

Manejo básico y resultados preliminares de crecimiento y supervivencia de tencas (*Tinca tinca* L.) y lechugas (*Lactuca sativa* L.) en un prototipo acuapónico

J.R. Lobillo*, V.M. Fernández-Cabanás, E. Carmona y F.J. Candón L.

ETSIA-Universidad de Sevilla. Dpto. de Ciencias Agroforestales. Crtra. Utrera Km 1. 41013-Sevilla. España

Resumen

Este trabajo presenta el manejo básico de un prototipo acuapónico así como resultados preliminares sobre el crecimiento de tencas y lechugas en dicho prototipo. El sistema consta de una instalación de recirculación de agua con cuatro elementos en el siguiente orden de dirección del agua: depósito de peces, del que parten dos ramas: una de ellas hacia un biofiltro, zona de hidropónicos en NFT ("*Nutrient Film Technique*") y colector; y la otra hacia la zona de hidropónicos en raíz flotante, que desemboca igualmente en el colector. Los resultados obtenidos durante 66 días de ensayo, criando las tencas a densidades entre 0,68 kg/m³ y 1,19 kg/m³, con raciones diarias entre el 0,8 y 1,23% de la biomasa, un volumen total de la instalación de 2.800 litros con tasa media diaria de recambio de agua del 1,26% y parámetros variables de la misma, con máximos y mínimos, respectivamente, de temperaturas, entre 15 y 25°C; de nitratos, entre 32 y 105 ppm; y de pH entre 7,3 y 8,25, muestran una elevada supervivencia de las tencas (99,32%) y las lechugas (98%); y la finalización del ciclo de estas últimas alcanzando tamaños comerciales. El control de los parámetros citados, más los niveles de oxígeno, y una instalación sencilla de baja densidad de peces sin dispositivos de separación de sólidos, permitió la regulación óptima del sistema.

Palabras clave: Acuaponía, hidroponía, acuicultura, recirculación.

Abstract

Basic operations and preliminary results on the growth and survival rates of tench (*Tinca tinca* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.) in an aquaponic prototype

This paper presents the basic operations of an aquaponic prototype and preliminary results on the growth of tench and lettuce. This prototype consisting in a water recirculating system made up of: fish rearing tank with two outlet pipes, one of this connected to a biofilter, NFT hydroponics device and sump; and the other one, to a raft hydroponic device draining to the same sump. Results showed a high survival rate of tenchs (99,32%) and lettuces (98%), and finalization of vegetative cycle of lettuce with commercial sizes, under the following assay conditions: tench stock densities between 0,68 kg/m³ and 1,19 kg/m³, with daily food rates between 0,88 y 1,23% of fishes biomass, a total system water volume of 2,8 m³ and 1,26% of water reposition daily rate, and water variables parameters between 15 and 25°C temperature; 32 and 105 ppm of nitrate levels; and 8,25 and 7,3 pH values. Control of the above mentioned parameters, plus oxygen levels in water, maintaining fish at low densities and without solids removal devices, reached the optimum regulation system.

Key words: Aquaponics, hydroponics, aquaculture, recirculating systems.

* Autor para correspondencia: pepelobillo@yahoo.es

<http://dx.doi.org/10.12706/itea.2014.009>

Introducción

La acuaponía es el cultivo conjunto de peces y plantas en un sistema de recirculación de agua (Rakocy *et al.*, 2006). En un sistema acuapónico, la materia orgánica disuelta en el agua, procedente de los productos de excreción de los peces y/o del alimento que se les suministra, es descompuesta por bacterias, que liberan en el agua sales minerales y nutrientes simples que posteriormente son asimilados por plantas que están creciendo sin suelo, en condiciones hidropónicas. Una vez que las raíces de las plantas retiran del agua los nutrientes, el agua vuelve a los depósitos donde se mantienen los peces, reiniciándose la recirculación. La acuaponía reproduce en condiciones controladas el ciclo del nitrógeno y los mecanismos de depuración del agua en la naturaleza, obteniendo además resultados productivos en términos de biomasa vegetal y animal.

Los sistemas acuapónicos están demostrando claros beneficios frente a la acuicultura o a los cultivos hidropónicos, por separado (Rakocy y Hargreaves, 1993; Rakocy *et al.*, 2006; Nelson, 2008), como son: el ahorro en agua; el menor impacto ambiental de los efluentes de la explotación, al ser la carga de nitratos y fosfatos menor (ya que son parcialmente retirados del agua por las plantas); la obtención de dos fuentes de ingresos diferentes, plantas y peces, que comparten infraestructuras y costes; niveles productivos similares o superiores a la hidroponía y acuicultura por separado; y la obtención de productos más saludables, ya que en acuaponía no pueden usarse los tratamientos químicos convencionales frente a las patologías que pudieran aparecer (la mayor parte de productos fitosanitarios perjudican a los peces; y la gran mayoría de los compuestos químicos para tratar ictiopatologías afectan a las plantas).

Entre las dificultades se citan: la complejidad inicial de mantener en un equilibrio óptimo las poblaciones de peces, bacterias y plantas; el coste y riesgo del control biológico; y el complejo balance (la ratio) entre la cantidad de peces y la superficie de cultivo hidropónico, todo lo cuál requiere de mayores destrezas, conocimientos y prácticas iniciales.

Actualmente, uno de los sistemas acuapónicos más desarrollados es el UVI, de la universidad de las Islas Vírgenes, que usa la tilapia como pez para la producción de múltiples especies vegetales como lechugas, tomates, pepinos, albahaca, berenjena, perejil, cebollino, espinacas, berro, verdolaga y otras (Savidov, 2004; Rakocy *et al.*, 2004).

En España la acuaponía apenas tiene desarrollo, ya que la mayoría de sistemas similares que se están ensayando se encuadran en el concepto más amplio de la acuicultura integrada en el medio marino, por lo tanto, sin aprovechamiento directo de cultivos de plantas terrestres. A nivel internacional, el sistema acuapónico de tenca-lechuga parece no haber sido ensayado aún, o al menos no ha sido publicado, por lo tanto el prototipo acuapónico que presentamos es doblemente innovador, por un lado por dar uno de los primeros pasos para impulsar el desarrollo de la acuaponía en España; y por otro, por avanzar hacia la puesta a punto de un nuevo sistema acuapónico que combina tencas y lechugas.

Los objetivos de este trabajo han sido (1) conocer el funcionamiento y regulación básica de un prototipo acuapónico, determinando qué parámetros son necesarios controlar periódicamente para mantener el sistema en un grado óptimo de funcionamiento; y (2) obtener unos resultados preliminares sobre el crecimiento y la supervivencia de tencas y lechugas en dicho prototipo.

Materiales y métodos

Descripción del prototipo acuapónico

El prototipo (figuras 1 y 2) se instaló en el interior de un invernadero de arcos metálicos recubiertos con láminas de polietileno, con

orientación este-oeste y ventilación natural lateral y cenital, ocupando una superficie de aproximadamente 50 m², de los 240 m² de superficie total del mismo. Dicho invernadero está ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA) de la Universidad de Sevilla.

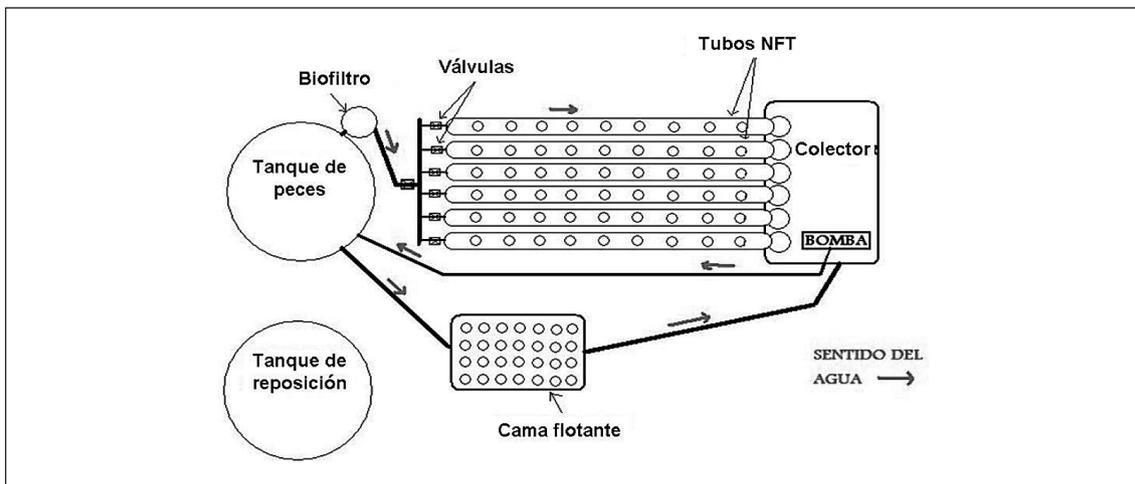


Figura 1. Croquis del prototipo acuapónico.

