

Producción hidropónica de forraje verde de *Hordeum vulgare* y desempeño productivo de *Cavia porcellus*

Hydroponic production of Hordeum vulgare green fodder and productive performance of Cavia porcellus

Diego Ygor Chocano Rossi ^a 

✉ diehochano@virtual.upt.pe

Samir Andres Condori Osco ^a 

Ariadna Celeste Quiroz Almanza ^a 

^a Universidad Privada de Tacna. Tacna, Perú

Palabras clave:

Alimentación animal;
Cebada; Cuyes; Sistemas
hidropónicos

Keywords:

Animal feeding; Barley;
Guinea pigs; Hydroponic
systems

Cómo citar:

Chocano Rossi DY, Condori Osco SA, Quiroz Almanza AC. Producción hidropónica de forraje verde de *Hordeum vulgare* y desempeño productivo de *Cavia porcellus*. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias. 2026; 10 (30). <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i30.503>



Resumen

Contexto: La producción de cuyes (*Cavia porcellus*) constituye una actividad pecuaria de creciente importancia en la seguridad alimentaria de América Latina, particularmente en países andinos como Perú, Ecuador, Bolivia y Colombia.

Objetivo: Evaluar un sistema de forraje verde hidropónico (FVH) de *Hordeum vulgare* mediante el diseño estructural, el modelamiento del requerimiento de semilla y su aplicación en la crianza de *Cavia porcellus* en Tacna, Perú. **Metodología:** Se empleó un diseño completamente al azar con dos tratamientos y tres repeticiones, utilizando 18 cuyes. El tratamiento experimental recibió FVH de cebada más concentrado comercial, mientras que el control fue alimentado con alfalfa más concentrado comercial. Se evaluó el rendimiento forrajero y el desempeño productivo animal.

Resultados: El FVH alcanzó un rendimiento promedio de 6 kg/kg de semilla. Además, el tratamiento con FVH presentó mayor ganancia diaria de peso (16,56 g/día) respecto al control (13,23 g/día), con diferencias significativas ($p = 0,034$).

Conclusiones: Se concluye que el FVH de cebada constituye una alternativa viable para la alimentación de cuyes en condiciones áridas.

Abstract

Context: The production of guinea pigs (*Cavia porcellus*) constitutes a livestock activity of growing importance in the food security of Latin America, particularly in Andean countries such as Peru, Ecuador, Bolivia, and Colombia. **Objective:** To evaluate a hydroponic green forage (HGF) system of *Hordeum vulgare* through structural design, seed requirement modeling, and its application in the rearing of *Cavia porcellus* in Tacna, Peru. **Methodology:** A completely randomized design with two treatments and three replications was employed, using 18 guinea pigs. The experimental treatment received barley HGF plus commercial concentrate, while the control was fed alfalfa plus commercial concentrate. Forage yield and animal productive performance were evaluated. **Results:** The HGF achieved an average yield of 6 kg/kg of seed. Furthermore, the HGF treatment showed a higher daily weight

gain (16.56 g/day) compared to the control (13.23 g/day), with significant differences ($p = 0.034$). **Conclusions:** It is concluded that barley HGF constitutes a viable alternative for feeding guinea pigs under arid conditions.

Introducción

La *Cavia porcellus* es una especie reconocida por su eficiencia reproductiva, con ciclos de gestación de 67 días y camadas de dos a cuatro crías y su alto valor proteico (20,5 % de proteína cruda en la canal), representa una fuente accesible de proteína animal para poblaciones rurales y periurbanas de la región ⁽¹⁾. En Perú, la población de cuyes supera los 16 millones de ejemplares, con una producción anual cercana a 20 000 toneladas de carne, cifra que refleja su relevancia económica y social ⁽²⁾. El consumo per cápita en las zonas altoandinas alcanza los 5 kg anuales, posicionando a esta especie como un componente estratégico de la canasta básica familiar. Sin embargo, la expansión de esta actividad enfrenta limitaciones estructurales asociadas a la disponibilidad de alimentos balanceados y forrajes de calidad, especialmente en regiones donde las condiciones ambientales restringen la productividad agrícola convencional.

La escasez hídrica constituye uno de los principales factores limitantes para la producción forrajera tradicional en las zonas áridas de la costa peruana. Tacna, ubicada en el extremo sur del país, presenta un clima clasificado como BWk (árido frío) según la clasificación de Köppen, con temperatura media anual de 18,5 °C y precipitaciones inferiores a 50 mm/año ⁽³⁾. El valle de Tacna depende casi exclusivamente de las aguas del río Caplina y de la recarga del acuífero del mismo nombre, cuyos niveles descendieron críticamente en la última década como consecuencia de la extracción no regulada y la reducción de los caudales de avenida.

En este contexto, la producción de alfalfa (*Medicago sativa*), forraje convencionalmente empleado en la alimentación de cuyes, demanda volúmenes de agua que oscilan entre 12 000 y 18 000 m³/ha/año, magnitud difícil de sostener en un escenario de estrés hídrico creciente. La situación se agrava por la sobreexplotación de acuíferos y la reducción progresiva de caudales de riego ⁽⁴⁾, lo que impone la necesidad de buscar alternativas tecnológicas que optimicen el uso del agua en la producción forrajera y garanticen la sostenibilidad de los sistemas productivos locales.

El forraje verde hidropónico (FVH) surge como una alternativa tecnológica viable para la producción de biomasa vegetal en condiciones controladas, con un consumo de agua significativamente menor al de los sistemas convencionales. Esta técnica, basada en la germinación y crecimiento temprano de granos de cereales sin suelo, permite obtener forraje de alta calidad nutricional en ciclos cortos de 10 a 14 días, independientemente de las condiciones climáticas externas ⁽⁵⁾.

