

Aquaponic system with subsurface wetland for carp production (*Cyprinus carpio* L.), strawberry (*Fragaria × ananassa* (Duchesne ex Weston) and canola (*Brassica napus* L.)

Sistema acuapónico con humedal subsuperficial para producción de carpa (*Cyprinus carpio* L.), fresa (*Fragaria × ananassa* (Duchesne ex Weston) y canola (*Brassica napus* L.)

Mercado-Albarrán, Ilse M.¹; Ramírez-Carranza, Donovan R.²; Cruz Monterrosa, Rosy G.³; Díaz-Ramírez, Mayra³; Jiménez-Guzmán, Judith³; García-Garibay, José M.³; Miranda de la Lama, Genaro C.³; Beristain Cardoso, Ricardo⁴; Rayas-Amor, Adolfo A.^{3*}

¹Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma, Licenciatura en Ingeniería en Recursos Hídricos. Lerma de Villada, Estado de México. ²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca. Av. Tecnológico S/N, colonia Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec Estado de México, México. ³Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma, Departamento de Ciencias de la Alimentación. ⁴Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma Departamento de Recursos de la Tierra.

*Autor de correspondencia: a.rayas@correo.ler.uam.mx

ABSTRACT

Objective: a greenhouse pilot aquaponic system was installed, operated, and evaluated to produce carps-strawberry-canola.

Design/methodology/approach: the proposed aquaponics system was made of four modules: 1) module for the production of carp (*Cyprinus Carpio comunis*), 2) hydroponic module, deep flow type for the production of duckweed (*Lemna minor* L.) used to feed the carps, 3) hydroponic module for the strawberry production (*Fragaria × ananassa*), 4) hydroponic module with substrate (medium gravel) for the canola production (*Brassica napus*). The carps (*Cyprinus carpio*) had an average weight of 0.92 g at the beginning of the study (July 2018), the density was 500 carps/0.7 m³ of water. From September to December, a sample of 5% was taken to quantify their growth (length and weight) employing a Vernier, and a triple beam balance (OHAUS®). The carps were fed only with duckweed (*Lemna minor* L.). The carps were fed daily with 1.5% of duckweed as fresh matter concerning the average live weight of the 500 carps. Module 2 had an area of 0.26 m². The dry matter of duckweed was quantified using a PVC cylinder that had an area of 0.010 m², and then the fresh sample was weighed and dried at 105 °C until constant weight. Module 3 (0.42 m²) had 23 plants in a vegetative state, the growth of 5 plants was evaluated by measuring the size of the root (cm), the height of the plant (cm), the length and width of the leaves (cm) and the foliar area (cm²). Module 4 had 0.42 m², canola seed was sown at a density of 1.2 g/m² that represented 185 seedlings. The growth of 9 plants was evaluated by measuring the same variables of strawberry plants.

Results: in module 1, an average weight per carp of 17.7 g was obtained, representing an average weight increase of 16.8 g in the period from September to December. Module 2 produced 12 kg of duckweed in a fresh basis with 5.6% of dry matter. duckweed production was maintained using the nutrients from the effluent of module 1. In module 3, it was observed that strawberry plants presented an increase of 2.5 g in the fresh weight, 1 cm in root size, 0.9 cm in plant height, 0.2 cm in leaf length, 0.2 cm in leaf width and 0.4 cm² in the leaf area. In module 4, there was an increase of 8.1 g in plant height, 0.2 cm in the leaf length, 0.2 cm in the leaf width and 0.1 cm² in the leaf area.

Limitations of the study/implications: for the canola crop, only results of the vegetative growth were reported. For the carps, only three months were reported. However, there was evidence of the feasibility of the system.

Findings/Conclusions: an aquaponic system was installed, operated, and evaluated to produce carps-strawberry-canola. The duckweed was the only source of dry matter for carps. The effluent from the carp module provided nutrients for strawberry growth, bearing fruits of the right color. Canola plants developed adequately, although they had a purple color on the leaves, indicating a possible phosphorus deficiency.