Figure 1. Aquaponics prototype sketch.

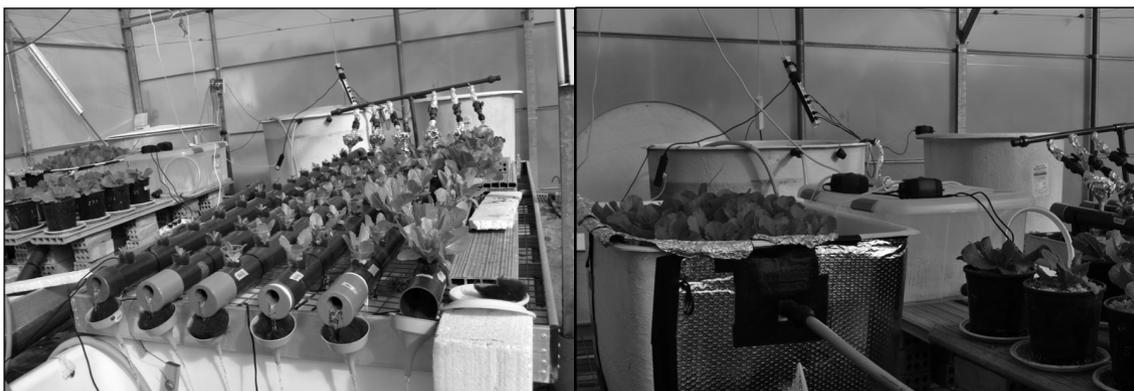


Figura 2. Fotografías del prototipo acuapónico en funcionamiento dentro del invernadero.

Figure 2. Aquaponics prototype running inside the greenhouse.

Los peces se mantuvieron en un depósito cilíndrico de poliéster, de 2.120 litros ("tanque de peces" en la figura 1), donde se instalaron: 2 aireadores "EHEIM" de 400 l/h y 3 calentadores "EHEIM" de 300W cada uno, que mantuvieron una temperatura media en torno a los 20°C, con mínimos y máximos comprendidos entre los 15 a 25°C (ver figura 3).

Desde el tanque de peces, el agua tenía dos salidas: la primera, partiendo del fondo del tanque de peces, se conectaba a un biofiltro Eheim 3445 con una capacidad máxima filtrante de 6 m³, que incorporaba a su salida una bomba de aspiración EHEIM 11201 regulable (caudal de 1.500-3.000 l/h). El agua atravesaba el biofiltro, que albergaba colonias de bacterias nitrificantes sobre substratos de canutillos cerámicos y bolas Eheim Substrat Pro (con una superficie de 450 m²/m³ de bolas), separando ambos substratos con fibra de perlón azul.

La tubería de salida del biofiltro se dividía en 6 ramales por los que progresaba el agua hacia 6 embudos que desembocaban en 6 tubos de PVC de 90 mm de diámetro y 3 m de longitud, que servían de soporte para las lechugas en el sistema hidropónico de NFT. El agua de salida de los 6 tubos, se vertía sobre otros 6 embudos, con perlón azul en su interior y a través de ellos, a un depósito colector rectangular de poliéster, con 1.040 litros de capacidad.

En la segunda salida del tanque de peces, el agua fluía por gravedad hacia un depósito rectangular de poliéster de 320 litros de capacidad, con unas dimensiones de 104 (largo) x 73 (ancho) x 57 cm (altura), que se usó como contenedor para mantener el sistema hidropónico en raíz flotante. Desde aquí, el agua era canalizada hasta el depósito colector, donde una bomba sumergible y regulable, con un caudal de 2.500-5.000 l/h, la devolvía hasta el tanque de peces para iniciar la recirculación a través de los elementos descritos.

El volumen total de agua recirculante por la instalación era aproximadamente de 2.800 l.

Otro depósito cilíndrico de poliéster, de 2.120 l, se usó para reponer las pérdidas de agua debidas a la evaporación y a la evapotranspiración de las plantas, así como para realizar las renovaciones o recambios diarios de agua. Se estableció inicialmente una tasa de renovación del 2% del total del volumen de agua recirculante, siguiendo las recomendaciones de Rakocy et al. (2006) que estiman que, en sistemas cerrados de recirculación de agua, con niveles de recambio de agua inferiores al 2%, los nutrientes disueltos, procedentes de las excreciones directas del metabolismo de los peces o generados por la acción bacteriana sobre los residuos orgánicos, se acumulan en concentraciones similares a las presentes en una solución hidropónica de nutrientes. Antes de incorporar el agua de este depósito al circuito acuapónico, se sometía a dos tratamientos diferentes. Por un lado, la eliminación de cloro mediante agitación con turbulencias y oxigenación del agua durante 48 horas, por medio de una bomba Eheim sumergible de 1.200 l/h y un aireador Eheim de 400 l/h. Y posteriormente el ajuste del pH, mediante mezcla del agua de la red (con una dureza media-alta) con agua osmotizada, para reducir el kH de la primera hasta 3-4° d (grados alemanes); y posteriormente adición de HCl, para aproximar el pH del agua de este tanque de reposición, al pH que tuviera el agua del circuito acuapónico en cada momento.

Los dos subsistemas hidropónicos mencionados, fueron: el NFT ("*Nutrient Film Technique*"), donde el agua con la solución de nutrientes atraviesa las raíces de las plantas en forma de una película fina de apenas 1-2 cm de espesor, favoreciendo así el máximo contacto de las raíces con el aire. Y el otro sistema, conocido como de "cama o raíz flotante" ("*Raft system*"), donde las raíces permanecen totalmente sumergidas en el agua con la solución de nutrientes, necesitando en este caso aplicar aireación suplementaria en el agua.

Para el sistema NFT se emplearon 6 tubos de PVC de 9 cm de diámetro y 3 metros de lon-

gitud cada uno, colocados en paralelo sobre una mesa de rejilla de 1,5 x 3 m y 0,80 m de altura, que les servía de soporte, separando los tubos entre sí 20 cm. A lo largo de los 3 metros de tubos se practicaron cada 20 cm agujeros de 5 cm de diámetro en su parte superior, colocando cestillas de rejilla en su interior para el soporte de las plantas. El agua entraba en los tubos a través de un embudo colocado en una perforación próxima a un extremo, desplazándose por gravedad con una pendiente del 2% hasta el otro extremo del tubo, donde se colocaba otro embudo antes de verter el agua al colector.

Durante los 15-20 días posteriores al trasplante de las lechugas en los tubos NFT, se colocaba un tapón reductor a la salida de los tubos, para elevar el nivel del agua en su interior hasta los 3-4 cm, para ayudar a la rápida elongación de las raíces hacia la película de nutrientes que pasaba por el interior de los tubos. También se emplearon fibras de poliéster sobre las cestillas de siembra, dando soporte al cepellón de turba en el momento de los trasplantes.

El sistema de raíz flotante se instaló sobre el depósito de poliéster de 320 l descrito anteriormente, manteniéndose una altura de agua de 30 cm y colocando sobre el mismo una plancha flotante de poliespán o corcho blanco (poliestireno expandido) de 4 cm de grosor. Sobre esta plancha se practicaron orificios de 5 cm de diámetro, distanciados entre sí 10 cm, insertando en los mismos las cestillas de soporte de plantas. El agua dentro de este depósito se oxigenó mediante 2 aireadores Eheim de 400 l/h.

Descripción de las poblaciones de peces, bacterias y plantas

Los sistemas acuapónicos mantienen tres poblaciones simultáneamente, de peces, plantas y bacterias. Para los peces, se partió de una

población inicial de 736 alevines de tencas (*Tinca tinca* L.), con aproximadamente 7-8 meses de edad y pesos comprendidos entre 1-3 gramos, sumando una biomasa total de 1.904 gramos. Los alevines fueron proporcionados por el Centro Regional de Acuicultura "Las Vegas del Guadiana", empresa pública perteneciente a la Junta de Extremadura, situada en Villafranco del Guadiana. Se eligió la tenca como especie para el prototipo acuapónico, por ser una especie plenamente adaptada a la climatología de la Península Ibérica y por presentar una gran resistencia a los cambios en la calidad del agua.

