

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agrícola
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Comparación del rendimiento en la producción de forraje verde
hidropónico utilizando dos fuentes de agua diferentes

Estudiantes

Julián David Castillo Araya
Andrés Felipe Montenegro Castro

Asesores

Patricio E. Paz, Ph.D.
Ángel Suazo, M.AE.

Honduras, octubre 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos quienes han hecho posible la culminación de este proyecto de graduación. En primer lugar, extendemos nuestra profunda gratitud a nuestros asesores, el Dr. Paz y el Ing. Suazo, por su invaluable orientación y apoyo durante todo el proceso. Sus conocimientos y disposición para resolver nuestras dudas han sido fundamentales para el éxito de nuestro trabajo. Para finalizar a la unidad de riego y drenaje encabezada por el Ing. Jofiel Giron que nos ayudó con la construcción de todo el sistema para la producción del forraje verde hidropónico.

Contenido

Agradecimientos	3
Índice de Cuadros	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Materiales y Métodos	14
Descripción del Sitio	14
Caracterización del Agua de Recambio del Cultivo Acuícola	14
Sistema de Producción de FVH	15
Sistema de Riego	16
Variables	16
Temperatura	16
Semillas de Maíz	17
Densidad y Preparación de Semillas	17
Siembra	17
Germinación	17
Cosecha de Bandejas	18
Variables Evaluadas en Campo	18
Peso Húmedo	18
Altura (cm)	18
Peso Raíz	19
Peso Forraje	19

Variables Evaluadas en Laboratorio.....	19
Peso Seco	19
Porcentaje de Materia Seca (%).....	20
Diseño Experimental y Análisis Estadístico	20
Resultados y Discusión.....	21
Caracterización del Agua de Recambio.....	21
Calidad de Agua	21
Sistema Hidropónico para la Producción de Forraje Verde Hidropónico	22
Temperatura	22
Variables Evaluadas para el Forraje Verde Hidropónico	23
Peso Húmedo (kg).....	23
Peso Forraje	24
Peso Raíz	25
Altura	25
Porcentaje de Materia Seca por Bandeja	26
Peso Seco	27
Conclusiones	28
Recomendaciones.....	29
Referencias.....	30
Anexos.....	32

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Metodologías utilizadas en los parámetros nutricionales del agua de recambio.....	15
Cuadro 2 Resultados obtenidos en la caracterización nutricional del agua de recambio	21
Cuadro 3 Resultados pruebas API de calidad de agua en la producción de forraje verde hidropónico	22
Cuadro 4 Resultados obtenidos para las variables tomadas en campo	23
Cuadro 5 Resultados obtenidos para las variables tomadas en laboratorio	26

Índice de Figuras

Figura 1 Invernadero de la unidad de acuicultura Daniel E Meyer.....	14
Figura 2 Diseño del sistema para producción de forraje verde hidropónico	16
Figura 3 Cosecha de bandejas: a. Riego Acupónico; b. Riego Control Agua Potable Declorinada	18
Figura 4 Comportamiento de la temperatura durante el experimento	22

Índice de Anexos

Anexo A Estanque utilizado para la obtención del agua de recambio	32
Anexo B Kit API utilizado para la toma de pH y nutrientes durante el experimento.	33
Anexo C Sistema utilizado para la producción de forraje verde hidropónico	34
Anexo D Termómetro utilizado para la obtención de temperatura durante el experimento.....	35

Resumen

La producción de forraje verde hidropónico presenta una alternativa para la producción de alimento bajo condiciones controladas, durante todo el año y con un rendimiento alto por área. Debido a las condiciones climáticas cambiantes y aumento en los precios de producción, existe una falta de forrajes convencionales de alta calidad con un bajo costo de producción para alimentación animal. Esta investigación propone la integración de la producción convencional de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y el uso del agua de recambio como subproducto, para la fertilización del forraje verde hidropónico. El estudio se llevó a cabo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano usando dos sistemas hidropónicos independientes con un sistema de riego automatizado bajo las mismas condiciones. Los parámetros evaluados fueron altura, peso húmedo, peso de forraje, peso de raíces, peso seco y materia seca (%). Los datos fueron analizados mediante una prueba T de Student con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. Los tratamientos fueron T1- agua de recambio de producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y T2 - agua corriente. Los resultados indican que para las variables altura, peso húmedo, peso de forraje y peso de raíces se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$). Por otro lado, para las variables peso y materia secos (%) no se encontraron diferencias. Este estudio demuestra que la utilización de agua verde de recambio rica en nutrientes proveniente de la producción de tilapia, para la producción de forraje verde hidropónico es viable ya que presenta más forraje por metro cuadrado.

Palabras clave: Acuaponía, agua de recambio, fertilización, forraje verde hidropónico.

Abstract

Hydroponic green forage production presents an alternative for feed production under controlled conditions, all year round and with a high yield per area. Due to changing climatic conditions and increasing production prices, there is a lack of high-quality conventional forages with low production costs for animal feed. This research proposes the integration of conventional tilapia (*Oreochromis niloticus*) production and the use of replacement water as a by-product for fertilization of hydroponic green forage. The study was carried out at the Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano using two independent hydroponic systems with an automated irrigation system under the same conditions. The parameters evaluated were height, wet weight, forage weight, root weight, dry weight and dry matter (%). Data was analyzed using the student's t-test with a significance level of $P \leq 0.05$. Treatments were T1- tilapia (*Oreochromis niloticus*) production replacement water and T2 - tap water. These results indicate that for the variables height, wet weight, forage weight and root weight, differences were found ($P \leq 0.05$). On the other hand, for the variables dry weight and dry matter (%) no differences were found. This study demonstrates that the use of nutrient-rich green water from tilapia production to produce hydroponic green fodder is viable because it provides more fodder per square meter.

