



Producción y eficiencia hídrica del forraje verde hidropónico de trigo (*Triticum aestivum* L.) en un sistema NFT automatizado

Production and water efficiency of hydroponic green forage of wheat (*Triticum aestivum* L.) in an automated NFT system

Produção e eficiência hídrica da forragem verde hidropônica de trigo (*Triticum aestivum* L.) em um sistema NFT automatizado

ARTÍCULO ORIGINAL




Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.462>

Víctor Paredes Atoche¹ 
vparedes@uncp.edu.pe

Paulo Vásquez-Garay Torres² 
pvasquezgarayt@undac.edu.pe

Maurino Silvestre Cahuana Hidalgo¹ 
mcahuana@uncp.edu.pe

¹Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo Perú

²Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Oxapampa, Perú

Artículo recibido: 7 de noviembre 2025 / Arbitrado: 20 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

La producción de forraje enfrenta limitaciones crecientes asociadas con la escasez hídrica, la degradación de los suelos y la competencia por áreas cultivables. En este escenario, los sistemas hidropónicos constituyen una alternativa tecnológica para producir biomasa destinada a la alimentación animal en espacios reducidos y con consumo controlado de agua. **Objetivo:** evaluar el crecimiento radicular y foliar, la producción de biomasa y la eficiencia hídrica del forraje verde hidropónico de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivado en un sistema NFT automatizado, así como determinar las relaciones entre estas variables. El experimento se desarrolló en Oxapampa, Perú, mediante un sistema NFT conformado por cuatro bandejas principales subdivididas en doce sub-bandejas. Durante ocho días se midieron diariamente la longitud radicular y foliar; al final del ciclo se registró la biomasa fresca y el consumo total de agua para calcular la eficiencia hídrica y estimar correlaciones de Pearson. La longitud radicular alcanzó 16,7 cm y la longitud foliar 15,4 cm al octavo día. La producción promedio fue 9,9 kg por sub-bandeja, equivalente a 11,0 kg m⁻², con eficiencia hídrica de 0,95 kg L⁻¹. Además, se observaron correlaciones positivas significativas entre crecimiento vegetal y biomasa ($r = 0,65-0,74$). Se concluye que el sistema NFT automatizado demostró alta eficiencia productiva e hídrica para forraje de trigo, por lo que representa una alternativa viable para alimentación animal en regiones con limitaciones de agua y suelo.

Palabras clave: Automatización; Cultivo hidropónico; Eficiencia hídrica; Forraje; *Triticum aestivum*

ABSTRACT

Fodder production faces increasing limitations associated with water scarcity, soil degradation, and competition for arable land. In this context, hydroponic systems constitute a technological alternative for producing animal feed biomass in reduced spaces and with controlled water consumption. **Objective:** to evaluate root and shoot growth, biomass production, and water use efficiency of hydroponic green wheat fodder (*Triticum aestivum* L.) cultivated in an automated NFT system, and to determine the relationships among these variables. The experiment was conducted in Oxapampa, Peru, using an NFT system composed of four main trays subdivided into twelve sub-trays. Root and shoot length were measured daily for eight days; at the end of the cycle, fresh biomass and total water consumption were recorded to calculate water use efficiency and estimate Pearson correlations. Root length reached 16.7 cm and shoot length 15.4 cm on day eight. Average production was 9.9 kg per sub-tray, equivalent to 11.0 kg m⁻², with a water use efficiency of 0.95 kg L⁻¹. Significant positive correlations were also observed between plant growth and biomass ($r = 0.65-0.74$). It is concluded that the automated NFT system showed high productive and water efficiency for wheat fodder, representing a viable alternative for animal feeding in regions with water and land limitations.

Key words: Automation; Fodder; Hydroponic cultivation; *Triticum aestivum*; Water use efficiency

RESUMO

A produção de forragem enfrenta limitações crescentes associadas à escassez hídrica, à degradação dos solos e à competição por áreas cultiváveis. Nesse contexto, os sistemas hidropônicos constituem uma alternativa tecnológica para produzir biomassa destinada à alimentação animal em espaços reduzidos e com consumo controlado de água. **Objetivo:** avaliar o crescimento radicular e foliar, a produção de biomassa e a eficiência hídrica da forragem verde hidropônica de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivada em um sistema NFT automatizado, bem como determinar as relações entre essas variáveis. O experimento foi conduzido em Oxapampa, Peru, mediante um sistema NFT composto por quatro bandejas principais subdivididas em doze sub-bandejas. Durante oito dias foram medidas diariamente a longitude radicular e foliar; ao final do ciclo, registraram-se a biomassa fresca e o consumo total de água para calcular a eficiência hídrica e estimar correlações de Pearson. A longitude radicular atingiu 16,7 cm e a foliar 15,4 cm no oitavo dia. A produção média foi de 9,9 kg por sub-bandeja, equivalente a 11,0 kg m⁻², com eficiência hídrica de 0,95 kg L⁻¹. Também foram observadas correlações positivas significativas entre crescimento vegetal e biomassa ($r = 0,65-0,74$). Conclui-se que o sistema NFT automatizado demonstrou elevada eficiência produtiva e hídrica para forragem de trigo, representando uma alternativa viável para a alimentação animal em regiões com limitações de água e solo.

Palavras-chave: Automação; Cultivo hidropônico; Eficiência hídrica; Forragem; *Triticum aestivum*

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria global enfrenta una disyuntiva cada vez más compleja en el siglo XXI. El crecimiento demográfico proyectado hacia 2050, estimado en aproximadamente 9.700 millones de personas, ejercerá una presión sostenida sobre los sistemas agroalimentarios y, en particular, sobre la disponibilidad de alimentos para consumo humano y animal (1). Esta presión se expresa con especial intensidad en la competencia por el uso del suelo, pues la producción de granos, pasturas y forrajes debe desarrollarse en áreas cultivables finitas. A ello se suman los efectos del cambio climático, la degradación edáfica y la escasez hídrica, factores que limitan la productividad de la agricultura convencional y obligan a explorar tecnologías de producción desacopladas de la dependencia directa del suelo agrícola.