El desarrollo de sistemas hidropónicos para producción forrajera ha experimentado un crecimiento acelerado en la última década, con experiencias documentadas en regiones áridas de Jordania, Arabia Saudita, Túnez, Emiratos Árabes Unidos y el norte de México. La cebada (*Hordeum vulgare*) es uno de los cereales más empleados en sistemas hidropónicos por su rápido crecimiento, su elevado coeficiente de conversión de semilla a biomasa y su aceptable perfil nutricional. Estudios realizados en regiones áridas de Medio Oriente y el Norte de África han reportado rendimientos que fluctúan entre 4 y 8 kg de FVH por kilogramo de semilla. El consumo de agua oscila entre 2 y 4 L/kg de forraje producido, valores que representan entre el 5 % y el 10 % del agua requerida por la alfalfa cultivada en campo abierto ^(6,7). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha promovido activamente esta tecnología como parte de sus estrategias de adaptación al cambio climático en zonas de estrés hídrico, reconociendo su potencial para fortalecer la resiliencia de los sistemas pecuarios familiares ⁽²⁾.

La inclusión de FVH en la alimentación de cuyes ha sido explorada en diversos estudios con resultados prometedores. Cuenca et al. ⁽⁸⁾, reportaron que la sustitución parcial del forraje convencional por FVH de cebada, combinado con microorganismos eficientes, mejoró los parámetros productivos y hematológicos en cuyes de engorde, alcanzando pesos finales superiores al grupo testigo. Aguilar et al. ⁽⁹⁾, encontraron que los cuyes alimentados con FVH de cebada combinado con concentrado alcanzaron pesos totales significativamente superiores a los del grupo testigo alimentado exclusivamente con forraje convencional, demostrando el efecto sinérgico de esta combinación dietética.

Por su parte, Cayllahua et al. ⁽¹⁰⁾, demostraron que la sustitución gradual de alfalfa por germinado de cebada en raciones de cuyes en la etapa de crecimiento produjo ganancias de peso comparables o superiores, dependiendo del nivel de inclusión, sin afectar negativamente la salud digestiva de los animales. Hinojosa et al. ⁽¹¹⁾, evaluaron cuatro sistemas de alimentación en cuyes y encontraron que aquellos que incluían FVH presentaron mejores indicadores de conversión alimenticia y ganancia de peso, con diferencias estadísticamente significativas respecto a las dietas convencionales. Núñez et al. ⁽¹²⁾, compararon avena forrajera en corte e hidropónica y observaron que el FVH produjo un rendimiento superior en términos de ganancia diaria de peso y eficiencia de conversión. Taboada et al. ⁽¹³⁾, evaluaron el desempeño y el valor nutricional del FVH de cebada en la alimentación de cuyes en condiciones de la costa central del Perú, confirmando su potencial como sustituto parcial de forrajes convencionales con una relación beneficio-costos favorable.

A pesar de la evidencia acumulada, persisten vacíos de conocimiento que limitan la adopción masiva del FVH en sistemas productivos de pequeña escala. En particular, no se dispone de modelos predictivos que permitan estimar con precisión el requerimiento de semilla en función del número de animales, la duración del ciclo productivo y el consumo esperado de forraje. La ausencia de estas herramientas matemáticas dificulta la planificación de la producción, el dimensionamiento de las instalaciones y la escalabilidad del sistema hacia unidades productivas de mayor tamaño.

En consecuencia, el presente estudio tuvo como objetivos: (i) evaluar la producción de forraje verde hidropónico de *Hordeum vulgare* en un sistema de bajo costo implementado en Tacna, Perú; (ii) determinar el efecto de la inclusión de FVH como reemplazo parcial de alfalfa sobre el desempeño productivo de *Cavia porcellus* en condiciones áridas; y (iii) formular un modelo matemático predictivo del requerimiento de semilla para la planificación de la producción forrajera.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el distrito de Tacna, provincia de Tacna, Perú, ubicado a 18°00'33" S y 70°14'55" O, a 560 msnm. La zona presenta un clima árido frío (BWk) según la clasificación de Köppen, con temperatura media anual de 18,5 °C, precipitación total anual inferior a 50 mm y humedad relativa promedio de 65 %. El periodo experimental comprendió 61 días: 12 días para la producción y estabilización del sistema hidropónico y 49 días para la evaluación del desempeño productivo de los cuyes.

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con dos tratamientos y tres repeticiones. Cada unidad experimental consistió en una poza con tres cuyes machos destetados, totalizando 18 animales. Los tratamientos fueron: T1, alimentación con forraje verde hidropónico de cebada más concentrado comercial; y T2, alimentación con alfalfa fresca más concentrado comercial (testigo). El periodo experimental incluyó 7 días de adaptación a la dieta y 42 días de evaluación, con mediciones semanales de peso vivo durante 7 semanas consecutivas.

Sistema hidropónico

Se construyó un sistema hidropónico vertical de acero galvanizado con una estructura de germinación cerrada y oscura para los primeros tres días del ciclo. La estructura de producción constó de cuatro niveles con pendiente del 10 % para facilitar el drenaje del excedente de riego y evitar la acumulación de agua en la base de las bandejas. Cada nivel alojó bandejas de plástico de 0,6 × 0,4 m (0,24 m² de superficie por bandeja), perforadas en la base para permitir el drenaje. La distancia entre niveles fue de 0,4 m, lo que permitió un adecuado desarrollo vertical del forraje y facilitó las labores de mantenimiento y cosecha.

El sistema de riego comprendió tubería de polietileno de 16 mm de diámetro con nebulizadores en la etapa de germinación y aspersores en la etapa de producción, accionados por una bomba de 0,5 HP (373 W) con un caudal de 35 L/min. La frecuencia de riego se programó a seis eventos diarios de 3 minutos cada uno, distribuidos uniformemente durante el fotoperiodo de 12 horas luz. El agua utilizada para el riego provino de la red pública de Tacna y fue analizada previamente para determinar sus parámetros fisicoquímicos: pH 7,2; conductividad eléctrica 0,85 dS/m; sólidos disueltos totales 425 mg/L, valores considerados aptos para la producción hidropónica de forraje.