La tenca es una especie omnívora para la cual no existen aún piensos comerciales específicos (Quirós et al., 2003), por lo cual durante el ensayo se les suministró pienso de arranque para salmónidos, marca Dibaq, tipo microbaq-15, con un 50% de proteína, suplementando 1 vez a la semana con 3 gramos (peso seco) de adultos de pulga de agua (*Daphnia sp.*) y artemia (*Artemia salina*) ambas congeladas, siguiendo las recomendaciones de Wolnicki et al. (2003), que probó diferentes tipos de dietas y combinaciones entre pienso seco y alimento natural (vivo o congelado). El alimento se suministró partiendo de una ración del 0,8% diario de la biomasa de tencas, reajustada aproximadamente cada 28-32 días tras pesar a toda la población. Esta ración se repartía en dos tomas, una próxima al amanecer y la otra al atardecer.

Para las pesadas, se extraían el total de las tencas del tanque y se anestesiaban tras depositarlas en un recipiente con 20 litros de la misma agua del circuito acuapónico, el cual contenía esencia de clavo natural (Guinama®) a razón de 1 ml por cada 10 l de agua. A continuación se pesaba toda la biomasa en una báscula y posteriormente se depositaban en un recipiente con agua limpia del circuito acuapónico, aireada con un compresor Eheim de 400 l/hora, para facilitar la recuperación de la anestesia.

Con los datos obtenidos de las pesadas se obtenían el Índice de Conversión Medio (ICM), la Ganancia Media Diaria (GMD) y la Tasa de Crecimiento Específico (SGR, "Specific Growth Rate", expresada como porcentaje del peso corporal incrementado por día.), en el intervalo de tiempo entre cada pesada, según las fórmulas a continuación, donde T1 es la fe-

$$ICM = \frac{Kg_{Pienso}}{n^{\circ} Peces \times (Pm2(Kg) - Pm1(Kg))} \quad GMD = \frac{Pm2 - Pm1}{T2 - T1} \quad SGR = \frac{Ln(Pm2) - Ln(Pm1)}{T2 - T1} \times 100$$

Para las plantas, se optó por la lechuga Romana por presentar sólo crecimiento vegetativo hasta alcanzar el tamaño comercial, por no ser muy exigente en nutrientes y porque se puede cultivar sin entutorar. Se germinaron 124 semillas sobre un semillero de poliestireno expandido de dimensiones 698 x 484 x 73 mm, llenando con turba la mitad de los alveolos del semillero e introduciendo una semilla de lechuga por alveolo.

Las plantas se mantuvieron en el semillero hasta que alcanzaron 4 hojas verdaderas, aproximadamente BBCH = 14 (Meier, 2001), luego se trasplantaron a las cestillas de soporte (manteniendo parte de la turba que envolvía las raíces) y, finalmente, se repartieron entre los 3 subsistemas hidropónicos: los tubos del NFT, las láminas flotantes de poliespán y en 8 macetas individuales que contenían substrato de perlita (estas últimas, no incluidas en el prototipo acuapónico y utilizadas como testigos). Los trasplantes se realizaron en diferentes fechas de forma escalonada, según iba aumentando la cantidad de alimento suministrado a los peces, en función del aumento de su biomasa.

Del total de 124 plantas con 4 hojas, se tomaron 108 para trasplantar, de las cuales, 78 para los NFT; y otras 22 para la raíz flotante. Las restantes 8 plantas, sembradas en perlita sobre macetas individuales de 5 litros, no se incluyeron en la instalación acuapónica, regándose periódicamente con solución nutritiva de Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950). La

fecha de la pesada inicial; T2, la de la siguiente pesada tras 28-32 días; Pm1 es el peso medio por pez en la T1, que se calcula dividiendo la biomasa de peces entre el número total de peces, y Pm2, el peso medio por pez en la siguiente pesada, obtenido dividiendo la biomasa de peces en la T2, entre el número total de peces.

idea era registrar el crecimiento de estas 8 plantas con todos los nutrientes a su disposición, como referencia para observar el crecimiento del resto de lechugas en las condiciones acuapónicas.

Para estimar el grado de finalización del ciclo vegetativo, se midieron el número, altura y anchura de las hojas, así como el perímetro del cogollo y el porcentaje de materia seca en las hojas (esto último al finalizar el periodo de ensayo). Los valores se tomaron en plantas cultivadas en los tres sub-sistemas hidropónicos (NFT, raíz flotante e hidroponía convencional sobre perlita) y con la misma fecha de trasplante (el 12/01/2012), tomando al azar aproximadamente el 50% de las plantas de cada sub-sistema y realizándose las medidas una vez a la semana.

La altura de las plantas se tomaba poniendo el cero de la escala justo encima del cepellón, donde empieza la parte aérea de la planta. Para la anchura de las hojas, se tomaron dos por planta que estuviesen más o menos opuestas, señalándose con una etiqueta. Cuando las lechugas tenían unas 20 hojas desplegadas (BBCH = 45), se ataron con una gomilla con el fin de que formasen el cogollo. Siguiendo la circunferencia de la gomilla, se medía el perímetro del cogollo (a partir del atado, dejó de medirse la anchura de las hojas). Se contabilizaron también el número de hojas verdaderas que tenían las lechugas marcadas, excluyendo los cotiledones y contabilizando sólo las hojas totalmente desplegadas.

Al final del periodo de ensayo, se tomaron 5 lechugas seleccionadas al azar en los 3 subsistemas hidropónicos, anotando su peso fresco justo en el momento de la cosecha. Posteriormente se depositaron sobre bandejas metálicas numeradas, que fueron introducidas en una estufa a 65°C durante 48 horas. Tras este tiempo se volvieron a pesar, obteniendo por la diferencia de pesadas, la media del porcentaje de materia seca de cada grupo.

Con objeto de facilitar el crecimiento y la proliferación de las bacterias nitrificantes durante la puesta a punto del sistema, se mantuvo en funcionamiento el prototipo acuapónico ya montado, sin peces ni plantas, durante 6 semanas, con el agua recirculando por toda la instalación. Durante este periodo (tiempo del ciclado del nitrógeno), se adicionaron semanalmente inóculos concentrados de bacterias "Biodigest" (Prodibio), a razón de una ampolla de 10 ml a la semana, para el total del volumen de agua de la instalación (2.800 litros, aproximadamente). En dos ocasiones, cada 3 semanas, también se adicionaron unos 28 gramos de pienso para peces, como sustrato orgánico para impulsar la nitrificación.

Control de parámetros físico-químicos del agua

Para conocer el funcionamiento del sistema acuapónico y llegar a regularlo, se registraron diariamente diferentes parámetros físico-químicos del agua, como el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura; y semanalmente los niveles de fosfatos (PO_4^{3-}), nitratos (NO_3^-) y oxígeno (O_2) disuelto. Todas las muestras de agua se tomaron en el tanque de peces.

Otro parámetro esencial que se registró y es esencial en los sistemas acuapónicos, es la "ratio" o proporción entre la cantidad de pienso suministrado diariamente a los peces (en gramos) y la superficie del cultivo vegetal (metros cuadrados) en producción.

Resultados

La evolución de tres de los parámetros físico-químicos del agua (temperatura, pH y nitratos) durante el tiempo de ensayo se muestra en la figura 3. El pH descendió, desde 8,25 al inicio del ensayo ya con las lechugas trasplantadas en el sistema acuapónico (o desde 8,59 al inicio del ciclado), hasta 7,3 al final del ensayo al cosechar las lechugas.

La temperatura del agua osciló durante todo el periodo de ensayo, desde un mínimo de 15,5°C hasta máximos de 24,5°C, siendo la temperatura media de $20,04 \pm 2,36^\circ\text{C}$.

En cuanto al nivel de nitratos, la figura 3 muestra que los niveles se mantuvieron entre mínimos y máximos de 32 y 105 ppm, respectivamente, con un valor medio de $69,87 \pm 15,04$. Los niveles permanecieron en un intervalo constante en el segundo mes de ciclo de las lechugas, entre 60 y 80 ppm. La conductividad eléctrica (CE), se mantuvo estable entre valores de 1.000 y 1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, equivalentes a 600-720 ppm de TDS (sólidos disueltos totales); y los niveles de oxígeno se mantuvieron constantes durante todo el ensayo en 5 mg/l. Por último, la tasa de renovación media diaria de agua, fue del 1,18%, es decir, renovamos 35,27 litros al día, de los 2.800 litros totales de la instalación.