En este contexto, la agricultura de ambiente controlado y los sistemas de producción vertical se presentan como alternativas tecnológicas con potencial para complementar los sistemas tradicionales. Estas innovaciones permiten producir biomasa vegetal en ambientes protegidos, con mayor control de las condiciones de crecimiento y con menor exposición a variaciones climáticas externas (2). Además, la hidroponía, entendida como el cultivo de plantas sin suelo mediante agua o soluciones nutritivas, ha adquirido relevancia en

la producción de forraje verde por su capacidad para reducir tiempos de cultivo, aumentar la eficiencia del uso del agua y generar biomasa en espacios limitados (3-5).

La producción de forraje verde hidropónico (FVH), sin embargo, no debe asumirse como un procedimiento uniforme, dado que su rendimiento depende de la interacción entre especie, densidad de siembra, tiempo de cosecha, calidad del agua, diseño hidráulico y manejo operativo. En estudios comparativos se ha demostrado que diversas especies forrajeras pueden producir biomasa en ciclos cortos bajo condiciones hidropónicas, aunque la eficiencia hídrica y el rendimiento varían según la especie evaluada (3-7). En ese sentido, el comportamiento productivo del FVH exige valorar no solo la cantidad de biomasa fresca obtenida, sino también el momento en que esta alcanza condiciones adecuadas para su aprovechamiento animal.

De manera particular, Herrera et al. evidenciaron que el tiempo de cosecha incide sobre el valor proteico y energético del forraje verde hidropónico de trigo, lo cual demuestra que la edad de corte constituye una variable decisiva para interpretar la calidad final del material producido (4). Asimismo, Naik y Swain (6) sostienen que la hidroponía representa una alternativa frente al forraje verde cultivado convencionalmente, pero advierten que su pertinencia depende del

manejo técnico, la disponibilidad de recursos y la estabilidad del sistema productivo. Por consiguiente, el análisis del FVH no puede limitarse al rendimiento en peso fresco, ya que debe integrar criterios de calidad nutricional, eficiencia de manejo y viabilidad operativa.

Además, Sánchez et al. (8) reportaron que el forraje hidropónico de trigo y cebada puede incidir favorablemente en la ganancia de peso de ovinos, lo que refuerza su utilidad como alternativa alimenticia en sistemas pecuarios con limitaciones de suelo o disponibilidad forrajera. De forma complementaria, Cerrillo et al. demostraron que la producción de biomasa y el valor nutricional del FVH de trigo y avena varían según las condiciones de producción y el material vegetal utilizado (9). En consecuencia, la decisión técnica sobre el uso del FVH debe fundamentarse en una lectura integral del sistema, considerando simultáneamente la productividad, la calidad del forraje y su funcionalidad dentro de la alimentación animal.

De manera complementaria, la sostenibilidad del FVH se relaciona con la gestión integral del recurso hídrico. En escenarios donde el agua constituye un factor limitante, la recirculación, el control volumétrico y la reducción de pérdidas por escorrentía o evaporación se convierten en criterios esenciales para evaluar la pertinencia tecnológica de los sistemas hidropónicos. Esta preocupación resulta especialmente importante

en regiones donde la cosecha, conservación y aprovechamiento sostenible del agua forman parte de las estrategias de adaptación agroambiental (10). Por tanto, estudiar la eficiencia hídrica de sistemas NFT automatizados permite generar evidencia aplicada para mejorar la productividad forrajera sin incrementar proporcionalmente la demanda de agua.

La selección de la especie forrajera constituye, además, una decisión agronómica central. Investigaciones regionales han confirmado la viabilidad del trigo y la cebada hidropónicos para la alimentación de ovinos, mientras que otros estudios han aportado evidencia sobre la producción de biomasa y el valor nutricional del trigo y la avena en sistemas de FVH (8,9). En condiciones amazónicas ecuatorianas también se ha observado que la densidad de siembra, la especie y la edad de cosecha modifican la producción de biomasa, lo cual refuerza la necesidad de ajustar los protocolos a cada contexto agroecológico (11).

Del mismo modo, los parámetros físicos del sistema hidropónico influyen directamente en la uniformidad del crecimiento. En sistemas NFT, la pendiente de las bandejas determina la distribución de la película de agua y condiciona el contacto de las raíces con el flujo recirculante (12). Desde una perspectiva técnica, el cálculo de la pendiente exige considerar el desnivel entre la

parte más elevada y el punto inferior por donde fluye el agua por gravedad, de modo que el diseño hidráulico responda a las necesidades hídricas del cultivo y reduzca diferencias espaciales dentro de las unidades de producción (13). Estos aspectos son decisivos porque la heterogeneidad del forraje hidropónico dentro de una misma bandeja puede afectar tanto el rendimiento como la calidad del producto final (14).

Por otra parte, la hidroponía ofrece oportunidades vinculadas con la economía circular y la sostenibilidad. En regiones áridas se ha documentado que los sistemas hidropónicos pueden alcanzar ventajas comparativas en eficiencia hídrica frente a sistemas convencionales, aunque su adopción depende de la inversión inicial, el consumo energético y la estabilidad del manejo (15). También se han explorado estrategias de fertirrigación basadas en la reutilización de lixiviados y en el manejo de soluciones recirculantes, principios que podrían contribuir a cerrar ciclos de nutrientes y reducir impactos ambientales en sistemas intensivos (16). En esa misma línea, la formulación y el manejo de soluciones nutritivas constituyen aspectos determinantes para sostener el crecimiento vegetal, mejorar la eficiencia del sistema y reducir pérdidas asociadas al uso inadecuado de insumos, especialmente cuando se trabaja con cultivos de ciclo corto bajo condiciones controladas (17). De igual forma, el uso de fuentes alternativas

de agua, como aguas urbanas recuperadas, ha sido evaluado para producir forraje hidropónico, siempre bajo criterios de inocuidad, calidad y protección sanitaria de los animales (18).

