

## APROVECHAMIENTO DE METABOLITOS NITROGENADOS DEL CULTIVO DE TILAPIA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO

### Nitrogen metabolites use from tilapia culture in aquaponic system

Alejandro Cervantes-Santiago, Martha Patricia Hernández-Vergara\*, Carlos Iván Pérez-Rostro

Laboratorio de Mejoramiento Genético y Producción Acuícola. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Boca del Río Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, CP. 94290, Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia: mphv1@yahoo.com.mx

**Artículo científico**      **recibido:** 27 de enero de 2015, **aceptado:** 4 de agosto de 2015

**RESUMEN.** En un ciclo de producción de tilapia, se realizó el cultivo de hongos setas, forrajes verdes y cucurbitáceas en un sistema acuapónico, con el objetivo de evaluar la eficiencia en la remoción y aprovechamiento de desechos nitrogenados. Para el estudio se usó un sistema de recirculación de tres tinajas circulares de 7 m<sup>3</sup>, en las que se sembraron 64 tilapias por m<sup>3</sup>. En la primera fase, se mantuvieron tres ciclos de cultivo de setas de 20 d, en dos sistemas: acuaponía y riego tradicional. Posteriormente, se realizaron seis ciclos de 12 d de crecimiento de cuatro forrajes verdes: maíz amarillo y blanco, trigo y sorgo, para luego realizar un ciclo de 45 d de pepino y sandía en bicultivo. La producción acumulada total de setas en el tratamiento de acuaponía durante los tres ciclos fue 16 % superior al obtenido con riego tradicional. La mayor producción de forraje en biomasa total fresca se obtuvo el trigo (47.55 kg); la mayor longitud de tallos (27 ± 2.20 cm) y eficiencia de remoción de metabolitos nitrogenados en el maíz blanco. Las plantas de pepino y sandía produjeron frutos al segundo mes de cultivo, con rendimiento de 27.15 y 4.84 kg, respectivamente, las cuales fueron más eficientes en aprovechar los metabolitos que las setas y los forrajes. En el ciclo de producción producción de tilapia se puede cultivar diferentes vegetales y aprovechar los metabolitos nitrogenados con acuaponía.

**Palabras clave:** Acuicultura, acuaponía, forraje de maíz, sistemas integrados, sustentabilidad

**ABSTRACT.** During tilapia production cycle (six months), mushrooms, green fodder and cucurbits were conducted in an aquaponic system to evaluate their efficiency in the removal and use of nitrogenous waste. For the study, a recirculation system of three circular tanks of 7m<sup>3</sup> was used, where 64 tilapias per m<sup>3</sup> (0.35 ± 0.18 g) were stocked. During the first phase, three mushroom cultivation cycles of 20 d were developed in two systems: Aquaponic and traditional irrigation. Subsequently, six 12 d of growth cycles for green fodders (yellow and white maize, wheat and sorghum), and finally one 45 d cucumber and watermelon bicultivation cycles were done. The total cumulative mushroom production in the aquaponic treatment during the three cycles was 16 % higher than the obtained in the traditional treatment. Most of forage production in total fresh biomass was obtained with wheat (47.55 kg), however The higher length in the stems (27 ± 2.20 cm) and the greater nitrogen metabolite removal efficiency were achieved with white maize. The cucumber and watermelon plants produced fruits until the second month of culture with total yield of 27.15 kg and 4.84 kg, respectively, and also they are the most efficient to leverage metabolites versus mushrooms and fodder. With the above results, it can be concluded, that during the tilapia production, it is possible to grow various vegetables, and take advantage of nitrogenous metabolites by aquaponic practices.

**Key words:** Aquaculture, aquaponic, maize fodder, integrated system, sustainability

### INTRODUCCIÓN

La acuaponía es una actividad con la que se producen alimentos para consumo humano y ani-

mal, a partir del aprovechamiento de los metabolitos derivados de la alimentación de especies acuáticas, por lo que es una alternativa tecnológica sustentable (García-Ulloa et al. 2005, Rakocy et al.

2006). Los sistemas acuapónicos pueden fabricarse de diversos materiales y dimensionarse con base en la disponibilidad de espacio, volumen de agua y especie acuática en cultivo. Son sistemas versátiles, que llaman la atención de productores acuícolas y agrícolas que están incursionando en esta actividad (Pérez-Rostro *et al.* 2013). Algunos de las plantas más sembradas en acuaponía son la albahaca y la lechuga; sin embargo, existen otras plantas con potencial, como los forrajes verdes (López-Aguilar *et al.* 2009).

La producción de forrajes en acuaponía puede ser una alternativa para abastecer de alimento al ganado en épocas de escasez de lluvias, mediante la obtención de germinados de maíz, trigo, sorgo, cebada, arroz y alfalfa provenientes de cultivos acuapónicos (Vargas-Rodríguez 2008, Rivera *et al.* 2010). Los metabolitos nitrogenados que se generan durante las actividades acuícolas se pueden aprovechar, en lugar de verterlos a los cuerpos de agua y disminuir el impacto sobre el medio ambiente (Pérez-Rostro *et al.* 2013). Los vegetales de ciclo corto son una alternativa para sistemas acuapónicos, principalmente, aquellos con bajos requerimientos de nutrientes y alto valor comercial (Álvarez-Rodríguez *et al.* 2010), como los hongos comestibles y las cucurbitáceas. Resultados de estudios previos indican que los monocultivos en sistemas acuapónicos presentan un ciclo de producción más corto que el que tienen los peces y crustáceos (Pérez-Rostro *et al.* 2013), donde se genera además un incremento paulatino de los nutrientes en el sistema, derivado del aumento de la biomasa acuática (Ronzón-Ortega *et al.* 2012). Por lo anterior, se planteó el objetivo de evaluar la eficiencia en la remoción de metabolitos y la productividad de un sistema acuapónico con tilapia, asociado a la producción de hongos setas, forrajes verdes y cucurbitáceas, bajo un esquema de aprovechamiento integral de los nutrientes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó de enero a junio de 2012, en la planta piloto de acuaponía del Laboratorio de

Mejoramiento Genético y Producción Acuícola, del Instituto Tecnológico de Boca del Río, Veracruz, México.

