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

TESIS DE GRADO

PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO (FVH) DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) CON DIFERENTES DENSIDADES DE SIEMBRA EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE KALLUTACA

Por:

Graciela Maribel Chavez Mamani

EL ALTO – BOLIVIA

Diciembre, 2024

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

PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO (FVH) DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) CON DIFERENTES DENSIDADES DE SIEMBRA EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE KALLUTACA

Tesis de Grado presentado como requisito
para optar el Título de
Ingeniera Agrónoma

Graciela Maribel Chavez Mamani

Asesores:

M.Sc. Ing. Eddy Diego Gutiérrez Gonzales .....

M.Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez .....

Tribunal Revisor:

Lic. Ing. René Felipe Coronel Cortez .....

Lic. Ing. Teofilo Serrano Canaviri .....

M.Sc. Lic. Ing. Ciro Raúl Quiape Callocosi .....

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador .....

DEDICATORIA:

A mis padres, Jesus Chavez Apaza (†) y Genara Mamani Corine (†) cuyo amor y apoyo incondicional me han dado la fuerza para alcanzar mis metas. Su ejemplo de trabajo arduo y perseverancia ha sido mi guía constante.

A mis queridas hermanas, Jhannet y Gregoria Chavez, por creer en mi incluso en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta tesis, me siento en la obligación de expresar mi gratitud a todas las personas e instituciones que contribuyeron a su realización.

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios Todopoderoso por la oportunidad de concederme la vida, por iluminarme durante mi etapa de aprendizaje y por estar siempre conmigo, guiándome y dándome las fuerzas necesarias para lograr la conclusión de mi carrera profesional.

A la Universidad Pública de El Alto, Carrera Ingeniería Agronómica, Módulo Animales Menores, por facilitarme los recursos necesarios y brindarme un ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación.

A mis asesores de tesis, M.Sc. Ing. Diego Gutiérrez y M.Sc. Ing. Ramiro Ochoa, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante. Sus conocimientos y sus experiencias han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a los miembros del tribunal examinador, M.Sc. Ing. Ciro Quiape, Ing. Teófilo Serrano, Ing. René Coronel; por sus valiosas sugerencias y comentarios que han enriquecido significativamente esta investigación.

A mis compañeros de estudio, por sus consejos, críticas constructivas y por compartir este arduo pero gratificante camino académico.

No puedo dejar de mencionar a mi familia, quienes con su amor y comprensión me han dado el ánimo necesario para seguir adelante.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que esta tesis fuera una realidad.

CONTENIDO

CONTENIDO i
ÍNDICE DE TEMAS i
ÍNDICE DE CUADROS v
ÍNDICE DE FIGURAS vi
ÍNDICE DE ANEXOS vii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Antecedentes 2
1.2. Planteamiento del problema 2
1.3. Justificación 3
1.4. OBJETIVOS 3
1.4.1. Objetivo general 3
1.4.2. Objetivos específicos 3
1.5. Hipótesis 4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 5
2.1. Hidroponía 5
2.1.1. Importancia de la hidroponía 5
2.2. Cultivos hidropónicos 5
2.3. Hidroponía de alta tecnología 6
2.4. Hidroponía simplificada. 6
2.5. El forraje. 7
2.6. El forraje hidropónico. 7
2.6.1. Forraje verde hidropónico (FVH) 7
2.7. Importancia del cultivo de forraje hidropónico 8
2.8. Ventajas del Forraje Verde Hidropónico (FVH) 9
2.8.1. Eficiencia en el uso del agua 9
2.8.2. Eficiencia en el uso del espacio 10
2.8.3. Eficiencia en el tiempo de producción 10
2.9. Desventajas del Forraje Verde Hidropónico (FVH) 10
2.9.1. Desinformación y sobrevaloración de la tecnología 11

2.9.2. Costo de instalación elevado 11
2.9.3. Bajo contenido de materia seca 11
2.10. Factores que Influyen en la producción de FVH 11
2.10.1. Condiciones ambientales 12
2.10.1.1 Temperatura 12
2.10.1.2 Humedad relativa 12
2.10.1.3 Iluminación 13
2.10.1.4 Oxigenación 13
2.10.2. Calidad de agua de riego 14
2.10.3. Calidad de semilla 14
2.11. Utilización de Forraje Verde Hidropónico 15
2.12. Arveja 15
2.12.1. Origen. 15
2.12.2. Taxonomía. 16
2.12.3. Características morfológicas 16
2.12.3.1 Raíz 16
2.12.3.2 Tallos 17
2.12.3.3 Hojas 17
2.12.3.4 Flores 17
2.12.3.5 Fruto 18
2.12.3.6 Semilla 18
2.12.4. Importancia de la arveja 19
2.12.5. Requerimiento de la arveja en campo. 19
2.12.6. Requerimiento de la arveja bajo sistema hidropónico. 20
2.12.7. Valor nutritivo de la arveja forrajera 20
2.13. Densidad de siembra 21
2.13.1. Densidad de siembra en suelo 21
2.13.2. Densidad de siembra en FVH 21
3. MATERIALES Y MÉTODOS 22
3.1. Localización 22
3.1.1. Ubicación Geográfica 22
3.1.2. Características edafoclimáticas 23
3.1.2.1 Clima 23
3.1.2.2 Suelo 23

3.1.2.3 Flora 23
3.1.2.4 Fauna 24
3.2. Materiales 24
3.2.1. Material de campo 24
3.2.2. Laboratorio 25
3.2.3. Material de gabinete 25
3.3. Metodología 25
3.3.1. Procedimiento experimental 25
3.3.1.1 Instalación de anaqueles 25
3.3.1.2 Preparación de bandejas 25
3.3.1.3 Selección de semilla 26
3.3.1.4 Lavado y desinfección de la semilla 26
3.3.1.5 Remojo, oreo y pre germinación de semillas 26
3.3.1.6 Siembra 27
3.3.2. Fase de luminosidad 27
3.3.2.1 Riego 27
3.3.2.2 Cosecha 27
3.3.2.3 Análisis de laboratorio 28
3.3.3. Diseño Experimental 29
3.3.4. Tratamientos en estudio 29
3.3.5. Croquis del experimento 30
3.3.5.1 Descripción del experimento 30
3.3.6. Variables de respuesta 31
3.3.6.1 Porcentaje de germinación: 31
3.3.6.2 Altura de planta 31
3.3.6.3 Longitud radicular 31
3.3.6.4 Rendimiento de forraje verde hidropónico de arveja en materia verde 31
3.3.6.5 Rendimiento de forraje verde hidropónico de arveja en materia seca 31
3.3.7. Análisis económico 32
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 33
4.1. Temperaturas registradas durante el desarrollo del cultivo de arveja 33
4.2. Variables de respuesta 35
4.2.1. Porcentaje de germinación 35
4.2.2. Altura de planta 36

4.2.3. Longitud de raíz 38
4.2.4. Rendimiento en materia verde 39
4.2.5. Rendimiento en materia seca 41
4.2.6. ANÁLISIS BENEFICIO COSTO 44
5. CONCLUSIONES 46
6. RECOMENDACIONES 48
7. BIBLIOGRAFÍA 49
8. ANEXOS 57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valor nutricional de arveja forrajera..... 20
Cuadro 2. Tratamientos en estudio..... 29
Cuadro 3. Porcentaje de germinación..... 35
Cuadro 4. Análisis de varianza de altura de planta..... 36
Cuadro 5. Promedio de altura de planta por bloques..... 37
Cuadro 6. Análisis de varianza de longitud de raíz..... 38
Cuadro 7. Análisis de varianza de rendimiento en materia verde..... 39
Cuadro 8. Promedio de rendimientos de materia verde por densidades..... 39
Cuadro 9. Análisis de varianza de rendimiento en materia seca..... 41
Cuadro 10. Promedio de rendimientos de materia seca por densidades..... 42
Cuadro 11. Relación Beneficio/Costo para la producción de FVH en 12 ciclos..... 44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Estación Experimental de Kallutaca 22
Figura 2. Croquis del experimento 30
Figura 3. Temperaturas registradas del interior del ambiente en el periodo de estudio 33

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Impermeabilización de bandejas 57
Anexo 2. Desinfección de bandejas 57
Anexo 3. Lavado y desinfección de semillas 58
Anexo 4. Siembra de FVH 58
Anexo 5. Traslado de bandejas al estante 59
Anexo 6. Germinación de semillas y culminación de la fase oscura 59
Anexo 7. Toma de datos altura de planta 60
Anexo 8. Toma de datos longitud de raíz 60
Anexo 9. Recolección de agua de riego excedente 61
Anexo 10. Culminación de fase de luminosidad 61
Anexo 11. Cosecha de FVH 62
Anexo 12. Alimentación con FVH 62
Anexo 13. Análisis bromatológico 63

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo en la Estación experimental de Kallutaca, ubicada en el municipio de Laja, provincia Los Andes, departamento de La Paz. el objetivo fue determinar la densidad de siembra óptima para la producción de forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja (*Pisum sativum* L.) empleando distintas densidades de siembra. Se consideraron variables de respuesta como altura de planta, longitud de raíz, rendimiento en materia verde y rendimiento en materia seca.

Se utilizaron semilla de arveja adquiridos de la feria local de El Alto, el estudio se realizó en estantes de tres niveles. Las semillas fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio y posteriormente lavadas. La siembra se realizó en bandejas de 0.225 m^2 según los tratamientos establecidos: T1 (2 kg/m^2), T2 (2,5 kg/m^2), T3 (3 kg/m^2), T4 (3,5 kg/m^2). Las bandejas se mantuvieron en los estantes cubiertos con plástico negro durante siete días. Una vez germinadas, se retiró el plástico para permitir la fase de crecimiento bajo luz. El riego se realizó desde el día de la siembra hasta el día anterior a la cosecha (23 días).

El análisis de los resultados no mostró diferencias estadísticamente significativas entre densidades de siembra en cuanto a la altura de planta, presentando un promedio de 28.5 cm. Tampoco se evidenciaron diferencias en la longitud de la raíz entre las diferentes densidades y bloques. En términos de rendimiento en materia verde los tratamientos T4 (3,5 kg/m^2) y T3 (3 kg/m^2) presentaron mayores rendimientos con una media de 3,42 kg y 3 kg respectivamente, comparados con los tratamientos T1 (2 kg/m^2) y T2 (2,5 kg/m^2) que tuvieron medias de 2.61 kg y 2,14 kg respectivamente. En cuanto al rendimiento en materia seca, los tratamientos T4 y T3 también mostraron los mayores rendimientos, con medias de 0,71 kg y 0,66 kg respectivamente, debido a la conversión desde el rendimiento en materia verde.

El análisis económico reveló que los tratamientos 4 y 3 son los que presentan mayor rentabilidad con una relación Beneficio/Costo mayor a 1, específicamente, T4 (3,5 kg/m^2) presentó una relación B/C = 1,29 y T3 (3 kg/m^2) de 1,13 mientras que los tratamientos T1 y T2 presentaron una relación B/C menor a 1.

El Forraje Verde Hidropónico de arveja obtenido en la investigación presentó 25,79% de proteína bruta y un 23,30% de fibra cruda.

ABSTRACT

The study was conducted at the Kallutaca Experimental Station, located in the municipality of Laja, Los Andes province, La Paz department. The objective was to determine the optimal sowing density for the production of hydroponic green forage (HGF) of pea (Pisum sativum L.) using different sowing densities. Response variables such as plant height, root length, fresh matter yield, and dry matter yield were considered.

Pea seeds were obtained from the local market in El Alto, and the study was conducted on three-level shelves. The seeds were disinfected with sodium hypochlorite and subsequently washed. Sowing was carried out in 0.225 m² trays according to the established treatments: T1 (2 kg/m²), T2 (2.5 kg/m²), T3 (3 kg/m²), and T4 (3.5 kg/m²). The trays were kept on shelves covered with black plastic for seven days. Once germinated, the plastic was removed to allow the growth phase under light. Irrigation was carried out from the day of sowing until the day before harvest (23 days).

The analysis of the results did not show statistically significant differences between sowing densities in terms of plant height, with an average of 28.5 cm. No differences were observed in root length between the different densities and blocks either. In terms of fresh matter yield, treatments T4 (3.5 kg/m²) and T3 (3 kg/m²) showed higher yields, with an average of 3.42 kg and 3 kg, respectively, compared to treatments T1 (2 kg/m²) and T2 (2.5 kg/m²), which had averages of 2.61 kg and 2.14 kg, respectively. Regarding dry matter yield, treatments T4 and T3 also showed the highest yields, with averages of 0.71 kg and 0.66 kg, respectively, due to the conversion from fresh matter yield.

The economic analysis revealed that treatments T4 and T3 had the highest profitability, with a Benefit/Cost (B/C) ratio >1; specifically, T4 (3.5 kg/m²) had a B/C ratio of 1.29, and T3 (3 kg/m²) had a B/C ratio of 1.13, while treatments T1 and T2 had a B/C ratio <1.

The hydroponic green forage of pea obtained in the research had 25.79% crude protein and 23.30% crude fiber.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las variaciones de precipitación registradas en los últimos años (SENAMHI, 2021), ocasionando que cada vez sea más difícil disponer de pastos y forrajes para los animales como: bovino, ovino, cuyes y otros, donde es uno de los retos para el ganadero e investigador es mejorar el aprovechamiento adecuado de los recursos forrajeros. Para este fin se han desarrollado métodos físicos, químicos, biológicos y biotecnológicos, que en la actualidad se pueden combinar para hacer más eficiente la producción animal.

Se sabe que es posible cultivar en climas adversos, en regiones donde sí se puede cultivar dentro de invernaderos, carpas o módulos hidropónicos y que también es posible cultivar sin necesidad de suelo a través de la técnica de cultivo llamado hidroponía. Pero el agua ha sido y se será siempre el factor limitante para la implementación de toda actividad de producción agrícola (Quispe, 2013).

El forraje verde hidropónico (FVH) es el producto resultante de la germinación controlada de semillas de gramíneas y leguminosas (*Poaceae y Fabaceae*), que son utilizadas como forraje. Este proceso consiste en la germinación de granos de cereales, como trigo, avena, centeno, cebada, maíz y alfalfa, bajo condiciones ambientales controladas (luz, temperatura y humedad) en ausencia de suelo. Después de un período de 12 a 15 días, el FVH es cosechado cuando los brotes alcanzan una longitud de 18 a 22 cm y se suministra como alimento para animales. Este proceso se realiza en bandejas planas de material inerte, utilizando riegos con agua (Abarca, 2016).