No obstante, la implementación masiva del FVH continúa enfrentando desafíos técnicos y sanitarios. Entre ellos se encuentran los costos energéticos, la necesidad de estandarizar protocolos, la prevención de contaminación microbiológica y la adecuación de las condiciones de manejo para favorecer tanto el crecimiento como el valor nutricional del forraje (19,20). En consecuencia, resulta necesario generar estudios aplicados que describan con precisión el comportamiento del cultivo bajo condiciones locales, especialmente cuando se emplean sistemas automatizados que podrían mejorar la regularidad del riego, la recirculación y la eficiencia operativa.

En consecuencia, el presente estudio se orienta a aportar evidencia empírica sobre la productividad del forraje verde hidropónico de trigo en condiciones de selva alta peruana, considerando tanto el crecimiento vegetal como el uso eficiente del agua. El análisis resulta pertinente porque permite relacionar variables morfológicas de fácil medición con la producción final de biomasa, lo que puede fortalecer la toma de decisiones técnicas durante ciclos productivos cortos.

Desde esta perspectiva, se planteó como objetivo evaluar el crecimiento radicular y foliar, la producción de biomasa y la eficiencia hídrica del forraje verde hidropónico de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivado en un sistema NFT automatizado, así como determinar las relaciones entre estas variables. Con ello se busca contribuir al diseño de alternativas forrajeras eficientes, replicables y sostenibles para unidades productivas con restricciones de suelo y agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo-correlacional, orientado a analizar las relaciones entre variables de crecimiento vegetal, producción de biomasa y eficiencia hídrica en un sistema de forraje verde hidropónico. La investigación se realizó en una vivienda ubicada en la calle Los Geranios, Mz. 29, Lt. 17, urbanización Las Margaritas, provincia de Oxapampa, Perú, con coordenadas UTM WGS84 18L 457263, 8829939. El área experimental tuvo 16 m² y se localizó a una altitud aproximada de 1836 m s. n. m., en una zona de selva alta peruana. El experimento comprendió ocho días continuos de cultivo durante marzo de 2026, con cosecha realizada al noveno día, procurando mantener condiciones ambientales estables y evitando interferencias por precipitaciones que afectaran el funcionamiento del sistema automatizado.

El diseño fue no experimental y transversal, con alcance descriptivo-correlacional, debido a que las variables fueron observadas en su contexto de producción sin manipulación deliberada de tratamientos. Se implementó una infraestructura hidropónica automatizada tipo NFT (*Nutrient Film Technique*), construida con estructura de madera de 2" × 2" y listones de 2" × 1". El sistema incluyó bandejas de material Aluzin TR4, recirculación continua de agua, cubierta de calamina galvanizada y translúcida, así como ventilación lateral natural. No se utilizó malla Raschell, con el fin de no modificar las condiciones lumínicas incidentes. El montaje experimental estuvo conformado por cuatro bandejas principales de Aluzin TR4, cada una subdividida longitudinalmente en tres sub-bandejas o canalones independientes, totalizando doce unidades experimentales.

Cada sub-bandeja presentó dimensiones uniformes de 0,30 m de ancho por 3,00 m de longitud, con un área efectiva de cultivo de 0,90 m² por unidad. Además, se estableció una pendiente aproximada de 10 %, equivalente a 0,30 m de desnivel en 3,00 m lineales, para facilitar el flujo gravitacional de la película de agua recirculante. Esta configuración permitió evaluar el desempeño del sistema bajo un diseño hidráulico reproducible, en el cual la pendiente, el área de cultivo y la división de unidades experimentales quedaron claramente definidas para futuras repeticiones.

Respecto a la población estuvo constituida por la totalidad de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) establecidas en el sistema hidropónico durante el ciclo de producción. Las semillas provinieron de un lote comercial homogéneo sin identificación varietal específica. Dado el enfoque correlacional y la disponibilidad total de unidades, se trabajó con las doce sub-bandejas como censo de unidades experimentales. Para las mediciones de crecimiento vegetal se aplicó muestreo aleatorio simple dentro de cada sub-bandeja, seleccionando diariamente diez plántulas distintas mediante un generador de coordenadas aleatorias. De esta manera, se evitó repetir mediciones sobre los mismos individuos y se garantizó independencia observacional, alcanzando 960 mediciones individuales distribuidas en los ocho días del ciclo productivo.

Con el propósito de asegurar homogeneidad y validez de las observaciones, se establecieron criterios de inclusión y exclusión. Se incluyeron únicamente plántulas con emergencia radicular y foliar visible durante las primeras 24 horas posteriores a la siembra, a fin de evaluar individuos con capacidad germinativa y vigor inicial comparable. Se excluyeron plántulas ubicadas en los primeros y últimos 10 cm lineales de cada sub-bandeja para reducir efectos de borde asociados con variaciones del flujo hídrico o del microclima. Asimismo, se retiraron del análisis las

unidades muestrales con síntomas evidentes de contaminación fúngica, daño mecánico del tapete radicular o desarrollo anormalmente retardado respecto de la media poblacional, criterios aplicados mediante inspección visual sistemática durante las mediciones diarias.