Del número total de peces introducidos al comienzo del ensayo (736 tencas), sobrevivieron 731, por lo tanto la supervivencia fue del 99,32% (tabla 1). De las cinco bajas, tres de ellas se produjeron por pequeños fallos de manejo durante los muestreos para pesar los peces (aplastamientos en la red o mala recuperación de la anestesia). Tan sólo dos de los cinco peces murieron por causas desconocidas, sin mostrar síntomas patológicos reconocibles o malformaciones físicas.

Los resultados preliminares sobre el crecimiento de las tencas se recogieron a partir de las 4 pesadas durante 89 días (23 días previos a los trasplantes de lechugas y 66 días más de

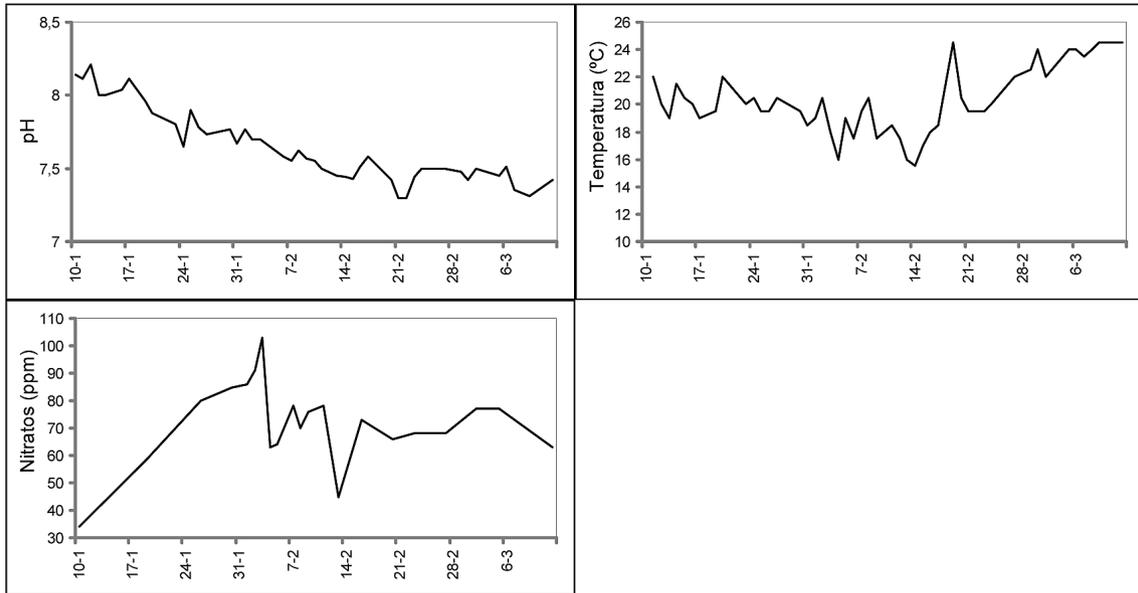


Figura 3. Cambios en pH, temperatura y niveles de nitratos en el agua del circuito acuapónico.
 Figure 3. Changes in pH, temperature and nitrate levels in aquaponics water circuit.

Tabla 1. Resultados obtenidos en las cuatro pesadas de las tencas
 Table 1. Results for the four weighing controls of tench

Fecha	Biomasa (g)	Alimento consumido (g)	ΔPeso (g)	Nº peces (mortalidad)	ICM	GMD (g)	SGR (%/día)
15/12/2011	1.904 ⁽¹⁾	–	–	736 (0)	–	–	–
16/01/2012	2.335	598	431	733 (3)	1,36	0,02	0,65
13/02/2012	3.036	804	701	733 (0)	1,15	0,03	0,94
12/03/2012	3.304	656	268	731 (2)	2,37	0,01	0,31

(1). Biomasa inicial.

crecimiento conjunto de lechugas y tencas), mostrándose en la tabla 1. Las tencas aumentaron su peso en una media de 1,92 gramos/pez en los 89 días, con valores mínimos y máximos de ICM y SGR, de 1,15-2,37; y 0,31-

0,94%/día, respectivamente. La media para estos tres parámetros igualmente durante los 89 días fue de $1,55 \pm 0,65$ para el ICM; de $0,018 \pm 0,010$ para la GMD; y de $0,5743 \pm 0,3153\%$ /día para la SGR.

En cuanto a la supervivencia de las lechugas, sólo se registraron 2 bajas durante los días posteriores al trasplante en el sistema NFT. De las 22 plantas que se trasplantaron en el sistema de raíz flotante, consiguieron sobrevivir el 100%. Por lo tanto, la mayoría de las 100 plantas consiguieron completar su ciclo, con una supervivencia total del 98%.

El grado de finalización del ciclo de las lechugas, se muestra en las gráficas de la figura 4 que detallan la evolución de su altura, anchura, número de hojas y perímetro del cogollo, en los tres subsistemas hidropónicos. La tabla 2 muestra finalmente, los diferentes pesos frescos, secos y porcentajes de materia seca

de las lechugas en los tres subsistemas hidropónicos. Tampoco se presentaron patologías reconocibles y la única deficiencia detectable fue de potasio, cuyos síntomas desaparecían rápidamente en 48 horas, aplicando sulfato potásico al 1,5% por vía foliar. No se presentaron deficiencias ni de hierro ni de calcio.

La ratio fue descendiendo conforme aumentaba la superficie de cultivo hasta el máximo de 5,2 m² (4,5 m² en NFT y 0,7 en raíz flotante). En este punto, 24 gramos de pienso para peces, soportaron 5,2 m² de cultivo de lechugas creciendo durante su último mes de desarrollo vegetativo, por lo tanto una ratio final de 4,62 gr/m².

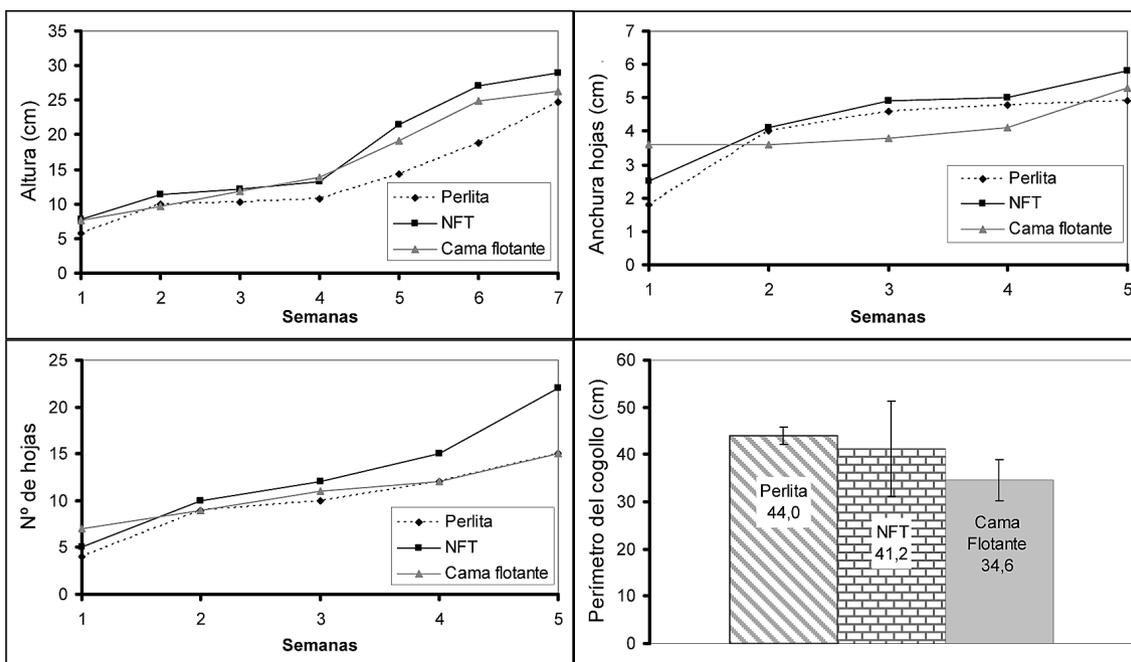


Figura 4. Evolución de la altura, anchura y número de hojas de lechugas; y perímetro del cogollo, en los tres subsistemas hidropónicos.
 Figure 4. Evolution of lettuce leaves height, width and number, and perimeter of the bud in the three hydroponic subsystems.