Especialistas sostienen que la germinación incrementa significativamente el valor nutritivo de las semillas, que convierte al forraje verde hidropónico (FVH) en un sistema eficiente para la producción de biomasa vegetal de alta calidad nutricional y sanidad. Este sistema permite la producción rápida de forraje en un periodo de 10 a 15 días, en cualquier época del año. A través de esta metodología, es posible cosechar anualmente entre 15 y 25 toneladas de materia seca (López, 2010).

1.1. Antecedentes

Al final del siglo XI, John Wood Ward produjo germinaciones de granos utilizando aguas de diferentes orígenes y comparó diferentes concentraciones de nutrientes para el riego de los granos, así como la composición del forraje resultante (UNALM, 2007).

Contreras *et al* (2015), realizaron estudios sobre el rendimiento de forraje hidropónico de Arveja con Cebada y Trigo en la Universidad Nacional de Huancavelica (Perú), donde se manejó dos asociaciones (arveja/cebada y arveja/trigo) con seis proporciones (0/100, 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 y 100/0), donde obtuvo 16,4 kg/m^2 producción de forraje verde y 4,1 kg/m^2 en la producción de materia seca con respecto a la proporción 100/0.

1.2. Planteamiento del problema

Uno de los problemas que presenta la ganadería (animales menores) en esta región es los escases de forraje verde, como por ejemplo cebada, avena, arveja, maíz y otros. La producción agropecuaria está limitada por las condiciones climatológicas adversas, tales como sequías, falta de lluvias, presencia de heladas, ventarrones, alta evapotranspiración. Estos factores imposibilitan al productor que cuente con suficiente forraje verde deseado en época seca.

La producción de forraje en condiciones del altiplano está supeditada al periodo estacionario de lluvias porque el forraje verde se produce solo en estaciones de lluvia que comprende los meses de diciembre hasta abril y de mayo a noviembre donde comienza la escasez de forraje de verde. Por lo tanto, la alimentación y nutrición de los animales se verá realmente afectada.

La densidad de siembra es un factor crucial que influye en el rendimiento y la calidad del forraje hidropónico. Diferentes densidades de siembra pueden afectar la competencia por recursos como luz, agua y nutrientes, impactando en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Actualmente, existe falta de estudios específicos que analicen cómo diferentes densidades de siembra afectan la producción de forraje verde hidropónico de arveja en las condiciones específicas de Kallutaca.

1.3. Justificación

Ante esta situación surge la necesidad de emplear forrajes alternativos para poder suministrar alimento al ganado en época seca, una de estas alternativas es la producción de forraje verde hidropónico (FVH) en este caso la arveja que se puede producir durante todo un año sin la necesidad de suelo. Por tanto, mejora la condición productiva de las diferentes especies animales que se cría en el altiplano. Esto ayudará a mejorar sus ingresos económicos de las familias y también beneficiará a las familias que se dedican a la crianza de animales y la producción de cultivos. Con el presente trabajo de investigación se busca dar una alternativa para contribuir a mitigar la falta de forraje en época seca.

Asimismo, el presente trabajo pretende alivianar la escases de forraje en época seca donde las diferentes especies ganaderas mayores y menores están restringidas de materia verde, por tanto con el presente estudio del uso de forraje verde hidropónico de arveja forrajera se busca minimizar dicho efecto.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar la producción de forraje verde hidropónico de arveja (*Pisum sativum* L.), con diferentes densidades de siembra en ambiente protegido en la Estación Experimental de Kallutaca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la densidad de siembra más adecuada en la producción de forraje verde hidropónico de arveja en la Estación Experimental de Kallutaca.
- Evaluar el efecto sobre la biomasa de los diferentes niveles de densidad de siembra en el cultivo de arveja hidropónica.
- Analizar la relación beneficio/costo parcial en la producción forraje verde hidropónico de arveja, bajo el uso de diferentes densidades de siembra.

1.5. Hipótesis

- H0: No existen diferencias significativas en la producción forraje de verde hidropónico de arveja bajo diferentes densidades de siembra en la Estación Experimental de Kallutaca.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Hidroponía

La palabra hidroponía proviene del griego, combinando "*hidro*" (agua) y "*ponos*" (labor o trabajo), que literalmente significa "trabajo en agua". La hidroponía es una ciencia que se enfoca en el cultivo de plantas sin tierra. Esta técnica se basa en la utilización de un espacio mínimo, el consumo reducido de agua y la maximización de la producción. En países desarrollados, la hidroponía ha alcanzado un alto grado de sofisticación (Sánchez, 2004).

González (2006), menciona que la hidroponía es el arte de cultivar plantas sin usar suelo. El mismo autor señala que la palabra "hidroponía" se compone de dos términos griegos: "*hidro*", que significa "agua", y "ponía", derivado de "*ponos*", que significa "trabajo". Por tanto, su significado sería "trabajo en agua".

Por otro lado, Alpízar (2004), explica que la hidroponía es una técnica para producir cultivos sin suelo, suministrando los nutrientes necesarios a través del agua, que permite obtener productos de rápido desarrollo y buena sanidad

2.1.1. Importancia de la hidroponía

Castro (2007), sostiene que la agricultura mundial está experimentando transformaciones esenciales debido a problemas como la disminución de la frontera agrícola y otros factores de incidencia directa. Entre estos factores se incluyen el rápido crecimiento de las ciudades, el aumento de la población que necesita ser alimentada, y la accesibilidad a insumos y centros de abastecimiento. En este contexto, los cultivos hidropónicos se presentan como alternativas ideales para la producción microempresarial y la seguridad alimentaria.

2.2. Cultivos hidropónicos

Izquierdo (2002), afirma que los cultivos hidropónicos son aquellos en los que el suelo se reemplaza por un sustrato inerte, y los nutrientes necesarios para el crecimiento y producción de las plantas se suministran a través del riego. También se consideran cultivos hidropónicos aquellos que se cultivan directamente en agua enriquecida con nutrientes. Este sistema permite cultivar una amplia variedad de plantas, incluyendo hortalizas, flores, pastos para forraje, plantas ornamentales, condimentos, plantas medicinales e incluso cactus.

Por su parte, Corona (2011), establece que este procedimiento permite la producción intensiva de forraje fresco para animales de trabajo o engorde (como vacas, caballos, cerdos, borregos, conejos, cuyes, gallinas, entre otros), optimizando el uso del espacio y los recursos, con resultados muy satisfactorios. Se sabe que en un metro cuadrado se puede producir aproximadamente 352 kilogramos de forraje fresco al día.

2.3. Hidroponía de alta tecnología.

Para Abad, citado por Aviles (2003), el cultivo hidropónico está orientado al mercado, para maximizar la relación beneficio/costo del empresario, por la venta de su producción, emplea alta tecnología e inversión, con poca mano de obra, generalmente se ubica en áreas rurales.

El país líder en el uso de hidroponía, es Países Bajos, su éxito es debido a que existe una alta densidad poblacional y a que los productores hortícolas que utilizaban el suelo para producir en sus invernaderos contaban con mercado para sus productos y la destreza para producirlos, (Hy-Farm, 2024).

2.4. Hidroponía simplificada.

Según la FAO (2001), la organización ha desempeñado un papel activo en el desarrollo y difusión de la hidroponía simplificada como parte de una estrategia de seguridad alimentaria para poblaciones de escasos recursos en áreas periurbanas y rurales.

La hidroponía simplificada es una variante de baja inversión dentro de la hidroponía. Emplea los conceptos generales de la hidroponía, pero se diferencia de la hidroponía de alta tecnología utilizada en Estados Unidos, Europa y Australia. Su objetivo principal es que las familias puedan autoalimentarse y generar algún pequeño ingreso. Esta metodología se adapta a poblaciones desfavorecidas, ya que utiliza una tecnología sencilla, requiere poca inversión y emplea mano de obra familiar (Abad, citado por Aviles, 2003).

2.5. El forraje.

Para Elizondo (2005), se denomina forraje a la planta, pratense o temporal, que se corta y se suministra a los animales en el establo, junto con los pastos constituyen los alimentos voluminosos. Se llaman alimentos voluminosos aquellos que contengan más del 18 % de fibra bruta; los alimentos voluminosos comprenden los pastos, forrajes y otros subproductos vegetales, se caracterizan por su riqueza en celulosa, hemicelulosa y lignina, también contienen alta cantidad de azucares.

2.6. El forraje hidropónico.

2.6.1. Forraje verde hidropónico (FVH)

Según la FAO (2001), el FVH es solo una de las aplicaciones prácticas de la técnica de cultivos sin suelo o hidroponía. El autor menciona que el FVH se refiere a la tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida durante el crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano a partir de semillas viables.

Por otro lado, Tarrillo (2008) explica que el FVH se produce mediante el proceso de germinación de granos de cereales o leguminosas (como maíz, arveja, sorgo, cebada, alfalfa y otros) en un período corto de 9 a 15 días. Durante este proceso, las plantas captan energía solar y asimilan minerales de una solución nutritiva, sin utilizar sustratos.

Aquino (2010), señala que, en zonas de altura como el altiplano, la producción de FVH se extiende a períodos de 15 a 22 días. En contraste, Álvarez (2011) indica que, en ecosistemas de alta montaña por encima de los 3800 msnm, donde las temperaturas oscilan entre -3°C y 21°C, la cosecha se realiza entre 18 y 25 días.

Lopez (2010), destaca que el FVH es una tecnología que permite producir alimento en un corto período de 7 a 22 días, destinado a la alimentación animal. Describe que este método proporciona forraje de alto valor nutritivo, obtenido a partir del crecimiento inicial de las plantas desde la germinación hasta el desarrollo del tallo principal, utilizando semillas humedecidas dispuestas en bandejas.

Además, la FAO (2001) menciona que el FVH puede ser producido en cualquier época del año y en cualquier ubicación geográfica, siempre y cuando se establezcan las condiciones mínimas necesarias.

2.7. Importancia del cultivo de forraje hidropónico

El forraje verde hidropónico (FVH) representa una alternativa crucial para la suplementación del ganado en zonas de ganadería extensiva, especialmente en regiones donde las épocas secas son prolongadas y severas (Cañas, citado por Nina, 2017).

Las mejoras derivadas del uso de FVH en la alimentación animal son significativas y abarcan áreas como la ganancia de peso, la eficiencia en la conversión alimenticia, la producción de leche y sólidos totales en la misma, así como el contenido de grasa y la mejora general en la condición corporal y el pelaje. En el caso de los cuyes, se reporta una mayor producción de leche y un excelente aporte de vitamina C, además de cubrir eficientemente los requerimientos de agua (Tarrillo, 2005).

Para reducir la variabilidad en la producción y asegurar un suministro constante y adecuado conforme a los requerimientos nutricionales del ganado, es crucial mantener condiciones climáticas uniformes en las áreas donde se desarrolla el forraje hidropónico de manera continua. Esto no solo beneficia la producción animal al reducir la variabilidad, sino que también conlleva beneficios económicos debido a las ventajas operativas que ofrece este método (Rodríguez, citado por Salas 2010).

El FVH no solo proporciona nutrientes esenciales como proteínas, vitaminas A, E y C, sino que estas vitaminas se encuentran en formas fácilmente asimilables y solubles en el forraje. Se ha demostrado que la vitamina E en particular es completamente asimilable por los animales alimentados con FVH, como se evidenció en análisis realizados en la Universidad de Colombia (1986), donde no se detectó vitamina E en los excrementos, indicando su completa absorción. En términos de contenido proteico, el FVH de trigo presenta niveles de proteína (20-22%) comparables e incluso superiores a los de la cebada (16-20% de proteína cruda), lo que lo convierte en una opción valiosa, similar en calidad a la alfalfa requerida por su alto contenido proteico (Samperio, citado por Huiza, 2015)

Para Arano, citado por Condori (2019), la producción de forraje verde hidropónico es recomendable para la alimentación del ganado en las siguientes circunstancias:

- En zonas áridas o ubicadas en latitudes extremas donde la disponibilidad de agua y suelo son limitadas.
- En tierras inapropiadas, de baja calidad o costosas para la agricultura convencional.
- Para reducir el desgaste excesivo de los animales debido a largas caminatas en busca de pasto.
- Cuando se prefiere destinar la tierra fértil a actividades agrícolas de mayor rentabilidad económica.
- Durante períodos de escasez de forraje, como en situaciones de emergencia ambiental

2.8. Ventajas del Forraje Verde Hidropónico (FVH)

Existen diferentes puntos de vista en lo que se refiere a la producción de Forraje Verde Hidropónico, a continuación, se citan las siguientes ventajas y desventajas observadas por diversos autores.

2.8.1. Eficiencia en el uso del agua

En Bolivia, donde las variaciones climáticas pueden causar sequías prolongadas, la hidroponía permite un uso más eficiente del agua en comparación con la agricultura tradicional. La producción de FVH utiliza hasta un 90% menos de agua que los métodos convencionales, que es vital en áreas con recursos hídricos limitados (González *et al.,* 2015).

En el sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH), las pérdidas de agua por evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración son mínimas en comparación con las condiciones de producción convencional en especies forrajeras. Las eficiencias de uso del agua en la producción convencional varían entre 270 y 635 litros de agua por kilogramo de materia seca. En contraste, la producción de 1 kg de forraje verde hidropónico requiere solamente de 2 a 3 litros de agua, con un contenido de materia seca que oscila entre el 12% y el 18%, dependiendo de la especie forrajera utilizada (Rodríguez, 2000).

Esto se traduce en un consumo total de agua de 15 a 20 litros por kilogramo de materia seca obtenida en un período de 14 días, demostrando así una significativa reducción en el uso del recurso hídrico comparado con métodos tradicionales de producción forrajera.

2.8.2. Eficiencia en el uso del espacio

La producción de FVH requiere mucho menos espacio que la agricultura tradicional. Esto es especialmente beneficioso en regiones montañosas o urbanas donde la tierra agrícola es escasa o costosa (Loza y Ramírez, citado por Alvarez 2018).