Keywords: Aquaponics, fertilization, hydroponic green forage, replacement water.

Introducción

Las producciones convencionales de forraje con fines de alimentación animal han enfrentado dificultades significativas debido a la situación económica del sector agropecuario. Esta realidad ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas que permitan un uso eficiente de recursos como el agua y el espacio, además de lograr altos rendimientos por metro cuadrado utilizado, así como la obtención de forrajes con una calidad nutricional elevada y un impacto ambiental mínimo en su producción. (Albert et al., 2016)

El aumento de la temperatura atmosférica y del nivel del mar, la disminución y la baja estabilidad del patrón de las lluvias, el aumento e intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos, como las inundaciones y los huracanes, empeoran la producción de alimentos, infraestructura y los medios de vida, eso ocasiona que el ambiente se vea debilitado y su capacidad de proveer recursos y servicios vitales se vean afectados (Ordaz et al., 2010).

El forraje verde hidropónico (FVH) se presenta como una alternativa viable para la producción de múltiples variedades de gramíneas y leguminosas, siendo una de las técnicas modernas más eficientes para la producción de forraje con fines alimenticios para distintos tipos de animales. El FVH constituye un sistema intensivo para la producción de biomasa vegetal sin necesidad de suelo, bajo condiciones controladas, que ofrece una alta calidad nutricional y un manejo sanitario optimizado (Juarez-López et al., 2013).

Según Putzu (2012), algunos de los requerimientos para la producción de forraje verde hidropónico (FVH) incluyen una temperatura que oscila entre los 18 °C y los 26 °C, dependiendo del tipo de grano utilizado. En el caso del maíz, el rango ideal de temperatura se encuentra entre los 25 °C y los 28 °C. El lugar de producción debe mantener una humedad relativa inferior al 90%, un parámetro fundamental para garantizar la sanidad y la adecuada producción del FVH. Este cultivo requiere una intensidad lumínica de 1,000 a 1,500 microwatts/cm², con un período de exposición diaria de 12 a 14 horas y un tiempo de cosecha que varía entre 10 y 15 días, dependiendo de las

condiciones de cultivo. Finalmente, el FVH demanda entre dos y tres litros de agua para producir un kilogramo de forraje, con un contenido de materia seca que oscila entre el 12% y el 18%, según la variedad cultivada.

Considerando los puntos anteriores, el forraje verde hidropónico (FVH) se presenta como una opción viable para la suplementación alimenticia de diversos animales, ofreciendo múltiples beneficios a pequeños y medianos productores, al reducir los costos y el tiempo de producción del forraje. Además, el FVH constituye una alternativa frente a la compactación del suelo provocada por el sobrepastoreo en animales que requieren una interacción constante con las pasturas y la contaminación de las aguas derivada de las producciones agrícolas (Chavarria y Del Castillo, 2018).

La hidroponía es un método de agricultura sin suelo que emplea sustratos inertes para brindar soporte a las plantas y retener la humedad. En algunos sistemas, se utilizan medios acuosos donde las raíces permanecen desnudas. Aunque existen varios diseños de hidroponía, todos comparten las mismas características básicas para sustentar el crecimiento de las plantas (Somerville et al., 2022).

La agricultura sin suelo ofrece numerosas ventajas en comparación con el sistema tradicional, como la reducción de la incidencia de enfermedades y plagas presentes en el suelo. En el caso de que se utilice algún tipo de sustrato en hidroponía, este es desinfectado previamente antes de su uso. Con los sustratos adecuados, se logra un entorno óptimo para el desarrollo de las raíces, proporcionando una mejor aireación, retención de humedad y disponibilidad de nutrientes. Este sistema innovador también permite reducir el uso de químicos, así como la cantidad de agua y fertilizantes necesarios para la producción, gracias a su sistema de recirculación (Somerville et al., 2022).

La acuaponía es una tecnología innovadora para la producción de alimentos de alta calidad, que se ha implementado durante varios años como una estrategia para combatir la desnutrición, el hambre y la pobreza. Este sistema permite obtener cultivos de mayor calidad y rendimiento, ya que los nutrientes están siempre disponibles para las raíces. A diferencia del cultivo en suelo, donde la

fertilización no garantiza que todos los nutrientes proporcionados por el fertilizante estén completamente accesibles para las plantas (Gómez et al., 2015).

La acuaponía integra el cultivo de peces con la producción hidropónica, conectándolos mediante un único sistema de recirculación. En este sistema, los desechos metabólicos generados por los organismos acuáticos y el alimento no consumido por los peces son aprovechados por las plantas, lo que permite obtener un producto de valor a partir de un subproducto que, de otro modo, sería desechable. Una de las ventajas clave es que el agua, una vez que las plantas han absorbido los nutrientes, queda libre de ellos y puede ser reutilizada en el sistema (Calo, 2011).

