

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**OPTIMIZACIÓN DE AGUA, NUTRIMENTOS
SOLUBLES Y SEDIMENTOS DE LA PISCICULTURA
PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS**

MACIEL REYES FLORES

TESIS

PRESENTADA COM REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER ELGRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

Montecillo, Texcoco, estado de México

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, "**Maciel Reyes Flores**", alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **Manuel Sandoval Villa**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Optimización de agua, nutrimentos solubles y sedimentos de la piscicultura para la producción de plantas**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, a 5 de diciembre de 2017



Maciel Reyes Flores

Firma y nombre del alumno



Dr. Manuel Sandoval Villa

Visto Bueno del Consejero

La presente tesis titulada: **“Optimización de agua, nutrimentos solubles y sedimentos de la piscicultura para la producción de plantas”** realizada por el alumno: **Maciel Reyes Flores** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

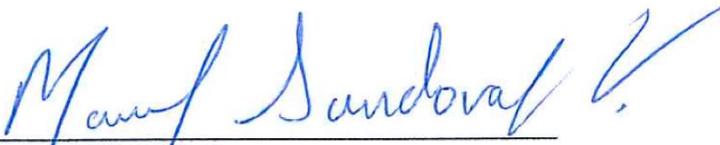
DOCTOR EN CIENCIAS

EN

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESORA



Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza

ASESORA



Dra. Libia Iris Trejo Téllez

ASESOR



Dr. Julio Sánchez Escudero

ASESOR



Dr. Juan Reta Mendiola

Montecillo, Texcoco, estado de México, diciembre de 2017

OPTIMIZACIÓN DE AGUA, NUTRIMENTOS SOLUBLES Y SEDIMENTOS DE LA PISCICULTURA PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS

Maciel Reyes Flores, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Indudablemente, el agua es el recurso más importante para la vida y la producción de alimentos. Por eso, se debe utilizar en forma integral y eficiente. En un sistema de producción es importante utilizar al máximo los recursos para obtener beneficios económicos adicionales. La acuaponía utiliza el agua en la que viven los peces como medio nutritivo para producir cultivos de interés. La utilización de esta agua permite reutilizar los nutrientes disponibles derivados del alimento y la descomposición microbiana de los desechos de peces. El manejo de descarga cero y libre de fertilizantes hace de la acuaponía un sistema de producción respetuoso con el medio ambiente. Aunque las concentraciones de nutrientes en acuaponía son más bajas que las usadas en sistemas hidropónicos, debido al almacenamiento de nutrientes en el agua recirculante y el suministro continuo de minerales por los peces. No obstante, a pesar de las investigaciones desarrolladas en los últimos, la calidad de las producciones vegetales de la acuaponía contra la hidroponía necesita desarrollarse ampliamente. Es posible la generación de sistemas acuapónicos de autoconsumo y comerciales a gran escala, siempre que la producción sea competitiva a los estándares y calidad de los productos que se oferten en el mercado.

La investigación realizada en el módulo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo evaluó el rendimiento y calidad de las producciones acuapónicas. El cultivo de tomate y tilapia fueron estudiados durante dos años de experimentos para determinar la concentración de nutrientes en acuaponía y su efecto en la calidad de frutos de tomate. Además de proponer alternativas para incrementar la rentabilidad de la acuaponía con el uso de materiales más económicos en la elaboración de los sistemas acuapónicos.

En el caso del tomate (*Solanum lycopersicon* L. var. Cid) cultivado con tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) se obtuvieron rendimientos muy bajos en acuaponía, acuaponía con aplicaciones foliares de Fe y con el uso del efluente piscícola como solución nutritiva en sustrato. Esto debido

principalmente a los bajos niveles de nutrientes y la conductividad eléctrica. La evaluación del rendimiento demostró que disminuyó 60, 76 y 83%, la altura de planta 18, 28 y 60%; y peso seco de la parte aérea 58, 65 y 78%, respecto a lo que se produce en hidroponía convencional.

La influencia del efluente acuapónico como medio nutritivo y complementado con aspersiones foliares de micronutrientes en concentraciones crecientes se estudió para determinar la calidad de los frutos maduros de tomates. Los resultados de calidad de frutos en acuaponía se compararon con un tratamiento en hidroponía convencional con la solución nutritiva Steiner. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares en acuaponía no afectaron los sólidos solubles totales (SST), la acidez titulable (AT), relación SST/AT y la concentración de licopeno pero si hubo una ligera diferencia en el pH del jugo de tomate. La AT, el pH, la relación SST/AT y el licopeno en los tratamientos acuapónicos no mostraron diferencias significativas y únicamente los SST disminuyeron 22.2% en ACU, 26.6% en ACUFF1 y 31.7% en ACUFF2 comparado con HID. Debido al aporte de nutrimentos del agua en acuaponía, las aplicaciones foliares de micronutrimentos no influyeron positivamente en los atributos de calidad química de frutos de tomate.