Keywords: fish, aquaculture, vegetables

RESUMEN

Objetivo: se instaló, operó y evaluó un sistema acuapónico piloto bajo invernadero para la producción de carpa-fresa-canola utilizando lenteja de agua como única fuente de alimento.

Diseño/metodología/aproximación: el sistema acuapónico propuesto consistió en cuatro módulos: 1) módulo para la producción de carpa (*Cyprinus Carpio comunis*), 2) módulo hidropónico tipo flujo profundo para la producción de lenteja de agua (*Lemna minor* L.) que se utilizó para alimentar a las carpas, 3) módulo hidropónico tipo raíz flotante para el cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*), 4) módulo hidropónico con sustrato (grava media) para el cultivo de canola (*Brassica napus*). En el módulo uno se criaron carpa (*Cyprinus carpio*) con peso promedio inicial de 0.92 g, a una densidad de 500 peces/0.7 m³ de agua en el mes de julio de 2018. De septiembre a diciembre del mismo año se tomó una muestra del 5% de la población para medir su crecimiento (longitud y peso) empleando un vernier de campo, y se obtuvo el peso (g) por carpa con una balanza granataria. Las carpas se alimentaron solamente con lenteja de agua (*Lemna minor* L.), se les ofreció 1.5% de peso fresco de Lemna con respecto al peso promedio de las 500 carpas. El módulo dos tuvo un área de 0.26 m², se cuantificó la producción de materia seca de la lenteja de agua mediante un cilindro de PVC con un área de 0.010 m², la muestra fresca se pesó al momento del muestreo y posteriormente se secó a 105 °C hasta peso constante. En el módulo 3 de 0.42 m² se cultivaron 23 plantas de fresa en estado vegetativo, se monitoreó el crecimiento de 5 plantas mediante la medición del tamaño de la raíz (cm), la altura de la planta (cm), el largo y ancho de las hojas (cm) y el área foliar. El módulo 4 tuvo una superficie de 0.42 m², se sembró semilla de canola a una densidad de 1.2 g/m² que representó 185 plántulas. Se monitorio el crecimiento de 9 plantas y se evaluaron las mismas variables para las plantas de fresa.

Resultados: en el módulo 1 se obtuvo un peso promedio por carpa de 17.7 g representando un incremento de peso de 16.8 g en el periodo de septiembre a diciembre. En el módulo 2 se produjo 12 kg de lenteja de agua fresca en un área de 0.26 m² con 5.6% de materia seca. La producción de lenteja de agua se mantuvo utilizando los nutrientes del efluente del módulo 1. En el módulo 3 se observó que las plantas de fresa se adaptaron al sistema hidropónico tipo raíz flotante. En promedio se cuantificó un incremento de 2.5 g en el peso fresco de la planta, 1 cm en el tamaño de raíz, 0.9 cm en la altura de planta, 0.2 cm en el largo de hoja, 0.2 cm en el ancho de hoja y 0.4 cm² en el área foliar. En el módulo 4 se cuantificó en promedio un incremento de 8.1 g en la altura de planta, 0.2 cm en el largo de hoja, 0.2 cm en el ancho hoja y 0.1 cm en el área foliar.

Limitaciones del estudio/implicaciones: se reportan resultados del crecimiento vegetativo para la canola, para las carpas solamente se reporta el crecimiento en tres meses, no obstante, se muestra evidencia de la factibilidad del sistema.

Hallazgos/conclusiones: se instaló, operó y evaluó un sistema acuapónico recirculante para la producción de carpa-fresa-canola. La lenteja de agua funcionó como la única fuente de alimento para el crecimiento de la carpa. El efluente del módulo carpa proporcionó nutrientes para el crecimiento de la fresa, dando frutos de buen color. Las plantas de canola se desarrollaron adecuadamente, aunque presentaron un color púrpura en las hojas, lo que indicó una posible deficiencia de fósforo.