Para evaluar el crecimiento vegetal se empleó medición directa con instrumentos de precisión. La longitud radicular y la longitud foliar se registraron diariamente en centímetros mediante vernier digital con precisión de 0,01 mm (Mitutoyo, serie 500-181-30), calibrado antes de cada sesión de medición con patrones de referencia certificados. La producción de biomasa fresca se determinó al momento de la cosecha con una balanza electrónica de plataforma de 30 kg de capacidad máxima y precisión de 1 g (OHAUS, modelo Ranger 3000). En cada sub-bandeja se registró el peso total del tapete vegetal, incluyendo raíces, tallos, hojas y semillas remanentes.

El consumo hídrico se cuantificó mediante el método volumétrico diferencial. Para ello, diariamente se midió el volumen de agua necesario para reponer el tanque de recirculación hasta su capacidad inicial de 80 L, empleando un caudalímetro digital instalado en la línea de llenado (Badger Meter, modelo EPR) y verificaciones manuales con probeta graduada de 2000 mL. El sistema de riego automatizado operó mediante un programador electrónico (Rain Bird, modelo ESP-

Me), conectado a una electrobomba de 0,5 HP, que generó cuatro pulsos diarios de riego de cuatro minutos cada uno.

En cuanto la eficiencia hídrica, se calculó como la relación entre la producción total de biomasa fresca y el volumen total de agua consumido durante el ciclo de producción. El indicador se expresó en kg L^{-1} , conforme a la ecuación: $\text{EH} = \text{PB} / \text{CA}$, donde EH corresponde a eficiencia hídrica, PB a producción total de biomasa fresca en kilogramos y CA al consumo acumulado de agua en litros. Esta definición permitió comparar el rendimiento del sistema en términos de biomasa producida por unidad de agua utilizada.

Los datos fueron organizados en matrices digitales mediante Microsoft Excel para Mac versión 16.89. Posteriormente, se realizaron análisis exploratorios para verificar normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, confirmando el cumplimiento de los supuestos paramétricos. Para evaluar las relaciones entre longitud radicular, longitud foliar y producción de biomasa se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson con nivel de confianza de 95 % ($p < 0,05$). Adicionalmente, se calcularon intervalos de confianza mediante bootstrap con 1000 réplicas. Los análisis se complementaron con modelos de regresión lineal simple para explorar la capacidad predictiva de las variables de crecimiento sobre

el rendimiento productivo, empleando R versión 4.3.2 y los paquetes *tidyverse*, *ggplot2* y *corrplot* para visualización gráfica y análisis correlacional.

La investigación respetó los principios de integridad científica y responsabilidad ambiental establecidos en el Código de Ética para la Investigación de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión y de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Se garantizó la transparencia en el registro y reporte de datos, evitando manipulación selectiva o exclusión injustificada de observaciones. En relación con el impacto ambiental, el sistema operó bajo recirculación cerrada para minimizar el consumo hídrico y evitar efluentes contaminados. Al finalizar el experimento, la biomasa residual fue incorporada como material orgánico en procesos de compostaje institucional, cerrando parcialmente el ciclo de nutrientes.

RESULTADOS

Los resultados se presentan siguiendo la secuencia lógica del ciclo productivo: primero se describe el crecimiento radicular y foliar durante los ocho días de evaluación; luego se expone la producción de biomasa fresca por sub-bandeja; posteriormente se analiza la relación entre las variables morfológicas y productivas; finalmente, se sintetiza la eficiencia hídrica alcanzada por el sistema NFT automatizado. Esta organización

permite observar la evolución del cultivo, identificar el comportamiento de las unidades experimentales y comprender la asociación entre crecimiento vegetal, rendimiento y uso del agua.

A continuación, la Figura 1 muestra la evolución diaria de la longitud radicular promedio del forraje verde hidropónico de trigo durante el ciclo productivo.

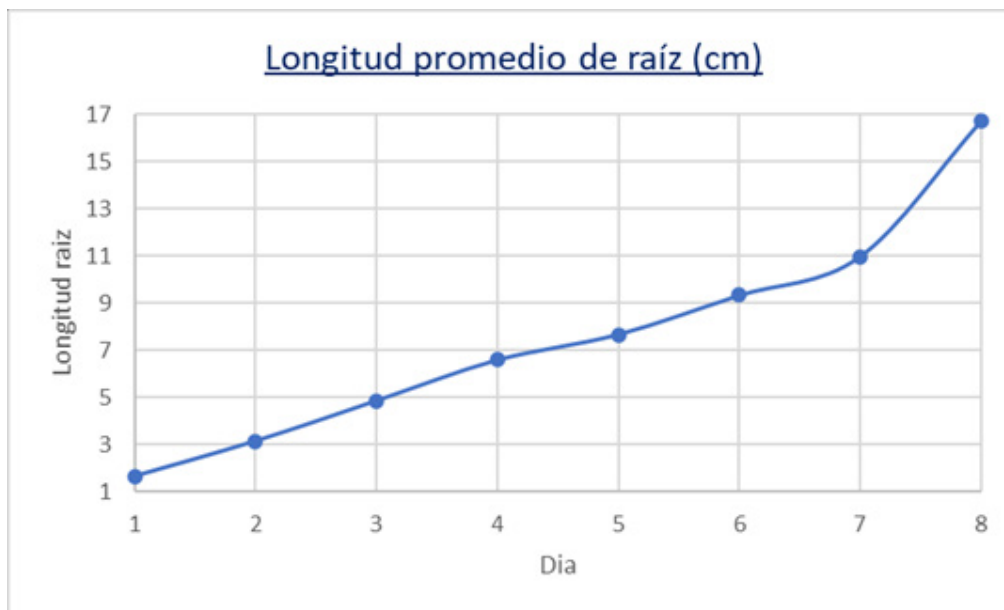


Figura 1. Crecimiento radicular promedio del forraje verde hidropónico de trigo durante el ciclo de producción.