La investigación proyectó la viabilidad financiera del sistema acuapónico en donde se realizaron las investigaciones, Home Food Production Systems de la empresa Nelson and Pade®. Los datos analizados fueron los costos fijos y variables, ingresos y los indicadores de viabilidad financiera que son el valor actual neto (VAN), relación beneficio-costos (RBC), la tasa interna de recuperación (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI). Se identificó que el sistema debido al costo de la amortización de la inversión no es rentable ya que el VAN fue de -\$37 962, la RBC de 0.77, la TIR de 0.16% y el PRI de 18.5 años. Las alternativas rentables serían la fabricación del sistema acuapónico e invernadero con materiales más económicos (opción 1) o el sistema acuapónico sin invernadero (opción 2). De estas formas el VAN sería de \$8941 y \$21 818, la RBC de 1.09 y 1.26, la TIR 14.3 y 32.3% y el PRI de 6.5 y 3.9 años para cada una de las opciones.

Palabras clave: sostenibilidad, integración, seguridad alimentaria, combate a la pobreza.

OPTIMIZATION OF WATER, SOLUBLE NUTRIMENTS AND SEDIMENTS OF FISH FARM FOR THE PRODUCTION OF PLANTS

Maciel Reyes Flores, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

Undoubtedly, water is the most important resource for life and food production. Therefore, it should be used in an integral and efficient way. In a production system it is important to make the maximum use of resources to obtain additional economic benefits. Aquaponics uses water in which fish live as a nutrient medium to produce crops of interest. The use of this water makes it possible to reuse available nutrients derived from food and the microbial decomposition of fish waste. The management of zero discharge and free of fertilizers makes aquaponics a production system that respects the environment. Although the nutrient concentrations in aquaponics are lower than those used in hydroponic systems, due to the storage of nutrients in the recirculating water and the continuous supply of minerals by the fish. However, despite the research developed in the past, the quality of aquaponics plant production against hydroponics needs to be widely developed. The generation of aquaponic self-consumption and commercial systems on a large scale is possible, but it must be competitive; at least to have the standards and quality of the products that are offered in the market.

The research carried out in the experimental module of the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, evaluated the yield and quality of aquaponic productions. The tomato and tilapia culture were studied during two years of experiments to determine the concentration of nutrients in aquaponics and its effect on the quality of tomato fruit. In addition to proposing alternatives to increase the profitability of aquaponics with the use of cheaper materials in the development of aquaponic systems.

In the case of tomato (*Solanum lycopersicon* L. var. Cid) cultivated with tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) very low yields were obtained in aquaponics, aquaponics with foliar applications of Fe and with the use of fish effluent as a nutrient solution in the substrate. This is mainly due to low

nutrient level and electrical conductivity. The evaluation of the yield showed that it decreased 60, 76 and 83%, plant height 18, 28 and 60%; and dry weight of aerial part 58, 65 and 78%, with respect to what is produced in conventional hydroponics.

The influence of the aquaponic effluent as a nutrient medium and supplemented with foliar sprays of micronutrients in increasing concentrations was studied to determine the quality of ripe tomato fruits. The fruit quality results in aquaponics were compared with a conventional hydroponics treatment with the Steiner nutrient solution. The results showed that the foliar applications in aquaponics did not affect the total soluble solids (TSS), the titratable acidity (TA), the TSS/TA ratio and the lycopene concentration, but there was a slight difference in the pH of the tomato juice. The TA, pH, TSS/TA ratio and lycopene in the aquaponic treatments showed no significant differences and only the TSS decreased 22.2% in ACU, 26.6% in ACUFF1 and 31.7% in ACUFF2 compared to HID. Due to the contribution of water nutrients in aquaponics, foliar applications of micronutrients did not positively influence the chemical quality attributes of tomato fruit.