### Planta piloto

El cultivo de las crías de tilapia (*Oreochromis niloticus*) se realizó en un sistema de recirculación de tres tanques circulares de 7 m<sup>3</sup>, recubiertos de polietileno de alta densidad, conectado a un filtro mecánico de 750 L con arpillas plásticas (trampa de sólidos), un filtro biológico de 750 L con biobolas plásticas y un tanque de bombeo con flujo permanente, aireación constante con un aireador regenerativo de un HP. El cultivo de setas (*Pleurotus ostreatus*) y forrajes verdes de maíz (*Zea mays* L.) blanco y amarillo, sorgo (*Sorghum vulgare*) y trigo (*Triticum aestivum*), se realizó en un sistema acuapónico con dos módulos verticales de metal de 4.10 m x 2.20 m x 0.50 m, en tres niveles, con un sistema de riego por aspersión, con flujo de 2 L d<sup>-1</sup>. Uno de los módulos acuapónicos se conectó en circuito cerrado al sistema de producción acuícola, mediante tubería de PVC, con el objetivo de recuperar el agua después de su paso por el módulo acuapónico. En el segundo módulo (Tratamiento tradicional), se mantuvo un riego directo con agua potable sin nutrientes y flujo constante de 2 L d<sup>-1</sup>. Todos los días se recuperó el agua perdida por evaporación o fugas para mantener el buen funcionamiento del sistema de recirculación.

Las semillas de los forrajes y cucurbitáceas utilizadas se adquirieron en un local comercial especializado en venta y distribución de semillas y especias, ubicado en el mercado de la Ciudad de Veracruz, las cuales estaban libres de insecticidas y pesticidas; mientras que los micelios de las setas se compraron en la Unidad de Capacitación para el Desarrollo Rural número 2, de Coatepec, Veracruz.

Para el cultivo de las plantas, se emplearon charolas agrícolas de 0.125 m<sup>2</sup>. Durante el cultivo de los forrajes y cucurbitáceas, no se usó tratamiento control, debido al limitado espacio destinado a la planta piloto, por ello se consideró conveniente aprovecharlo para los tratamientos en evaluación. Por lo anterior, los dos módulos

acuapónicos se conectaron en recirculación con el sistema acuícola. Para el cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) y sandía (*Citrullus lanatus*), se utilizó un canal de membrana plástica (linner) con estructura externa de PVC, con dos secciones de 4.0 x 0.30 m, conectado en recirculación con el sistema acuícola, mediante una tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$  con un flujo continuo de agua de  $8 \text{ L min}^{-1}$ . Las plantas se colocaron dentro de cestos de plástico de 20 cm de diámetro x 35 cm de alto, de forma vertical y homogénea sobre la superficie del canal.

Durante el cultivo, se probaron dos tipos de sustratos de fijación radicular: 1) una mezcla 50:50 de arena sílica y tezontle, y 2) una mezcla 50:50 de conchas pequeñas y arena sílica, ya que resultados previos en el laboratorio que demostraron que, después de un ciclo acuapónico, el tezontle se desmoronara y afecta el desarrollo radicular (Ronzón-Ortega et al. 2012), mientras que las conchas son un material local, inerte, sin valor comercial, que puede ser una alternativa en acuaponía.

### Organismos experimentales

Se emplearon 1 350 crías de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con un peso promedio inicial de  $0.35 \pm 0.18 \text{ g}$ , que se sembraron en enero y se mantuvieron en el sistema de cultivo por seis meses, durante los que se proporcionó una dieta comercial (Pedregal, Silver Cup<sup>®</sup>) con 45 % de proteína, que se administró en una ración equivalente al 15 % de su biomasa total, dividida en cuatro raciones por día. Cada 15 d se realizaron biometrías para evaluar el incremento de biomasa (g) y longitud promedio (cm), al final del estudio se determinó la supervivencia (%). La propagación de micelios de las setas (*Pleurotus ostreatus*) inició en enero, época del año en la que se registran temperaturas promedio de  $21 \text{ °C}$ , la cual es una temperatura adecuada para el cultivo de setas (Gaitán-Hernández y Salmones 2008).

**Experimento 1.** Se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar con dos tratamientos y cuatro bolsas con micelios como réplicas, durante

tres ciclos de 20 d cada uno. La propagación e incubación de los micelios se realizó en una habitación oscura, con temperatura constante de  $28 \text{ °C}$  por 21 d. Se empleó como sustrato 2.5 kg de paja de avena desinfectada, dentro de una bolsa plástica, en donde se distribuyeron al azar 125 g del inóculo de micelios (Romero et al. 2010). Cuando se observó la presencia de los primeros primordios, las bolsas se colocaron en los módulos verticales, donde se mantuvieron hasta obtener setas de tamaño comercial. Se evaluó el número de cuerpos fructíferos por tratamiento, el diámetro del sombrero o píleo, el peso promedio individual de los cuerpos fructíferos, así como el rendimiento total en peso húmedo por bolsa y por tratamiento. Además, se monitoreó la temperatura de entrada y salida del agua de los módulos acuapónicos y cada 7 d se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos del agua: amonio no ionizado ( $\text{mg L}^{-1}$ ), nitritos ( $\text{mg L}^{-1}$ ), nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ), fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y pH.