Los resultados de la Figura 1, evidencian una trayectoria ascendente continua de la longitud radicular, que inició con valores cercanos a 1,5 cm durante las primeras 24 horas y alcanzó 16,7 cm al momento de la cosecha. Esta progresión no presentó un comportamiento lineal homogéneo, sino una fase de aceleración más marcada entre los días tres y seis, periodo en el cual la elongación radicular aumentó de manera notable. En términos funcionales, este comportamiento

indica que, una vez superada la etapa inicial de activación metabólica y movilización de reservas endospermáticas, el sistema radicular expresó su mayor potencial de crecimiento bajo condiciones de disponibilidad hídrica constante y ausencia de restricciones físicas propias del suelo. A continuación, en la Figura 2 se presenta el crecimiento foliar promedio del forraje verde hidropónico durante el mismo periodo de evaluación.



Figura 2. Crecimiento foliar promedio del forraje verde hidropónico durante el ciclo de producción.

La Figura 2, muestra que la longitud foliar también aumentó de forma progresiva, aunque con una tendencia distinta a la observada en el sistema radicular. El crecimiento foliar se aceleró especialmente entre los días tres y cinco, para luego aproximarse a una fase de estabilización hacia el octavo día, cuando alcanzó 15,4 cm. Este patrón sugiere que el cultivo priorizó inicialmente el establecimiento de estructuras vegetativas y, posteriormente, mantuvo una expansión foliar

más moderada. En conjunto, las Figuras 1 y 2 evidencian sincronía entre crecimiento radicular y foliar, rasgo fisiológico relevante para explicar la acumulación de biomasa fresca durante ciclos cortos de producción.

Seguidamente, la Tabla 1 presenta los valores individuales de producción de biomasa fresca obtenidos en las doce sub-bandejas del sistema experimental.

Tabla 1. Producción de biomasa fresca del forraje verde hidropónico de trigo por sub-bandeja.

Bandeja	Sub-bandeja	Producción (kg)
1	1	8,540
1	2	8,670
1	3	8,670
2	4	9,047
2	5	9,670

Bandeja	Sub-bandeja	Producción (kg)
2	6	10,040
3	7	9,478
3	8	10,399
3	9	11,243
4	10	11,133
4	11	12,170
4	12	9,158

Según expone la Tabla 1, existe una variabilidad interunidades entre 8,54 y 12,17 kg por sub-bandeja. Esta dispersión no constituye necesariamente una debilidad metodológica, sino una expresión del comportamiento del sistema bajo condiciones operativas reales, donde pequeñas diferencias de flujo hídrico, densidad efectiva de germinación o pendiente local pueden influir en el rendimiento. La producción promedio fue de 9,9 kg por sub-bandeja, equivalente aproximadamente a 11,0 kg m⁻², lo que

establece un referente productivo para futuras investigaciones con sistemas NFT en condiciones similares.

Además, once de las doce unidades superaron 8,5 kg y cuatro excedieron 11 kg, lo cual indica que el sistema posee capacidad para alcanzar rendimientos altos cuando el manejo hidráulico y la uniformidad de germinación se optimizan. Posteriormente, la Tabla 2 expone la matriz de correlaciones de Pearson entre longitud radicular, longitud foliar y producción de biomasa fresca.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de crecimiento y producción del forraje verde hidropónico de trigo.

Variable	Longitud de raíz	Longitud de hoja	Producción de biomasa
Longitud de raíz	1,00	0,74 (p < 0,01)	0,71 (p < 0,05)
Longitud de hoja	0,74 (p < 0,01)	1,00	0,65 (p < 0,05)
Producción de biomasa	0,71 (p < 0,05)	0,65 (p < 0,05)	1,00

La Tabla 2, muestra asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre todas las variables evaluadas, con coeficientes entre 0,65 y 0,74. La correlación más alta se observó entre

longitud radicular y longitud foliar (r = 0,74; p < 0,01), lo que sugiere una sincronía fisiológica en la respuesta del cultivo a las condiciones hidropónicas. Asimismo, la relación entre longitud

radicular y producción de biomasa ($r = 0,71$; $p < 0,05$) indica que raíces más desarrolladas se asociaron con mayor acumulación de materia fresca.

Por su parte, la correlación entre longitud foliar y producción ($r = 0,65$; $p < 0,05$) confirma que la expansión de la superficie fotosintética

también contribuyó al rendimiento, aunque con menor intensidad que la variable radicular. A continuación, la Figura 3 ilustra la relación entre la longitud de raíz alcanzada al octavo día y la producción de forraje verde hidropónico por sub-bandeja.

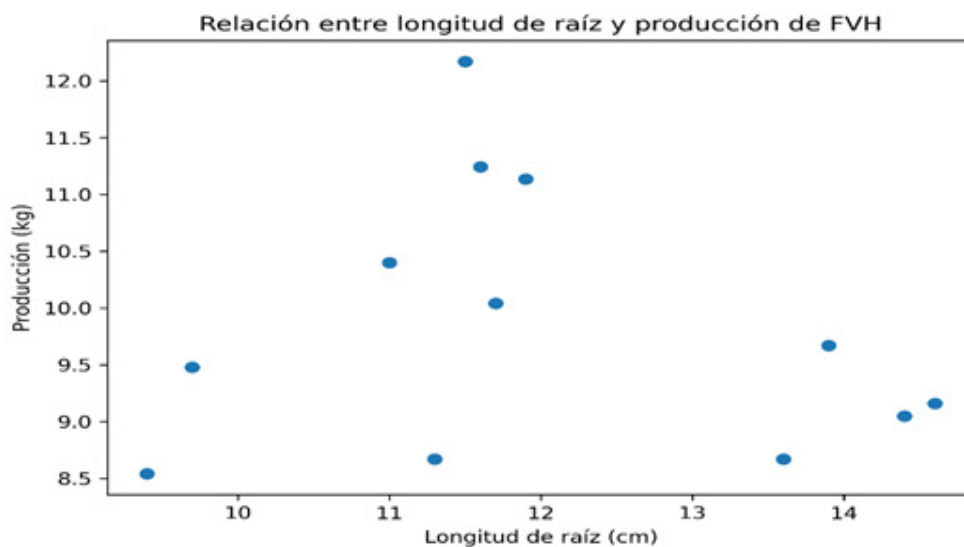


Figura 3. Relación entre la longitud de raíz y la producción de forraje verde hidropónico de trigo.