Los organismos acuáticos generan desechos orgánicos, entre los cuales el amonio es el componente predominante. A través del proceso de nitrificación, los microorganismos acuáticos convierten estos desechos en nitratos, que sirven como fuente de nutrientes para las plantas. Las plantas, a su vez, actúan como un filtro biológico, eliminando compuestos tóxicos del agua, lo que contribuye a mantener un ambiente saludable para los peces (Ramírez et al., 2008).

Para que el proceso de nitrificación se lleve a cabo, intervienen dos grupos de bacterias benéficas, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Las bacterias *Nitrosomonas* convierten los desechos amoniacales, liberados por las branquias, la orina y el alimento no consumido, en nitritos. Posteriormente, los nitritos son transformados en nitratos por las bacterias *Nitrobacter*. Una vez completado este proceso, las plantas pueden absorber directamente los nutrientes del agua y, al mismo tiempo, eliminar las sustancias tóxicas presentes en ella (Martínez, 2013).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial del agua de recambio de un estanque de tilapia como fertilizante para la producción de forraje hidropónico bajo las condiciones del invernadero de la Unidad de Acuicultura en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.

Materiales y Métodos

Descripción del Sitio

El experimento se realizó en el invernadero ubicado en la unidad de acuicultura de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano ubicada en el valle del Yegüare, departamento de Francisco Morazán, a una elevación de 800 msnm y una temperatura anual de 24 a 29 °C. Se instalaron dos sistemas de producción independiente para forraje hidropónico bajo las mismas condiciones.

Figura 1

Invernadero de la unidad de acuicultura Daniel E Meyer



Caracterización del Agua de Recambio del Cultivo Acuícola

El agua de recambio utilizada para el tratamiento número uno proviene de un sistema de cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) ubicado en un invernadero especializado en la producción acuícola en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Este sistema opera con una densidad de 1,050 tilapias por estanque, lo que asegura una producción intensiva y controlada dentro de las condiciones óptimas para el desarrollo de los peces. El agua rica en nutrientes generada por el cultivo de tilapia se utiliza como insumo en el tratamiento acuapónico.

Para obtener información detallada sobre la concentración de nutrientes presentes en el agua proveniente del estanque de producción de tilapia, se realizaron dos muestreos en diferentes momentos a lo largo del experimento. El objetivo de estos muestreos fue cuantificar los nutrientes presentes en el agua, los cuales son fundamentales para evaluar la eficiencia del sistema acuapónico y su potencial para la producción de forraje verde, los cuales fueron analizados por el laboratorio de calidad de agua, del departamento de ingeniería de ambiente y desarrollo. Los parámetros evaluados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1

Metodologías utilizadas en los parámetros nutricionales del agua de recambio

Parámetro	Metodología
Amonio (mg/L N-NH ₄)	ISO 7150-1 Método Salicilato
Nitritos (mg/L N-NO ₂)	SMWW 4500 NO ₂ B, Colorimetric Method
Nitratos (mg/L NO ₃)	SMWW 4500 NO ₃ C.Second-derivative UV Spectrophotometric Method
Nitrógeno total (mg/L N)	SMWW 4500 N C. Persulfate Method
Fósforo total (mg/L P)	SWW 4500 -P. J Persulfate method
Turbidez (NTU)	SMWW 2130 B. Nephelometric method

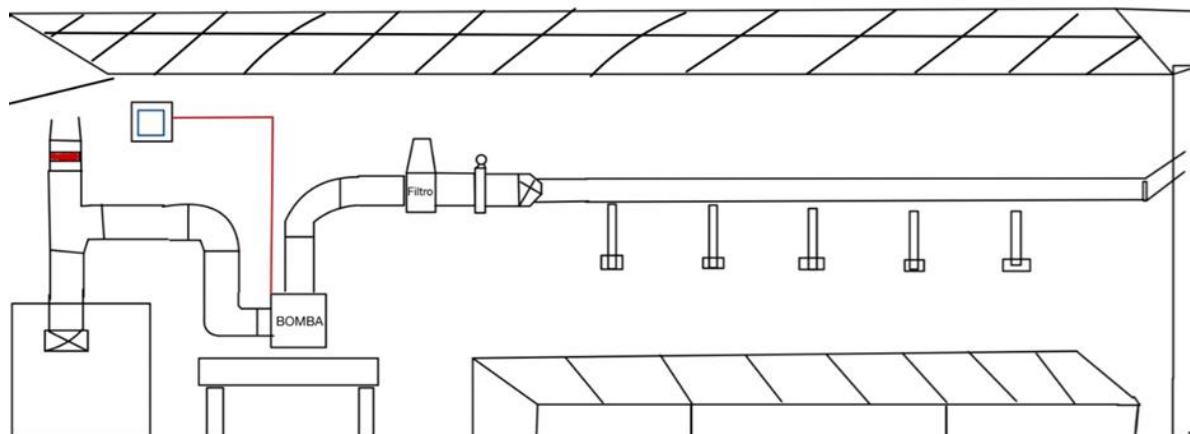
Se llevaron a cabo mediciones regulares, específicamente día de por medio, de los parámetros fisicoquímicos del agua de riego proveniente del estanque de recambio. Estas mediciones incluyeron pH, amonio (NH₄⁺), nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻), utilizando el kit de pruebas API® Freshwater Máster Test Kit, una herramienta estándar en la evaluación de la calidad del agua en sistemas acuáticos.