Modelo matemático de requerimiento de semilla

Se formuló un modelo matemático para estimar el requerimiento de semilla en función del consumo estimado de FVH y el factor de conversión del sistema. La ecuación general del modelo se expresa como:

$$S = C / (R \times F)$$

donde S es la cantidad de semilla requerida (kg), C es el consumo total estimado de FVH (kg), R es el rendimiento del sistema hidropónico (kg de FVH/kg de semilla) y F es un factor de ajuste por eficiencia de germinación (adimensional, entre 0,85 y 1,00).

El consumo total estimado se calcula como:

$$C = n \times c \times d$$

donde n es el número de animales, c es el consumo diario de FVH por animal (kg/día) y d es la duración del periodo de alimentación (días).

La relación entre el área de producción requerida y la cantidad de semilla se expresa como:

$$A = S / \rho$$

donde A es el área total de bandejas (m²) y ρ es la densidad de siembra (kg de semilla/m²).

Finalmente, el número de bandejas necesarias se determina mediante:

$$N = A / a$$

donde a es el área de cada bandeja (0,24 m²).

Los parámetros de consumo de FVH considerados para la formulación del modelo matemático se presentan en la Tabla 1, donde se incluyen los periodos de crecimiento, el consumo estimado de FVH y las constantes de requerimiento de semilla utilizadas durante el análisis.

Tabla 1. Periodos de crecimiento del cuy y consumo de FVH

Periodo	Días	Consumo FVH (g)	$k_i = C_i/R$ (g semilla/día/cuy)	Ponderación (r_i)
1	1 – 10	75	12,5	0,0435

Periodo	Días	Consumo FVH (g)	$k_i = C_i/R$ (g semilla/día/cuy)	Ponderación (r_i)
2	11 – 20	100	16,7	0,0580
3	21 – 40	150	25,0	0,1739
4	41 – 90	250	41,7	0,7246
Total	90 días	—	—	1,0000

Nota. Ponderación r_i calculada como la fracción del consumo total acumulado de FVH en cada periodo. FVH = forraje verde hidropónico.

Producción de FVH

Se empleó semilla de cebada (*Hordeum vulgare*) adquirida en el mercado local de Tarata y Puno, departamento de Puno, Perú. La semilla se sometió a un proceso de selección manual para eliminar granos partidos, impurezas y materiales extraños. Posteriormente, se desinfectó mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 1 % (v/v) durante 5 minutos, seguido de tres enjuagues con agua potable. El remojo se realizó en agua potable durante 24 horas con cambios de agua cada 8 horas, seguido de oreo por 24 horas en superficie plana con ventilación natural.

La siembra se realizó a una densidad de 500 g de semilla previamente hidratada por bandeja de 0,6 × 0,4 m, distribuyendo el grano en una capa uniforme de aproximadamente 1,5 cm de espesor. Durante los primeros tres días, las bandejas permanecieron en la cámara de germinación en condiciones de oscuridad total y temperatura ambiente (18–20 °C), con riego por nebulización cada 6 horas para mantener la humedad superficial sin desplazar las semillas. A partir del tercer día, las bandejas se trasladaron a los niveles de producción con exposición lumínica natural (radiación fotosintéticamente activa promedio de 325 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ medida a nivel de las bandejas) y riego por aspersión seis veces al día.

Durante todo el ciclo, se aplicó una solución nutritiva compuesta por fertilizante comercial NPK 20-20-20 (20 % N, 20 % P_2O_5 , 20 % K_2O) más micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo) a una concentración de 1 g/L de agua, preparada diariamente y aplicada una vez al día en el primer riego de la mañana. La temperatura y la humedad relativa dentro del área de producción se registraron diariamente mediante un data logger (marca HOBO, modelo UX100-011), registrándose un promedio de $22,4 \pm 2,8$ °C y $68,3 \pm 5,1$ % de humedad relativa durante el periodo de producción. La cosecha se realizó al día 12 del ciclo de producción, momento en el cual el forraje alcanzó una altura promedio de 20–25 cm.

Alimentación

Los animales del tratamiento T1 recibieron FVH de cebada ad libitum más concentrado comercial para cuyes (proteína cruda 18 %, fibra cruda 8 %, grasa 3 %, ceniza 8 %) a razón de 30 g/animal/día, distribuido en dos raciones diarias (mañana y tarde). El tratamiento T2 recibió alfalfa fresca ad libitum picada más el mismo concentrado comercial en igual cantidad y frecuencia. El consumo de forraje se registró diariamente mediante diferencia entre la cantidad ofrecida y el residuo no consumido en cada unidad experimental.

Variables evaluadas

Las variables de respuesta fueron: peso vivo inicial (g), peso vivo final (g), ganancia total de peso (g), ganancia diaria de peso (GDP, g/día), consumo de forraje (g/animal/día) y rendimiento del sistema hidropónico (kg de FVH/kg de semilla). El pesaje de los animales se realizó semanalmente con balanza digital de precisión ± 1 g (marca Camry, modelo ACS-30). La ganancia diaria de peso se calculó como la diferencia entre el peso final y el peso inicial dividida por el número de días del periodo de evaluación.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de una vía para un diseño completamente al azar, utilizando el software estadístico R versión 4.3.2 (R Core Team, 2023) con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. El modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde Y_{ij} es la variable respuesta observada en la unidad experimental j del tratamiento i , μ es la media general, τ_i es el efecto del tratamiento i y ε_{ij} es el error experimental. Se verificaron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). Las diferencias entre medias de tratamientos se consideraron significativas cuando el valor de p fue inferior a 0,05.