**Experimento 2.** A partir de abril, se observó un incremento de la temperatura ambiental y del agua ( $31.1$  y  $27.3 \text{ °C}$ , respectivamente), además de un aumento de la biomasa de las tilapias y la concentración de metabolitos nitrogenados, por lo que se inició el segundo estudio. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, para evaluar la productividad de forrajes de maíz blanco y amarillo (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum vulgare*) y trigo (*Triticum aestivum*), en seis ciclos productivos de 12 d cada uno. La producción se realizó en 16 charolas plásticas rectangulares de  $0.125 \text{ m}^2$ , en las que se pusieron 500 g de semillas previamente hidratadas. Las charolas se colocaron al azar en los módulos acuapónicos verticales. La germinación de las semillas se realizó de acuerdo con Vargas-Rodríguez (2008) y López-Aguilar et al. (2009). Todos los días se realizaron cuatro riegos por aspersión de 500 ml de agua por charola a las 8, 12, 16, 20 h mediante un flujo de  $2 \text{ L d}^{-1}$ . Al final de cada ciclo, se evaluó la altura de los tallos de cada especie, rendimiento promedio de forraje verde, rendimiento de forraje verde por  $\text{m}^2$  y la pro-

ducción acumulada de los seis ciclos.

**Experimento 3.** En el mes de mayo, Temperatura ambiental y del agua de cultivo fue de  $33.48 \pm 1.0$  y  $28.65$  °C, respectivamente, con lo que se tuvo un incremento de actividad metabólica y biomasa de las tilapias. El tercer experimento tuvo una duración promedio de 45 d, bajo un diseño experimental factorial en bloques al azar de  $2 \times 2$ , con dos especies de cucurbitáceas: pepino y sandía, cultivados en dos mezclas de sustratos de fijación en una proporción 50:50 de cada material: 1) arena sílica de 0.2 cm de diámetro y tezontle de 1.5 cm de diámetro, y 2) conchas de moluscos de 1 cm de largo y arena gruesa de 0.4 cm de diámetro, con cinco repeticiones por tratamiento. Las mezclas de sustratos se colocaron dentro de cestos de plástico de 20 cm de diámetro y 35 cm de altura, recubiertos con malla plástica para evitar la pérdida del material. La germinación del pepino y sandía se realizó en charolas plásticas de  $0.125 \text{ m}^2$  con compartimientos individuales de  $1 \text{ cm}^2$ , en los que se colocó una semilla por compartimiento, sobre una mezcla 50:50 de arcilla y cascarilla de coco como sustrato de fijación. Las plantas se trasplantaron al sistema acuapónico cuando tenían 7 cm de altura, colocando una por unidad experimental. Durante el cultivo, se evaluó la altura de las plantas, peso y longitud promedio de frutos, número de frutos por planta y por tratamiento, así como rendimiento promedio por planta y por tratamiento.

### Calidad del agua y aprovechamiento de nutrientes

Todos los días se midió la temperatura del agua, y cada semana, la eficiencia de absorción de los derivados nitrogenados en las plantas en acuaponía a partir de la determinación de la concentración promedio de amonio ( $\text{mg L}^{-1}$ ), nitritos ( $\text{mg L}^{-1}$ ), nitratos ( $\text{mg L}^{-1}$ ), fosfatos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y pH, tanto en la entrada como en la salida de agua del módulo de cultivo; mediante pruebas colorimétricas. En el caso de los forrajes, las muestras de agua para la evaluación se tomaron de forma directa de las charolas, sin considerar el tiempo de permanencia

del agua en el módulo, por lo que se tomó muestras del agua de la entrada, luego de la salida; posteriormente se procedió a las determinaciones *in situ*.

### Composición nutrimental de las setas y forrajes

Al final del estudio, se tomaron muestras aleatorias de los cuerpos fructíferos maduros de las setas y forrajes, con el objetivo de determinar: composición bromatológica porcentual por triplicado; el contenido de humedad, mediante secado en horno de inversión a  $70$  °C; contenido de proteína total, por Kjeldahl Gunning-Arnold; lípidos totales, por Soxhlet; fibra cruda, por digestión ácida, y cenizas, por calcinación (AOAC 1990).

### Análisis de resultados

Previo al análisis, a los datos se les evaluó normalidad y homocedasticidad, por medio de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levens (Zar 1999). Debido a que se cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, no se requirió la transformación, excepto para la supervivencia (%), que fue transformada a arcoseno. Los datos se analizaron mediante ANOVA de una o dos vías, dependiendo el diseño experimental; en el caso de más de dos tratamientos, se realizó comparación de medias de Tukey ( $p < 0.05$ ). Todos los análisis se realizaron con el software STATISTICA v. 7.0.