Palabras clave: peces, acuicultura, hortalizas

INTRODUCCIÓN

La acuaponía es una técnica de cultivo en la cual se cultivan peces (acuicultura) y hortalizas (hidroponía) en un mismo sistema de producción. En estos sistemas las plantas se alimentan a través de nutrientes excretados por los peces; tales como: nitrógeno orgánico,

fósforo orgánico y carbono orgánico. Las excretas de los peces son ricas en estos nutrientes, pero tóxicas para los peces en altas concentraciones. Cada kg de alimento consumido por pez contiene: 80 g de nitrógeno orgánico, 11.5 g de fósforo orgánico y 450 g de carbono orgánico; de los cuales 68.8 g de nitrógeno, 3.45 g de fósforo y 13.5 g de carbono son desechos disueltos, y 11.2 g de nitrógeno, 2.3 g de fósforo y 112.5 g de carbono, son desechos sólidos sedimentables. La carpa es el pescado con mayor producción del mercado en kilogramos cosechados y número de operaciones comerciales, es una especie tolerante y resistente a cambios en calidad de agua y tiene una amplia tolerancia ambiental (FAO, 2009) y es una de las especies de peces más utilizada en sistemas acuapónicos. Este sistema de cultivo ha sido ampliamente explotado a nivel comercial y casero alrededor del mundo debido a las siguientes ventajas: 1) reduce el consumo del agua en los cultivos a través del sistema de recirculación, 2) genera mayor sanidad de las hortalizas porque se minimiza el uso de agroquímicos, y 3) representa un ahorro en el proceso productivo debido a que la mayoría de los nutrientes para las hortalizas son generados por los peces a través de las excretas (Colagrosso, 2014). La acuaponía representa no sólo una fuente completa de alimentos de alta calidad, sino también una oportunidad para mejorar las condiciones socioeconómicas del ser humano, contribuyendo a la vez con la seguridad alimentaria.

Las hortalizas en los sistemas acuapónicos actúan como un biofiltro al absorber los nitratos disueltos que son previamente transformados por bacterias del género *Nitrosomas*, *Nitrococcus*, y *Nitrobacter*, quienes transforman mediante oxidación el amonio a nitratos, y posteriormente éstos son absorbidos por las plantas para su crecimiento.

En los sistemas acuapónicos se puede producir casi cualquier cultivo, siendo la lechuga (*Lactuca sativa* L.), la especie más cultivada en estos sistemas. No obstante, en el presente proyecto se cultivó la fresa (*Fragaria* × *Ananassa* y canola (*Brassica napus* L.) en un sistema acuapónico, ya que son cultivos muy demandados por la sociedad y en el Estado de México se produce principalmente maíz (*Zea mays* L.), jitomate (*Solanum lycopersicum* Mill.), tomate (*Physalis* sp.), lechuga y flores de ornato en cuanto a plantaciones se refiere; por otro lado, la trucha (*Oncorhynchus mykiss*), carpa

(*Cyprinus carpio* L.), mojarra (*Diplodus vulgaris* Forster) y charal (*Chirostoma* sp.) son las especies más cultivadas (SAGARPA, 2009).

En la actualidad, Estados Unidos es el mayor productor de fresa (822,000 t año⁻¹) y Rusia es el mayor productor de canola (5,000,000 t año⁻¹) en el mundo. En México, el estado de Michoacán es el principal productor de fresa (229,000 t año⁻¹) (FAOSTAT, 2007). Las fresas son ricas en vitamina C (mayor que los cítricos), vitamina A, E, B1, B2, B3 y B6, K, Mg, Fe, P, I, Ca, ácido fólico, grandes cantidades de salicilatos que previenen enfermedades cardiovasculares, degenerativas y cáncer. Al estar compuestas por 85% de agua, ayudan a adelgazar, también en enfermedades como cálculos renales, hipertensión y ácido úrico (SAGARPA, 2009).