Resultados

Rendimiento del sistema hidropónico

El sistema implementado permitió la producción continua de forraje verde hidropónico (FVH) de cebada bajo condiciones áridas de Tacna. Durante el proceso experimental se observó un adecuado desarrollo vegetativo del forraje, evidenciándose uniformidad en la germinación y crecimiento de la biomasa vegetal. El rendimiento obtenido del sistema hidropónico fue de aproximadamente 6 kg de FVH por kilogramo de semilla utilizada. La biomasa producida presentó adecuada cobertura radicular y crecimiento homogéneo durante los 12 días de producción.

Los resultados presentados en la Tabla 2 evidencian que el requerimiento de semilla de cebada aumentó progresivamente conforme avanzó el ciclo de crecimiento de los cuyes. Durante los primeros 10 días de evaluación, el consumo total de FVH fue de 6,75 g, requiriéndose aproximadamente 1,13 kg de semilla para abastecer dicho periodo. Entre los días 11 y 20, el requerimiento de semilla se incrementó a 1,50 kg debido al aumento del consumo diario de FVH asociado al crecimiento fisiológico de los animales.

Tabla 2. Requerimiento estimado de semilla por periodo

Periodo	Duración (días)	Consumo FVH total (g)	Semilla requerida (g)	Semilla requerida (kg)
1 (días 1-10)	10	6,750	1,125	1,13
2 (días 11-20)	10	9,000	1,500	1,50
3 (días 21-40)	20	27,000	4,500	4,50
4 (días 41-49)	9	20,250	3,375	3,38
Total	49	63,000	10,500	10,50

Nota. FVH = forraje verde hidropónico.

El mayor requerimiento de semilla se registró durante el tercer periodo experimental (días 21-40), donde el consumo total de FVH alcanzó 27,00 g y demandó aproximadamente 4,50 kg de semilla. Asimismo, durante los últimos nueve días del experimento (días 41-49), se requirieron 3,38 kg de semilla para cubrir un consumo total de 20,25 g de FVH. En términos acumulados, el sistema experimental demandó 10,50 kg de semilla para alimentar 9 animales durante 49 días. Estos resultados evidencian que el incremento del consumo de FVH se concentra en las últimas etapas del crecimiento animal, aspecto relevante para la planificación de la producción hidropónica y el abastecimiento continuo del sistema.

Evolución del peso vivo

Respecto a la evaluación productiva durante las siete semanas, se registró un incremento progresivo del peso vivo en ambos tratamientos. Sin embargo, los animales alimentados con FVH de cebada más concentrado comercial presentaron mayores valores de crecimiento respecto al tratamiento convencional basado en alfalfa más concentrado comercial. Los resultados de la Figura 1 muestran que ambos tratamientos iniciaron el experimento con pesos promedio similares, registrándose 279 g para T1 y 275 g para T2. Esta diferencia inicial de solo 3,9 g indica que los grupos experimentales presentaban condiciones homogéneas al inicio del estudio.

A partir de la primera semana comenzó a observarse una tendencia de crecimiento superior en el tratamiento alimentado con FVH de cebada. Durante la primera semana, la diferencia entre tratamientos aumentó a 26,4 g, incrementándose progresivamente durante todo el periodo experimental. En la cuarta semana, el tratamiento T1 alcanzó un promedio de 745 g, mientras que el tratamiento T2 registró 648 g, evidenciándose una diferencia de 96,5 g. Posteriormente, hacia la séptima semana, el tratamiento T1 alcanzó un peso promedio final de 1091 g, superando en 166,9 g al tratamiento T2, cuyo peso promedio final fue de 924 g. Además, la diferencia progresiva observada semana tras semana sugiere un efecto acumulativo positivo del FVH sobre el desempeño productivo de los animales.