Sistema de Producción de FVH

Se instalaron dos sistemas de producción independientes dentro del invernadero ubicado en la unidad de producción acuícola (Figura 2) bajo las mismas condiciones de cultivo. Ambos sistemas de producción FVH contaron con 10 bandejas de aluminio de producción por sistema. Cada bandeja tuvo una dimensión de 25.5 cm × 19.5 cm. Los dos sistemas evaluados fueron: a) Control con agua potable declorinada y b) Acuapónico, en estos se establecieron dos sistemas de riego iguales para asegurar la igualdad de condiciones y en cada uno de los sistemas.

Figura 2

Diseño del sistema para producción de forraje verde hidropónico



Sistema de Riego

En el sistema de riego se instalaron cinco nebulizadores CoolNet™ Pro con cuatro boquillas en cruz por cada sistema de producción, separados cada uno a 50 cm. Con una probeta se hizo una prueba de uniformidad de riego la cual determinó el gasto de agua por minuto de cada uno de ellos, el cual fue de 450 mL/min. El sistema estaba conectado a dos bombas de medio caballo de potencia Pearl las cuales brindan un caudal de 5 a 35 L/min, alimentadas por dos tanques de 100 L cada uno.

Los riegos se realizaron en horarios de 6 am a 5 pm, seis veces por día en riegos de 1 minuto cada uno, controlados por un temporizador Intermatic® de seis eventos por día, este estaba conectado a un conector para que los sistemas encendieran al mismo tiempo. el tiempo se definió basado en pruebas realizadas para asegurar la uniformidad de riego en toda la bandeja.

Variables

Temperatura

Se tomó la temperatura con ayuda de un termómetro marca Taylor® en el área de cultivo, durante los 10 días de producción, en los cuales se realizaron mediciones en la mañana y tarde.

Semillas de Maíz

Para este experimento se utilizó maíz Tuxpeño certificado y tratado con funguicida proveniente de la planta de procesamiento de semillas de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Esta variedad tiene un rendimiento de 0.51 a 0.58 kg/m², presenta una buena adaptación a zonas e intermedias que va desde los 0 a los 1200 msnm, tiene un grano de tipo dentado, un promedio de 3,120 granos por kg de maíz y un porcentaje de germinación del 85 al 95% dependiendo de las condiciones brindadas.

Densidad y Preparación de Semillas

Se utilizó la densidad establecida por Ovando (2021) en cual se lograron los mejores rendimientos con maíz Tuxpeño con una densidad de 9.2 kg/m². Se usó 0.45 kg de maíz Tuxpeño por bandeja, con un promedio de 1404 semillas sometidas a un remojo de 24 horas dividido en dos partes con un período de secado al aire libre de 1 hora, después de pasadas las 12 horas.

Siembra

Una vez finalizado la pre germinación de la semilla, se siguió el protocolo planteado por Gómez (2008) donde se procedió a desinfectar las bandejas con cloro al 5% por un minuto, se colocó un papel toalla en el fondo de la bandeja, permitiendo que las semillas permanecieran húmedas.

Germinación

Para la germinación de las semillas se taparon las semillas de las bandejas, ya que estas deben estar en completa oscuridad para su correcto desarrollo, además se realizaron seis riegos durante todo el día para evitar exceso de humedad en las semillas. La etapa de germinación terminó cuando se observó las raíces entrelazadas completamente y los cotiledones comenzaban a emerger, este proceso termino al día 5.

Cosecha de Bandejas

Luego de 10 días de producción de forraje verde hidropónico, se procedió a cosechar las 10 bandejas presentes en los dos tratamientos utilizados. Para luego ser procesadas y obtener los valores de las variables a evaluar en este experimento como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Cosecha de bandejas: a. Riego Acuapónico; b. Riego Control Agua Potable Declorinada



Variables Evaluadas en Campo

Peso Húmedo

Para la variable de peso fresco, se realizó una medición directa colocando el colchón de forraje verde, que incluía tanto las raíces como el forraje. Se utilizó una balanza multifunción de 40 kg marca Truper debidamente calibrada esto permitió obtener el peso total del colchón de FVH, el peso se midió en kilogramos.

Altura (cm)

El proceso implicó seleccionar cuatro puntos representativos y uniformes dentro del área de muestreo. Los cuales se determinaron mediante un diseño de muestreo aleatorio, la regla se coloca perpendicularmente al suelo, asegurándose de que esté en contacto directo con la base del colchón

de forraje. Los datos obtenidos se registraron en centímetros, para luego obtener un promedio de los cuatro de muestro por bandeja.

Peso Raíz

La variable peso fresco de la raíz se determinó mediante la medición con una balanza de precisión debidamente calibrada. El procedimiento incluyó un corte al colchón del forraje, separando de manera cuidadosa la raíz del resto del material vegetal. Se pesaron por separado tanto la raíz como el forraje para obtener valores precisos de la biomasa de cada componente. Este proceso se llevó a cabo en las 20 bandejas del experimento.

Peso Forraje

Para obtener el peso del forraje se procedió a separar la totalidad de la materia verde de las raíces para cada bandeja haciendo un corte horizontal con ayuda de un cuchillo de corte. Seguidamente se procedió a pesarlo individualmente, se utilizó una balanza multifunción para 49kg de la marca Truper, los valores obtenidos fueron medidos en kilogramos.