Por otro lado, los estados de Morelos, Nayarit, Baja California Sur y Norte, Campeche y Coahuila son los encargados mayoritarios para la producción de canola (200 t año⁻¹). La canola (*Brassica napus*) permite la producción de aceite con bajo ácido erúsico (2%) y glucosinolatos en la torta o afrecho (la torta o afrecho es el producto que queda después de extraído el aceite de la semilla). Al ser una variedad que se obtuvo en Canadá, se le dio el nombre por Canadian oil Low Acid. Actualmente este cultivo es de interés, ya que, permite la producción de aceite vegetal para consumo humano, por su alto contenido de Omega-3, reemplaza el aceite de pescado y es útil como fuente para producir biodiesel (Tay et al., 2007).

Por otro lado, en los sistemas acuapónicos la alimentación de los peces se basa en alimento concentrado comercial peletizado, lo cual incrementa substancialmente los costos de producción, ya que puede representar entre el 70 y 80% de los costos totales. En este tenor, se pretendió acoplar al sistema acuapónico un módulo para la producción de lenteja de agua (*Lemna* sp.). La familia Lemnaceae comprende un grupo de pequeñas plantas acuáticas vasculares monocotiledóneas que flotan libremente sobre la superficie del agua, crecen en colonias y frecuentemente desarrollan densos y uniformes mantos, de unos milímetros a algunos centímetros de grosor, en charcas, lagos, lagunas y cuerpos de agua con movimiento léntico (Zetina et al., 2010), de tal forma que la lenteja de agua sirva como alimento para los peces, con el objeto de reducir substancialmente los costos por concepto de la alimentación.

A pesar de las ventajas que presentan los sistemas acuapónicos, en México, la tecnología aún no ha sido aplicada ampliamente y la investigación sobre este tipo de sistemas es escasa. Por lo anterior, el presente estudio se enfocó en el desarrollo y evaluación de un sistema acuapónico para la producción de carpas-fresa-canola acoplado a un módulo de producción de *Lemna sp* y a un humedal subsuperficial para el pulimento de la calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se desarrolló en el invernadero de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, estado de México (19° 17' 31.38" N; 99° 30' 06.63" O) a una elevación de 2572 m. El clima del municipio es templado subhúmedo, la temperatura media anual es de 12.4 °C. Este tipo de invernadero brinda protección al sistema acuapónico piloto contra los ventarrones y se tiene mayor control de la temperatura durante todo el año, así como menor pérdida de agua por evapotranspiración.

El sistema consistió en cuatro módulos; Uno para la producción de carpa (*Cyprinus Carpio comunis*) en fase de alevín con una densidad inicial de 0.075 kg L⁻¹; otro, o hidropónico tipo flujo profundo para la producción de lenteja de agua (*Lemna minor* L.) que se utilizó para alimentar a las carpas, un tercer módulo hidropónico tipo raíz flotante para el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*), y el cuarto módulo hidropónico con sustrato (grava media) para el cultivo de canola (*Brassica napus*).

Módulo 1: se sembraron crías de *Cyprinus carpio* cuya longitud ini-

cial promedio fue de 2 cm y 0.92 g de peso a una densidad de 500 peces 0.7 m³⁻¹ o 0.075 kg L⁻¹ de agua en el mes de julio de 2018. Durante los meses de julio y agosto los peces tuvieron un período de adaptación al sistema acuapónico por lo tanto no se realizaron mediciones. De septiembre a diciembre se tomó una muestra de 5% de la población de peces para cuantificar la longitud con un vernier de campo, y se obtuvo el peso por carpa con una balanza granataria para obtener una ecuación de predicción. Durante este proceso los peces fueron separados en una cubeta y al finalizar el procedimiento fueron regresados al módulo de peces. Las carpas se alimentaron con lenteja de agua una vez al día, se les ofreció en promedio 1.5% de peso fresco de la lenteja de agua con respecto al peso promedio de los 500 organismos.