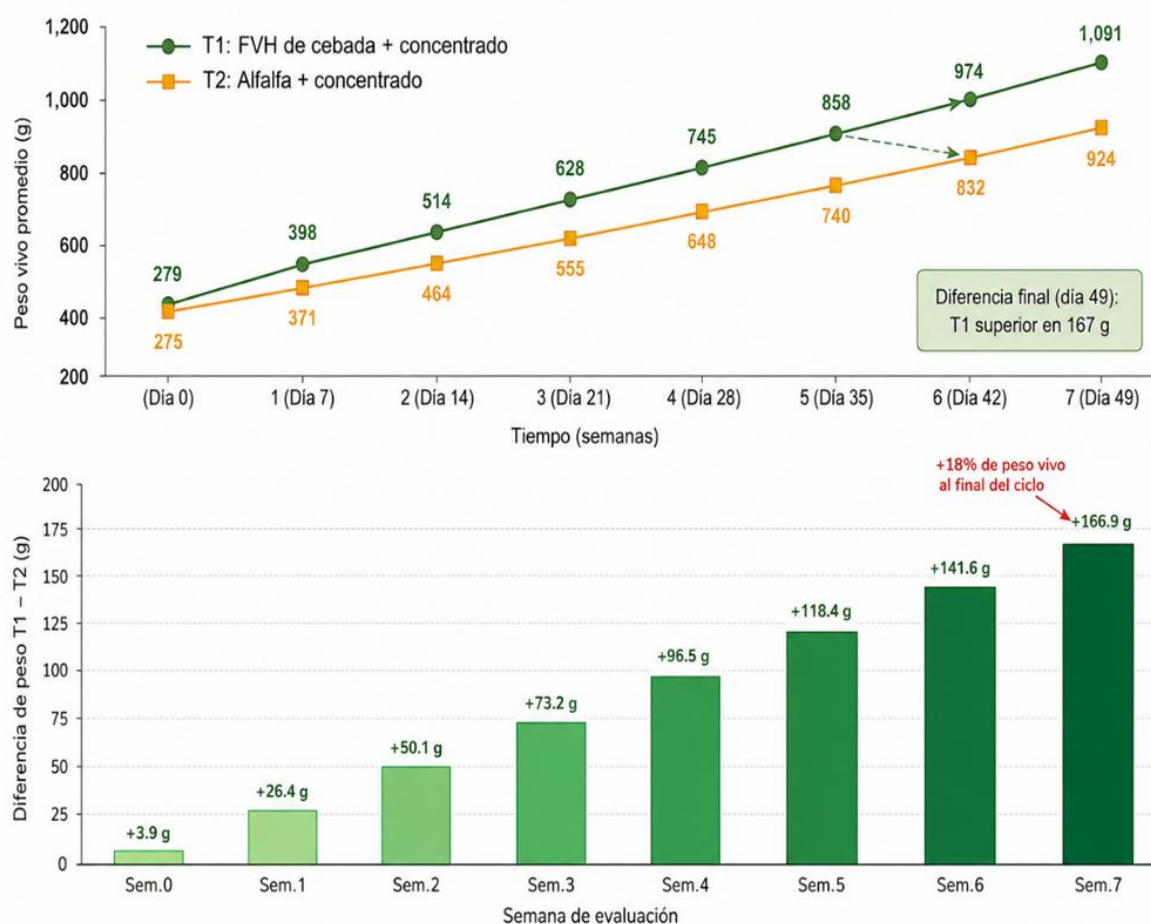


Figura 1. Curva de crecimiento semanal de *Cavia porcellus* alimentada con FVH de *Hordeum vulgare* más concentrado (T1) versus alfalfa más concentrado (T2) durante 49 días en condiciones áridas. Eje X: semanas de evaluación (1 a 7). Eje Y: peso vivo promedio (g). Las barras verticales representan la desviación estándar de la media ($n = 9$ por tratamiento). La línea continua (T1) muestra una pendiente ascendente más pronunciada a partir de la semana 3.

Indicadores productivos

La Tabla 3 evidencia diferencias importantes entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T1 presentó un peso final promedio de 1090,5 g, mientras que el tratamiento T2 alcanzó 923,6 g, registrándose una diferencia absoluta de 166,9 g a favor del sistema alimentario basado en FVH de cebada. Respecto a la ganancia total de peso, los animales alimentados con FVH lograron una ganancia promedio de 811,3 g durante los 49 días experimentales, mientras que el tratamiento con alfalfa alcanzó 648,3 g, obteniéndose una diferencia acumulada de 163,0 g.

Tabla 3. Indicadores de ganancia de peso por tratamiento

Indicador	T1: FVH + Conc.	T2: Alfalfa + Conc.	Diferencia
Peso inicial promedio (g)	279,2	275,3	+3,9
Peso final promedio (g)	1 090,5	923,6	+166,9
Ganancia total promedio (g)	811,3	648,3	+163,0
Ganancia diaria promedio (g/día)	16,56	13,23	+3,33
Desviación estándar (g/día)	1,61	0,85	—

Nota. T1 = tratamiento con forraje verde hidropónico (FVH) de cebada más concentrado comercial; T2 = tratamiento con alfalfa fresca más concentrado comercial (testigo). GDP = ganancia diaria de peso.

Asimismo, la ganancia diaria promedio fue superior en el tratamiento T1, registrándose 16,56 g/día frente a 13,23 g/día obtenidos en el tratamiento T2. La diferencia de 3,33 g/día representa un incremento productivo considerable bajo las condiciones evaluadas. En relación con la variabilidad de los datos, el tratamiento T1 presentó una desviación estándar de 1,61 g/día, mientras que el tratamiento T2 mostró una desviación estándar menor (0,85 g/día). Aunque el tratamiento con FVH presentó una ligera mayor dispersión en los valores de ganancia diaria, los resultados generales evidencian un desempeño productivo superior respecto al tratamiento convencional.

Análisis de varianza

Los resultados de la evaluación experimental evidenciaron que el tratamiento alimentado con forraje verde hidropónico (FVH) de cebada más concentrado comercial presentó mayores valores de ganancia diaria de peso en las tres repeticiones experimentales respecto al tratamiento basado en alfalfa más concentrado comercial. El tratamiento T1 registró ganancias diarias de 18,36, 15,24 y 16,08 g/día, obteniendo una media de $16,56 \pm 1,61$ g/día, mientras que el tratamiento T2 presentó valores de 14,16, 12,49 y 13,05 g/día, con una media de $13,23 \pm 0,85$ g/día. La gran media experimental fue de 14,90 g/día. El análisis de varianza (ANOVA) mostró una suma de cuadrados para tratamientos de 16,58 y un cuadrado medio de 16,58, mientras que el error experimental presentó una suma de cuadrados de 6,65 y un cuadrado medio de 1,66. Asimismo, el valor de F calculado fue de 9,98, superior al valor crítico de 7,71 para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Del mismo modo, el valor de probabilidad obtenido fue de $p = 0,034$, indicando diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados.

Discusión

Rendimiento del sistema hidropónico en contexto

El rendimiento de 6,0 kg de FVH por kilogramo de semilla obtenido en el presente estudio se encuentra dentro del rango reportado por la literatura internacional. Al-Karaki y Al-Hashimi⁽⁶⁾, reportaron rendimientos entre 5,5

y 7,2 kg/kg para diferentes cultivares de cebada en sistemas hidropónicos en Jordania, hallazgos consistentes con estudios previos sobre variedades de cebada en condiciones controladas⁽¹⁴⁾, mientras que Bouajila et al. ⁽¹⁵⁾, obtuvieron valores de 5,8 a 6,5 kg/kg en Túnez bajo condiciones de estrés térmico. Elmulthum et al.⁽⁷⁾, trabajando en Arabia Saudita, registraron rendimientos de 6,2 kg/kg, lo que confirma la eficiencia productiva de los sistemas hidropónicos en condiciones áridas. Estas coincidencias sugieren que el sistema implementado en Tacna alcanzó niveles de eficiencia comparables a los de sistemas reportados en otras regiones áridas del mundo, incluyendo aquellos que utilizan aguas residuales tratadas para la producción hidropónica de forraje ⁽¹⁶⁾.