Según Ticona (2018), el sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH) puede ser instalado de manera modular dentro de carpas solares, utilizando tanto la dimensión vertical como horizontal para optimizar el espacio disponible. Esta configuración permite formar pisos productivos en bandejas dentro del invernadero, facilitando así un uso eficiente del espacio y una gestión adecuada de la producción de forraje.

2.8.3. Eficiencia en el tiempo de producción

La producción de FVH es mucho más rápida que la agricultura tradicional. En condiciones controladas, el forraje puede estar listo para la cosecha en tan solo 7-10 días, que permite una producción continua y estable (Mendoza *et al.,* 2009).

La producción de forraje verde hidropónico (FVH) destinado a la alimentación animal tiene un ciclo típico de 10 a 15 días. Sin embargo, algunos establecimientos pueden optar por prolongar el ciclo hasta los 14 o 15 días debido a estrategias internas de manejo. A pesar de ello, estudios científicos indican que el óptimo período de cosecha no debe extenderse más allá del día 12. A partir de este punto, se observa un marcado descenso en el valor nutricional del forraje verde hidropónico (Hidalgo, 1985).

2.9. Desventajas del Forraje Verde Hidropónico (FVH)

Aunque la producción de forraje verde hidropónico (FVH) presenta numerosos beneficios, también existen desventajas que deben considerarse, especialmente en el contexto de Bolivia.

2.9.1. Desinformación y sobrevaloración de la tecnología

Proyectos de FVH preconcebidos como “llave en mano” son vendidos a productores sin conocer exactamente las exigencias del sistema. Se debe tener presente que, por ejemplo, para la producción de forraje verde hidropónico sólo precisamos un fertilizante foliar quelatizado el cual contenga, aparte de los macro y micro nutrientes esenciales, un aporte básico de 200 partes por millón de nitrógeno. Asimismo, la producción de FVH es una actividad continua y exigente en cuidados que implica un compromiso concreto del productor. La falta de conocimientos e información simple y directa se transforma en desventaja, al igual que en el caso de la tecnología de hidroponía familiar (FAO, 2001).

El manejo eficiente de un sistema de FVH requiere conocimientos técnicos específicos sobre hidroponía, manejo de nutrientes, y control de condiciones ambientales. Muchos agricultores en Bolivia pueden carecer de este conocimiento o de acceso a capacitación adecuada (Pérez, 2017).

2.9.2. Costo de instalación elevado

Según Gómez (2020), la instalación de sistemas de producción de FVH puede requerir una inversión significativa en infraestructura y tecnología. Esto incluye la construcción de invernaderos, sistemas de riego automatizado y bandejas de cultivo.

Una desventaja que presenta este sistema sería el elevado costo de implementación. Sin embargo, se ha demostrado utilizando estructuras de invernáculos hortícolas comunes, se logran excelentes resultados (FAO, 2001).

2.9.3. Bajo contenido de materia seca

En general, el FVH tiene bajo contenido de materia seca, que se resuelve agregando diversos rastrojos o alimento concentrado para complementar la ración en la alimentación del ganado (Juárez, *et al.* citados por Condori, 2019).

2.10. Factores que Influyen en la producción de FVH

FAO (2001), considera que los siguientes factores son los más importantes ya que condicionan el éxito o fracaso de la producción de FVH:

2.10.1. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales, incluyendo temperatura, humedad y luz, son cruciales. Sistemas de control ambiental, como invernaderos y carpas solares, permiten optimizar estas condiciones para maximizar la producción. En el altiplano boliviano, las variaciones extremas de temperatura pueden afectar la producción si no se gestionan adecuadamente (Pérez, 2017).

2.10.1.1 Temperatura

Castro (2007) señala que, la temperatura debe guardar relación con la iluminación, temperaturas promedias de 15 a 25 °C son las recomendables para lograr una adecuada germinación.

Aquino (2010) señala que, el rango óptimo de temperatura para la producción de leguminosas como la arveja y el haba se encuentra entre los 15 a 18°C. Además, enfatiza que la temperatura debe mantenerse constante, ya que las temperaturas bajas pueden retardar el crecimiento, mientras que las temperaturas altas combinadas con alta humedad pueden causar problemas fitosanitarios, como la aparición de hongos.

Samperio, citado por Gómez (2020), menciona que, la temperatura controla la velocidad de crecimiento de las plantas. Al aumentar la temperatura, los procesos químicos se aceleran. Estos procesos en las plantas están regulados por enzimas que actúan dentro de ciertos rangos de temperatura. Fuera de estos rangos, la actividad enzimática comienza a deteriorarse, que causa que los procesos químicos ocurran más lentamente o se detengan.

2.10.1.2 Humedad relativa

Gutiérrez (2000), manifiesta la gran importancia de la humedad del ambiente sea superior al 80% puesto que ejerce una influencia directa en el trabajo que desempeñan las estomas, en caso de no existir suficiente humedad en el ambiente, no sería posible la absorción de CO_2, y por lo tanto no tendría lugar la asimilación.

2.10.1.3 Iluminación

La FAO (2001) advierte que, si no hay luz en los recintos destinados a la producción de forraje verde hidropónico (FVH), la función fotosintética no podría llevarse a cabo, lo que resultaría en la ausencia de producción de biomasa. La radiación solar es esencial para el crecimiento vegetal; sin embargo, es crucial manejar adecuadamente la luz en los diferentes estados de desarrollo de la planta.

Aquino (2010) sugiere que, durante la germinación de las semillas, la luz solar no es necesaria. Hasta el séptimo día, las bandejas deben mantenerse en un ambiente oscuro, pero con riego oportuno para favorecer la aparición de brotes y el desarrollo de las raíces. A partir del octavo día, las bandejas deben ser expuestas a la luz solar para permitir la fotosíntesis, pero nunca directamente, ya que esto podría causar una mayor evapotranspiración y quemaduras en las puntas de las hojas. Para evitar estos problemas, se recomienda utilizar una malla de semi-sombra con un porcentaje de sombra entre el 50 al 70%.

Hernández (2024), indica que, durante la germinación, las semillas de FVH requieren oscuridad total. Posteriormente, para un crecimiento óptimo, se debe proporcionar de 9 a 12 horas de luz por día, una luminosidad que varíe entre 2800 y 40000 lux.

2.10.1.4 Oxigenación

Samperio citado por Gómez (2020), destaca la importancia de la oxigenación en la producción de forraje verde hidropónico (FVH), señalando que este proceso es crucial para el transporte de nutrientes y la acumulación de elementos dentro del sistema celular de las plantas. El oxígeno, al oxidar los minerales, actúa como catalizador en la generación de energía metabólica a través del sistema de respiración radicular. Para un funcionamiento adecuado se recomiendan niveles de oxígeno disuelto (OD) iguales o mayores a 5 mg/l, lo contrario puede resultar en el detrimento o muerte de las plantas. Sin esta, incluso si se proporcionan los nutrientes adecuados, el cultivo puede ser precario o en casos más graves, las raíces pueden morir, ya que necesitan respirar.

2.10.2. Calidad de agua de riego

La calidad de agua de riego es otro de los factores importantes en la producción de FVH. La condición básica que debe presentar un agua para ser usada en sistemas hidropónicos es su potabilidad. Puede ser agua de pozo, agua de lluvia o agua del grifo. Si el agua disponible no es potable, se podrían tener problemas sanitarios por lo que se recomienda realizar un análisis microbiológico para usar el agua de manera confiable (Rodríguez, 2000).

El uso de agua de buena calidad y soluciones nutritivas adecuadas es esencial. En investigaciones realizadas en Bolivia, se ha demostrado que la calidad del agua influye directamente en el crecimiento y la salud del FVH (Rodríguez, citado por Huiza, 2015).

FAO (2001), indica que, la conductividad eléctrica y el pH para la producción de FVH debe estar preferentemente menor a 100 µS/cm y el pH entre 5,5 a 7.

2.10.3. Calidad de semilla

Marulanda e Izquierdo, citados por Mendoza (2009), establecen que el porcentaje mínimo de germinación de las semillas para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) debe ser del 70 al 75%. Además, las semillas deben estar limpias y el lote no debe contener semillas partidas y semillas de otros cultivares comerciales ni semillas tratadas con insecticidas o fungicidas.

Aquino (2010), por su parte, no recomienda el uso de semillas certificadas debido al alto costo en comparación con las semillas de origen artesanal. Estas semillas artesanales deben tener un buen porcentaje de germinación para evitar pérdidas en la producción de FVH. También deben estar libres de piedras, pajas, tierra, semillas partidas y semillas de otras plantas.

2.11. Utilización de Forraje Verde Hidropónico

Las mejoras obtenidas con el uso de forraje verde hidropónico (FVH) en la alimentación animal incluyen una serie de beneficios en diferentes aspectos productivos y de salud. En bovinos lecheros, el FVH contribuye a una mayor ganancia de peso, una mejor conversión alimenticia, un aumento en la producción de leche y en los sólidos totales presentes en la leche. Además, se observa un incremento en el contenido de grasa de la leche, una mejora en la condición corporal y un mejoramiento del pelaje. En cuyes, se reporta una mayor producción de leche, lo que resulta en un mayor número de crías logradas. Además, el FVH es una excelente fuente de vitamina C y cubre los requerimientos de agua de estos animales (Tarrillo, 2005).

2.12. Arveja

2.12.1. Origen.

La arveja es una de las plantas más antiguas, encontrándose referencias escritas de haber sido ya utilizada por pueblos neolíticos del cercano oriente, 7.000 a 6.000 años a.C. su cultivo se expandió a regiones templadas y zonas altas de los trópicos de todo el mundo siendo hoy ampliamente cultivada y consumida (Moreira citado por Guerrero, 2017).

La arveja es una de las plantas cultivadas más antiguas, con referencias escritas que indican su uso por pueblos neolíticos del Cercano Oriente hace entre 7000 y 6000 años a.C. Además, el cultivo de arveja se expandió a regiones templadas y zonas altas de los trópicos en todo el mundo. Hoy en día, la arveja es ampliamente cultivada y consumida, ya sea como hortaliza fresca o como semilla seca, en casi todos los países. India, China, Estados Unidos, Francia y Reino Unido son los mayores productores de arveja verde a nivel mundial (Buitrago *et al.* citado por Choquehuanca, 2006)

2.12.2. Taxonomía.

Según Takhtajan, citado por Rodríguez (2015).

División:	Magnoliophyta
Sub-división:	Angiospermas
Clase:	Magnoliopsida
Sub-clase:	Rosidae
Orden:	Fabales
Familia:	Fabaceae
Género:	*Pisum*
Especie:	*Pisum sativum* L.

2.12.3. Características morfológicas

2.12.3.1 Raíz

La arveja posee una raíz principal fuerte y numerosas raicillas secundarias. En estas se encuentran adheridas pequeñas bolitas de color rosado que contienen bacterias, las cuales mejoran significativamente el suelo (INIAF, citado por Alarcón, 2021).

La raíz principal de la arveja se desarrolla hasta una profundidad de 50 cm y es de tipo pivotante, conteniendo raíces secundarias y terciarias. Estas presentan nódulos determinados por bacterias del género *Rhizobium* de forma natural (Cervantes, citado por Alarcón, 2021).

El sistema radicular de la arveja, aunque poco desarrollado en conjunto, presenta una raíz principal pivotante bien desarrollada y abundantes raíces secundarias. Estas contienen nódulos de bacterias del género *Rhizobium*, las cuales fijan el nitrógeno atmosférico (Maroto, citado por Valdes 2017).

2.12.3.2 Tallos

Los tallos de la arveja son cilíndricos, huecos y lisos, y pueden ser más o menos ramificados, presentando un porte erecto o trepador. Estos tallos tienen entre 10 y 35 nudos, los cuales pueden tener un crecimiento enano, medio o alto. Las ramas tienen una posición lateral y se presentan tres ramas principales, de las cuales pueden derivarse otras, especialmente en las variedades de crecimiento medio (Maroto, citado por Valdes 2017).

Según el tamaño de los tallos, la arveja puede clasificarse en: Variedades bajas que llegan hasta 45 centímetros; variedades de medio enrame, que crecen postradas y llegan hasta 70 centímetros de alto y las variedades de enrame que llegan a medir hasta 2 metros y necesitan de tutores (INIAF, citado por Alarcón, 2021).

2.12.3.3 Hojas

Las estípulas en la arveja son generalmente de mayor tamaño que los folíolos, especialmente en cultivares que producen granos de mayor tamaño. Las hojas compuestas por 3 a 8 folíolos de forma elíptica, que terminan en un zarcillo que la planta utiliza para sujetarse al soporte. Estas hojas pueden ser de color verde glauco y a veces presentan jaspeado. En la base de las hojas se encuentran dos estípulas muy grandes que abrazan al tallo en su parte basal (Maroto, citado por Valdes 2017).

Son algo redondeadas o lanceoladas, una a cada lado y las hojitas terminales se han transformado en “guías” o zarcillos, que le sirven a la planta para trepar y sujetarse (INIAF citado por Alarcón, 2021)

2.12.3.4 Flores

La flor de arveja es papilionada, significa que se asemeja a una mariposa con las alas desplegadas cuando los pétalos se desenvuelven. Esta flor presenta una simetría bilateral. Al formarse, los botones florales crecen encerrados por las hojas superiores, con cinco sépalos totalmente unidos que envuelven al resto de la flor (Buitrago *et al*., 2006).

2.12.3.5 Fruto

La arveja presenta una vaina ligeramente oblonga y curvada, que contiene de 5 a 9 semillas. La pared de la vaina no es carnosa y no muestra venación reticular cuando está madura; sin embargo, las vainas jóvenes son carnosas y cerosas. La capa interna de la pared de la vaina es similar a un pergamino rígido, que en las vainas jóvenes se separa fácilmente de la pared externa. La superficie interna de la pared de la vaina es finamente pubescente, especialmente a lo largo de la sutura ventral, y a lo largo de la sutura dorsal pueden encontrarse algunos pelos dispersos entre los funículos. En ocasiones, la sutura dorsal puede presentar un tono púrpura (Marmolejo 2002)

La vaina es el fruto de la planta de arveja y es algo curvada, más o menos gruesa y dentro de esta se encuentran los granos; en cada vaina existe de 4 a 10 granos; 11 cuando están secos, los granos o semillas, son esféricos, de color blanco, crema o verde claro; pueden ser arrugados o lisos (INIAF, citado por Alarcón, 2021).