Módulo 2: consistió en un contenedor de 0.26 m², para evaluar la producción de materia seca de lenteja de agua se utilizó un cilindro de PVC de 0.010 m², la muestra fresca fue pesada y posteriormente secada a 105 °C hasta peso constante. Se obtuvo una producción de 12 kg de lenteja de agua en materia fresca quincenalmente con un 5.6% de materia seca.

Módulo 3: se trasplantaron 23 plantas, se evaluó el crecimiento tomando cinco plantas como muestra; estas fueron pesadas en fresco empleando una balanza granataria y medidas con un vernier de campo. Se evaluó el tamaño de la raíz, la altura de la planta, el largo y ancho de las hojas (L x A) y el área foliar (AF) se estimó empleando la siguiente ecuación cúbica (Casierra-Posada *et al.*, 2008):

$$AF = 0.286141 * (L \times A) - 8.562461 \times 10^{-5} * (L \times A)^2 - 1.06547953 \times 10^{-8} * (L \times A)^3$$

Módulo 4: se sembró semilla de canola a una densidad de 1.2 g m²⁻¹; representando un total de 185 plántulas. Se identificaron y marcaron nueve plantas representativas y escogidas aleatoriamente para evaluar su crecimiento y evaluaron las mismas variables que en la planta de fresa, el área foliar se calculó empleando la siguiente ecuación cuadrática (Chavarría *et al.*, 2011):

$$AF = 0.2023 * (\text{largo de hoja})^2 - 0.4267 * (\text{largo de hoja}) + 20148$$

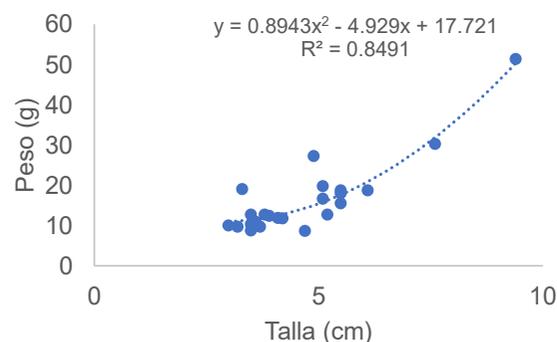
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Módulo 1: La Figura 1A muestra el crecimiento de las carpas alimentados solamente con lenteja de agua y la Figura 1B muestra la relación cuadrática significativa (P<0.05) entre la talla y el peso de los peces, con una R² de 0.849 y el modelo cuadrático que permitió estimar el peso de las carpas a partir de la talla durante los primeros tres meses de crecimiento, al medir solamente la talla se minimiza el estrés de los peces durante el manejo. El intercepto del modelo cuadrático indica que en esta etapa de crecimiento el peso mínimo de los peces es de 17.7 g cuando la talla equivale a cero. Cabe mencionar que el modelo cuadrático tendrá mayor predicción conforme se incorporan más datos de carpas con mayor talla y peso.

Módulos 2, 3 y 4: La Figura 2 muestra el crecimiento de la lenteja de agua, fresa y canola. En el módulo 2 se produjo 12 kg de lenteja de agua fresca en un área de 0.26 m² quincenalmente; se cuantificó que por cada 100 g de lenteja de agua húmeda se tienen 5.6 g de materia seca, y en la materia seca se tiene el 35% de proteína, energía, vitaminas y minerales.



Figura 1. Crecimiento de la carpa (*Cyprinus carpio*) alimentada con lenteja de agua (*Lemna minor* L.).



El Cuadro 1 muestra el crecimiento de las plantas de fresa durante un periodo de 70 días después del trasplante, partiendo de plantas con tres hojas. Las plantas de fresa mostraron buena adaptación al sistema de cultivo (tipo raíz flotante) ya que produjo frutos de color rojo aceptable para este tipo de plantas y el marchitamiento de las hojas fue mínimo.