Según la Figura 3, se visualiza la tendencia positiva entre desarrollo radicular y biomasa fresca. Aunque la nube de puntos presenta dispersión propia de fenómenos biológicos, las unidades experimentales con raíces más extensas tendieron a concentrar mayores producciones, superando en varios casos los 11 kg por sub-bandeja. Este comportamiento confirma visualmente la correlación de Pearson observada y respalda la interpretación de que el sistema radicular

constituye un indicador morfológico relevante para anticipar el rendimiento del FVH de trigo. Asimismo, la dispersión en longitudes intermedias sugiere que variables adicionales, como uniformidad de germinación o microvariaciones hidráulicas, también pueden modular la productividad.

La Figura 4 representa la asociación entre longitud foliar y producción de biomasa fresca por sub-bandeja.

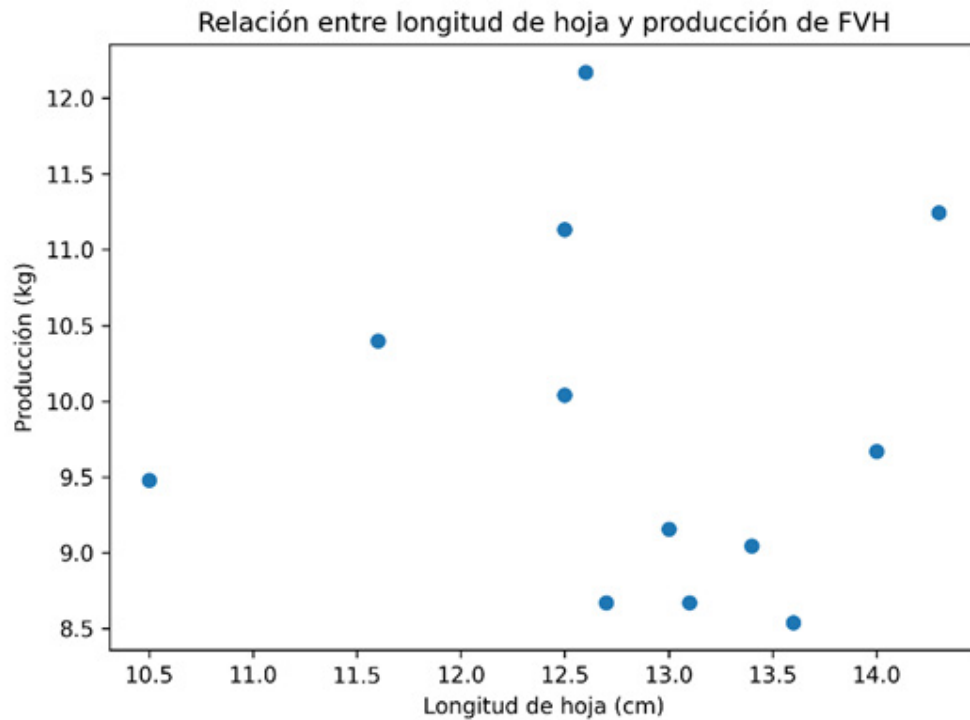


Figura 4. Relación entre la longitud de hoja y la producción de forraje verde hidropónico de trigo.

La Figura 4 evidencia una tendencia positiva entre longitud foliar y producción, aunque ligeramente menos pronunciada que la observada para la relación raíz-producción. Las sub-bandejas con longitudes foliares superiores tendieron a registrar mayores rendimientos, mientras que aquellas con longitudes menores presentaron producciones más bajas. No obstante, la presencia de puntos con longitudes foliares intermedias y rendimientos contrastantes indica que la longitud de hoja, por sí sola, no explica completamente la acumulación de biomasa. Por ello, su interpretación debe integrarse con el crecimiento radicular, la densidad del tapete vegetal y las condiciones hidráulicas del sistema.

En términos de eficiencia hídrica, el sistema alcanzó una producción promedio de 9,9 kg por sub-bandeja y una eficiencia de 0,95 kg L⁻¹. Este resultado indica que, por cada litro de agua consumida durante el ciclo productivo, se produjo casi un kilogramo de biomasa fresca. Así, el sistema NFT automatizado mostró un desempeño favorable para producir FVH de trigo en ciclos cortos, con uso controlado del recurso hídrico y con potencial de adaptación a contextos donde el agua y el suelo cultivable constituyen factores limitantes.

En síntesis, los resultados evidencian que el FVH de trigo cultivado en un sistema NFT automatizado presentó crecimiento radicular y

foliar sostenido, producción de biomasa relevante y alta eficiencia hídrica. La secuencia de figuras y tablas confirma que el rendimiento no dependió de una sola variable, sino de la interacción entre desarrollo radicular, expansión foliar, uniformidad del sistema y manejo del agua. Por tanto, el sistema evaluado constituye una opción técnicamente viable para producir forraje fresco en espacios reducidos y con consumo hídrico eficiente.

Discusión

El crecimiento radicular y foliar observado confirma el rápido establecimiento vegetativo del forraje verde hidropónico de trigo bajo condiciones de sistema NFT automatizado. Las longitudes alcanzadas al octavo día, 16,7 cm para raíz y 15,4 cm para hoja, son coherentes con investigaciones que documentan ciclos cortos de producción en sistemas hidropónicos y resaltan la capacidad de esta tecnología para acelerar las fases iniciales del desarrollo vegetal (7). En este sentido, la disponibilidad constante de agua, la ausencia de resistencia mecánica del suelo y la recirculación controlada favorecieron un ambiente de baja restricción física, en el cual la plántula pudo expresar tempranamente su potencial meristemático.