2.12.3.6 Semilla

Las semillas de arveja pueden tener una forma globosa o globosa angular, con un diámetro que oscila entre los 3 y 5 mm. La testa, o capa externa de la semilla, es delgada y puede presentar diversos colores como incoloro, verde, gris, café o violeta. La superficie de la testa puede ser lisa o rugosa, dependiendo de la variedad y las condiciones de crecimiento (Marmolejo, citado por Valdes 2017).

Las semillas de la arveja, necesitan “endurar” para germinar bien después de cosechadas. Estas pueden germinar y producir hasta los 3 años como máximo; pero es mejor sembrar semillas que tengan menos de 2 años desde su cosecha. Las variedades de grano arrugado, germinan menos (INIAF, citado por Alarcón, 2021).

2.12.4. Importancia de la arveja

La importancia actual de la arveja como planta agrícola radica principalmente en la alta calidad proteica de sus semillas, que son destinadas tanto para el consumo en fresco como en seco. Además, toda la planta se utiliza en la producción de heno, a menudo asociada con cereales como la avena. La arveja muestra un excelente comportamiento en climas templados y templado-fríos, adaptándose bien a períodos de bajas temperaturas durante la germinación y los primeros estados de crecimiento, que favorece su enraizamiento y desarrollo de macollos (SEFO-SAM, 2018).

2.12.5. Requerimiento de la arveja en campo.

La arveja va bien en los suelos ligeros de textura silíceo-limosa, en los suelos calizos puede presentar síntomas de clorosis y las semillas suelen ser duras, conviene rotar la siembra cada temporada. El pH que mejor le va está comprendido entre 6 y 6,5. Respecto a la salinidad, es una planta considerada como intermedia en resistencia a la salinidad (Maocho, 2013).

El requerimiento de temperatura para la germinación es de 4.5 a 29 ºC, en condiciones normales la plántula emerge entre 8 y 12 días de la siembra; se desarrolla bien en condiciones frías, siendo la temperatura óptima entre 16 y 20 ºC, con máximas medias de 22 ºC y mínimas medias de 7ºC, prefiere suelos con buen drenaje, de textura arenosa, con pH óptimo de 6,5 a 7; los suelos ácidos con pH 5,5 no son apropiados, los requerimientos de calcio son altos, solo tolera hasta 2 mS/cm de sales (Delgado de la Flor, citado por Guerrero, 2017).

La planta detiene su crecimiento cuando las temperaturas empiezan a ser menores de 5 ó 7ºC; el desarrollo vegetativo óptimo se produce con temperaturas comprendidas entre 16 y 20ºC, estando el mínimo entre 6 y 10ºC y el máximo en más de 35ºC, si la temperatura es muy elevada la planta vegeta bastante mal. La humedad relativa óptima del aire durante la primera fase de cultivo es del 60 al 65%, y posteriormente oscila entre el 65 y el 75%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y dificultan la fecundación (Maocho, 2013).

2.12.6. Requerimiento de la arveja bajo sistema hidropónico.

Al comienzo 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 (aumento de la evapotranspiración, endurecimiento de las hojas, quemaduras de las hojas) (Izquierdo, 2004).

El valor de pH del agua de riego debe oscilar entre 5.2 y 7 y salvo raras excepciones como son las leguminosas, que pueden desarrollar hasta con pH cercano a 7.5, el resto de las semillas utilizadas (cereales mayormente) usualmente en FVH, no se comportan eficientemente por encima del valor 7 (Sánchez, 2004).

Según Sánchez (2005), 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.

2.12.7. Valor nutritivo de la arveja forrajera

El cuadro 1, muestra los valores nutricionales de la arveja forrajera.

Cuadro 1. Valor nutricional de arveja forrajera

COMPOSICIÓN NUTRITIVA						
MS%	Cen%	PC%	FDN %	EB MCal/kg	EE %	IAU
86.58	2.94	24.14	35.04	4.42	1	0.07

Fuente: Bauza (2013)

2.13. Densidad de siembra

2.13.1. Densidad de siembra en suelo

La arveja puede ser sembrada de diversas formas adaptadas al método de cultivo preferido. Se puede optar por la siembra al voleo, que es rápida y eficiente, dispersando las semillas uniformemente sobre el terreno preparado. También es posible sembrar en hileras simples, con una separación de 20 a 25 cm entre ellas, facilitando el manejo y la cosecha. Otra opción es la siembra en hileras dobles sobre camellones espaciados a 0,90 m entre cada centro de camellón, dejando entre 10 y 12 cm entre las hileras internas, cual optimiza el uso del espacio y favorece un crecimiento adecuado de la planta. Para asegurar una buena densidad de siembra y un desarrollo óptimo, se recomienda una densidad de 80 a 100 kg/ha (SEFO-SAM, 2018).

2.13.2. Densidad de siembra en FVH

Las dosis óptimas de semillas a sembrar por m^2 oscilan entre 2 a 3,5 kg considerando que la disposición de las semillas o "siembra" no debe superar los 1,5 cm de altura en la bandeja para ello se distribuirá una delgada capa de semillas pre- germinadas (Contreras 2015).

FAO (2001), indica que la densidad de siembra adecuada para tener un rendimiento óptimo de forraje hidropónico es de 5 kg de semilla por m^2, con una temperatura que oscila entre 16 a 20 ºC y una humedad relativa de 85 %.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

El presente trabajo de investigación se efectuó en la Estación Experimental de Kallutaca, municipio de Laja ubicada en la segunda sección de la provincia Los Andes del departamento de La Paz. Ubicada a 27 km de la ciudad de La Paz ubicada geográficamente entre los paralelos 16°46'15,11 de latitud sur y 68°29'49.81. longitud oeste. Se encuentra a una Altitud de 3.902 msnm (Google Earth, 2021).

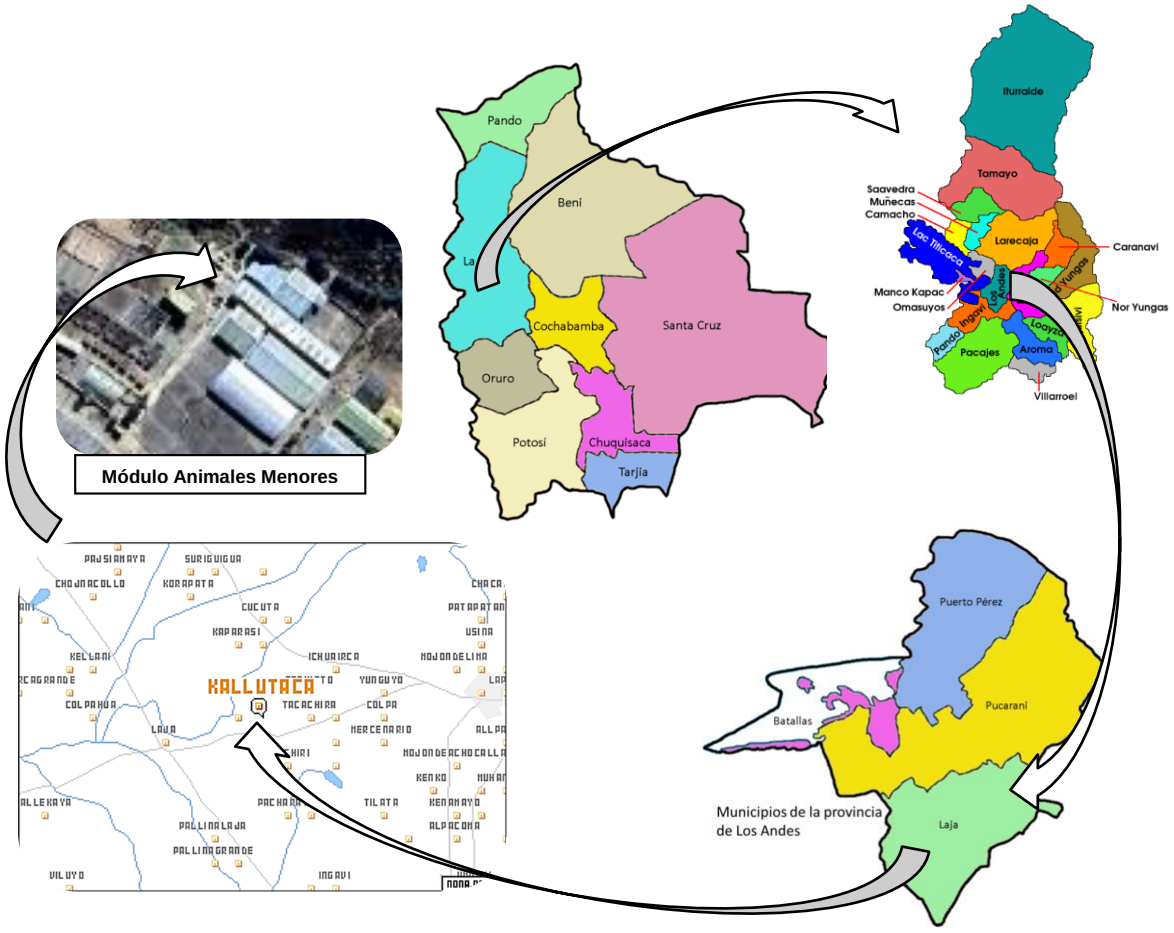


Figura 1. Ubicación Estación Experimental de Kallutaca

3.1.2. Características edafoclimáticas

3.1.2.1 Clima

La evaporación media encuentra los máximos valores en los meses de septiembre a febrero con 5 a 5.2 mm como promedio, en los meses de marzo a julio disminuye entre 4.1 a 3.9 mm con una acumulación anual de 55.6 mm (SENAMI, 2021)

La precipitación media anual para la zona de estudio es de 613.1 mm/año, en tanto que las mayores precipitaciones se registran entre los meses de diciembre y enero con 113,1 a 141,3 mm/mes respectivamente (SENAMHI, 2021).

El comportamiento de la temperatura media es de 7,1°C, se cuentan con temperaturas extremas mínimas de -10,8 a -11,0°C en los meses de mayo, junio y julio. En los meses de noviembre y diciembre se observa comportamiento de temperaturas máximas de 21,6 a 22,3°C. los cultivos en esta zona, están supeditados a esta amplia variación de temperaturas extremas (SENAMHI, 2021).

3.1.2.2 Suelo

Los suelos de Kallutaca muestra asociación de tipo Cambisoles – Leptosoles con inclusión fluvisoles, muestran textura franco arcillosa con estructura laminar y columnar. (PTDI, 2016).

La región de Kallutaca presenta suelos de formación fluvio-lacustre no inundable con características de bofedales, texturalmente son suelos franco arcillosos con perfiles de horizontes distinguidos. Con una pendiente mínima de 1%, casi a nivel, el drenaje superficial es lento debido a su textura y pendiente (Guarachi, 2011).

3.1.2.3 Flora

El tipo de vegetación natural que presenta la región de Kallutaca está conformada por: thola *(Parastrephia lepidophylla)*, gramíneas como paja brava, chillihua *(Festuca dolychophylla),* crespillo *(Calamagrostis sp.)* y grama *(Muhlembergia sp.)* cola de ratón *(Hordeum muticum)* cebadilla *(Bromus lenatus),* llantén *(Plantago sp.)* pilli *(Hipochoeria taraxacoides)* y alfombrilla *(Lucilia areioidea*), Chiji *(Disticha), Totorilla (Scirpus),* y otros (Mamani, 2015).

Se evidencia la predominancia de la paja brava o ichu (*Stipa ichu*), chillihua (*Festuca dolichophylla*) y cebadilla *(Bromus sp*), asociadas con cola de ratón *(Hordeum muticum*), Calamagrostis, yawara (*Nasella meyeniana*), layu layu (*Trifolium amabile*), kora (*Tasara tenella*), kailla (*Tetraglochin cristalum*), y ñaka thola (*Boccaris incarum*) (Mañocopa, citado por Coria, 2021).

3.1.2.4 Fauna

Entre los mamíferos más importantes, está el zorro (*Canidae*), el pampa huanco o liebre (*Rhodentiae*), de reciente aparición, y que se ha convertido en una plaga principalmente de los granos y hortalizas. Dentro del grupo de aves, se menciona a la perdiz (*Tinamidae*), patos (*Anatidae*), marias (*Falconidae*), y otras, principalmente en orillas de los ríos y lugares húmedos. Se ha detectado de la presencia de especies anfibias (ranas y sapos) en la zona ha declinado en forma alarmante, y se especula que se deba a la contaminación de las fuentes de agua (Arteaga, 2007).

3.2. Materiales

3.2.1. Material de campo

- Tacho de 50 l
- Bandejas
- Estantes de fierro
- Termómetro
- Regadera
- Romana digital (50 kg)
- Hipoclorito de sodio (NaClO)
- Tamiz
- Letreros

3.2.2. Laboratorio

- Estufa
- Pinza

3.2.3. Material de gabinete

- Computadora
- Impresora
- Calculadora
- Bolígrafos
- Planillas

3.3. Metodología

3.3.1. Procedimiento experimental

El trabajo de investigación se realizó en el galpón del Módulo de Animales Menores de la Estación Experimental de Kallutaca.

3.3.1.1 Instalación de anaqueles

Comprende toda la estantería para soportar las bandejas en que se cultivó el forraje hidropónico de arveja, con tres niveles separados a 50 cm y el primer nivel estuvo a 30 cm del suelo, cada nivel con una pendiente del 5% para drenar el agua de riego sobrante de las bandejas.

3.3.1.2 Preparación de bandejas

Cada bandeja presentó una medida de 0,45 m de largo y 0,50 m de ancho, y una altura de 0,05 m (5 cm). Se acondicionó las bandejas con sunchos de plástico dándole más resistencia a la base de las mismas los cuales se impermeabilizó con plástico, para luego realizar la desinfección con hipoclorito de sodio al 1 %. (Anexo 2)

3.3.1.3 Selección de semilla

Se adquirió semillas de arveja de la feria local 16 de julio de la ciudad de El Alto y fueron sometidas a pruebas de germinación para probar su viabilidad. Las semillas adquiridas fueron pasadas por un tamiz para eliminar las semillas rotas o en mal estado, luego se retiró manualmente otros tipos de impurezas como son: cáscaras, ramitas, pajas y otros que permanecieran luego del tamizado.