Tabla 2. Medias (\pm desviación típica) del peso fresco de las lechugas cosechadas y humedad de las muestras
 Table 2. Means (\pm standard deviation) of fresh weight of harvested lettuces and moisture contents

Subsistema hidropónico	Peso fresco (g)	Humedad (%)
Perlita	380,8 \pm 44.2	93,9
NFT	611,3 \pm 241.7	95,1
Cama Flotante	332,1 \pm 114.9	95,2

Discusión

El manejo básico de un sistema acuapónico parte de cierta complejidad inicial por el hecho de mantener simultáneamente, a tres poblaciones de seres vivos estrechamente interrelacionadas: peces, plantas y bacterias. Este punto de partida conlleva, por un lado, un control más exhaustivo de los parámetros físico-químicos del agua; y por otro, conseguir una óptima proporción (o ratio) entre la cantidad de comida suministrada diariamente a los peces y la superficie de cultivo de plantas en crecimiento (Rakocy et al., 2006). El objetivo de estos controles es conseguir un equilibrio dinámico en las condiciones del sistema que favorezca, tanto la producción de peces y plantas, como la acción de las bacterias en la nitrificación y en general en la mineralización de la materia orgánica.

El progresivo descenso del pH mostrado en la figura 3 se debió principalmente a la producción de ácido nítrico resultante de la nitrificación bacteriana. Esta bajada de pH hacia el entorno de 7, es esencial para el buen funcionamiento de un sistema acuapónico, ya que hay que buscar un punto medio que garantice la disponibilidad y absorción de nutrientes para las plantas (la mayor parte de las cultivadas en hidroponía lo hacen de ma-

nera óptima entre pHs de 5,8 y 6,2); y al mismo tiempo favorezca la nitrificación bacteriana, con óptimos entre 7 y 9 (mayor eficiencia a pHs superiores a 8). En el caso de las tencas, los márgenes de pH a los que pueden vivir son bastante amplios, entre 6 y 9 (Carbó, 2009). De esta información, se deduce que los valores de pH en torno a la neutralidad, serían los favorables para las bacterias, plantas y peces (Rakocy et al., 2006).

Observamos en la figura 3, que desde los primeros trasplantes de las lechugas y durante un mes (07/01 al 7/02), las lechugas crecieron a pHs entre 8,25 y 7,5-7,6, margen notablemente por encima de los recomendado para la producción vegetal en hidroponía, ya que perjudican la absorción y asimilación de nutrientes como el hierro, potasio, manganeso o zinc (Rakocy et al., 2006). Sin embargo, la alta supervivencia de las lechugas, la finalización de su ciclo vegetativo y las deficiencias presentadas únicamente en potasio, parecen mostrar que a pHs en torno a 7,5 y con las aguas de origen calizo empleadas, en las que el pH ha ido descendiendo paulatinamente, ha sido también posible la producción acuapónica de lechugas.

También es posible que estos poco favorables márgenes de pH, se hayan visto compensados en parte por altos niveles de nutrientes disueltos. Algunos autores (Ako y Baker, 2004), encontraron que niveles de nitratos por encima de 40 mg/l, indican que los otros macro y micronutrientes (salvo el hierro), alcanzan valores óptimos en la solución acuapónica. En nuestro prototipo, los niveles de nitratos estuvieron siempre por encima de 30 ppm, con picos máximos de 105 ppm y márgenes estables en el segundo y último mes del ciclo de la lechuga, entre 60 y 80 ppm.

De estos resultados podríamos sacar una conclusión práctica para el manejo básico del pH en una instalación acuapónica, partiendo de aguas con dureza media-alta con pHs por encima de 8. Podemos dejar que el ácido ní-

trico resultante de la nitrificación bacteriana vaya reduciendo poco a poco el pH, siempre que el agua que usemos para reponer las pérdidas por evaporación o para dar recambios de agua, que en nuestro caso seguía siendo agua a pH >8, esté acondicionada de la manera ya descrita, para que se añada con un pH similar al que tenga en ese momento la instalación acuapónica. De este modo, y al no aportar más carbonatos en exceso, permitimos que la nitrificación baje el pH progresivamente.

Los valores obtenidos de conductividad (CE) están muy por debajo de los niveles máximos fitotóxicos de 2.000 ppm, y por encima de los mínimos de 200-400 ppm propuestos por Rakocy et al. (2006) para los sistemas acuapónicos. Como el nivel de TDS, hace referencia al nivel de los nutrientes disueltos, los valores estables obtenidos en el prototipo acuapónico de baja densidad, parecen indicar que la materia orgánica se va mineralizando a un ritmo tal que permite un suministro suficiente de nutrientes para las lechugas; y por otro lado, se evita la acumulación de sólidos en las raíces de las lechugas, hecho que terminaría por necrosar el sistema radicular.

Los niveles estables de oxígeno se consiguieron, como ya se ha descrito en el apartado de material y métodos, con compresores de aire de 400 l/h; con oxigenación extra (por difusión), en la capa de contacto agua-aire dentro de los tubos NFT; por caídas de cascada entre elementos de la instalación; y por un dispositivo Venturi en la entrada del agua al tanque de peces.

En cuanto a la temperatura, al igual que el pH, se trató de buscar un valor medio que favoreciera el crecimiento de plantas, bacterias y peces. La tenca tiene una gran tolerancia térmica, con valores mínimos críticos por debajo de 0°C y picos máximos de temperatura cercanos a 35°C (De La Puente, 2002), encontrándose los máximos rendimientos de crecimiento y de conversión de alimento en torno a los 27,5°C (Wolnicki y Korwin-Kossa-

kowski, 1993; Panagiotis y Hatzinikolau, 2011). Para la biofiltración, según DeLong y Losordo (2012), los valores óptimos de temperatura de encuentran entre 25 y 30°C (a 18°C la nitrificación trabaja al 50%). La mayoría de las plantas se desarrollan bien cuando la temperatura de la región alrededor de las raíces se encuentra entre 20 y 25°C, si bien la temperatura óptima para la lechuga se encuentra alrededor de 18°C.

Según los valores citados, una temperatura óptima para las tencas, lechugas y bacterias rondaría los 25°C. Ya que pretendíamos que el prototipo acuapónico se ensayara en condiciones lo más parecidas posibles a las de cultivo en invernaderos en la zona del ensayo, con la idea de transferir la tecnología acuapónica a escala familiar o de pequeños productores; y ya que la inversión en equipos de calentamiento de agua es muy elevada, con el consecuente consumo eléctrico, optamos por regular la temperatura del agua entre márgenes más amplios, partiendo del efecto térmico del invernadero y de equipos de calentamiento de bajo costo, disponibles fácilmente en el mercado y con baja potencia calorífica. En estas condiciones, se alcanzó la temperatura media citada de $20,04 \pm 2,36^\circ\text{C}$.

En cuanto a las oscilaciones en los niveles de nitratos, lo primero a señalar es lo ya mencionado sobre su utilidad como indicadores de los niveles de macro y micronutrientes disponibles para las plantas (Ako y Baker, 2004). Niveles por encima de 40 ppm parecen indicar que hay suficiente disponibilidad de los macro y micronutrientes (salvo el hierro). Durante la mayor parte del periodo de nuestro ensayo, los nitratos permanecieron por encima de 40 ppm, presentándose únicamente deficiencias en potasio.

Lo segundo a señalar, es que los nitratos también pueden ser útiles para estimar los diferentes puntos de equilibrio que se van alcanzando en el sistema acuapónico, en función de los factores que hacen que aumenten o

disminuyan sus niveles. Factores que aumentan, son: la nitrificación y la cantidad de alimento diario suministrado a los peces (relacionada directamente con la ratio); y aquellos que los reducen o retiran del sistema, como son: la tasa de renovación diaria de agua y la capacidad de absorción radicular de las plantas. Tomando como referencias los niveles estables de nitratos alcanzados en el último mes del ensayo (entre 60 y 80 ppm), podríamos decir que se alcanzó un punto de equilibrio entre los factores que influyen en la producción y retirada de los mismos del agua. Otros factores, aunque con mucho menor efecto, serían: el agua de origen para la instalación, como aporte extra de nitratos; y la desnitrificación, en pequeños "bolsas" anaeróbicas de la instalación, como reductora de los niveles de nitratos

También hay que considerar otro factor más complicado de controlar, que es la ingesta de los peces. Debido a la ausencia de piensos específicos para tencas (De Pedro *et al.*, 2001; Wolnicki *et al.*, 2006), son frecuentes los rechazos parciales de las raciones, lo que nos llevaba a disminuir de vez en cuando las raciones diarias, para evitar acúmulos indeseables de restos de pienso en el agua. También los cambios en la ingesta han podido estar influidos por las oscilaciones de la temperatura del agua.