Este rendimiento se encuentra dentro de los rangos reportados para sistemas hidropónicos de producción de cebada forrajera bajo condiciones controladas ^(15,7), y puede atribuirse a las condiciones controladas de humedad, germinación y riego implementadas durante el proceso productivo. Del mismo modo, los sistemas hidropónicos favorecen la eficiencia en el uso del agua debido a la reducción de pérdidas por infiltración y evaporación respecto a los sistemas agrícolas convencionales ^(15,7).

Mecanismo biológico del efecto del FVH

La ganancia diaria de peso superior en el grupo T1 (16,56 vs. 13,23 g/día; $p = 0,034$) puede explicarse por varios mecanismos biológicos. En primer lugar, el FVH de cebada presenta una mayor digestibilidad de la materia seca en comparación con la alfalfa, debido a su menor contenido de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA)⁽¹⁷⁾. Dung et al.⁽¹⁸⁾ demostraron que el contenido de FDN en el grano germinado de cebada se reduce hasta un 22 % respecto al grano seco, lo que explica la mayor digestibilidad del forraje hidropónico.

En segundo lugar, el FVH ofrece una mayor palatabilidad respecto a la alfalfa, especialmente en condiciones de estrés térmico. Este hallazgo coincide con lo reportado por Elfaki et al.⁽¹⁷⁾, quienes observaron que la digestibilidad in vitro del FVH de cebada fue significativamente superior a la de forrajes convencionales, incluso cuando el consumo de materia seca fue menor.

En tercer lugar, los tejidos jóvenes del FVH mantienen una actividad enzimática elevada, particularmente de α -amilasa y fitasa, que puede contribuir a una mejor utilización de los nutrientes del concentrado complementario ⁽¹⁹⁾. Este efecto sinérgico entre el FVH y el concentrado comercial podría explicar en parte la magnitud de las diferencias observadas, superiores a las reportadas en estudios donde el FVH se suministró como único componente forrajero.

Comparación con estudios previos en cuyes

Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados por Taboada ⁽²⁰⁾, quien encontró GDP de 15,8 g/día en cuyes alimentados con FVH de cebada frente a 12,9 g/día con alfalfa en un estudio realizado en Lima, Perú. Hinojosa et al. ⁽¹¹⁾, reportaron GDP entre 14,2 y 16,1 g/día para dietas que incluían FVH, valores que se alinean con el rango observado en el T1. Cuenca et al. ⁽⁸⁾, registraron GDP de 14,8 g/día en cuyes suplementados con FVH y microorganismos eficientes, ligeramente inferior al valor del presente estudio.

Por otro lado, Núñez et al. ⁽¹²⁾, reportaron GDP de 15,2 g/día para cuyes alimentados con avena hidropónica. Aguilar et al. ⁽⁹⁾, observaron pesos finales de 1 042 g en cuyes alimentados con FVH más concentrado, ligeramente inferiores a los 1 090,5 g del T1. Cayllahua et al. ⁽¹⁰⁾, encontraron que la sustitución del 50 % de alfalfa por germinado de cebada produjo GDP de 14,5 g/día.

Adicionalmente, Bonifaz et al. ⁽²¹⁾, evaluaron el FVH como alternativa nutricional en cuyes en la zona costera de Ecuador y reportaron GDP de 13,9 g/día. Estudios en otras especies han reportado hallazgos similares: Gebremedhin et al. ⁽²²⁾, encontraron que conejos alimentados con FVH de cebada alcanzaron GDP un 18 %

superiores a los del grupo testigo. Abdel-Wareth et al. ⁽²³⁾, observaron incrementos del 18,6 % en la ganancia diaria de peso en conejos con 25 % de FVH en la dieta. El-Mesery et al. ⁽²⁴⁾, confirmaron mejoras en el rendimiento productivo y la calidad de la canal en conejos. En rumiantes, Carrillo et al. ⁽²⁵⁾, demostraron mejoras en producción y calidad de leche de cabras suplementadas con FVH de maíz, Agius et al. ⁽²⁶⁾, en vacas lecheras, y Sadeghi et al. ⁽²⁷⁾, en terneras Holstein. Peerzada et al. ⁽²⁸⁾ y Velázquez-González et al. ⁽²⁹⁾, concluyeron que el FVH constituye una alternativa forrajera sostenible y viable para mitigar los efectos del cambio climático en la producción pecuaria.

Implicaciones para zonas áridas

La eficiencia hídrica del sistema hidropónico representa una ventaja comparativa relevante para regiones con disponibilidad limitada de agua ⁽³⁰⁾. Bouadila et al. ⁽³¹⁾, evaluaron un sistema de invernadero hidropónico en Túnez y concluyeron que la tecnología permite un ahorro significativo de agua. Elzanaty et al. ⁽³²⁾ reportaron que la eficiencia en el uso del agua de cebada hidropónica fue sustancialmente superior a la de cebada en suelo bajo clima árido. Limache et al. ⁽³⁾, documentaron la crítica situación hídrica del valle de Tacna, donde la demanda supera la oferta disponible en los meses de estiaje.

La adopción del sistema hidropónico propuesto no requiere grandes extensiones de tierra ni inversiones de capital elevadas. Shrivastava et al. ⁽³³⁾, demostraron que sistemas hidropónicos de bajo costo pueden producir forraje de calidad para pequeños y medianos productores. El modelo matemático formulado permite planificar la producción en función del número de animales y la duración del ciclo, facilitando la escalabilidad del sistema. Aguilar ⁽³⁴⁾ y Telles ⁽¹⁾, ya habían identificado la necesidad de herramientas de planificación para la producción de FVH en el valle de Tacna.

Limitaciones

El presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse. En primer lugar, el tamaño muestral ($n = 18$) es reducido, aunque estadísticamente suficiente para detectar diferencias significativas entre tratamientos. En segundo lugar, el estudio comprendió un solo ciclo de producción y evaluación. En tercer lugar, se empleó una sola dosis de inclusión de FVH (reemplazo total de alfalfa). Asimismo, no se realizaron análisis de calidad nutricional del FVH ni del perfil de ácidos grasos de la carne. Finalmente, no se realizó un análisis económico detallado que considere los costos de inversión, operación y mantenimiento del sistema.