3.3.1.4 Lavado y desinfección de la semilla

Este procedimiento consistió en sumergir las semillas en agua con hipoclorito al 1 % (10 ml de hipoclorito de sodio en un litro de agua) y posterior lavado de las semillas, este lavado tiene por objetivo eliminar bacterias y hongos perjudiciales para este tipo de cultivos, en este proceso también se pueden retirar las semillas inviables que flotan en el agua.

El tiempo de desinfección es muy importante ya que no debe pasar demasiado tiempo porque afecta a la viabilidad del embrión, el tiempo recomendado es de 1 minuto con 30 segundos, por último, se enjuagan las semillas de 3 a 4 veces con abundante agua limpia con el fin de eliminar los restos del hipoclorito que hubieran quedado en las semillas (Anexo 3).

3.3.1.5 Remojo, oreo y pre germinación de semillas

Para el remojo, las semillas fueron pesadas de acuerdo a los tratamientos, luego colocados en sacos de yute para facilitar el oreado de las mismas, el remojo de la semilla fue realizadas por 24 horas, este tiempo fue dividido en dos periodos de 12 horas cada uno, a las 12 horas de estar sumergida las semillas se procedió a sacarlas y orearlas durante una hora luego se sumergió nuevamente por 12 horas.

Para el oreado, se colocó las semillas en recipientes tapados con plásticos donde se dejó reposar por 24 horas a fin de mejorar la uniformidad de germinación del cultivo.

3.3.1.6 Siembra

Culminado el oreado de las semillas y cuando estás presentaron el punto de brote se realizó la siembra en las bandejas debidamente etiquetadas de acuerdo a los tratamientos correspondientes; esta actividad consistió en esparcir la semilla de forma homogénea en las bandejas de 0,45 x 0,50 m de tal manera que la germinación y su desarrollo sea uniforme (Anexo 4).

Una vez sembradas todas las bandejas fueron trasladados a los estantes recubiertos con plástico negro con el objetivo de proporcionar un ambiente de semioscuridad para conservar la humedad y favorecer el proceso de germinación.

3.3.2. Fase de luminosidad

Una vez terminada la fase oscura se retiró el nylon negro y se expuso las bandejas a la luz para dar inicio a la fase luminosa donde la germinación alcanzo al 80% que fue a los tres días de la siembra. La arveja capta la luz solar para realizar la fotosíntesis y crecer hasta el momento de la cosecha (Anexo 6).

3.3.2.1 Riego

El periodo de riego se inició cuando las semillas entraron a la etapa de germinación, fase oscura con un riego leve de 0,5 litros de agua por bandeja/día.

El riego para la etapa de producción se realizó 3 a 4 veces por día dependiendo de las condiciones ambientales existentes en el lugar, el riego inicio con 0,5 litros de agua por bandeja/día incrementándose hasta llegar a 1,5 litros por bandeja/día con intervalos entre riegos de 3 a 4 horas, comenzando 7:00 a.m. hasta 07:00 p.m. este periodo de riego duró hasta el día de la cosecha los veinte cinco días después la siembra.

3.3.2.2 Cosecha

La cosecha del Forraje Verde Hidropónico comprendió de la biomasa total (hojas, tallos y tapete radicular). La cosecha se realizó a los quince días después de la germinación a una altura promedio de 25,5 cm el mismo que se midió y se pesó por tratamiento para evaluación de las variables de la investigación (Anexo 11).

3.3.2.3 Análisis de laboratorio

Se tomó una muestra del experimento para el análisis bromatológico en el laboratorio de Nutrición Animal, departamento de Zootecnia y Producción Animal de la Facultad de ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales “Martin Cárdenas” de la Universidad Mayor de San Simón (Anexo 13).

3.3.3. Diseño Experimental

Para el análisis estadístico se aplicó el ensayo de Diseño Bloques Completamente al Azar descrito por (Ochoa, 2016).

Con el siguiente modelo lineal aditivo:

$$Yij = \mu + \beta j + \alpha i + \varepsilon ij$$

Dónde:

Yij = Observación cualquiera de la variable de respuesta

μ = Media poblacional

βj = Efecto del j-esimo bloque

αi = Efecto del i-esima densidad de siembra

εij = Error experimental

3.3.4. Tratamientos en estudio

El estudio se realizó con cuatro tratamientos en tres bloques, los cuales se detallan en el cuadro siguiente:

Cuadro 2. Tratamientos en estudio

TRATAMIENTOS
T_1= 2,0 kg/m^2
T_2= 2,5 kg/m^2
T_3= 3,0 kg/m^2
T_4= 3,5 kg/m^2

3.3.5. Croquis del experimento

ANAQUEL 1

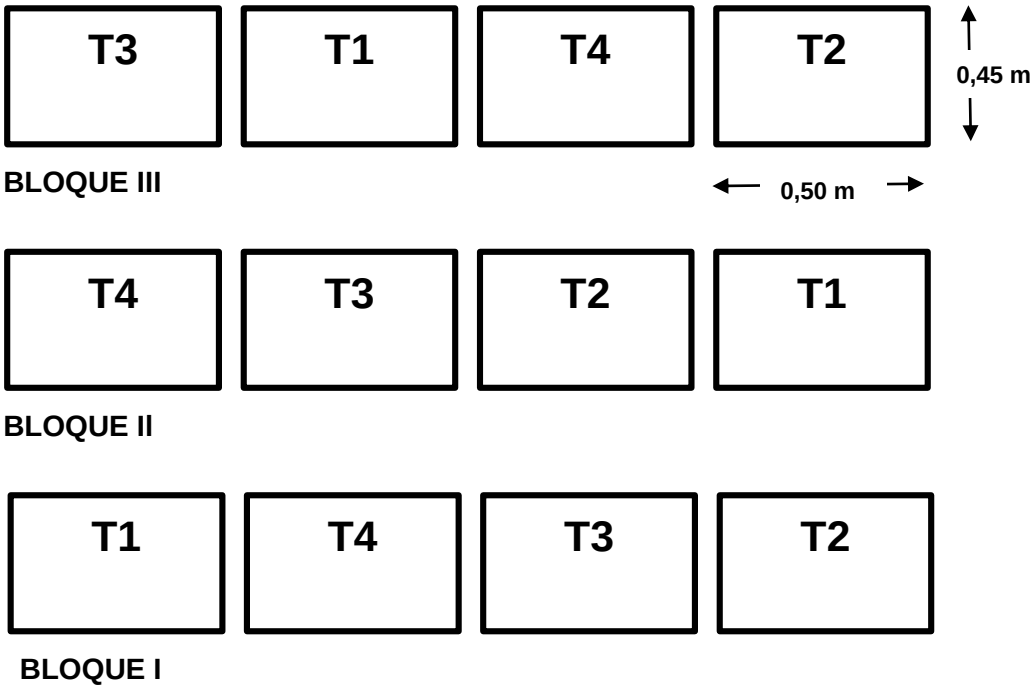


Figura 2. Croquis del experimento

3.3.5.1 Descripción del experimento

Largo del anaquel:	2,20 m
Ancho del anaquel:	0,50 m
Altura de anaquel:	1,50 m
Largo de bandejas:	0,50 m
Ancho de bandejas:	0,45 m
Alto de bandejas:	0,05 m
Área de bandejas:	0,225 m^2
Distancia entre bloques:	0,50 m
Distancia del suelo:	0,30 m
Pendiente:	5%

3.3.6. Variables de respuesta

3.3.6.1 Porcentaje de germinación:

El porcentaje de germinación consistió en retirar un lote de semillas con una muestra de 100 (o un múltiplo de 100) semillas puras (Condori, 2015).

El porcentaje de semilla completa se calcula como sigue:

$$\text{Porcentaje de semilla plena } = \frac{\text{cantidad de semilla plenas y sanas}}{\text{cantidad total de semilla}} x100$$

3.3.6.2 Altura de planta

Transcurridos tres días luego de la siembra se comenzó con la toma de datos de la altura de las plantas de FVH. Para esto se tomó aleatoriamente 10 plantas de la parte central de la bandeja y esta estratificada en tres regiones alta, media y baja; se midió con una regla metálica desde el cuello de la planta hasta la última hoja superior expresada en centímetros, estas medidas fueron evaluadas hasta el día de la cosecha (Anexo 7).

3.3.6.3 Longitud radicular

Comprende la longitud de las raicillas hasta la parte vegetativa del cuello de la planta, ésta medición se realizó en cuatro zonas de cada bandeja y se midió en centímetros (Anexo 8).

3.3.6.4 Rendimiento de forraje verde hidropónico de arveja en materia verde

Se determinó el rendimiento de materia verde al momento de la cosecha, realizando el pesaje del FVH con una balanza de cada bandeja o tratamiento (0,225 m^2), haciendo una relación de kilogramos por metro cuadrado.

3.3.6.5 Rendimiento de forraje verde hidropónico de arveja en materia seca

Para la determinación del peso de materia seca, se realizó a partir de las muestras tomadas anteriormente para la evaluación de rendimiento en materia verde los cuales pasaron por el proceso de secado y pesaje.

3.3.7. Análisis económico

El análisis económico se realizó mediante el cálculo del Beneficio / Costo para cada uno de los tratamientos de acuerdo (Ochoa, 2019) con la siguiente relación:

$$CP = CV + CF$$

$$B = R * P$$

Donde:

CP = Costo de producción

R = Costos variables

CF = Costos fijos

B = Beneficio Bruto

R = Rendimiento

P = Precio

$$B/C = B / CP$$

Donde:

B/C = Relación Beneficio Costo

Considerando los costos de insumos mano de obra y herramientas.

Cuando:

B/C = Mayor a 1 es rentable

B/C = Igual a 1 sin pérdidas

B/C = Menor a 1 no es rentable

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al trabajo de investigación y con el objetivo de mostrar el efecto de la densidad en la producción de forraje de arveja en sistema hidropónico, se muestran los siguientes resultados.

4.1. Temperaturas registradas durante el desarrollo del cultivo de arveja

En el trascurso del experimento en los meses de febrero y marzo se registraron temperaturas máximas y mínimas diariamente con un termómetro el cual estaba ubicado a 1,20 m de altura y se obtuvo la siguiente información.

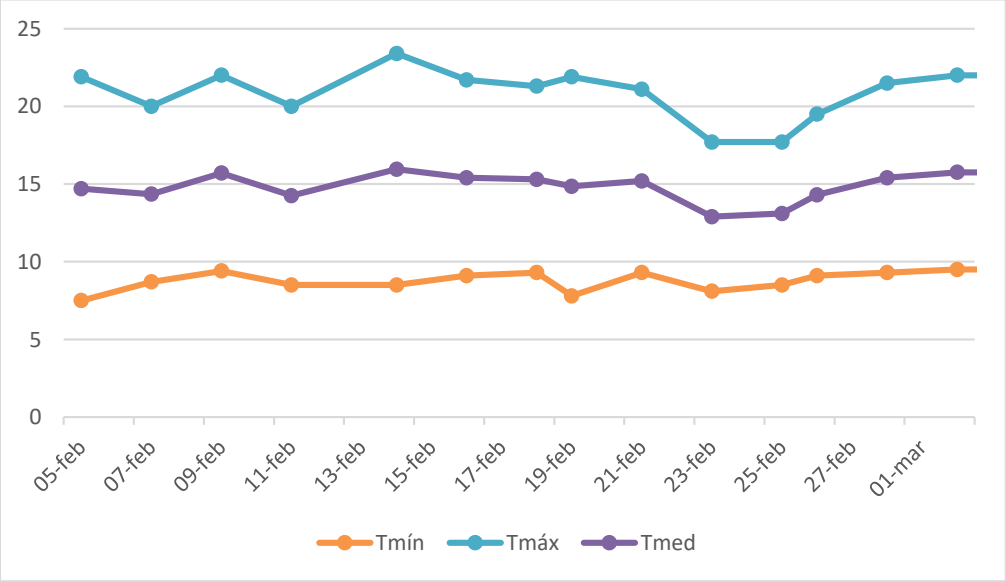


Figura 3. Temperaturas registradas del interior del ambiente en el periodo de estudio

La figura 3, muestra que en el presente estudio, se registró una temperatura mínima de 7,8 °C, una máxima de 23,4 °C y un promedio de 14,9 °C. Este rango de temperaturas sugiere condiciones favorables para el desarrollo de la arveja en un sistema de FVH.

Martínez, citado por Quispe (2013), destaca que el rango óptimo de temperatura para la producción de FVH se encuentra entre 18 y 26 °C. En este contexto, el promedio de 14,9 °C registrado en el presente estudio, aunque inferior al rango ideal propuesto, indica que el cultivo aún podría desarrollarse, pero probablemente no al máximo de su potencial. Esto sugiere que, si bien las temperaturas mínimas y máximas se sitúan dentro de un rango que permite el crecimiento, la media puede no ser suficientemente alta para garantizar una producción óptima.

Por otro lado, Roger, citado por Huiza (2015), menciona que temperaturas cercanas a los 15 °C son ideales para la producción de FVH, lo que podría significar que el promedio observado se acerca a condiciones favorables. Sin embargo, el mismo autor advierte que temperaturas alrededor de 30 °C son indicativas de un ambiente con exceso de calor, lo que resulta inadecuado para el cultivo. Las temperaturas registradas en este estudio se mantienen dentro del margen aceptable para el desarrollo del cultivo, lo que implica que, aunque el promedio no alcanza el ideal, la producción no se ve comprometida por condiciones extremas de calor.

aunque las temperaturas promediadas en este estudio no alcanzan el rango óptimo recomendado, se encuentran dentro de un margen que permite el crecimiento del FVH de arveja. Esto subraya la importancia de monitorear las condiciones ambientales y ajustar las prácticas de manejo para maximizar la producción, especialmente en situaciones donde la temperatura promedio se mantiene por debajo de lo ideal.

4.2. Variables de respuesta

4.2.1. Porcentaje de germinación

El cuadro 3, indica que se tuvo un 93% de germinación y no germinó el 7%.