De manera similar, estudios realizados en condiciones amazónicas ecuatorianas muestran que el trigo hidropónico alcanza desarrollos

vegetativos comparables, aunque las magnitudes pueden variar según densidad de siembra, edad de cosecha y manejo del sistema (11). Esta coincidencia refuerza la idea de que la hidroponía forrajera posee una base tecnológica reproducible, pero también evidencia que los protocolos deben ajustarse a las condiciones locales. En el presente estudio, el ciclo de ocho días permitió obtener biomasa fresca relevante; sin embargo, ciclos más prolongados podrían incrementar el rendimiento, siempre que se evalúe simultáneamente la relación hoja-raíz y la calidad nutricional del material cosechado.

La eficiencia hídrica obtenida, equivalente a $0,95 \text{ kg L}^{-1}$ o 950 kg m^{-3} , supera valores reportados para algunas especies forrajeras en condiciones hidropónicas comparativas (7). Esta diferencia podría explicarse por el diseño de recirculación cerrada, el control automatizado de riego y la reducción de pérdidas de agua durante el ciclo. No obstante, la comparación debe realizarse con cautela, debido a que los estudios previos utilizaron condiciones de iluminación, temperatura, especies y soluciones nutritivas diferentes. Aun así, el valor alcanzado confirma que el sistema NFT representa una estrategia prometedora para producir biomasa animal con alta productividad por unidad de agua.

La producción promedio de $11,0 \text{ kg m}^{-2}$ también resulta consistente con la literatura

sobre FVH y sistemas NFT, aunque la variabilidad entre sub-bandejas confirma la importancia del diseño hidráulico. Grigas et al. demostraron que la pendiente de las bandejas afecta la distribución de la película nutritiva y, por tanto, la homogeneidad del crecimiento y la productividad del trigo hidropónico (12). En este estudio, la pendiente aproximada de 10 % y la recirculación controlada favorecieron rendimientos altos, pero la diferencia entre la sub-bandeja de menor producción y la de mayor producción indica que aún existe margen para mejorar la uniformidad espacial del sistema.

Las correlaciones positivas y significativas entre longitud radicular, longitud foliar y producción de biomasa respaldan la utilidad de las variables morfológicas como indicadores tempranos del rendimiento. La relación raíz-producción ($r = 0,71$) fue más intensa que la relación hoja-producción ($r = 0,65$), lo que sugiere que la capacidad de absorción y anclaje del tapete radicular desempeñó un papel central en la acumulación de biomasa fresca. Esta interpretación coincide con la evidencia fisiológica que destaca la importancia de los elementos benéficos, la absorción de agua y la nutrición vegetal en el crecimiento de plantas bajo condiciones controladas (19).

Desde una perspectiva aplicada, los resultados ofrecen criterios útiles para productores interesados en implementar FVH de trigo. El seguimiento diario de longitud radicular y foliar

puede funcionar como herramienta de monitoreo técnico, ya que permite anticipar posibles desviaciones de crecimiento antes de la cosecha. Además, la identificación de sub-bandejas con rendimientos contrastantes facilita la toma de decisiones sobre ajustes en pendiente, caudal, densidad de siembra y distribución de agua. En este punto, la automatización no sustituye la supervisión agronómica, pero sí mejora la regularidad del sistema y reduce la variabilidad asociada con el riego manual.

La principal limitación metodológica del estudio fue la ausencia de una solución nutritiva balanceada, aspecto que podría haber subestimado el potencial productivo y bromatológico del cultivo. La literatura señala que el tiempo de cosecha, la disponibilidad de nutrientes y la composición mineral inciden en el contenido proteico y energético del FVH (4,6,9). Por ello, futuras investigaciones deberán incorporar tratamientos con soluciones nutritivas diferenciadas, análisis bromatológicos, evaluación microbiológica y estimaciones económicas que permitan valorar integralmente la viabilidad del sistema a escala productiva.

Finalmente, la relevancia ambiental del sistema se vincula con su capacidad para producir biomasa con bajo consumo de agua y recirculación cerrada. En regiones con limitaciones hídricas, estas características son coherentes con estrategias

de gestión sostenible del agua y adaptación productiva (10,15). Sin embargo, la sostenibilidad real del FVH debe evaluarse considerando no solo la eficiencia hídrica, sino también el consumo energético, los costos de infraestructura, la inocuidad del producto y la estabilidad del sistema frente a cambios ambientales. En consecuencia, el presente estudio constituye una base empírica para avanzar hacia modelos de producción forrajera más eficientes, replicables y ambientalmente responsables.

CONCLUSIONES

El sistema NFT automatizado implementado en condiciones de selva alta peruana demostró capacidad para producir forraje verde hidropónico de trigo en ciclos de ocho días, con crecimiento vegetativo progresivo, producción de biomasa relevante y eficiencia hídrica destacable. Los resultados confirman que esta tecnología puede contribuir a superar limitaciones edáficas e hídricas propias de la agricultura convencional, ofreciendo una alternativa viable para la producción intensiva de alimento animal en espacios reducidos.

Asimismo, la sincronía entre desarrollo radicular y foliar, junto con las correlaciones positivas observadas, indica que el monitoreo morfológico constituye una herramienta predictiva útil para estimar rendimientos y

optimizar decisiones durante el ciclo productivo. En particular, la longitud radicular mostró una asociación estrecha con la producción de biomasa, por lo que puede considerarse un indicador técnico prioritario en sistemas NFT de FVH de trigo. La eficiencia de conversión hídrica alcanzada posiciona a los sistemas hidropónicos NFT como una estrategia alineada con principios de sostenibilidad y seguridad alimentaria, especialmente en escenarios de cambio climático y competencia creciente por recursos hídricos.