Líneas futuras de investigación

Sería relevante evaluar diferentes niveles de inclusión de FVH (25 %, 50 %, 75 % y 100 %) para determinar la dosis óptima. Se requiere un análisis económico completo con indicadores como VAN, TIR y periodo de recuperación. Estudios multicológicos en costa, sierra y selva permitirían validar la reproducibilidad de los resultados. Sería igualmente relevante investigar el efecto del FVH sobre la calidad de la canal y parámetros reproductivos. Por último, la incorporación de sensores de bajo costo y sistemas de control automatizado podría mejorar la eficiencia del sistema y reducir los costos operativos ⁽²⁴⁾.

Conclusiones

El sistema hidropónico de producción de forraje verde de *Hordeum vulgare* implementado en condiciones áridas de Tacna demostró ser viable técnicamente, con un rendimiento de 6 kg de FVH por kilogramo de semilla, lo que evidencia su potencial como alternativa forrajera en zonas con limitada disponibilidad hídrica.

El modelo matemático de requerimiento de semilla formulado constituye una herramienta funcional para la planificación de la producción forrajera en sistemas de pequeña escala, permitiendo estimar la cantidad de semilla necesaria en función del número de animales y de los periodos de crecimiento de *Cavia porcellus*.

La inclusión de FVH de cebada en la dieta de *Cavia porcellus* produjo una ganancia diaria de peso significativamente superior (16,56 g/día; $p = 0,034$) en comparación con la dieta basada en alfalfa (13,23 g/día), con una diferencia de 166,9 g en el peso final a las siete semanas.

El modelo productivo evaluado es transferible a sistemas de agricultura familiar en regiones con limitación hídrica, contribuyendo a la seguridad alimentaria de comunidades rurales en Tacna y zonas áridas similares de la costa peruana.

Acerca de

Financiamiento: El estudio fue financiado por el Círculo de Investigación "Karpe Diem" de la Universidad Privada de Tacna, mediante Resolución N.º 048-CF-2024-FAING/UPT.

Contribución de autores (CRediT): Diego Ygor Chocano Rossi: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Investigación, Redacción (borrador original). Samir Andres Condori Osco: Investigación, Curación de datos, Redacción (revisión y edición). Ariadna Celeste Quiroz Almanza: Investigación, Curación de datos, Redacción (revisión y edición).

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: El estudio cumplió con los principios de bienestar animal para la experimentación con *Cavia porcellus* establecidos por la normativa peruana (Ley N.º 30407). El protocolo experimental fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Privada de Tacna.

Historia del artículo: Artículo recibido 10 de junio 2026 | Aceptado 07 de julio 2026 | Publicado 16 de septiembre 2026

Referencias

1. Trelles Velásquez RP. Evaluación de índices productivos en la crianza del cuy (*Cavia porcellus*) en las granjas del valle viejo de Tacna [tesis de licenciatura]. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; 2010. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB_e703e370ce45b89862d0b5ab7b9ba842
2. Ghorbel R, Koşum N. Hydroponic fodder production: an alternative solution for feed scarcity. 6th International Students Science Congress Proceedings Book; 2022. <https://doi.org/10.52460/issc.2022.005>
3. Limache Sandoval E, Choque Apaza V, Piaggio Canivillo MA. Propuesta de programa para la optimización de los recursos hídricos en zonas áridas de Tacna, Perú. Rev Univ Soc. 2021;13(4):521-535. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2199>
4. Yahyaei M, Talebi B. Hydroponic fodder for livestock production and productivity: a review. Greenhouse Plant Prod J. 2024;1(3):1-12. <https://doi.org/10.61186/gppj.1.3.1>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forraje verde hidropónico: manual técnico. Santiago de Chile: FAO; 2001. <https://www.fao.org/3/a-s8946s.pdf>
6. Al-Karaki GN, Al-Hashimi M. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. ISRN Agron. 2012;2012:1-5. <https://doi.org/10.5402/2012/924672>
7. Elmulthum NA, Zeineldin FI, Al-Khateeb SA, et al. Water use efficiency and economic evaluation of the hydroponic versus conventional cultivation systems for green fodder production in Saudi Arabia. Sustainability. 2023;15(1):822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>