Los niveles de nitratos también fueron utilizados como referentes para aumentar o disminuir la tasa de renovación diaria de agua. Si estos se aproximaban a 100 ppm, entonces se aumentaba dicha tasa por encima del nivel de referencia del 2%. Si los niveles descendían, se reducía igualmente esta tasa. Niveles de fosfatos alrededor de 0,5 ppm también orientaban para las renovaciones diarias de agua. Como media para los 66 días del ensayo, la tasa de renovación fue finalmente del 1,18%.

En cuanto a la supervivencia, tanto de tencas como lechugas, los resultados obtenidos muestran elevados porcentajes para ambas especies. Al instalar un único prototipo, sin repe-

ticiones, y al no existir un grupo control de tencas en un sistema en recirculación, sin parte hidropónica, no podemos afirmar que estos elevados porcentajes de supervivencia sean concluyentes, aunque sí parecen indicar que se realizó una adecuada regulación del prototipo acuapónico que favoreció la supervivencia de ambas especies.

Además, cabe destacar que no aparecieron síntomas de patologías reconocibles en las tencas, hecho notable teniendo en cuenta que los parámetros físico-químicos del agua fueron variando gradualmente durante el tiempo del ensayo. Así por ejemplo (ver figura 3), la temperatura del agua osciló entre los 15°C y los 25°C, el pH fue bajando gradualmente desde 8,25 hasta un mínimo de 7,3, así como los nitratos, que oscilaron también desde valores mínimos de 32 ppm hasta máximos de 105 ppm. Y en las lechugas, sólo se presentó la ya citada deficiencia de potasio. Esto parece indicar que los nutrientes liberados en el agua por los peces, producto de la digestión y metabolismo de su alimento, y por la posterior acción bacteriana, alcanzaron niveles suficientes para hacer crecer y desarrollarse las lechugas de forma óptima.

Los resultados obtenidos sobre el crecimiento de tencas y lechugas, parecen estar dentro de los márgenes esperados. Para las primeras, los valores medios de ICM, de $1,55 \pm 0,65$, y de SGR de $0,5743 \pm 0,3153\%/día$, se aproximan a los observados por otros autores que realizaron ensayos de crecimiento de tencas sólo en sistemas de recirculación, en condiciones similares de temperatura al prototipo (entre 22-27°C), con diferentes tipos de pienso y pesos de tencas comprendidos entre 2 y 25 gramos. Así por ejemplo, Tomás-Vidal *et al.* (2011) obtuvieron un índice de conversión de 2,15 y SGR entre 0,61-0,64%/día. Panagiotis y Hatzinikolaou (2011) registraron conversiones entre 1,41 y 2,77, y un mejor valor para la SGR del 0,25%/día. Finalmente, Quirós *et al.* (2003) obtuvieron SGR entre 0,7 y 1,26%/día. Estos resultados

apoyarían la idea de que el prototipo acuapónico estaría funcionando en unas condiciones tales, que favorecen el crecimiento de la tenca, de una manera similar a como lo hace en un sistema de recirculación de agua en acuicultura. Como ya indicamos, estos resultados habría que validarlos con un grupo control de tenca creciendo sólo en un sistema de recirculación, sin parte hidropónica.

Para las lechugas, los resultados en altura, anchura, número de hojas y perímetro del cogollo, (figura 4) parecen encontrarse dentro de los márgenes óptimos propuestos por Gregory (1992) para la lechuga romana. Y aquellos obtenidos para los pesos frescos, secos y % de materia seca (tabla nº 2), en los tres subsistemas hidropónicos, igualmente parecen encontrarse dentro de los valores normales propuestos por Herrmann (2001) para esta misma variedad de lechuga.

Por otro lado, el crecimiento de las lechugas en el prototipo acuapónico, medido por las variables mencionadas, parece ser similar o próximo al crecimiento en hidroponía convencional con sustrato de perlita. Estos resultados, unidos a las altas tasas de supervivencia de las lechugas, parecen volver a mostrar que en el prototipo acuapónico no sólo se dan las condiciones suficientes para una alta supervivencia de estas plantas, sino que, adicionalmente, podría ofrecer resultados productivos dentro de los márgenes esperados.

Todos estos resultados referentes a los diferentes parámetros de crecimiento en tenca y lechugas, y al grado de finalización del ciclo productivo en las segundas, no son concluyentes como ya hemos mencionado y estarían pendientes de validación completando el diseño experimental. Sólo pretendíamos que dichos resultados, de acuerdo a los dos objetivos propuestos para este ensayo, nos orientaran para ensayos posteriores de una instalación acuapónica en producción, para entonces sí, validar la viabilidad técnico-productiva, medioambiental y económica.

Los resultados orientativos obtenidos con este primer prototipo, han sido útiles para mejorar el funcionamiento del mismo, esta vez con tenca-tomates (Lobillo et al. 2013a); y posteriormente para optimizar la regulación y completar el diseño experimental poniendo a punto una instalación por triplicado con tenca-fresas (Lobillo et al. 2013b). Los resultados de estos ensayos, que partieron del prototipo acuapónico aquí descrito, nos han servido finalmente para poner a punto un nuevo prototipo para la producción acuapónica, en condiciones productivas de campo, que actualmente está probando una asociación de productores hortícolas (asociación de agricultura ecológica, social y comunitaria del Polígono Sur (Sevilla), "Verdes del Sur").

A diferencia del UVI System (Rakocy et al., 2006; Nelson y Pade, 2010), u otros sistemas acuapónicos desarrollados en Alberta (Canadá) en los últimos 25 años, adaptando el sistema UVI dentro de invernaderos (Savidov, 2005), el prototipo acuapónico cuyos resultados mostramos en este artículo, parte de mantener los peces a bajas densidades, siguiendo el ejemplo de otros sistemas desarrollados con anterioridad (Van Gorder, 2003; Hughey, 2008; Friend y Mann, 2010). En el prototipo, alcanzamos una densidad máxima de peces al término de la cosecha de lechugas de 1,19 Kg/m³, partiendo de 0,680 Kg/m³, a diferencia del sistema UVI, que alcanza densidades máximas entre 60 y 70 kg/m³ (Rakocy et al., 2006). Estas densidades tan altas liberan gran cantidad de nutrientes para las plantas, maximizando la producción vegetal y animal; sin embargo exige una mayor inversión, mayor gasto energético, y sobre todo, un mayor nivel de conocimientos tecnológicos para manejar los elevados niveles de sólidos en suspensión que produce el sistema.

En su lugar, la idea inicial de este trabajo fue poner en marcha un prototipo que fuera fácil de manejar, con una baja inversión y sencillez tecnológica, de modo que fuera fácil-

mente exportable a escala familiar o de pequeños productores, con vistas al autoconsumo o a la venta en mercados locales, en el marco de la soberanía alimentaria. Con esta idea de partida y la práctica ausencia de experiencias documentadas de producción acuapónica en España, los sistemas de alta densidad como el modelo UVI (Rakocy et al., 2006), que requieren de mayores conocimientos técnicos, inversión y complejidad tecnológica, no nos parecían los adecuados para la promoción inicial de sistemas acuapónicos a pequeña escala.

Además, existen aún pocos estudios sobre el cultivo de tencas a altas densidades en sistemas de recirculación de agua, por lo que era prudente empezar con bajas densidades. Por lo tanto, el prototipo que hemos puesto en marcha es del tipo de "baja densidad", lo que facilita el manejo y evita o reduce notablemente la utilización de aireación suplementaria, lo que supone un ahorro energético considerable. También evita el empleo de dispositivos para la eliminación de sólidos, así como otros dispositivos para la desnitrificación y desgasificación. Esto reduce la inversión inicial y simplifica el manejo de la instalación.

Previo a este trabajo, se ha empleado una vez la tenca en acuaponía en España, en la comunidad de Extremadura (DOE, 2006), donde el cultivo de esta especie tiene cierto desarrollo, además de en Castilla-León (De La Puente, 2002). Este trabajo ha tratado de continuar esta experiencia innovadora (Jambrina et al., 2011).