Variables Evaluadas en Laboratorio

Peso Seco

La determinación del peso seco se realizó en el Laboratorio de Diagnóstico Molecular utilizando un procedimiento estandarizado de secado en horno. Con el objetivo de evaluar el contenido de materia seca y cuantificar la biomasa libre de humedad. Las muestras de forraje y raíces se separaron antes del secado para asegurar una deshidratación uniforme, ya que las características físicas y la composición de ambas partes pueden influir en la tasa de secado. Las muestras fueron pesadas inicialmente en muestras de 100 g cada uno para obtener el peso fresco, colocadas en bolsas de papel. El secado se llevó a cabo en un horno de convección a una temperatura constante de 70 °C durante un periodo de 72 horas, la temperatura y tiempo son óptimas para la deshidratación de forraje fresco sin provocar la descomposición térmica de los componentes orgánicos del forraje. Cada 24 horas, las muestras fueron removidas y agitadas para garantizar un secado homogéneo y evitar

puntos de humedad residual, que podrían afectar la precisión del peso seco final. Tras completar el secado de las muestras fueron retiradas del horno. Posteriormente, se pesaron nuevamente para obtener el peso seco.

Porcentaje de Materia Seca (%)

Para la variable de porcentaje de materia seca, se calculó multiplicando el peso húmedo de la bandeja por el peso seco expresado en porcentaje (Fórmula 1). Este procedimiento permitió obtener de manera precisa el contenido de materia seca de cada muestra.

$$\text{Materia Seca (\%)} = \text{Peso Seco (\%)} \times \text{Peso Húmedo por Bandeja} \quad [1]$$

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se usó un diseño completamente al azar, compuesto de dos tratamientos con 10 repeticiones cada uno para un total de 20 unidades experimentales. Para este estudio se utilizó la prueba T de Student con el programa JMP® Pro-18, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

Resultados y Discusión

Caracterización del Agua de Recambio

La caracterización de nutrientes presentes en el agua de recambio realizada por el laboratorio de calidad de agua, del Departamento de Ingeniería de Ambiente y Desarrollo, demostró presencia de los siguientes nutrientes mostrados en el Cuadro 2.

Cuadro 2

Resultados obtenidos en la caracterización nutricional del agua de recambio

Muestreo	Amonio (mg/L N- NH ₄)	Nitritos (mg/L N- NO ₂)	Nitratos (mg/L NO ₃)	Nitrógeno Total (mg/L N)	Fósforo Total (mg/L P)	Turbidez (NTU)
Dia 5	0.36	0.4	2.148	8.1	1.88	9.28
Dia 10	0.42	0.03	0.505	3.5	2.9	29.38

Calidad de Agua

El monitoreo del pH es fundamental ya que influye en la solubilidad y disponibilidad de nutrientes, así como en la toxicidad de ciertos compuestos para los organismos acuáticos. Un pH fuera del rango óptimo puede afectar tanto la salud de las tilapias como la eficiencia del sistema acuapónico para la absorción de nutrientes por las plantas. Según Guzmán (2015) el rango óptimo de pH para la producción de forraje es de 6 – 6.8, resultados diferentes a los obtenidos en este estudio, la variación en este parámetro se pudo deber a la procedencia de las dos diferentes fuentes de riego utilizadas. Las mediciones de nutrientes por medio de las pruebas API se realizaron con el fin de encontrar nutrientes nitrogenados en el agua de recambio utilizado para la producción del forraje verde hidropónico. Los resultados de los parámetros de pH y nutrientes obtenidos por medio de las pruebas rápida API se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3

Resultados pruebas API de calidad de agua en la producción de forraje verde hidropónico

Variable	Agua de Recambio (T1)	Agua Potable Declorinada (T2)
pH	8.56	7.34
Nitratos (mg/L)	0	0
Nitritos (mg/L)	0.9	0
Amonio (mg/L)	0.4	0

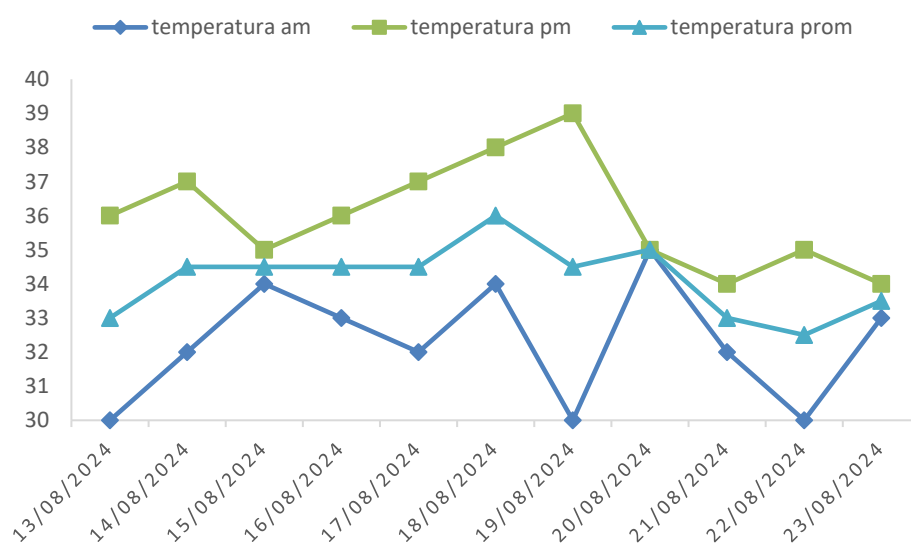
Sistema Hidropónico para la Producción de Forraje Verde Hidropónico