No obstante, futuras investigaciones deberán evaluar soluciones nutritivas balanceadas, densidades de siembra, momentos de cosecha, calidad bromatológica, inocuidad microbiológica y viabilidad económica, con el fin de consolidar el potencial productivo del sistema en diferentes condiciones agroecológicas y con otras especies forrajeras.

CONFLICTOS DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. Pastorelli G, Serra V, Turin L, Attard E. Hydroponic fodders for livestock production: a review. *Ann Anim Sci.* 2024;24(3):645-56. doi:10.2478/aoas-2023-0075
2. Benke K, Tomkins B. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustain Sci Pract Policy.* 2017;13(1):13-26. doi:10.1080/15487733.2017.1394054

3. Garuma Z, Gurmessa K. Evaluation of hydroponic fodder performance of different varieties of sorghum. *Int J Res -GRANTHAALAYAH*. 2021;9(2):1-10. doi:10.29121/granthaalayah.v9.i2.2021.2854
4. Herrera E, Cerrillo A, Juárez S, Murillo M, Ríos G, Reyes O, et al. Efecto del tiempo de cosecha sobre el valor proteico y energético del forraje verde hidropónico de trigo. *Interciencia*. 2010;35(4):284-9. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33913156008.pdf>
5. Sharma N, Acharya S, Kumar K, Singh N, Chaurasia OP. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: an overview. *J Soil Water Conserv*. 2018;17(4):364-71. doi:10.5958/2455-7145.2018.00056.5
6. Naik P, Swain B. Hydroponics: an alternative to cultivated green fodder. En: Kumar N, editor. *Hydroponics*. New York: Springer US; 2024. p. 197-209. doi:10.1007/978-1-0716-3993-1_11
7. Al-Karaki G, Al-Hashimi. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. *ISRN Agron*. 2012;2012:1-5. doi:10.5402/2012/924672
8. Sánchez F, Moreno E del C, Contreras E, Morales J. Producción de forraje hidropónico de trigo y cebada y su efecto en la ganancia de peso de borregos. *Rev Chapingo Ser Hortic*. 2013;19(4):35-43. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1027-152X2013000400003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
9. Cerrillo A, Juárez X, Rivera A, Guerrero M, Ramírez G, Bernal H. Producción de biomasa y valor nutricional del forraje verde hidropónico de trigo y avena. *Interciencia*. 2012;37(12):906-13. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925592007.pdf>
10. Vásquez-Garay P, Sandoval RMR, Campos ASG, Ordaya AD. Relación entre cosecha de agua pluvial y su aprovechamiento sostenible en el campus UNDAC Oxapampa. *Rev Alfa*. 2026;10(28):426-44. doi:10.33996/revistaalfa.v10i28.443
11. Valle S. Evaluación agronómica del trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays*) con el método de cultivo forraje verde hidropónico, bajo las condiciones de la Amazonia ecuatoriana [tesis de maestría en Internet]. Puyo: Universidad Estatal Amazónica; 2022. <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/1125>
12. Grigas A, Kemzūraitė A, Steponavičius D, Steponavičienė A, Domeika R. Impact of slope of growing trays on productivity of wheat green fodder by a nutrient film technique system. *Water*. 2020;12(11):3009. doi:10.3390/w12113009
13. Vásquez-Garay P. Extensión y promoción agraria en el Perú. Teoría, metodología y experiencias aplicadas. Un enfoque integral para el desarrollo rural sostenible. Ecuador: Editorial CIDE; 2026. doi:10.33996/cide.ecuador.ep2679956
14. Grigas A, Steponavičius D, Kemzūraitė A, Tarasevičienė Ž, Domeika R. Spatial heterogeneity in the properties of hydroponic wheat fodder and its sustainability. *Sci Rep*. 2024;14(1):19312. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-70128-9>
15. Elmulthum N, Zeineldin F, Al-Khateeb S, Al-Barrak K, Mohammed T, Sattar M, 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://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/822>
16. Paniagua F, Plaza B, Llanderal A, García-Caparrós P, Lao M. Sustainable strategies based on reused leachates and hydrogen peroxide supply to fertigate *Cordyline fruticosa* var. 'Red Edge' plants. *Agriculture*. 2023;13(7):1326. doi:10.3390/agriculture13071326
17. Machaca M. Efecto de tres concentraciones de microorganismos eficaces en el cultivo de forraje verde hidropónico de *Triticum aestivum* trigo, *Hordeum vulgare* cebada y *Zea mays* maíz. Ayacucho, 2019. Ayacucho: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; 2021. <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a4e7b531-d9c3-4794-a030-a80b8247c8c6/content>
18. Ceci L, Cavalera M, Serrapica F, Di Francia A, Masucci F, Carelli G. Use of reclaimed urban wastewater for the production of hydroponic

barley forage: water characteristics, feed quality and effects on health status and production of lactating cows. *Front Vet Sci.* 2023;10:1274466. doi:10.3389/fvets.2023.1274466

19. Trejo I, Gómez F, Gómez C. Biostimulant effects and concentration patterns of beneficial elements in plants. En: Pandey S, Tripathi DK, Singh VP, Sharma S, Chauhan DK, editores. *Beneficial chemical elements of plants*. 1.a ed. Wiley; 2023. p. 58-102. doi:10.1002/9781119691419.ch4

20. Ahamed M, Sultan M, Shamshiri R, Rahman M, Aleem M, Balasundram S. Present status and challenges of fodder production in controlled environments: a review. *Smart Agric Technol.* 2023;3:100080. doi:10.1016/j.atech.2022.100080