## RESULTADOS

### Cultivo acuícola

Los intervalos de temperatura registrados durante el estudio permanecieron dentro de los valores de tolerancia para el cultivo de tilapia. Sin embargo, al inicio del estudio fueron menores al valor óptimo recomendado para su crecimiento. A partir de abril, se tuvo una temperatura promedio superior a  $28.6$  °C, lo que permitió un incremento del peso, obteniendo un peso promedio final de  $149.68 \text{ g}$  y una supervivencia de  $78.88 \%$ . La concentración de oxígeno disminuyó conforme se incrementó la temperatura y la biomasa. En enero, se registraron valores promedio de oxígeno disuelto

**Tabla 1.** Parámetros fisicoquímicos promedio del agua en el sistema acuícola durante el cultivo de tilapia.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
T <sup>0</sup> C	21.69 ± 2.80	22.57 ± 3.20	24.75 ± 1.60	28.60 ± 2.30	28.65 ± 1.20	28.73 ± 0.80
pH	8.4 ± 0.09	8.2 ± 0.90	8.2 ± 0.09	8.0 ± 0.05	8.0 ± 0.06	8.0 ± 0.05
	mg/L					
NH <sub>3</sub> -N	0	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.06	0.60 ± 0.12	0.60 ± 0.12	0.21 ± 0.11
NO <sub>3</sub>	10.0 ± 3.91	20.0 ± 4.43	20.0 ± 6.50	50.0 ± 21.33	110.0 ± 28.90	20.0 ± 6.52
NO <sub>2</sub>	0.1 ± 0.07	0.1 ± 0.07	0.16 ± 0.09	0.3 ± 0.12	1.6 ± 0.40	0.46 ± 0.18
PO <sub>4</sub>	2.5 ± 0.80	2.5 ± 0.80	2.5 ± 0.80	5.0 ± 1.23	5.0 ± 1.23	2.5 ± 0.80
Dureza	168.3 ± 15.20	193.3 ± 18.59	297.3 ± 20.35	300.0 ± 19.60	300.0 ± 19.14	300.0 ± 19.44

± Desviación estándar.

**Tabla 2.** Resultados promedio obtenidos durante la producción de setas en acuaponía y tradicional (riego directo con agua potable), en tres ciclos de cultivo.

Variable	Tratamientos	
	Tradicional	Acuaponía
	mg/L	
Número de cuerpos fructíferos por bolsa (n)	18.41 ± 4.30	16.83 ± 8.66
Número de setas por tratamiento (n)	221.00	202.00
Diámetro de los sombreros (cm)	8.75 ± 0.30b	10.60 ± 0.88a
Peso promedio individual de las setas (g)	36.08 ± 5.38b	56.04 ± 30.58a
Rendimiento total en peso húmedo por bolsa (g)	625.25 ± 76.17b	749.58 ± 121.45a
Rendimiento total en peso húmedo por tratamiento (kg)	7.50b	8.99a

\*Valores con el mismo superíndice en la misma columna no son estadísticamente diferentes (ANOVA  $p \leq 0.05$ ), ± Desviación estándar.

de  $6.76 \pm 0.23 \text{ mg L}^{-1}$  y de abril a junio, se tuvo una concentración de  $5.26 \pm 0.32 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabla 1).

**Experimento 1.** La temperatura ambiente del área de producción de las setas se mantuvo entre 24.3 y 27.7 °C. Después de 40 d, los cuerpos fructíferos del sistema acuapónico alcanzaron un peso promedio de 500 g, el diámetro de sombrero y peso total de fructificación fue estadísticamente superior al observado en las setas bajo cultivo tradicional (Tabla 2).

**Experimento 2.** La longitud del tallo del maíz blanco fue estadísticamente superior a las otras plantas forrajeras cultivadas. La mayor producción acumulada se obtuvo con el trigo, mientras que el sorgo manifestó rendimiento, altura de tallo y producción inferiores a los obtenidos con el trigo, aunque similares al maíz (Tabla 3).

**Experimento 3.** El incremento de la temperatura ambiental y la máxima producción de metabolitos nitrogenados tuvo un efecto positivo en el crecimiento de las plantas de sandía y pepino. Estas

últimas tuvieron una longitud promedio de  $277 \pm 0.3 \text{ cm}$  en 45 d de cultivo, mientras que la sandía, de  $173 \pm 0.6 \text{ cm}$ . Después de 23 d de cultivo, se observaron las primeras flores en ambas especies. Los primeros frutos de pepino se observaron 30 d, mientras que en la sandía a los 32 d. Las frutas de pepino maduraron en un promedio de 3 a 5 d, por lo que la cosecha comenzó a partir del día 33 de cultivo, mientras que las frutas de sandía requirieron en promedio 11 d para madurar, iniciando la cosecha en el día 43, con rendimiento de 27.15 kg de pepino y 4.84 kg de sandía (Tabla 4).

### Aprovechamiento de los metabolitos nitrogenados

Durante el cultivo de las setas, se presentaron lecturas superiores de la concentración de metabolitos nitrogenados en la salida del agua del sistema en relación con la entrada, por lo que se consideró que había degradación del sustrato, debido a que las setas tienen la capacidad de digerir el sustrato de fijación y transformarlo a otros elementos, lo que afectó los parámetros químicos del agua y dificultó la cuantificación de los nutrientes. Durante

**Tabla 3.** Resultados promedio obtenidos durante la producción de setas en acuaponía y tradicional (riego directo con agua potable), en tres ciclos de cultivo.