Cuadro 3. Porcentaje de germinación

Germinado (%)	No germinado (%)
93	7

El porcentaje de germinación alcanzado en este estudio fue de 93%, lo cual es un valor óptimo para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de arveja. Este resultado se encuentra por encima del umbral recomendado por autores como Gallardo, citado por Gómez (2020), quien enfatiza que una germinación adecuada es crucial para el éxito de la producción de FVH, ya que determina en gran medida la uniformidad y cantidad de biomasa producida, también señala que es esencial emplear semillas con una viabilidad superior al 75% para asegurar un rendimiento satisfactorio.

Asimismo, Abarca (2016) subraya la necesidad de contar con un porcentaje de germinación superior al 90% y con semillas libres de malezas o impurezas para evitar problemas de competencia y asegurar un crecimiento uniforme en el sistema hidropónico.

Hudson, citado por Orellana (2015), menciona factores clave en la germinación de semillas de arveja, como la viabilidad del embrión, el vigor de la semilla y el contenido de humedad, todos los cuales contribuyen significativamente al éxito de la germinación en sistemas hidropónicos.

La tasa de germinación del 93% obtenida en este estudio cumple con estos estándares, lo cual favorece una producción eficiente y sostenible en el FVH de arveja, maximizando el uso del espacio y los recursos. Además, el uso de semillas de alta calidad garantiza que las plantas tengan un desarrollo inicial vigoroso, reduciendo el riesgo de pérdida de biomasa y manteniendo la competitividad del cultivo en sistemas hidropónicos. Estos resultados demuestran que las prácticas de selección de semillas en este experimento fueron adecuadas y fundamentales para alcanzar altos rendimientos y una producción uniforme de FVH de arveja.

4.2.2. Altura de planta

El cuadro 4, muestra el análisis de varianza para altura de planta, que mostró una respuesta significativa entre bloques y entre densidades, indica que al bloquear tanto la temperatura como la luz influyen en la homogeneidad de la variable altura de planta.

Cuadro 4. Análisis de varianza de altura de planta

FV	GL	SC	CM	F	p - valor	SIGNIFICANCIA
Bloque	2	21,50	10,75	9,92	0,0125	*
Densidad	3	11,00	3,67	3,38	0,0951	NS
Error	6	6,50	1,08			
Total	11	39,00				
CV (%)	3,65					

NS = No Significativo; * = Significativo

El cuadro 4, indica que los bloques tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta (p = 0,0125). Esto sugiere que factores como la pendiente, la orientación, la iluminación entre bloques influyen en la altura de planta. La densidad de siembra no mostró diferencias significativas (p = 0,0951), indica que la variación en densidad no afecta de manera significativa.

El coeficiente de variación del 3,65% indica que el experimento tiene un nivel bajo de variabilidad relativa, lo cual refleja un buen control experimental y una baja dispersión de los datos respecto a la media.

Howard y Castilla, citados por Álvarez (2018), subrayan la importancia del movimiento del aire en el crecimiento de las plantas, ya que influye en la transpiración, la absorción de CO_2 y el tamaño de las hojas, afectando el desarrollo del tallo y, en consecuencia, la altura. En sistemas hidropónicos, donde la competencia es principalmente por luz y no por nutrientes, una densidad de siembra excesiva aumenta la competencia por la luz. Esto genera un fenómeno de estiramiento en las plantas a medida que buscan capturar la mayor cantidad de luz posible, lo cual puede incrementar la altura, pero a costa de una estructura de tallo más delgada y posiblemente menos estable.

Cuadro 5. Promedio de altura de planta por bloques

Bloques	Media (cm)	Duncan (α = 5%)
3	30,00	A
1	28,75	A
2	26,75	B

El cuadro 5, muestra que el bloque 3 y el bloque 1 alcanzaron una mayor altura de planta; con medias de: 30,00 cm y 28,75 cm respectivamente en comparación al bloque 2 que tuvo una media de 26,75 cm de largo.

En comparación, Contreras (2015) obtuvo un promedio de 12,42 cm en la altura de plantas de FVH de arveja, un valor que puede verse influenciado por las condiciones específicas de su sistema hidropónico y la disposición de las bandejas. En este estudio, la altura de planta superó este promedio, lo cual puede estar relacionado con una optimización en la densidad de siembra y la disposición de las bandejas que favoreció un crecimiento uniforme.

La altura de las plantas en el forraje verde hidropónico (FVH) de arveja está influenciada por múltiples factores, el diseño del sistema de cultivo y las condiciones ambientales dentro de la estructura hidropónica. En este estudio, se observaron variaciones en la altura de las plantas que concuerdan con otros trabajos similares, en los que también se destaca la influencia de la posición de las bandejas en estructuras tipo estantería.

Abarca (2016) explica que las diferencias de altura entre plantas en distintos niveles de bandejas en sistemas de estantería hidropónica son atribuibles a factores como la intensidad de luz, temperatura, circulación de aire, humedad y la distribución de nutrientes y agua. Las bandejas superiores suelen recibir una mayor intensidad lumínica y mayor exposición al calor, promoviendo un crecimiento más rápido, por tanto, una mayor altura en las plantas. En contraste, las bandejas inferiores suelen estar más sombreadas y en condiciones más frías, lo que puede limitar el crecimiento vertical de las plantas y resultar en una menor altura promedio.

4.2.3. Longitud de raíz

Cuadro 6. Análisis de varianza de longitud de raíz

FV	GL	SC	CM	F	p - valor	SIGNIFICANCIA
Bloque	2	28,01	14,01	1,26	0,3483	NS
Densidad	3	27,58	9,19	0,83	0,5243	NS
Error	6	66,50	11,08			
Total	11	122,09				
CV (%)	23,67					

NS = No Significativo

El ANOVA para la longitud de raíz del forraje verde hidropónico (FVH) de arveja muestra que tanto los bloques (p = 0,3483) como la densidad de siembra (p = 0,5243) no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Esto indica que las diferencias observadas en la longitud de la raíz no se deben a las variaciones entre los bloques ni a los niveles de densidad de siembra evaluados. El coeficiente de variación del 23,67% sugiere una mayor dispersión en los datos, lo que indica una considerable variabilidad en la longitud de la raíz que no fue explicada por los factores del experimento.

En el presente estudio, las raíces mostraron una longitud uniforme, probablemente debido a la distribución eficiente de los recursos en el sistema hidropónico, un ambiente controlado donde las raíces no experimentan restricciones espaciales o competencia significativa por nutrientes.

Ortega, citado por Nina (2017), menciona que el desarrollo radicular inicial depende de la temperatura y la frecuencia de riego. Un riego uniforme a lo largo del día permite una mayor absorción de agua, promoviendo un crecimiento radicular constante. Este concepto es relevante en sistemas hidropónicos, donde la disponibilidad continua de agua favorece el desarrollo homogéneo de las raíces desde la germinación.

Orellana (2015) describe que, en sistemas hidropónicos bien gestionados, la uniformidad en la longitud de la raíz se debe a la adecuada disponibilidad de recursos como nutrientes, agua y oxígeno, que minimizan la competencia entre plantas. Incluso con variaciones en la densidad de siembra, la ausencia de suelo limita las restricciones físicas, permitiendo un crecimiento uniforme de las raíces.

4.2.4. Rendimiento en materia verde

Cuadro 7. Análisis de varianza de rendimiento en materia verde

FV	GL	SC	CM	F	p - valor	SIGNIFICANCIA
Bloque	2	1,16	0,58	4,77	0,057	NS
Densidad	3	2,66	0,89	7,31	0,0199	**
Error	6	0,73	0,12			
Total	11	4,55				
CV (%)	12,49					

NS = No Significativo; ** = Altamente Significativo

El ANOVA para el rendimiento en materia verde del forraje verde hidropónico (FVH) de arveja muestra que la densidad de siembra tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta, con (p = 0,0199), lo cual es inferior al nivel de significancia del 5%. Esto indica que existen diferencias significativas en el rendimiento de materia verde entre los diferentes niveles de densidad de siembra evaluados. Por otro lado, lo bloques no presentaron un efecto significativo (p = 0,057), aunque están cerca del umbral de significancia.

El coeficiente de variación del 12,49% indica una variabilidad moderada en los datos, lo que sugiere que el experimento tuvo un buen control sobre las condiciones. Dado que se identificaron diferencias significativas en la densidad de siembra, se realizó prueba de comparación de medias Duncan al 5%, para identificar que niveles de densidad difieren significativamente entre sí.

Cuadro 8. Promedio de rendimientos de materia verde por densidades

Densidad	Media (kg/m^2)	Duncan (α = 5%)
Densidad 4 (3,5 kg/m^2)	15,20	A
Densidad 3 (3,0 kg/m^2)	13,33	AB
Densidad 2 (2,5 kg/m^2)	11,60	BC
Densidad 1 (2,0 kg/m^2)	9,51	C

En el cuadro 8, revela las siguientes diferencias significativas entre las densidades de siembra: la densidad 4 (3,5 kg/m²) con un rendimiento promedio de 15,20 kg/m^2, se clasifica en el grupo A, esto indica que es la densidad más efectiva en términos de producción de materia verde y que es significativamente diferente de las demás densidades, la densidad 3 (3,0 kg/m²) con un promedio de 13,33 kg/m^2, pertenece a los grupos A B esto sugiere que no es significativamente diferente de la Densidad 4, pero sí se distingue de las densidades más bajas, la densidad 2 (2,5 kg/m²) con un rendimiento de 11,60 kg/m^2 se ubica en los grupos B C esto indica que su rendimiento es significativamente menor que el de las densidades 4 y 3, pero no es significativamente diferente de la densidad 1 (2,0 kg/m²) con 9,51 kg/m^2 está en el grupo C, siendo la densidad con el rendimiento más bajo y significativamente diferente de las demás densidades.

La densidad de 3,5 kg/m² (Densidad 4) maximiza la producción de materia verde, mientras que la densidad de 2,0 kg/m² (Densidad 1) produce significativamente menos. Estas diferencias en el rendimiento subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente la densidad de siembra para optimizar la producción de materia verde en el FVH de arveja.

Por tanto, lograr un equilibrio en la densidad de siembra es fundamental para maximizar el rendimiento total sin comprometer la estructura y el valor nutricional del forraje. Esto resalta la importancia de ajustar la densidad para maximizar el rendimiento en materia verde, considerando tanto el espacio disponible como las condiciones hidropónicas específicas para una producción eficiente y de alta calidad en el FVH de arveja.

El rendimiento de materia verde en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja obtenido en esta investigación, 15,2 kg/m², es notablemente superior al reportado por Contreras (2015), quien encontró un rendimiento de 8,6 kg/m². Esta diferencia podría atribuirse a diversas variables, como el manejo de la densidad de siembra, las condiciones hidropónicas específicas o incluso las variaciones en los genotipos de arveja empleados. El rendimiento superior obtenido en nuestro estudio sugiere que el sistema hidropónico y la densidad de siembra aplicada optimizan el aprovechamiento de recursos, promoviendo un desarrollo vegetal vigoroso y aumentando la producción de forraje por unidad de área.

La densidad de siembra influye significativamente en el rendimiento en materia verde en sistemas de producción de forraje hidropónico. Estudios previos, como el de Orellana (2015), sostienen que densidades más altas incrementan la competencia entre plantas por luz, nutrientes y espacio. Este aumento en competencia puede restringir el crecimiento individual de cada planta y reducir la producción por planta; sin embargo, el rendimiento total por área puede incrementarse hasta alcanzar un punto óptimo. Más allá de este punto, el rendimiento tiende a disminuir debido al estrés por competencia, afectando tanto la cantidad como la calidad del forraje.

4.2.5. Rendimiento en materia seca

Cuadro 9. Análisis de varianza de rendimiento en materia seca

FV	GL	SC	CM	F	p - valor	SIGNIFICANCIA
Bloque	2	0,01	0,01	1,76	0,25	NS
Densidad	3	0,13	0,04	13,41	0,0045	**
Error	6	0,02	3,3E-03			
Total	11	0,16				
CV (%)	9,62					

NS = No Significativo; ** = Altamente Significativo

El cuadro 9, análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento en materia seca del forraje verde hidropónico (FVH) de arveja muestra que la densidad de siembra tiene un efecto altamente significativo sobre el rendimiento, con un $p = 0,0045$. Esto indica que las variaciones en la densidad de siembra generan diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de materia seca. Por otro lado, los bloques no presentan un efecto significativo ($p = 0,25$), lo que sugiere que las diferencias entre los bloques no afectan el rendimiento de manera significativa.

El coeficiente de variación del 9,62% refleja una baja variabilidad relativa en los datos, lo que indica que los resultados son confiables. La variabilidad no explicada es mínima, lo que refuerza la relevancia de la densidad de siembra como factor determinante del rendimiento en materia seca.

Dado que existen diferencias significativas en la densidad de siembra, fue necesario realizar una prueba de medias Duncan al 5% para identificar qué niveles de densidad se diferencian significativamente en su rendimiento de materia seca.

Cuadro 10. Promedio de rendimientos de materia seca por densidades

Densidad	Media (kg/m^2)	Duncan (α = 5%)
Densidad 4 (3,5 kg/m^2)	3,16	A
Densidad 3 (3,0 kg/m^2)	2,93	AB
Densidad 2 (2,5 kg/m^2)	2,53	B
Densidad 1 (2,0 kg/m^2)	1,91	C

El cuadro 10, refleja las medias de materia seca entre diferentes densidades de siembra, donde la densidad 4 (3,5 kg/m^2) con un rendimiento promedio de 3,16 kg/m^2, pertenece al grupo A, lo que indica que es la densidad con el rendimiento más alto y significativamente diferente de las demás la densidad 3 (3,0 kg/m^2) con un promedio de 2,93 kg/m^2, está en los grupos A B, lo que sugiere que no es significativamente diferente de la Densidad 4, pero sí de la densidad 1, la densidad 2 (2,5 kg/m^2) con 2,53 kg/m^2, se ubica en el grupo B, presentando un rendimiento intermedio y significativamente menor que las densidades más altas (4 y 3) y la densidad 1 (2,0 kg/m^2) con 1,91 kg/m^2 está en el grupo C, teniendo el rendimiento más bajo y significativamente diferente de las demás densidades.