Otros resultados que hemos obtenido con el prototipo acuapónico tenca-lechuga, también pueden servir de orientación para abrir otras investigaciones que valoren su impacto medioambiental. Por ejemplo, el valor obtenido de la tasa de renovación media diaria de agua, es inferior al empleado en los sistemas de recirculación en acuicultura (SRAs), donde la tasa oscila normalmente entre el 5 y el 10% diario (Masser et al., 1999; Carbó, 2009);

y también es inferior al valor de referencia del 2% propuesto por Rakocy et al. (2006) para los sistemas acuapónicos. Este hecho supone ventajas tanto económicas como medioambientales, derivadas del ahorro en el consumo de agua.

Respecto a los efluentes, se alcanzaron máximos de nitratos y fosfatos de 105 ppm y 1,8 ppm, respectivamente, valores altos que tendrían un impacto medioambiental negativo. Para atajar esta desventaja se podría aumentar la superficie de cultivo de lechugas, de modo que extraigan más nitratos y fosfatos del agua, lo que probablemente llevaría a la aparición de nuevas y más tempranas deficiencias en las plantas, dado que se extraerían también otros macro y micronutrientes que se encuentren a concentraciones más bajas.

También se podrían plantear otras alternativas, que no fueron ensayadas en este proyecto y se proponen como nuevas líneas de investigación, como el tratamiento de los efluentes con plantas acuáticas (Savidov, 2005) o el uso del efluente para fertirrigación de huertas o cultivos anexos a la explotación acuapónica, tal y como se hace en explotaciones acuapónicas a nivel familiar (Van Gorder, 2003; Hughey, 2008; Friend y Mann, 2010).

En cuanto a la ratio alcanzada, su valor indica que se produciría 1 m² de cultivo de lechuga en su periodo final de crecimiento (30 días), con 4,62 gramos de alimento para peces, lo que supone entre 3,5 y 5,9 veces menos que la referencia de 15-25 gr/m² para el sistema NFT dada por Rakocy et al. (2006) para el sistema UVI. Dado que en el prototipo diseñado, la mayoría de la superficie de cultivo hidropónico la sumaba el sistema en NFT (4,5 m² frente a 0,7 m² de la raíz flotante), tomamos como referencia para establecer comparaciones, la ratio citada para el sistema NFT, con un valor de 15-25 gramos/m². Este valor podría considerarse como un punto de equilibrio del sistema que parece permitir el crecimiento en condiciones aceptables, tanto

de las tencas como de las lechugas. A falta de validación de este valor, sorprende que esta ratio menor mantenga el cultivo de lechugas. Podríamos explicar estos resultados por el origen calizo del agua, con una dureza media-alta, que se empleó para la carga inicial del sistema y para las renovaciones diarias. Análisis previos de este agua, antes de poner en marcha el prototipo acuapónico, mostraron valores de nitratos entre 7-15 ppm; de conductividad eléctrica de 780 mS/cm; de bicarbonatos, entre 180-200 ppm; y pH, 8,4-8,59. A partir de estos datos, podríamos sospechar un aporte extra, aunque mínimo, de otras sales que puedan servir de nutrientes suplementarios para las lechugas en el sistema acuapónico. Una segunda explicación para la baja ratio registrada, es el elevado porcentaje de proteína del pienso de las tencas, en torno al 50%, lo que proporciona una cantidad mayor de compuestos nitrogenados de excreción y posteriormente mayores niveles de nitratos.

Los resultados muestran un crecimiento lento propio de la tenca, como ya han citado otros autores (Wolnicki y Myszkowski, 1998; Quirós y Alvaríño, 2001) y es de sobra conocido por empresas del oeste de España que la cultivan en condiciones semiintensivas, alcanzando la talla comercial de 80-120 gramos en 2-3 años (Güelfo Fuentes, 2002).

El crecimiento tan lento de la tenca nos plantearía dudas sobre la elección de esta especie para los sistemas acuapónicos, sobre todo si la comparamos con la tilapia, una de las especies más populares y usadas en estos sistemas, que alcanza entre 500-800 gramos en tan sólo 4 meses, desde 59-79 gramos y a temperaturas próximas a 28°C (Rakocy *et al.*, 1997). Sin embargo, la tilapia aún no tiene fácil aceptación en el mercado nacional, y con un bajo precio de venta, que no sería rentable en sistemas con tan baja densidad como el ensayado. Aportamos a continuación varios argumentos que podrían justificar la

elección de la tenca como una especie válida para el desarrollo de los sistemas acuapónicos en la península ibérica.

El primer argumento es de tipo económico, derivado del elevado precio de la tenca en el mercado extremeño y en parte de Castilla-León, entre 9-12 euros el kilo, a lo que se suma que la demanda del mercado supera la oferta (De La Puente, 2002).

El segundo argumento a favor es la rusticidad de la tenca como especie para la acuicultura y la acuaponía. Esta especie soporta temperaturas críticas por debajo de 0°C y hasta 33-35°C, así como niveles de amoníaco o nitritos que son letales para otros peces. (De La Puente, 2002). Estas cualidades la hacen especialmente recomendable para la acuaponía, donde además de los cambios no previstos en las condiciones físico-químicas del sistema, hay también que manipular algunos parámetros del agua para hacer compatibles, simultáneamente, el crecimiento de bacterias, peces y plantas.

El tercer argumento es la consideración de la tenca como especie ya adaptada durante siglos a los cursos fluviales de la Península Ibérica, lo que merece una especial atención en el contexto local, de la defensa y puesta en valor de los recursos locales.

Finalmente, el último argumento se deriva del carácter omnívoro de la tenca, lo que quizás pueda ser una ventaja a priori para sustituir parte de las harinas y aceites de pescado de los piensos. Recordemos que esta sustitución plantea dos ventajas: por un lado, reducir los costos de la alimentación al ser las fuentes de proteínas y grasas de origen vegetal (por ejemplo, la soja) más baratas que aquellas obtenidas del pescado; y por otro lado, esta sustitución daría paso a una acuicultura más sostenible al reducir su dependencia de los recursos pesqueros (fuentes de las harinas y aceites de pescados en los piensos), cada vez más escasos y sometidos a fuer-

tes competencias. El trabajo de Tomás-Vidal et al. (2011) va en esta dirección, sustituyendo parte de las harinas de pescado en dietas para tenca, por harina de soja, encontrando que esta sustitución al 37,5% no produce efectos negativos sobre los parámetros de crecimiento, ni sobre la eficiencia nutritiva o la composición corporal.

Conclusiones

Aunque los resultados presentados no son concluyentes y estarían pendientes de validación, los elevados porcentajes de supervivencia de tencas y lechugas y los parámetros observados de crecimiento de ambas especies, dentro de los márgenes esperados, parecen indicar que se realizó una adecuada regulación de los parámetros físico-químicos del agua y de la ratio en el prototipo acuapónico.

Con el prototipo acuapónico propuesto y sin necesidad de recurrir a una tecnología cara y compleja, se ha observado que es posible mantener en equilibrio el sistema acuapónico controlando 4 parámetros básicos del agua: temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, aconsejando también una medición al menos semanal de los niveles de nitratos. Por otra parte, los bajos valores de la ratio alcanzados una vez que se estabilizó el sistema, son un argumento más que reforzarían la viabilidad del prototipo propuesto.

Los resultados obtenidos con el prototipo acuapónico de baja densidad, durante 66 días, criando tencas entre 0,68 kg/m³ y 1,19 kg/m³, con raciones entre el 0,8-1,23% de la biomasa y un volumen total de la instalación de 2.800 litros, podrían ofrecer un punto de referencia para poner en marcha instalaciones acuapónicas que no precisen dispositivos específicos para eliminar sólidos, lo que permite a su vez un considerable ahorro en la inversión inicial y sobre todo una simplificación en el manejo y funcionamiento del sistema.

Es necesario desarrollar líneas de investigación en varias direcciones: la validación del prototipo; el desarrollo de un pienso más adecuado para la tenca; el tratamiento de los efluentes del sistema acuapónico, o el reajuste de la ratio aumentando la superficie del cultivo para reducir los niveles de nitratos y fosfatos en los mismos. Finalmente, encontrar la densidad límite de las tencas en el cultivo acuapónico, sin necesidad de recurrir a dispositivos complejos para la eliminación de sólidos.