Variable	Tratamientos			
	Trigo	Maíz amarillo	Sorgo	Maíz blanco
Altura máxima de los tallos por ciclo (cm)	20.38 ± 2.77 <sup>c</sup>	23.92 ± 2.53 <sup>b</sup>	18.08 ± 2.14 <sup>d</sup>	27.00 ± 2.20 <sup>a</sup>
Rendimiento promedio de forraje verde por charola (kg)	1.98 ± 0.43 <sup>a</sup>	1.47 ± 0.16 <sup>b</sup>	1.44 ± 0.13 <sup>b</sup>	1.64 ± 0.25 <sup>b</sup>
Rendimiento de forraje verde por m <sup>2</sup> (kg)	15.84 <sup>a</sup>	11.79 <sup>b</sup>	11.55 <sup>b</sup>	13.17 <sup>b</sup>
Rendimiento calculado (kg)	3.96 <sup>a</sup>	2.95 <sup>b</sup>	2.88 <sup>b</sup>	3.29 <sup>b</sup>
Producción acumulada (kg)	47.55 <sup>a</sup>	35.38 <sup>b</sup>	34.64 <sup>b</sup>	39.51 <sup>b</sup>

\*Valores con letras diferentes en columna son diferentes estadísticamente con base Prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) ± Desviación estándar.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos durante la producción acuapónica de pepino y sandía, empleando dos sustratos de fijación.

Variable	Tratamientos			
	Pepino en arena sílica y tezontle	Pepino en conchas y arena sílica	Sandía en arena sílica y tezontle	Sandía en conchas y arena sílica
Altura máxima de plantas (cm)	277.00 ± 0.30	272.00 ± 0.60	164.00 ± 0.70	173.0 ± 0.60
Peso promedio de frutos (g)	287.54 ± 26.33	278.68 ± 15.64	583.68 ± 51.11	618.27 ± 36.75
Longitud promedio de frutos (cm)	18.48 ± 0.42	18.26 ± 0.35	21.33 ± 1.52	19.80 ± 3.49
Rendimiento promedio por planta (kg)	2.82 ± 0.35	2.61 ± 0.25	0.35	0.62
Rendimiento promedio por tratamiento (kg)	14.12	13.03	1.75	3.09
Número de frutos por tratamiento (n)	49.00	47.00	3.00	5.00

± Desviación estándar.

**Tabla 5.** Porcentajes de metabolitos utilizados como nutrientes durante la producción acuapónica de forraje verde por especie y por sistema, y producción de pepino y sandía.

Variable	Concentración en la salida del sistema (mg/L)								
	Forraje verde						Pepino y sandía		
	Entrada General	Trigo	Maíz amarillo	Sorgo	Maíz blanco	Total utilizado (%)	Entrada General	Pepino y sandía	Total utilizado (%)
NH <sub>3</sub> -N	0.6	83.3 <sup>c</sup>	50.0 <sup>b</sup>	50.0 <sup>b</sup>	100.0 <sup>a</sup>	70.8	0.60 <sup>a</sup>	0.0 <sup>b</sup>	100.00
NO <sub>2</sub>	0.3	0	0	0	0	0	1.60 <sup>a</sup>	0.1 <sup>b</sup>	93.75
NO <sub>3</sub>	50.0	60.0 <sup>b</sup>	80.0 <sup>a</sup>	0	80.0 <sup>a</sup>	55.0	110.00 <sup>a</sup>	10.0 <sup>b</sup>	90.90
PO <sub>4</sub>	5.0	50.0 <sup>a</sup>	50.0 <sup>a</sup>	0.0 <sup>b</sup>	50.0 <sup>a</sup>	37.5	5.00 <sup>a</sup>	1.0 <sup>b</sup>	80.00

\*\*Valores con letras diferentes en columna son diferentes estadísticamente con base en la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

**Tabla 6.** Composición proximal promedio de los forrajes acuapónicos de trigo, maíz amarillo, sorgo y maíz blanco.

Variable	Composición proximal (%)			
	Trigo	Maíz Amarillo	Sorgo	Maíz Blanco
Materia Seca Total	14.88 ± 1.21 <sup>a</sup>	12.93 ± 0.73 <sup>ab</sup>	16.23 ± 0.22 <sup>a</sup>	10.18 ± 0.85 <sup>b</sup>
Proteína Total	38.20 ± 0.35 <sup>a</sup>	18.92 ± 0.28 <sup>b</sup>	43.83 ± 0.57 <sup>a</sup>	26.83 ± 0.29 <sup>b</sup>
Lípidos Totales	11.13 ± 0.72	8.32 ± 0.52	9.91 ± 0.32	10.63 ± 0.82
Cenizas	11.26 ± 0.26	10.47 ± 0.32	12.60 ± 0.12	4.70 ± 0.25
Fibra Cruda	13.06 ± 0.52 <sup>a</sup>	15.98 ± 0.12 <sup>ab</sup>	14.72 ± 0.37 <sup>a</sup>	18.68 ± 0.54 <sup>b</sup>

\*Valores con el mismo superíndice en la misma columna, en base a la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), ± Desviación estándar.

el cultivo de forrajes, se observó que el maíz blanco presentó la mayor capacidad de asimilación de nutrientes en comparación con los otros forrajes, ya que se registró una disminución de la concentración de amonio no ionizado en las descargas del sistema acuapónico en comparación con la entrada, mien-

tras que en el maíz amarillo y sorgo, las diferencias en la concentración fueron menores que las de maíz blanco (Tabla 5a).