Temperatura

Durante los 10 días del experimento se realizaron las mediciones de temperatura con un valor promedio de 34 °C, en dos horas del día una en la mañana y otra en la tarde, con un termómetro en el área donde se realizó la producción de FVH en el invernadero de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8. Según Zagal et al. (2016), menciona que el rango óptimo de temperatura para la etapa de crecimiento del maíz debe ser de 24 °C a 30 °C, resultados diferentes obtenidos en este estudio debido al poco control que se tenía de este parámetro en el invernadero donde se realizó el estudio.

Figura 4

Comportamiento de la temperatura durante el experimento



VARIABLES EVALUADAS PARA EL FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO

Según los resultados obtenidos con el análisis de varianza realizado por medio de la prueba T, se obtuvo diferencias significativas para las variables tomadas en campo como lo muestra el Cuadro 4. En el T1 con en el cual se utilizó agua de recambio con respecto al T2 con agua corriente como fuente riego, presentando el primero mayor rendimiento para las variables evaluadas altura, peso húmedo, peso forraje y peso de raíces. El forraje verde hidropónico para el T1 obtuvo mayor altura con una media de 22.033 cm, peso de raíz con 0.995 kg y peso húmedo con 1.275 kg. Sin embargo, para las variables tomadas en laboratorio peso seco y porcentaje de materia seca por bandeja no mostraron diferencia significativa entre tratamientos. Durante el periodo de producción del forraje verde hidropónico hubo la presencia de un patógeno desconocido en los dos tratamientos. Esto se pudo deber al área donde se realizó el experimento, al ser una unidad de producción donde había un flujo constante de personas y el poco control que se tuvo del clima en el invernadero.

Cuadro 4

Resultados obtenidos para las variables tomadas en campo

Variable	Agua de Recambio (T1)	Agua Potable Declorinada (T2)	EE±	Valor P
Peso húmedo (kg)	1.275	1.052	0.057	0.013
Peso forraje (kg)	0.269	0.166	0.034	0.038
Peso raíz (kg)	0.995	0.888	0.026	0.0096
Altura (cm)	22.033	14.533	1.268	0.0006

Peso Húmedo (kg)

Para la variable peso húmedo se encontraron diferencias ($P = 0.013$) entre los dos sistemas de riego con un valor p de 0.057. En cual obtuvo un mayor rendimiento el sistema acuapónico con un promedio de 1.275 kg por bandeja a comparación del T2- agua potable declorinada que obtuvo un peso promedio de 1.05 kg, como lo muestra el cuadro 4. Resultados consistentes a los obtenidos por Putzu (2012) en el cual obtuvo un rendimiento en peso húmedo para el riego acuapónico de 0.768 kg y para el agua corriente de 0.663 kg con una diferencia significativa de 0.03. cabe resaltar que la diferencia entre los valores de peso húmedo de los estudios comparados pudo estar influenciada

debido a la densidad de siembra utilizada, donde para el estudio anteriormente mencionado fue de 0.3 kg en comparación con este estudio el cual se sembraron 0.46 kg semillas para cada unidad experimental. Continuando con lo anteriormente mencionado en las variables ambientales se ve una diferencia en la temperatura promedio con un valor de 20 a 19 grados durante los 10 días de producción del FVH en comparación con el obtenido para este estudio la cual fue de 33 a 35 °C. Por otro lado Ovando (2021) obtuvo rendimientos diferentes al estudio presentado donde obtuvo un rendimiento de 16.83 kg/m² con una densidad de 9.2 kg/m² y las mismas charolas utilizadas, para el tratamiento con agua corriente. En comparación con los resultados obtenidos en este experimento donde se obtuvo un rendimiento de 21.04 kg/m², esto se pudo deber a la utilización de un sistema bajo condiciones controladas en el invernadero de la unidad de acuicultura, con riegos automatizados cada hora brindando mejores condiciones de producción para el forraje verde hidropónico.

Peso Forraje

Como se puede observar en el Cuadro 4, el peso del forraje obtuvo diferencia entre los tratamientos ($P = 0.038$). El mayor rendimiento en el peso del forraje fue obtenido para el T1 donde se rego el forraje verde hidropónico con agua de recambio este obtuvo una media de 0.269 kg, en comparación con el T2 donde se utilizó agua corriente para el riego este obtuvo una media de 0.166 kg. Según información obtenida de Go Green Aquaponics (2024) en su estudio acerca del rol de los nitratos en los sistemas acuapónicos menciona que estos son una fuente crucial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Debido a que es un compuesto esencial para la producción de aminoácidos, proteínas y clorofila, todos estos necesarios para la fotosíntesis. El mayor rendimiento del T1 se pudo deber a la presencia de estos compuestos en el agua proveniente del agua de recambio como se observa en el Cuadro 3, obtenida de la caracterización del agua de recambio utilizada en el sistema de riego. Por otro lado en un estudio realizado por Nadeem et al. (2014) menciona que la semilla de maíz agota sus reservas de fosforo autotrófico luego del día cuatro, en adelante utiliza fosforo heterotrófico el cual debe ser suplementado externamente. El mayor rendimiento en el peso del forraje se pudo

deber a la cantidad de fósforo presente en el agua de recambio utilizada para el riego de este tratamiento durante los 10 días hasta la cosecha, como se observa en el Cuadro 3. El fósforo cumple funciones importantes en el desarrollo radicular, movilización de nutrientes y producción de compuestos esenciales para la formación de ATP por medio de la fotosíntesis.