El Cuadro 2 muestra el crecimiento de las plantas de canola, que mostró menor adaptación al sistema de cultivo, ya que se presentaron signos de marchitamiento ligero y hojas de color púrpura, debido a que

Cuadro 2. Crecimiento promedio de las plantas de canola.

Mes	AP (cm)	LH (cm)	AH (cm)	AF (cm ²)
Septiembre	6±2	2±1	3±1	20±1
Diciembre	14±7	2±1	3±1	20±3

AP: altura de la planta; LH: largo de hoja; AH: ancho de hoja; AF: área foliar; ±: desviación estándar.

la lemna tiene entre 0.5 a 0.8% de fósforo con respecto al contenido de materia seca (Mbagwu y Adeniji, 1988).



Figura 2. Crecimiento de lenteja de agua, fresa, canola.

Durante el periodo de evaluación, se presume que la canola utilizó el nitrógeno para desarrollo de los tallos principalmente ya que el largo, ancho y área foliar no presentaron diferencias, esto también pudo deberse a la deficiencia de fósforo. No obstante, es importante hacer mención que no existen aún estudios para producir canola en sistemas hidropónicos o acuapónicos y este sería el primero que evalúa su factibilidad bajo condiciones acuapónicas.

CONCLUSIONES

La lenteja de agua proporcionó los requerimientos de proteína para el crecimiento de la carpa y las excretas de las carpas proporcionaron

Cuadro 1. Crecimiento promedio de las plantas de fresa (*Fragaria × ananassas*).

Mes	PF (g)	TR (cm)	AP (cm)	LH (cm)	AH (cm)	ÁF (cm ²)
Septiembre	29±17	19±6	15±5	5±1	4±1	5±3
Diciembre	32±17	21.5±5	16±6	5±1	4±1	6±3

PF: peso fresco; TR: tamaño de raíz; AP: altura de la planta; LH: largo de hoja; AH: ancho de hoja; AF: área foliar; ±desviación estándar.

los nutrientes necesarios para el crecimiento de la fresa, dando frutos de buen color. La canola no se adaptó al sistema acuapónico propuesto ya que presentó deficiencias de fósforo. Finalmente, el sistema acuapónico recirculante permitió la depuración de nutrientes en el efluente del módulo 1, dándole una buena calidad y permitiendo el desarrollo de los cultivos de carpa-fresa.

LITERATURA CITADA

- Casierra, F., Peña, G. R., Peña, J. E. (2008). Estimación indirecta del área foliar en *Fragaria vesca* L. *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) LH Bailey y *Ficus carica* L. Rev. UDCA Actualidad Científica, 11(1), 95-102.
- Chavarría, G., Tomm, G. O., Müller, A., Ferro Mendonça, H., Mello, N., Serafini Betto, M. (2011). Índice de área foliar en canola cultivada sob variações de espaçamento e de densidade de sementeira. Ciência Rural, 41(12).
- Colagrosso, A. (2015). Instalación y manejo de sistemas de cultivo acuapónicos a pequeña escala. Youcanprint.
- FAOSTAT (2007). "Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics". Database Online. En <http://faostat.fao.org/faostat/collections>. (Citado en enero 2018).
- Mbagwu I.G., Adeniji H.A. (1988). The nutritional content of duckweed (*Wolffia microscopica* Hegelm.) in the kainji lake area, Nigeria. Aquatic Botany, 29, 357-366.
- SAGARPA. (2009). "Sistema producto fresa". Michoacán. Coloca la liga
- SAGARPA. (2009). "Plan Rector del Sistema-Producción". Ciudad de México.
- Tay, J. (2007). "Generalidades, manejo y residuos de evaluación de variedades de canola, lupino y arveja". INIA Quilamapu.
- Zetina, C. P., Ortega, C. M. E., Ortega, J. E., Reta, M. J. L., Sánchez-Torres, M. T. E., & Haro, H. J. G. (2010). Utilización de la lenteja de agua (Lemnaceae) en la producción de tilapia (*Oreochromis* spp.). Archivos de Zootecnia, 59, 133-155.