La densidad de 3,5 kg/m^2 (Densidad 4) es la más efectiva para maximizar el rendimiento de materia seca, mientras que la densidad de 2,0 kg/m^2 (Densidad 1) produce significativamente menos materia seca.

El rendimiento de materia seca en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja obtenido en esta investigación, 3,16 kg/m^2, es notablemente superior al reportado por Contreras (2015), quien encontró un rendimiento de 1,29 kg/m^2.

El rendimiento en materia seca del Forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja en este estudio fue notablemente influenciado por la densidad de siembra, observándose un patrón similar a lo reportado en otros estudios sobre FVH. Nina *et al.* (2017) observaron que, a densidades de siembra más bajas, conducen a un menor rendimiento total, debido a que el espacio disponible no es aprovechado de manera eficiente. Sin embargo, señalan que, aunque las plantas individuales pueden tener menos competencia y crecer mejor a densidades más bajas, el rendimiento por unidad de superficie disminuye.

En comparación, el presente estudio de FVH de arveja muestra una respuesta similar, donde el aumento en densidad optimiza el rendimiento en materia seca, destacando la importancia de una densidad de siembra adecuada para maximizar el rendimiento sin comprometer la calidad. Estos hallazgos resaltan la necesidad de ajustar la densidad de siembra para cada especie y sistema de producción, con el fin de obtener un rendimiento sostenible y eficiente en FVH.

4.2.6. ANÁLISIS BENEFICIO COSTO

Los cálculos de costos de producción se efectuaron considerando las proporciones de insumos y material biológico necesarios para todo el ciclo de producción de forraje verde hidropónico. El análisis económico se llevó a cabo mediante un estudio simplificado utilizando el indicador de relación Beneficio/Costo (B/C).

Cuadro 11. Relación Beneficio/Costo para la producción de FVH en 12 ciclos

DENSIDAD	T1 (2,0 kg/m^2)	T2 (2,5 kg/m^2)	T3 (3,0 kg/m^2)	T4 (3,5 kg/m^2)
Costos de producción	158,15	158,37	158,60	158,83
Rendimiento 1 ciclo (kg)	2,14	2,61	3	3,42
Rendimiento 12 ciclos (kg)	25,68	31,32	36,00	41,04
Precio	5	5	5	5
Ingresos	128,4	156,60	180,00	205,20
B/C	0,81	0,99	1,13	1,29

El cuadro 11, análisis de beneficio/costo (B/C) en función de la densidad de siembra muestra que la rentabilidad de la producción de Forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja mejora con el aumento de densidad, logrando que las densidades más altas ofrezcan mayor rentabilidad.

Para la densidad más baja, T1 (2,0 kg/m^2), el valor B/C es de 0,81 indica una pérdida, ya que los ingresos generados no cubren completamente los costos de producción. En contraste, con densidades de siembra más altas, como en T4 (3,5 kg/m^2), el valor B/C es de 1,29 lo cual representa un retorno positivo; por cada Bs. 1 invertido, se obtiene un beneficio de Bs. 0,29, lo que hace esta densidad la más rentable. Este incremento en el valor B/C se debe a que las mayores densidades permiten un mayor rendimiento en materia verde, aumentando así los ingresos por ciclo y anualmente.

Para optimizar aún más los costos de producción en FVH, Morales (2020) señala que el uso de materiales reciclados, como bandejas y módulos, puede abaratar significativamente los costos, especialmente cuando el sistema se emplea durante períodos largos. Morales también menciona que, aunque la inversión inicial en infraestructura es la más costosa, los materiales reutilizables permiten reducir los costos en ciclos sucesivos, lo que hace viable económicamente la producción a largo plazo.

5. CONCLUSIONES

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

- En la Estación Experimental de Kallutaca, se determinó que la densidad de siembra de 3,5 kg/m² (T4) es la más adecuada para la producción de Forraje Verde Hidropónico (FVH) de arveja. Esta densidad proporcionó los mayores rendimientos en términos de producción de biomasa, superando significativamente a las densidades menores, sin mostrar efectos adversos significativos en el sistema hidropónico, esta densidad optimiza el espacio disponible en el sistema, favoreciendo un crecimiento uniforme de las plantas y el máximo aprovechamiento de los recursos.

- La biomasa del FVH de arveja mostró un aumento significativo con el incremento en la densidad de siembra, alcanzando el máximo rendimiento en T4 (3,5 kg/m²), con 3,42 kg de materia verde por ciclo (15,2 kg/m^2). Esto respalda que, en condiciones de producción hidropónica, las densidades de siembra elevadas permiten un mejor aprovechamiento del espacio, maximizando el rendimiento por área sin causar efectos adversos importantes en el crecimiento de las plantas.

- El análisis beneficio/costo mostró que la densidad 3,5 kg/m² (T4) es también la más rentable, con un B/C de 1,29, mientras que las densidades menores, como 2,0 kg/m² (T1), presentan un B/C de 0,81, insuficiente para cubrir los costos de producción. Las mayores densidades permiten un ingreso superior gracias al rendimiento incrementado en biomasa. Esto sugiere que, al incrementar la densidad de siembra, es posible mejorar la rentabilidad, siempre que se mantenga un manejo adecuado del sistema. Además, el uso de materiales reciclados, como bandejas y módulos, puede reducir los costos iniciales, favoreciendo la viabilidad económica a largo plazo.

- El forraje verde hidropónico de arveja producido mostró una humedad promedio del 78,57%, lo cual es favorable para la palatabilidad y digestibilidad en la alimentación animal. Este nivel de humedad indica que el FVH puede suplir adecuadamente los requerimientos de agua en la dieta animal, mejorando la eficiencia en su consumo.

- El FVH de arveja obtuvo un contenido de proteína bruta del 25,79%, confirmando su alto valor nutricional. Esta calidad proteica lo convierte en un recurso excelente para suplementar dietas animales, lo que puede contribuir a mejorar la productividad en sistemas de producción animal.

- La densidad de 3,5 kg/m² (T4) maximiza el rendimiento de biomasa y los beneficios económicos, al tiempo que asegura un FVH de alta calidad nutricional, con niveles de humedad y proteína bruta que cumplen con los requisitos alimenticios para diversas especies animales.

6. RECOMENDACIONES

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

- Se recomienda utilizar una densidad de siembra de 3,5 kg/m² para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de arveja, ya que maximiza el rendimiento de biomasa sin comprometer la calidad del forraje ni la eficiencia del sistema. Esta densidad resulta en un alto rendimiento de materia verde por área cultivada y ofrece la mejor relación beneficio/costo.

- Mantener un manejo cuidadoso de los factores ambientales y del sistema, como la frecuencia de riego, la intensidad de luz y la distribución homogénea de nutrientes, para asegurar un crecimiento óptimo a densidades altas.

- Implementar riegos frecuentes y uniformes para ayudar a mantener la salud radicular, especialmente en condiciones de mayor competencia por luz.

- Para mejorar la viabilidad económica, se recomienda utilizar materiales reciclables, como bandejas y módulos en la infraestructura hidropónica, esto reducirá los costos de inversión inicial y facilitará una producción más rentable en ciclos prolongados.

- Para asegurar la replicabilidad y la estabilidad del rendimiento en distintas condiciones climáticas, se recomienda repetir el experimento en otras estaciones del año y en distintas localidades. Esto permitirá evaluar el impacto de factores estacionales en el FVH de arveja y ajustar las prácticas de manejo hidropónico de acuerdo a las variaciones ambientales.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abarca, P; Aguirre, C; Silva, L; Mora, D; Carrasco, J. 2016. Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura (en línea). Boletín INIA 321:159-184. Consultado 09 ago. 2024. Disponible en https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/f24407ef-7b86-4cd0-a3ea-44ef23bcdfbd/content

Alarcon, M. 2021. Evaluación de la productividad de un cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) bajo los sistemas de siembra tradicional y tutorado en la vereda de Mombita Municipio de Aquitania (Boyacá) (en línea). Tesis. Ing. Agr. Bogotá, Colombia. UNAD. Consultado 15 may. 2024. Disponible en https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/44414/malarconu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Alvarez, M. 2011. Hidroponia: una guía esencial para el cultivo en agua. 1ra. Edición. Buenos Aires, Argentina. Edit. Albatros. p 8-11.

Alvarez Mollo, NJ. 2018. Respuesta del forraje verde hidropónico a la aplicación de dos soluciones nutritivas en avena (*Avena sativa*) y cebada (*Hordeum vulgare*) en carpa solar (en línea). Tesis. Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 18 sep. 2024. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/20165/T-2608.pdf?sequence=1

Alpízar, L. 2004. Hidroponía básica: el cultivo fácil y rentable de plantas sin tierra. México. Editorial Diana. 153 p.

Aquino, E. 2010. Producción, manejo y usos de forraje verde hidropónico para zonas de altura. Primera edición. JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón -Proyecto Suma Uma) La Paz, Bolivia. p. 35.

Arteaga, J. 2007. Gobierno municipal de Laja (en línea). Trabajo dirigid. Arq. Lapaz Bolivia. UMSA. Consultado 14 may. 2024. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/17544/PG-2505.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Aviles, FJ. 2003. Efecto de la aplicación de hormonas vegetales, biozime,T.S.. (giberelinas), en germinados de maíz (*Zea mays* L.) para alimentación pecuaria (en línea). Tesis Ing. Agr. Jalisco, Mexico. UdeG. Consultado 18 may. 2024. Disponible en http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1237/Aviles_Flores_Francisco_Javier.pdf?sequence=1.

Bauza, R; Capra, G; Bratashi, C. 2013. Evaluacion de la arveja forrajera como alimento para cerdos de engorde (en línea). Agrociencia Uruguay. 17(2):91-98. Consultado 13 may. 2024. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_porcina/00-produccion_porcina_general/218-arveja_forrajera.pdf

Buitrago, J; Duarte, C; Sarmiento, A. 2006 el cultivo de la arveja en Colombia (en línea). Promedios y Fondo Nacional de leguminosa. Bogota, Colombia. 83 p. consultado 22 may. 2024. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262012000200013&script=sci_arttext

Castro, R. 2007. Manual de Hidroponía. La Paz, Bolivia. Editorial, Torre. p. 27.

Choquehuanca, R. 2006. Sistemas de cultivo de dos variedades de arveja (Pisum sativum L.) en lecho del rio y terreno cultivable, bajo tres densidades de siembra en Cota Cota (en línea). Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 20 ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/11055/T

Condori, F. 2019. Evaluación de la producción de forraje verde hidropónico de avena (*Avena sativa* L.) Por tres métodos de producción en la comunidad Corpa municipio Jesús de Machaca. Tesis Ing. El Alto, Bolivia, UPEA. 98 p.

Condori, C. 2015. Evaluación de tres periodos de cosecha en dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) para la producción de forraje verde hidropónico, en la localidad de Chuquiaguillo. (en linea). Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 15 Ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/7090/T-2140.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Contreras, JL; Tunque, M; Cordero, A. 2015. Rendimiento hidropónico de la arveja con cebada y trigo en la producción de germinados (en línea). Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. 26(1):9-19. Consultado 30 jun. 2024. Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1609-91172015000100002.

Coria, O. 2021. Evaluación agronómica de variedades de avena (*Avena sativa* L.) con niveles de hoja de coca molida (*Erythroxylum coca* Lam.) como abono verde en Kallutaca, La Paz. Tesis. Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UPEA. 132p.

Corona, L. 2011. Producción de forraje verde en la mixteca poblana una alternativa nutricional para la época de sequía. (en línea). Puebla, México. 63 p. consultado 17 jun. 2024. disponible en https://www.engormix.com/lecheria/forraje-verde-hidroponico/produccion-forraje-verde-mixteca_a28712/.

Elizondo, J. 2005. Forraje verde hidropónico: Una alternativa para la alimentación animal (en línea). Revista ECAG-Informa. 32:36-39. Consultado 18 may. 2024. Disponible en https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/aa4a0660-4199-4bcd-95ba-ffb79dea9f8c/content.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2001. Manual técnico forraje verde hidropónico (en línea). Santiago, Chile. Consultado 14 mayo. 2024. Disponible en www.fao.org/docrep/fao/field/009/ah472s/ah472s00.pdf.

Gomez, W. 2020. Evaluación de tres niveles de biol bovino en la producción de forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) En la localidad de Viacha. Tesis Ing. El Alto, Bolivia, UPEA. 89 p.

Gonzáles, A. 2006. La huerta casera: manual de hidroponía popular. Costa Rica. Editorial de la Universidad de San José. 84 p.

Gonzales, E; Ceballos, J; Benabides, O. 2015. Producción de forraje verde hidropónico de maíz *Zea mays* l. en invernadero con diferentes niveles de silicio (en línea). Revista de ciencias agrícolas. 32(1): 75-83. Consultado 12 jul. 2024. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-01352015000100007

Google Earth. 2021. (Programa Informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiplecartografía, con base en la fotografía satelital). Consultado en 28 de julio del 2021. Disponible en: http://www.google.es/intl/es/earth/index.html.

Guarachi, E. 2011. Balance hídrico en el cultivo de papa bajo condiciones de drenaje sukakollus La Paz - Bolivia. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UPEA. 96 p.

Guerrero, C. 2017. Evaluación de dos variedades de arveja (*Pisum sativum* L.) de porte bajo para uso agroindustrial en la región de Chia Cundinamarca. (en línea). Tesis Ing. Agr. Cundinamarca, Colombia. UC. Consultado el 30 may. 2024. Disponible en https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/2458/EVALUACI%C3%93N%20DE%20DOS%20VARIEDADES%20DE%20ARVEJA%20(Pisum%20sativum%20L.)%20DE%20PORTE%20BAJO%20PARA%20USO%20AGROINDUSTRIAL%20E.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Gutierrez, I. 2000. Cultivos Hidropónicos. Fascículo 9. Bogotá Colombia.

Hernández, R. 2024. Guía (en línea). Tlalnepantla, México. Consultado 11 de sep. 2024. disponible en https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=128#:~:text=Durante%20la%20germinaci%C3%B3n%2C%20las%20semillas,y%20el%20desarrollo%20del%20forraje.

Hidalgo. l. 1985. Producción de forraje en condiciones de hidroponía evaluaciones preliminares en avena y triticale. sn. chillán. Chile. p. 35 – 43.