Los nitritos se mantuvieron constantes después de pasar por el sistema acuapónico en todos los tratamientos de forraje. La absorción de

los fosfatos varió en los forrajes, teniendo el trigo, maíz amarillo y blanco una absorción de 50 %. Las plantas de pepino y sandía aprovecharon el 100 % de amonio, mientras que sólo el 93.73 % de nitritos y 90.9 % de nitratos (Tabla 5b). En general, el pH del agua del sistema acuícola tuvo un valor promedio de 8.2; después de pasar por los sistemas acuapónicos para todos los cultivos, disminuyó a 7.9.

### Composición proximal de las setas y forrajes verdes

La composición bromatológica de las setas en ambos tratamientos fue similar, con contenidos de 16.5 % proteína, 1.2 % de lípidos y 15 % de fibra. El sorgo tuvo el mayor porcentaje de materia seca, aunque no fue diferente estadísticamente al del trigo y maíz amarillo. Los forrajes con los mayores porcentajes de proteína fueron el sorgo y el trigo, y los menores se presentaron en el maíz. En tanto, el mayor porcentaje de fibra cruda (18.68 %) se presentó en el maíz blanco, el cual fue estadísticamente superior al obtenido con el trigo y el sorgo (Tabla 6).

## DISCUSIÓN

### Cultivo acuícola

De enero a marzo, en la zona conurbada de Veracruz-Boca del Río, se presentan las menores temperaturas del año, las cuales no son adecuadas para el cultivo de peces y crustáceos, a pesar de lo cual, algunos productores mantienen sistemas de cultivo en espera de condiciones óptimas. Por lo anterior, en estos meses, la acuaponía puede ser una actividad complementaria a la acuicultura, ya que proporciona bienes alimenticios y económicos a los productores (Pérez-Rostro *et al.* 2013). Los resultados del presente estudio indican que el cultivo acuapónico de vegetales durante dichos meses no afecta la supervivencia de las tilapias, ya que estuvo dentro de los rangos reportados como eficientes para un cultivo en recirculación (Rakocy *et al.* 2006 y Soto-Zarazúa *et al.* 2010). A diferencia de la supervivencia, el peso final de las tilapias después de 23 semanas de cultivo fue menor al esperado, que era

de 500 g bajo condiciones óptimas de temperatura. Lo anterior pudo ser resultado las temperaturas en el agua menores a 24 °C, las cuales se mantuvieron hasta el mes abril y ocasionaron una baja tasa de crecimiento inicial en las tilapias (Barki *et al.* 2001; Rakocy *et al.* 2006).

Al incrementarse la temperatura del agua y ambiental, la tasa metabólica y de crecimiento de las tilapias aumentó, al igual que la producción de metabolitos nitrogenados, incluso a valores que pueden considerarse tóxicos durante un cultivo tradicional. Cuando la concentración de NO<sub>3</sub> fue 100 % superior a la concentración inicial, las plantas de pepino y sandía fueron las especies vegetales con mayor demanda de nutrientes, ya que aprovecharon los metabolitos derivados del sistema acuícola para su desarrollo y producción. Durante el estudio, se observó que una de las limitantes para el buen funcionamiento del sistema acuapónico es la concentración de oxígeno disuelto, que debe ser superior a 5 mg L<sup>-1</sup> (Rakocy *et al.* 2006), ya que así cubre las necesidades de la especie acuícola, el complejo ambiente bacteriológico presente en el filtro biológico y el requerimiento de las plantas en cultivo. La concentración de oxígeno en el presente estudio se mantuvo constante debido al sistema de aireación permanente y al flujo continuo de agua, lo que además contribuyó a la eliminación de sedimentos en las raíces de las plantas (Pérez-Rostro *et al.* 2013).

**Experimento 1.** Los resultados indican la factibilidad de cultivo de setas en sistemas acuapónicos, lo que tiene un alto potencial, debido a que incrementó 16 % la producción en el sistema acuapónico en relación con el cultivo tradicional, en el que se riega con agua potable sin nutrientes. Aunque las setas cuentan con mecanismos que les permiten obtener nutrientes para su crecimiento, a partir de la degradación del sustrato de fijación y del aprovechamiento de productos ricos en nitrógeno y de compuestos inorgánicos (Gaitán-Hernández *et al.* 2006), las diferencias en el crecimiento indica que aprovecharon los nutrientes provenientes del sistema acuícola y generaron biomasa. Sin embargo, debido

a la degradación del sustrato, no se pudo determinar con exactitud el grado de aprovechamiento de los mismos. Por otro lado, y a pesar de que se tuvieron temperaturas menores a 21 °C, durante el presente estudio se tuvieron tres ciclos de producción hasta talla comercial. Al respecto Gaitán-Hernández y Salmones (2008) indican que la humedad ambiental durante el cultivo de setas debe estar entre 70 y 90 % para asegurar cuerpos fructíferos bien desarrollados.

**Experimento 2.** Durante el germinado y cultivo de los diferentes forrajes evaluados, se observó un crecimiento constante, aunque algunos autores indican que para producir forraje verde de trigo, avena y cebada se requieren temperaturas entre 18 y 21 °C, mientras que el forraje de maíz necesita temperaturas de 25 a 28 °C (López-Aguilar et al. 2009, Rivera et al. 2010). Al respecto Vargas-Rodríguez (2008) señala que se puede tener un buen rendimiento de forraje, aun cuando el cultivo esté fuera de los valores ambientales recomendados, siempre que se cubran sus requerimientos de nutrientes. No se encontraron diferencias de crecimiento y de producción entre especie, lo que puede estar relacionado con las tasas de crecimiento de cada gramínea, su origen o variedad (Rivera et al., 2010) como se observa en las diferencias entre el maíz blanco y amarillo. El sorgo fue el forraje con la mayor producción total, mientras que el maíz blanco tuvo la mayor altura de tallo, con valores similares a los que obtuvo Vargas-Rodríguez (2008), lo que sugiere que el agua del sistema acuícola cubrió las necesidades nutricionales de las plantas.