Peso Raíz

Los resultados obtenidos para el peso de raíz, presento diferencia entre los dos tratamientos ($P = 0.0096$). El agua de recambio presenta un mayor peso en la cantidad de raíces por bandeja de FVH, el cual presento una media de 0.995. En comparación con el peso de raíz para el sistema con agua corriente el cual presento un valor de 0.888. Según Ramirez y Bravo (2017) en su estudio realizado los tratamientos en los cuales se aplicaron nutrientes nitrogenados por medio del sistema de riego al forraje verde hidropónico tuvieron un mayor grosor del colchón radicular y raíces más gruesas. Esto se pudo deber a la presencia de compuestos nitrogenados en el agua de riego como se puede observar en el Cuadro 3, donde se caracterizó el agua del efluente del cultivo de tilapia. Estos compuestos promueven el desarrollo celular, generando un mejor rendimiento en la planta y el sistema radicular. Por otra parte Oñate (2016) determinó que para la etapa inicial del maíz, este destina la mayor parte de su energía en las primeras semanas a la producción de raíces para luego poder generar sus primeras hojas. Por ende, se concluye que la cantidad de raíces será mayor que la cantidad de forraje producido hasta el día 10. Según las etapas del crecimiento del maíz para el día nueve a 10 el maíz ya tiene establecido su sistema radicular y es visible la primera o segunda hoja.

Altura

Se observaron diferencias para la altura, en los dos sistemas de producción ($P = 0.0006$). El sistema de producción acuapónico presento un mayor rendimiento en la altura de forraje con una media de 22.033 cm, con respecto al tratamiento con agua corriente el cual tuvo una media de 14.533 cm. Resultados similares obtenidos por (Ramirez, C. y Bravo, F., 2017) en donde el tratamiento con mayor cantidad de nitrógeno en la fertilización del FVH obtuvo una mayor altura con un promedio de

30 cm justificando que el mayor rendimiento de este parámetro es causado debido a que las concentraciones de nitrógeno presentes en el agua de riego promueve el crecimiento vegetativo y con ello la elongación de las células. Sin embargo, este parámetro no afectó el peso seco y el porcentaje de materia seca por bandeja de los tratamientos comparados. Según el estudio realizado por López Pascua y Mcfield Garcia (2013) la altura más baja se reporta en el tratamiento con agua corriente, esto concuerda con los resultados obtenidos en este experimento. En el estudio anteriormente mencionado expresa que esta variable está relacionada con la cantidad y grosor de las raíces debido a que puede haber una mayor absorción de nutrientes que resulte en una mayor altura del forraje. En el Cuadro 4 el tratamiento de FVH con sistema acuapónico se puede observar como este tiene mayor cantidad de raíces.

Cuadro 5

Resultados obtenidos para las variables tomadas en laboratorio

Variable	Agua de Recambio (T1)	Agua Corriente (T2)	EE±	P
Peso seco (g/100)	18.350	18.230	1.218	0.924
%MS/bandeja	22.535	19.289	1.175	0.066

Porcentaje de Materia Seca por Bandeja

Para este parámetro no se encontraron diferencias ($P = 0.066$) presentado en el Cuadro 5. Con respecto al T1 producido con riego acuapónico obtuvo una media mayor con un valor de 22.536%, en comparación con el T2 con riego de agua corriente el cual obtuvo un valor de 19.289%. Los valores obtenidos en esta variable son consistentes según el estudio realizado por Albert et al. (2016) en el cual se obtuvieron resultados similares con un rango del 19 al 25% de porcentaje de materia seca para forraje verde hidropónico cosechado a los 10 días. Según Elizondo (2005) los resultados obtenidos en este experimento están dentro de los parámetros óptimos con respecto al porcentaje de materia seca obtenidos en este estudio donde el forraje verde hidropónico de maíz, debe estar en un rango del 20 al 30% de ms a los 10 días de cosecha. Para finalizar según Vargas (2024), la inexistencia de diferencias para el valor del porcentaje de materia seca se debió a que para los tratamientos utilizados en este

experimento el maíz está en la misma edad fenológica a los 10 días, donde el valor del porcentaje de materia seca se mantiene a medida que se incrementan los días a cosecha. Esto se puede deber a que para este estado fenológico la tasa de respiración es homogénea con respecto a la fijación del carbono por medio de la fotosíntesis.