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. UMSA. 97 p.

Hy-Farm. 2024. La importancia de la hidroponía (en línea, sitio web). Consultado 18 jul. 2024. Disponible en https://hy-farm.com/es/la-importancia-de-la-hidroponia-en-europa/

Izquierdo, J. 2002. Hidroponía escolar (en línea). Santiago de ch. Consultado 20 de Nov. 2021. Disponible en: http://www.rlc.fao.org/prior/segalim/prodalim/prodveg/hidrop/pdf/hidro 1.

López, F. 2010. Comparación de forraje verde hidropónico deshidratado de cebada con alimento balanceado en conejos de engorda de la F.M.V.Z. (en línea). Tesis Med. Vet. Zoot. Michoacan, Mexico. UMSNH. Consultado 30 may. 2024. Disponible en http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/12885 /FMVZ-L-2010-0431.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mamani, L. 2015. Efecto de la dosificación de compost de coca en el comportamiento de post repique de kiswara (*Buddleja coriácea*) en el vivero forestal de Kallutaca. Ing. Agr. UPEA, El Alto, Bolivia.

Maocho, F. 2013. Cultivo de guisantes (en línea). Consultado 06 may. 2023. Disponible en: https://felixmaocho.wordpress.com/2013 /09/01/huerto-familiar-cultivo-de-guisantes

Marmolejo D. 2002. Leguminosas de grano. Instituto de investigación de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo-Perú. 179 p.

Mendoza, M. 2009. Producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) bajo sistema hidropónico, en cuatro soluciones nutritivas. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. 70 p.

Morales, O. (2003). Forraje hidropónico y su utilización en la alimentación de corderos precozmente destetados. Ed. Universidad de concepción, Chillan. Chile, p. 75-78.

Morales, J.1987. Densidades de siembras y contenido nutrimental del forraje hidropónico y su efecto en la ganancia de peso en borregos. México. 98 p.

Morales, DB; Jimenez, LS; Burneo, JI; Capa, ED. 2020. Producción de forrajes de avena y trigo bajo sistemas hidropónico y convencional (en línea). Ciencia Tecnológica Agropecuaria, Mosquera. 21(3). Consultado 25 sep. 2024. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012287062020000300013&script=sci_arttext&tlng=es

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. (en línea). Tesis Ing. Agro. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 19 Ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/12939/T-2392.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Ochoa, R. 2016. Diseños Experimentales. 2da ed. La Paz, Bolivia, Ochoa ediciones. 385 p.

Ochoa, R. 2019. Investigación científica.1ra. ed. La Paz, Bolivia, Ochoa ediciones. 284 p.

Orellana, EB.2015. Evaluación de tres nivele de fertilización en forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) (en línea). Tesis ing. Agr. Ind. Cuenca, Ecuador. UPS. Consultado 27 jul. 2024. Disponible en https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8154/1/UPS-CT004907.pdf

Perez, JR. 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. El Alto, Bolivia, UPEA. 79 p.

Perrin, R; Wikelman, D; Moscardil E; Anderson, J.1997. La Formulación de Recomendaciones a Partir de Datos Agronómicos. Manual Metodológico Para Evaluación Económica. CIMMYT. México DF. 92 p.

Quispe, H. 2018. Evaluación productiva de dos variedades de arveja (*Pisum sativum* L.) Con sistema de tutorado en la localidad de Moyabaya-provincia Larecaja. (en línea). Tesis Ing. Agro. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 18 Ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/18404/T-2559.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Quispe, A. 2013. Rendimiento de cebada y avena como forraje verde hidropónico en relación a la densidad de siembra en carpa solar. (en línea). Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 14 Ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/4186/T-1907.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rodríguez. C. (2000). Manual para cultivos hidropónicos editorial Antropar. Bogotá, Colombia. 84 p.

Rodríguez, G. 2015. Evaluación de 12 cultivares de arveja (*Pisum sativum* L.) de tipo industrial para cosecha en verde en condiciones de tarma (en línea). Tesis. Ing. Agr. Jauja, Perú. UNCP. Consultado 14 abr. 2024. Disponible en https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/977/RODR%c3%8dGUEZ%20QUISPE%20GUSTAVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Salas, L. 2010. Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica (en línea). Terra Latinoamericana, 28(4):355-360. Consultado 24 jul. 2024. disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000400007

Samperio, G. 1997. Hidroponía básica: el cultivo fácil y rentable de plantas sin tierra. México. Editorial Diana. 153 p.

Sanchez, R. 2004. Manual de Hidroponía paso a paso cultivos sin tierra. Ed. RIPALME. Lima, Perú. p. 110 -117.

Sanchez, A. 2005. Informes Técnicos de Estadía. Informes Internos de la Dirección Nacional de Empleo. Montevideo, Uruguay.125 p.

SEFO-SAM (Semillas Forrajeras Sociedad Anónima Mixta). 2018. Arveja Multipropósito (en línea). Cochabamba, Bolivia. consultado 26 jun. 2024. Disponible en https://www.sefosam.com.bo/pdf/ft-arvejaforrajera.pdf

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2021. Boletín.

Serrano, G. 2013. Dinámica del agua en suka kollus bajo condiciones de drenaje superficial y subsuperficial, en la Estación Experimental de Kallutaca – Laja (en línea). Tesis M.Sc. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 19 de Ago 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/5300/TM-1958.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tarrillo, H. 2005. Manual de producción de forraje verde hidropónico. Segunda Edición. Ed. Forraje hidropónico E.I.R.L. Perú. p. 41

Ticona, B. 2018. Uso eficiente de agua con dos soluciones nutritivas hidropónicas sobre el rendimiento de forraje verde en cebada y avena. (en línea). Tesis M. Sc. La Paz, Bolivia. UMSA. Consultado 16 Ago. 2021. Disponible en https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18372/TM-2546.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina). 2007. Hidroponía (en línea). Lima, Perú. Consultado 10 de octubre de 2023. Disponible en www.lamolina.edu.pe/hidroponia/

Valdes, N. 2017. Rendimiento en vaina verde de variedad de arveja (*Pisum sativum* L.) con y sin tutor (en línea). Tesis. Ing. Agr. Ayacucho, Perú. UNSCH. Consultado 15 jun. 2024. Disponible en https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1817254e-5ec4-47c1-97c7-3e194a53b1d9/content

Vargas, A. 2015. Rendimiento de sorgo (*Sorghum bicolor*) y cebada (*Hordeum vulgare*) bajo tres densidades de siembra como forraje verde hidropónico. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. UMSA. 83 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Impermeabilización de bandejas

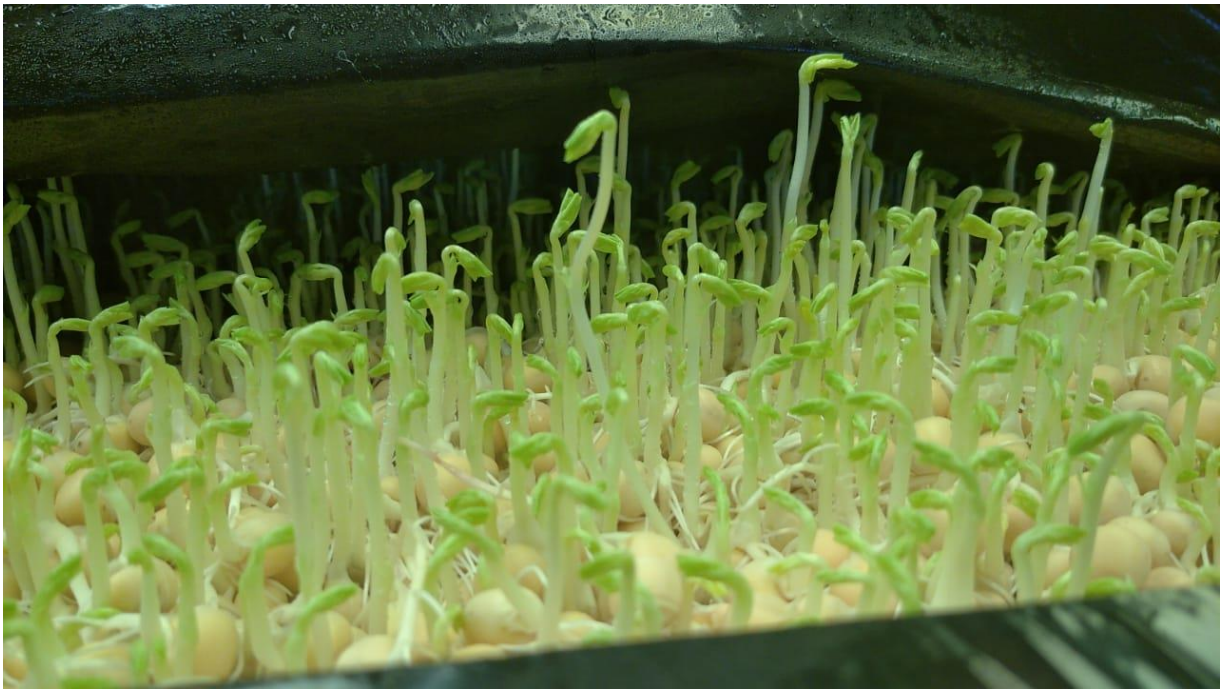
Anexo 2. Desinfección de bandejas

Anexo 3. Lavado y desinfección de semillas

Anexo 4. Siembra de FVH

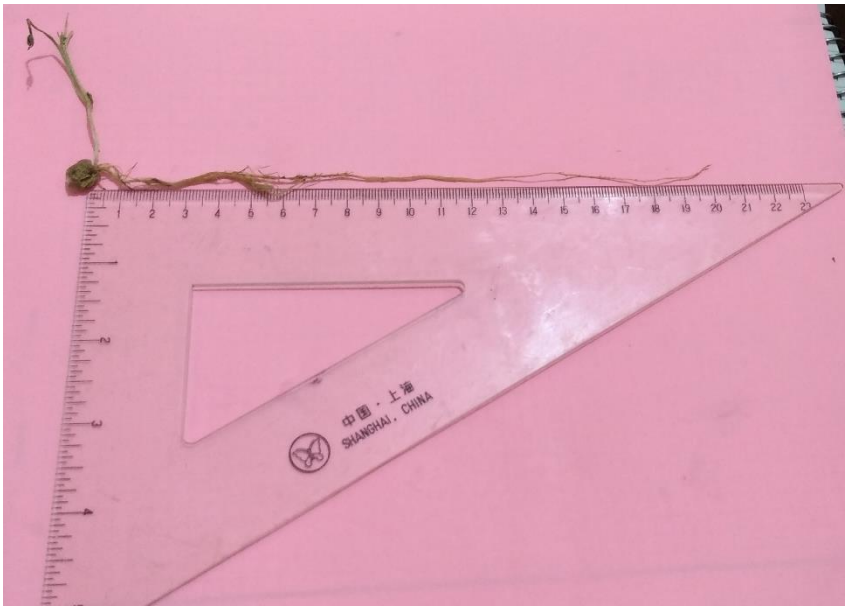
Anexo 5. Traslado de bandejas al estante

Anexo 6. Germinación de semillas y culminación de la fase oscura

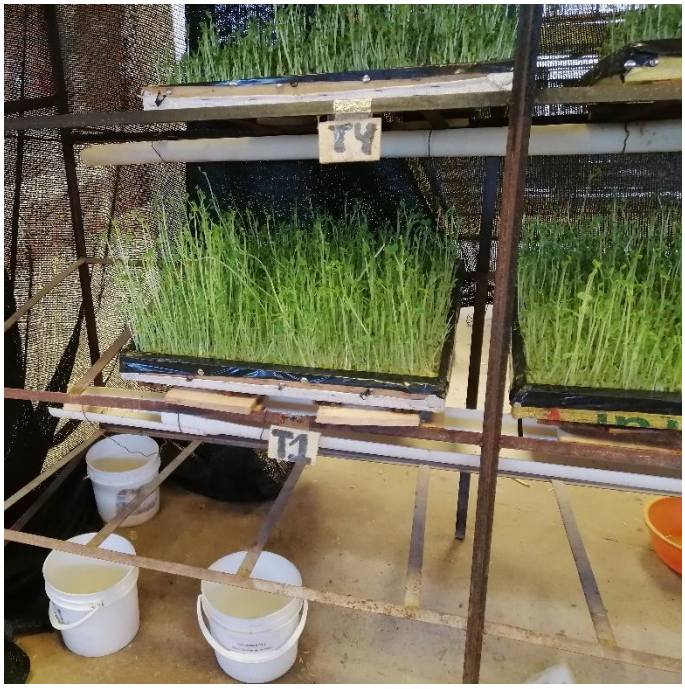


Anexo 7. Toma de datos altura de planta

Anexo 8. Toma de datos longitud de raíz



Anexo 9. Recolección de agua de riego excedente



Anexo 10. Culminación de fase de luminosidad

Anexo 11. Cosecha de FVH

Anexo 12. Alimentación con FVH

Anexo 13. Análisis bromatológico

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y FORESTALES "MARTIN CARDENAS"

DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA Y PRODUCCION ANIMAL
"LABORATORIO DE NUTRICION ANIMAL"

ANALISIS BROMATOLOGICO

Interesado	Graciela Maribel Chavez Mamani	**REPLNA** 5/2022
Institución	Trabajo de tesis UPEA	
Fecha	Cochabamba, 22 de abril 2022	Hoja 1/1

N.° Muestra	Nombre de la Muestra	% Proteína Bruta*	% Materia Seca Total*	% Ceniza*	% Extracto Etéreo*	% Fibra Cruda*	% E.L.N.*	% Calcio* (Ca++)
23-22	Arveja forrajera (hidropónico) ***Pisum sativum L.***	25,79	93,51	5,22	1,60	23,30	37,6	

(*) Análisis realizado en muestra parcialmente seca

Ing. Thelma Caballero B.
Resp. Laboratorio Nutrición Animal
FCAPyF- UMSS

FAC. CS. AGRICOLAS FORESTALES U.M.S.S. LABORATORIO NUTRICIÓN ANIMAL Cochabamba - Bolivia

Laboratorio de Nutrición Animal
Faculta de Ciencias Agrícolas y Pecuarias
Av. Petrolera km 5Tel/Fax (591) 4 4762385