**Experimento 3.** Durante el cultivo de pepino y sandía, la temperatura ambiental promedio fue de  $33.48 \pm 1$  °C, lo que causó un rápido crecimiento y producción de frutos en las dos especies. Lo anterior pudo deberse a que las raíces permanecieron inundadas en un flujo continuo de agua del sistema acuícola, lo que favoreció su desarrollo, dando como resultado una reducción del 50 % del periodo con respecto al cultivo tradicional, que oscila entre 75 y 90 d (García-Ulloa et al. 2005). Lo que

puede deberse de las altas concentraciones de amonio no ionizado ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), biodisponible en el agua. Al respecto, Rakocy et al. (2006) sugieren que el número de plantas que se pueden cultivar en acuaponía está relacionado con la biomasa acuícola y la tasa de alimentación durante el cultivo, lo que puede variar con el desempeño de la especie acuática. Al respecto Van Gorder (1991) indica que una elevada concentración de amonio en el agua de riego puede afectar el crecimiento de las plantas, así como la formación y maduración de frutos, por lo que es fundamental que el agua proveniente del sistema acuícola pase primero por un filtro biológico, en donde se transformen los metabolitos a productos que se puedan aprovechar por las plantas (Rakocy et al. 2006). Con respecto a los sustratos de fijación probados, es importante destacar que la causa de evaluar el desempeño de la concha como sustrato es su disponibilidad local (Ronzone-Ortega et al. 2012, Pérez-Rostro et al. 2013). De acuerdo los resultados, la concha mantuvo su estructura al final del estudio, con la ventaja adicional de que en dicho sustrato no crecieron plantas que compitieran con las cucurbitáceas, como puede ocurrir al usar tezontle.

### Aprovechamiento de los metabolitos nitrogenados

Durante el cultivo de los hongos, la degradación del sustrato empleado para la incubación dificultó la cuantificación del aprovechamiento de los nutrientes. Sin embargo, las diferencias de crecimiento y rendimiento entre tratamientos indican que las setas en acuaponía pueden tener un mejor desempeño que en riego tradicional, en el cual, se debe a la baja necesidad de nutrientes de las setas. Por otro lado, durante el cultivo de forrajes verdes, se observó un uso eficiente de los productos nitrogenados y de los fosfatos provenientes del sistema acuícola. Al respecto, Endut et al. (2010) indican que las plantas tienen una mejor asimilación de nitrógeno cuando se suministra en una combinación de amonio y nitratos, como los presentes en el metabolismo de proteínas de especies acuáticas. A diferencia de la concentración de amo-



nio, los nitritos se mantuvieron constantes ( $0.3 \text{ mg L}^{-1}$ ) después de pasar por el sistema acuapónico; lo anterior, se puede deber a la disponibilidad de otros elementos en el medio acuático. Al respecto, Snow *et al.* (2008) indican que en los sistemas acuapónicos puede ocurrir una reducción de entre 62 y 79 % de la concentración de nitritos-nitratos y entre 74 y 93 % de fosfatos durante la producción de forraje; lo que depende de la concentración y biodisponibilidad. Un factor importante para la absorción de nutrientes en las plantas es el pH, el cual en sistemas acuícolas puede ser de 7 a 8.5, valores superiores a los encontrados en un suelo agrícola. Al respecto, Taiz y Zeiger (2006) reportan que la asimilación óptima de los nutrientes requeridos por las plantas se logra cuando el pH del agua y suelo se encuentra entre 5.5 y 6.5. Al respecto Rakocy *et al.* (2006) recomiendan mantener valores promedio de pH cercanos a 7, lo que permite la asimilación de nutrientes por la planta, el funcionamiento eficiente del biofiltro y el crecimiento de los peces. En el presente estudio, aun cuando el pH fue superior a 7, los resultados indican que las plantas tuvieron tasas de crecimiento constantes.

### Composición proximal de setas y forrajes verdes.

Las setas tuvieron contenidos de proteína de 16.4 %, bajo contenido de lípidos y alto contenido de fibra, lo que indica que es un alimento que puede contribuir a la salud humana, ya que su perfil de aminoácidos y contenido de fibra (Ciappini *et al.* 2004). Por lo que es importante considerarlo como alternativa en la producción acuapónica. Por otro lado, el contenido de materia seca de los forrajes evaluados fue similar a los valores que se reportan en producciones tradicionales (Espinoza *et al.* 2004). En este sentido, Espinoza *et al.* (2004) indican que

el contenido de materia seca en los forrajes cultivados con riegos continuos puede variar entre 12 y 20 %, dependiendo de la especie forrajera. El mayor contenido de proteína en los forrajes se obtuvo con el sorgo; sin embargo, el contenido de proteína de los demás forrajes estuvo dentro de los rangos recomendados. Estos resultados concuerdan con lo que reportan Müller *et al.* (2005), quienes mencionan que el contenido de nitrógeno en los forrajes verdes es mayor en edades tempranas, en comparación con plantas maduras. Por otra parte, el sorgo fue la especie que mostró el menor aprovechamiento de nutrientes, por lo que la disposición de proteínas, al momento de la cosecha, se atribuye a que la especie tuvo una fijación o retención de los compuestos nitrogenados más eficiente en comparación con los otros forrajes, lo que le confiere ventajas para producciones acuapónicas.