Peso Seco

No se encontró diferencia ($P = 0.94$) para este parámetro con una media del 18.35% para el sistema acuapónico y 18.20% como se puede observar en el Cuadro 5. Según Putzu (2012) la producción de FVH con diferentes tipos de riego, no presentó diferencias entre tratamientos con riego acuapónico donde obtuvo un porcentaje del 54% y riego corriente con 49% para la variable de peso seco, resultados que son consistentes con este estudio. La diferencia entre los porcentajes de los dos estudios se debió probablemente al procedimiento utilizado para obtener los resultados de este parámetro donde se usaron temperaturas, tamaño de muestras y hornos diferentes. Por otro lado Varela (2017) obtuvo resultados similares a este estudio donde obtuvo un porcentaje de peso seco del forraje verde hidropónico de maíz del 17.5% donde para los tratamientos evaluados con fertilización orgánica no tuvieron diferencias significativas entre tratamientos. En este estudio expresa que el forraje verde hidropónico de maíz junto con otros autores citados debe tener un peso seco en un rango entre el 18% y 20%.

Conclusiones

La utilización del agua de recambio sobrante de la producción de tilapia fue eficiente en la producción de biomasa.

El sistema acuapónico aplicado a la producción de forraje verde hidropónico (FVH) presentó mayor rendimiento para peso húmedo, altura, peso de raíces y peso del forraje.

Según este estudio el forraje verde hidropónico para las variables evaluadas como porcentaje de materia seca y peso seco no obtuvieron diferencias en el rendimiento.

Recomendaciones

Explorar la producción de otras variedades de gramíneas y leguminosas mediante el sistema acuapónico para diversificar la oferta alimentaria animal.

Se recomienda mantener un control riguroso del clima en el invernadero con respecto a la temperatura y humedad además de realizar un protocolo de sanidad en el área de producción para evitar la incidencia de enfermedades.

Se recomienda realizar un análisis bromatológico del forraje verde hidropónico para obtener más información acerca del contenido nutricional antes de ser aportado a alguna dieta animal.

Para el empleo de forraje verde hidropónico con propósitos nutricionales en animales, se debe utilizar semillas que no hayan sido sometidas a tratamientos con insecticidas ni fungicidas.

Referencias

- Albert, G., Alonso, N., Cabrera, A., Rojas, L. y Rosthoj, S. (2016). Productive evaluation of green fodder hydroponics corn, oats and wheat. *Compendio De Ciencias Veterinarias*, 6(1), 7–10. <https://doi.org/10.18004/compend.cienc.vet.2016.06.01.7-10>
- Calo, P. (2011). *Introduccion a la acuaponia*. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC). <https://aquaponiabrasil.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/09/introduc3a7c3a3o-a-aquaponia-espanhol.pdf>
- Chavarria, A. y Del Castillo, S. (2018). El forraje verde hidropónico (FVH), de maíz como alternativa alimenticia y nutricional para todos los animales de la granja. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 4(8), 1032–1039. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i8.6716>
- Juarez-López, P., Morales-Rodríguez, H. J., Sandoval-Villa, M., Gómez Danés, A. A., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rosete, C. R., Aguirre-Ortega, J., Alejo-Santiago, G. y Ortiz-Catón, M. (2013). Produccion de forraje verde hidropónico. *Revista Fuente Nueva Epoca*(13), 16–25. <http://aramara.uan.mx:8080/bitstream/123456789/2126/1/Produccion%20de%20forraje%20verde%20hidropónico.pdf>
- Martinez, R. (2013). La acuaponia. *REDICINAYSA*, 2(5). <https://www.ugto.mx/campusleon/dcs/images/redicinaysa/publicaciones/2013/redicinaysa-sept-oct-2013-universidad-guanajuato.pdf#page=16>
- Ordaz, J., Ramirez, D., Mora, J., Acosta, A. y Sema, B. (2010). *Efectos del cambio climatico sobre la agricultura*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ca6e1984-5456-44b7-b2a5-9e54794534fb/content>
- Ovando, M. (2021). *Determinacion de densidades y tipo de bandeja para la produccion de forraje verde hidropónico de maiz* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/a96d7adc-7699-45e4-b99e-1294e344c952/content>
- Ramirez, D., Sabogal, D., Jimenez, P. y Hurtado, H. (2008). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Facultad De Ciencias Basicas*, 4(1-2), 33–49. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2230/1937>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. (2022). *Produccion de alimentos en acuaponia a pequeña escala* (1ª ed.). <https://books.google.hn/books?hl=es&lr=&id=yMBqEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA125&dq=acuaponia+cultivo&ots=y0H-mVgfNv&sig=x1w6af27uZd8QF4hn82mMzgXxCM#v=onepage&q&f=false>
- Varela, M. (2017). *Producción de biomasa y calidad nutritiva de Forraje Verde Hidropónico* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. <https://repositorio.una.edu.ni/3713/1/tnf04v293.pdf>
- Vargas, A. (2024). *Evaluación productivo-ambiental de dos genotipos de maíz (Zea mayz L.) en forraje verde hidropónico bajo invernadero* [Tesis de pregrado, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Durango, Mexico]. tesis.ipn.mx.

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3576/EVALUACIONPRODUCTIVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zagal, M., Martínez, S., Salgado, S., Escalera, F., Peña, B. y Carrillo, F. (2016). Producción de forraje verde hidropónico de maíz con riego de agua cada 24 horas. *Abanico Veterinario*, 6(1). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-61322016000100029

Anexos**Anexo A**

Estanque utilizado para la obtención del agua de recambio



Anexo B

Kit API utilizado para la toma de pH y nutrientes durante el experimento.



Anexo C

Sistema utilizado para la producción de forraje verde hidropónico



Anexo D

Termómetro utilizado para la obtención de temperatura durante el experimento