8. Cuenca MDC, Quinteros WO, Flores FR, Campos NDC. Impacto de forraje hidropónico y microorganismos eficientes en cuyes: parámetros productivos, hematológicos y bioquímicos nutricionales. *Rev Alfa*. 2023;7(21):573-582. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.238>
9. Aguilar Condori IM, Palza Chambe EI, Condor Lazo NAM, Limache Ortiz IV, Argota Pérez G. Ingeniería tecnológica de alimentación para el rendimiento de peso total de cuyes, Tacna-Perú. *Campus*. 2024;29(37):59-68. <https://doi.org/10.24265/campus.2024.v29n37.03>
10. Cayllahua CF, Condori DU, Cordero AG, Veliz M, Contreras JL. Sustitución gradual de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) por el germinado de cebada (*Hordeum vulgare*) en raciones de cuyes (*Cavia porcellus* L.) en la etapa de crecimiento. *Rev Complut Cienc Vet*. 2015;9(2):7-21. https://doi.org/10.5209/rev_rccv.2015.v9.n2.49601
11. Hinojosa RA, Yzarra A, Rojas G. Comportamiento productivo en cuyes bajo el efecto de cuatro sistemas de alimentación. *Rev Alfa*. 2022;6(16):178-185. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i16.160>
12. Núñez OP, Guerrero JR, Borja BE, Vaca C. Comportamiento de los índices productivos en cuyes utilizando avena de corte e hidropónica. *Bionatura*. 2023;8(3):1-9. <https://doi.org/10.21931/rb/2023.08.03.4>
13. Taboada VH, Sarria JA, Cruz JA, Huamaní D, Buendía MA. Desempenho e valor nutricional da forragem hidropônica de cevada verde na alimentação de porquinhos-da-índia. *Rev Acad Ciênc Anim*. 2024;22:e22010. <https://doi.org/10.7213/acad.2024.22010>
14. Gümüş H, Kowalczyk-Vasilev E. Effect of different seed density planting on biomass production and barley fodder quality grown in hydroponic systems. *Agron Sci*. 2025;79(3):65-72. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5400>
15. Bouajila A, Hamdi Z, Ammar H, et al. Hydroponics technology of fodder barley production used to improve feeding livestock in arid regions of Tunisia. *Asian J Anim Vet Adv*. 2023;18(1):21-28. <https://doi.org/10.3923/ajava.2023.21.28>
16. Al-Karaki GN. Utilization of treated sewage wastewater for green forage production in a hydroponic system. *Emirates J Food Agric*. 2011;23(1):80-94. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v23i1.5315>
17. Elfaki MOA, Akel AE, Kilic U. Forage yield, nutritive value and in vitro digestibility of barley green fodder germinated under different seed-moistening conditions in a hydroponic system. *Asian J Adv Agric Res*. 2025;25(12):68-80. <https://doi.org/10.9734/ajaar/2025/v25i12698>
18. Dung DD, Godwin IR, Nolan JV. Nutrient content and in sacco digestibility of barley grain and sprouted barley. *J Anim Vet Adv*. 2010;9(20):2485-2492. <https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2485.2492>
19. Jabbar MK, Ali AF. Providing fast fodder technology from barley crop by using a hydroponic system with different gibberellin concentrations. *Trends Agric Sci*. 2023;2(2):131-138. <https://doi.org/10.17311/tas.2023.131.138>
20. Taboada Mitma VH. Evaluación del forraje hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare*) en sistemas de alimentación durante el crecimiento del cuy (*Cavia porcellus*) [tesis de licenciatura]. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2022. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5280>
21. Bonifaz VLA, Arellano JJ, Malta YI, Torres DL. Hydroponic crops: a nutritional and sustainable alternative for the reproduction of guinea pigs in the coastal zone of Ecuador. *Sapienza Int J Interdiscip Stud*. 2024;5(2):e24042. <https://doi.org/10.51798/sijis.v5i2.776>
22. Jatutu SS, Muhammad AS, Egbo ML, Bello KM. Growth performance of feeding hydroponic maize fodder to weaner rabbit. *Afr J Agric Sci Food Res*. 2024;17(1):130-137. <https://doi.org/10.62154/ajasfr.2024.017.010530>

23. Abdel-Wareth AAA, Mohamed EM, Hassan HA, Eldeek AA, Lohakare J. Effect of substituting hydroponic barley forage with or without enzymes on performance of growing rabbits. *Sci Rep.* 2023;13:943. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27911-x>
24. Morales MA, de la Fuente B, Juárez M, Ávila E. Short communication: effect of substituting hydroponic green barley forage for a commercial feed on performance of growing rabbits. *World Rabbit Sci.* 2010;17(1):35-38. <https://doi.org/10.4995/wrs.2009.668>
25. Carrillo MG, Pérez LS, Esparza-Rivera JR, Preciado-Rangel P, Parede JR. Producción y calidad físico-química de leche de cabras suplementadas con forraje verde hidropónico de maíz. *Agron Mesoam.* 2013;24(1):169-176. <https://doi.org/10.15517/am.v24i1.9794>
26. Agius A, Pastorelli G, Attard E. Cows fed hydroponic fodder and conventional diet: effects on milk quality. *Arch Anim Breed.* 2019;62:517-525. <https://doi.org/10.5194/aab-62-517-2019>
27. Parsons SD, Steele MA, Leslie KE, Renaud DL, DeVries TJ. Effects of delaying increase in milk allowance and type of gradual weaning program on performance and health of calves fed lower levels of milk. *J Dairy Sci.* 2021;104(10):11176-11192. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20431>
28. Ebenezer RJ, Gnanaraj PT. Hydroponic fodder production and utilization in sustainable livestock and poultry feeding. *Discov Agric.* 2026;4(1):164. <https://doi.org/10.1007/s44279-026-00652-x>
29. Grigas A, Kemzūraitė A, Steponavičius D. Hydroponic devices for green fodder production: a review. *Rural Dev.* 2020;2019(1):21-27. <https://doi.org/10.15544/rd.2019.003>
30. Cisneros-Saguilán P, Cruz-Bautista P, Hernández-Hernández M. Forraje verde hidropónico como alternativa forrajera en la alimentación animal. *Trop Subtrop Agroecosystems.* 2023;26(3):#079. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4679>
31. Bouadila S, Baddadi S, Skouri S, Ayed R. Assessing heating and cooling needs of hydroponic sheltered system in Mediterranean climate: a case study sustainable fodder production. *Energy.* 2022;261:125274. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125274>
32. Elzanaty T, El-Mesery A, Zabady F, Mashhour A. Applications of magnetized and electrostatic water on irrigation water use efficiency and barley fodder yield under hydroponic system. *Al-Azhar J Agric Eng.* 2021;1(1):73-85. https://www.researchgate.net/publication/353846601_Applications_of_magnetized_and_electrostatic_water_on_irrigation_water_use_efficiency_and_barley_fodder_yield_under_hydroponic_system
33. Baye W, Moges F, Andualem D. Effect of hydroponic barley fodder on growth performance, carcass yield and carcass quality of cobb 500 broilers. *Heliyon.* 2024;10(13):e33909. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33909>
34. Aguilar Condori IM. Producción de forraje verde hidropónico para optimizar el uso del agua y su impacto en el nivel de ingreso del productor de cuyes en el valle Tacna – 2013 [tesis de maestría]. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; 2016. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB_42bf50566b015458eb83cac717b5d126