### CONCLUSIONES

Los resultados del estudio indican que el cultivo de tilapia con plantas es factible tanto para eliminar o aprovechar los desechos nitrogenados, para cultivar diferentes cultivos de interés comercial de manera continua y sustentable. El sistema acuapónico permite hacer más eficiente el uso del espacio disponible, además de que genera rendimientos similares o superiores que el cultivo tradicional, sin afectar la composición nutrimental del producto final.

### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgar la beca núm. 304936 para obtención de grado de Maestro en Ciencias en Acuicultura de ACS.

### LITERATURA CITADA

Álvarez-Rodríguez A, Campo-Costa A, Batista-Ricardo E, Morales-Miranda A (2010) It influences of the humus for subway foliating in vegetable development of the cultivation of the cucumber (*Cucumis sativus* L) in the UBPC The Garden, municipality Holguín Cuba. Ciencias Holguín 16:1-10.

AOAC (1990) Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 15th edition

- AOAC. Arlington, VA 1141p.
- Barki A, Gur N, Karplus I (2001) Management of interspecific food competition in fish-crayfish communal culture: the effects of the spatial and temporal separation of feed. *Aquaculture* 201: 343-354.
- Ciappini MC, Gatti B, López-Zamora ML (2004) *Pleurotus ostreatus*, a menu option. Research on mushrooms in the daily diet. Universidad del Centro Educativo Latinoamericano Rosario, Argentina. *Invenio* 7: 127-132.
- Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB, Hassan A (2010) A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology Journal* 101: 1511-1517.
- Espinoza F, Argeti P, Urdaneta G, Arenque C, Fuentes A, Palma J, et al. (2004) Use of hydroponics forage corn in the feeding of 5/8 Holstein x Brahman bovine. Venezuela. *Zootecnia Tropical* 22: 303-315.
- Gaitán-Hernández R, Esqueda M, Gutiérrez A, Sánchez A, Beltrán-García M y Mata G (2006) Bioconversion of agrowastes by *Lentinula edodes*: the high potential of viticulture residues. *Applied Microbiology and Biotechnology* 71: 432-439.
- Gaitán-Hernández R, Salmones D (2008) Obtaining and characterizing *Pleurotus ostreatus* strains for commercial cultivation under warm environmental conditions. *Scientia Horticulturae* 118: 106-110
- García-Ulloa M, León C, Hernández F, Chávez R (2005) Evaluation of an experimental aquaponic system. *Avance en Investigación Agropecuaria* 9: 43-47.
- López-Aguilar R, Murillo-Amador B, Rodríguez-Quezada G (2009) Hydroponic green fodder (HGF): An alternative for cattle food production in arid zones. *Interciencia* 34: 121-126.
- Müller L, Manfron P, Santos O, Medeiros S, Haut V, Dourado D, et al. (2005) Growth and bromatologic composition of hydroponic corn fodder in different dates of harvest and sowing densities. *Zootecnia Tropical* 23: 105-109.
- Pérez-Rostro CI, Hernández-Vergara MP, Amaro-Espejo IA (2013) *Acuaponía, bases y alternativas*. Editorial Académica Española. España. 109p.
- Rakocy JE, Losordo TM, Masser MP (2006) Recirculating Aquaculture tank production systems: Integrating fish and plant culture. In: Southern Regional Aquaculture Center. SRAC. Publication 454: 1-8.
- Rivera A, Moronta M, González-Estopiñan M, González D, Perdomo D, García DE, et al. (2010) Hydroponic forage production of corn (*Zea mays* L.) under natural conditions of light deficiency. *Zootecnia Tropical* 28: 33-41.
- Romero O, Huerta M, Damián MA, Macías A, Tapia AM, Parraguirre JFC, et al. (2010) Evaluation of the productive capacity of *Pleurotus ostreatus* using dehydrated banana leaves (*Musa paradisiaca* L., cv. Roatan), in contrast to other agricultural wastes. *Agronomía Costarricense* 34: 53-63.
- Ronzón-Ortega M, Hernández-Vergara MP, Pérez-Rostro CI (2012) Producción hidropónica y acuapónica de albahaca (*Ocimum basilicum*) y langostino malayo (*Macrobrachium rosenbergii*). *Tropical and Sub-tropical Agroecosystems* 15: S63-S71.
- Soto-Zarazúa MG, Herrera-Ruiz G, Rico-García E, Toledano-Ayala M, Peniche-Vera R, Ocampo-Velázquez R, et al. (2010) Development of efficient recirculation system for tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials. *African Journal of Biotechnology* 9: 5203-5211.
- Snow AM, Ghaly AE, Snow A (2008) A comparative assessment of hydroponically grown cereal crops for the purification of aquaculture wastewater and the production of fish feed. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 3: 364-378.

- Taiz L, Zeiger E (2006) Nutrition mineral. Chapter 5. Plant Physiology. Fourth Edition. Sinauer Associates. Sunderland MA USA. pp: 67-86.
- Vargas-Rodríguez CF (2008) Comparison of production yields of green hydroponic fodder of corn, rice and sorghum. *Agronomía Mesoamericana* 19: 233-240.
- Van Gorder S (1991) Optimizing production by continuous loading of recirculating systems. In: Workshop on Design of High Density Recirculating Systems. Baton Rouge, LA, USA. pp: 17-26.
- Zar JH (1999) Biostatistical Analysis. Fourth Edition. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, NJ. USA. 663p.