Agradecimientos

A César Fallola y a Paloma Moreno, del Centro de Acuicultura Vegas del Guadiana (Badajoz), por facilitarnos las tencas su apoyo y experiencia. A Antonio Rodríguez, David y Javier Flores por su participación en el diseño y montaje de las instalaciones, y a Pedro González, Yolanda Mena, y al personal de campo de la ETSIA por compartir tiempo, herramientas e ideas.

Bibliografía

- Ako H, Baker A (2004). Nutrient fluxes in aquaponics systems. College of Tropical Agriculture and Human Resources. Center for Tropical and subtropical aquaculture. Molecular Biosciences and Bioengineering. University of Hawaii at Manoa. [ppt]. Disponible en <http://www.ctahr.hawaii.edu/mbbe/Aquaponics%20for%20workshop.ppt> (1 junio 2012).
- Carbó R (2009). Sistemas de recirculación para la acuicultura (SRA). Hoja Divulgativa 2: Recirculación. Disponible en http://www.sea.org.es/docs/SEA_OESA_MARZO_10.pdf (7 junio 2012).
- De La Puente A (2002). El cultivo de la tenca en España. Disponible en <http://www.mispeces.com/reportajes/2002/nov/tenca/tenca.asp> (3 mayo 2012).

- DeLong DP, Losordo TM (2012). How to Start a Bio-filter. Southern Regional Aquaculture Center. SRAC Publication n° 4502: 4 pp.
- De Pedro NA, Guijarro I, Delgado MJ, Lopez-Patiño MA, Pinillos ML, Alonso-Bedate M (2001). Journal Applied Ichthyology 17: 25-29.
- D.O.E. (Diario Oficial de Extremadura) (2006). RESOLUCIÓN (25 de octubre de 2006). Convenio Interadministrativo de Colaboración entre la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente y la Diputación de Cáceres, sobre "Desarrollo de un sistema integrado para la producción intensiva de tenca y cultivos hidropónicos". Disponible en <http://doe.juntaex.es/pdfs/doe/2006/1330o/06063145.pdf> (10 febrero 2012).
- Friend S, Mann T (2010). Our history at Friendly Aquaponics. Disponible en <http://www.friendlyaquaponics.com/about-us/friendly-aquaponics-history/> (21 marzo 2012).
- Gregory PJ (1992). Crecimiento y desarrollo vegetal. Pp. 32-67. En: Wild, A. (Coordinador). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Güelfo Fuentes A (2002). Tendesala S.L.: Una empresa productora de tencas. Disponible en <http://www.mispecies.com/reportajes/2002/nov/tendesala/tendesala.asp> (7 abril 2012).
- Herrmann K (2001). Inhaltsstoffe von Obst und Gemüse. Universität Hohenheim. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart (Deutschland). 200 pp.
- Hoagland DR, Arnon DI (1950). The water-culture method for growing plants without soil. Journal Circular. California Agricultural Experiment Station. Vol. 347 No. 2nd edit. 32 pp.
- Hughey TW (2008). The barrel-ponics manual. Disponible en <http://www.fastonline.org/content/view/15/29/> (11 noviembre 2011).
- Jambrina MC, Forcadell A, Cowler PP, Redó JM, Cerdá J, Jover M (2011). Desarrollo vegetal integrado a la producción intensiva de tenca. Pruebas preliminares. Libro de actas del XIII Congreso Nacional de Acuicultura. Ed. Fundación Observatorio Español de Acuicultura. Castelldefels, Barcelona. 99 pp.
- Lobillo JR, Fernández-Cabanás VM, Carmona E, Martín JJ (2013a). Densidad límite de peces en un sistema acuapónico de tencas (*Tinca tinca* L.) y tomates (*Solanum lycopersicum* L.), sin dispositivos para la eliminación de sólidos. Libro de actas del XIV Congreso Nacional de Acuicultura (Gijón, Asturias 23-25 septiembre 2013). Editores FOESA.
- Lobillo JR, Fernández-Cabanás VM, Carmona E, Pradas S, Sánchez JM, Flores FJ (2013b). Ajuste de parámetros físico-químicos del agua para la optimización de un sistema acuapónico combinando la producción de tencas (*Tinca tinca* L.) y fresones (*Fragaria x ananassa* Duch). Libro de actas del XIV Congreso Nacional de Acuicultura (Gijón, Asturias 23-25 septiembre 2013). Editores FOESA.
- Masser MP, Rakocy J, Losordo TM (1999). Recirculating Aquaculture Tank Production System: Management of Recirculating Systems. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication n° 452.
- Meier U (2001). Estadios de las plantas mono-y dicotiledóneas. BBCH Monografía. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura. Edición 2ª, 149 pp.
- Nelson RL (2008). Aquaponic Food Production. Nelson and Pade Inc. Press, Montello, WI, USA: 218 pp.
- Nelson RL, Pade J (2010). Aquaponics systems. Clear Flow Aquaponic Systems®. Disponible en <http://aquaponics.com/page/aquaponic-systems> (13 marzo 2012).
- Panagiotis AP, Hatzinikolaou A (2011). The effect of ration level on the growth and survival of sub-adult tench (*Tinca tinca* L. 1758) in a recirculating water system. Marine and Freshwater Behaviour and Physiology 44(2): 125-130.
- Quirós M, Alvarino JMR (2001). Crecimiento y supervivencia de juveniles de tenca (*Tinca tinca*) bajo condiciones controladas de cultivo mantenidas a diferentes densidades y alimentadas con y sin suplemento alimenticio. Monografías del ICCM 4: 329-333.
- Quirós M, Nicodemus N, Alonso M, Bartolomé M, Écija JL, Alvarino JMR (2003). Survival and changes in growth in juvenile tench (*Tinca tinca*) fed

- defined diets commonly used to culture non-cyprinid species. *Journal of Applied Ichthyology* 19: 149-151.
- Rakocy JE, Hargreaves JA (1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. In: Wang JK (ed) *Techniques for modern aquaculture*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph Michigan USA, pp. 112-136.
- Rakocy JE, Bailey DS, Shultz KA, Cole WM (1997). Evaluation of a commercial-scale aquaponic unit for the production of Tilapia and lettuce. In: *Tilapia aquaculture: proceedings from the 4th international symposium on Tilapia in Aquaculture*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, New York, pp. 603-613.
- Rakocy JE, DS Bailey, RC Shultz, Thoman ES (2004). Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. in R.B. Bolivar, G.C. Mair, K. Fitzsimmons, Eds. *Proceedings from the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, Manila, Philippines. Pages 676-690.
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics – Integrating fish and plant culture*. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication n° 454.
- Savidov NA (2004). Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in Alberta. Disponible en <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/enviro/aquaculture/acrdp-pcrda/projects/reports-rapports/ca/CA-04-01-001.pdf> (24 marzo 2012).
- Savidov NA (2005). Evaluation of Aquaponics Technology in Alberta, Canadá. *Aquaponics Journal* (37). [publicación en línea]. Disponible en: <http://aquaponics.com/media/docs/articles/Evaluation-of-Aquaponics-Technology-in-Alberta.pdf> (24 marzo 2012).
- Tomás-Vidal A, Martínez-Llorens S, Jambrina C, De Saja González R, Jover Cerdá M (2011). Effects of dietary soybean meal on growth, nutritive efficiency and body composition of cultured tench (*Tinca tinca*). *Journal of Applied Ichthyology* 27(3): 892-896.
- Van Gorder S (2003). Small-scale aquaculture and aquaponics. Disponible en <http://aquaponics-journal.com/docs/articles/small-Scale-Aquaculture-and-Aquaponics.pdf> (26 junio 2012).
- Wolnicki J, Korwin-Kossakowski M (1993). Survival and growth of larval and juvenile tench *Tinca tinca* (L.) fed different diets under controlled conditions. *Aquaculture Research* 24: 707-713.
- Wolnicki J, Myszkowski L (1998). Evaluation of four commercial dry diets for intensive production of tench *Tinca tinca* (L.) juveniles under controlled conditions. *Polish Archives of Hydrobiology*. 45(3): 453-458.
- Wolnicki J, Myszkowsky L, Kaminski R (2003). Effect of supplementation of a dry feed with natural food on growth; condition and size distribution of juvenile tench *Tinca tinca*. *Journal of Applied. Ichthyology* 19: 157-160.
- Wolnicki J, Myszkowsky L, Korwin-Kossakowski M, Kaminski R, Andrzej Stanny L (2006). Effects of different diets on juvenile tench; *Tinca tinca* reared under controlled conditions. *Aquaculture International* 14: 89-98.

(Aceptado para publicación el 28 de octubre de 2013)