The investigation projected the financial viability of the aquaponic system where the research was carried out, Home Food Production Systems of the company Nelson and Pade®. The analyzed data were the fixed and variable costs, income and financial viability indicators that are the net present value (NPV), benefit-cost ratio (BCR), the internal recovery rate (IRR) and the recovery period of the investment (RPI). It was identified that the system due to the cost of the amortization of the investment is not profitable since the NPV was - \$ 37,962, the BCR of 0.77, the IRR of 0.16% and the RPI of 18.5 years. The profitable alternatives would be the manufacture of the aquaponic and greenhouse system with cheaper materials (option 1) or the aquaponic system without greenhouse (option 2). Of these forms the NPV would be of \$ 8 941 and \$ 21 818, the BCR of 1.09 and 1.26, the IRR 14.3 and 32.3% and the RPI of 6.5 and 3.9 years for each of the options.

Keywords: sustainability, integration, food security, fight against poverty.

AGRADECIMIENTOS

A dios por las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida.

Un profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad y el financiamiento brindado para realizar los estudios doctorales.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa por darme la oportunidad de trabajar en sus investigaciones y por brindarme la confianza durante todo este tiempo.

Por sus valiosas sugerencias en la investigación agradezco a la Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza, a la Dra. Libia I. Trejo Téllez, al Dr. Julio Sánchez Escudero y al Dr. Juan Reta Mendiola. Cada uno de ellos aportó sus conocimientos en esta investigación.

Un profundo agradecimiento al Ing. Plutarco Sánchez Velásquez por permitirme realizar la investigación en su Módulo acuapónico y por orientarme durante todo momento. También, por compartir sus conocimientos en acuaponía. Gracias por la amistad brindada.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco y al M. C. Enrique Rodríguez por la amistad y sugerencias en la investigación.

A la señora Agustina por la disponibilidad en la realización de todas las actividades en las que me apoyo y por la amistad brindada.

Maciel Reyes Flores

DEDICATORIA

A mis padres:

Edwin Reyes Moreno y Bariflor Flores González

Por su gran apoyo y motivaciones para realizar mis estudios. Les estaré eternamente agradecidos.

A mis abuelos paternos Ángela[†] y Adolfo[†] por la educación que me dieron. A mis abuelos maternos Elvia y José Antonio[†] por apoyarme y motivarme para seguir preparándome.

A mis hermanos: Marvin, Angelita y Roxana por apoyarme en todo momento y por formar parte importante de mi vida. Los amo.

DEDICATORIA ESPECIAL

A mi amada esposa Linda, por emprender juntos este camino y por formar parte de mi vida. Por estar ahí cuando necesitaba fuerzas para levantarme. Y lo más importante, que a su lado me he graduado como padre de mis dos grandes amores, Maximiliano y Valentino quienes en todo momento fueron mi inspiración para lograr mi objetivo.

LOS AMO familia.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVO GENERAL	2
Objetivos Particulares.....	2
HIPÓTESIS GENERAL	3
Hipótesis Particulares	3
REVISIÓN DE LITERATURA	3
¿Qué es la acuaponía?.....	3
Breve historia de la acuaponía.....	4
Elementos del sistema acuapónico	7
Subsistema acuícola	8
Subsistema de filtración mecánico y biológico.....	10
Subsistemas de producción de plantas	11
Bomba de recirculación y aireación.....	13
Interdependencia entre peces, plantas y bacterias	13
Ciclo del nitrógeno en el sistema acuapónico	14
Sedimentos y carga nutrimental del agua de la acuicultura	16
Una ventaja para la acuaponía: producción de nitrógeno y fósforo en sistemas acuícolas	18
Fertilización foliar como suplemento en la acuaponía	19
Importancia del pH en acuaponía	21
LITERATURA CITADA	21
CAPÍTULO I. Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	30
Resumen	30
Abstract	31
Introducción	31

Materiales y métodos -----	32
Resultados -----	35
Oxígeno disuelto (OD) en efluente acuapónico -----	35
pH -----	35
Conductividad eléctrica (CE) -----	36
Temperatura -----	37
Concentración de amonio (NH ₄ ⁺) en el efluente acuapónico -----	37
Nitrato (NO ₃ ⁻) -----	38
Concentración de P, K, Ca, Mg y micronutrientes en el efluente -----	39
Altura de las plantas de jitomate -----	40
Peso seco de la parte aérea -----	41
Rendimiento de frutos -----	41
Concentración y contenido de nutrientes en hojas -----	42
Conclusiones -----	44
Literatura citada -----	44
Capítulo II. Calidad de tomate (<i>solanum lycopersicum</i> L.) producido en acuaponía complementado con fertilización foliar de micronutrientes -----	48
Resumen -----	48
Abstract -----	49
Introducción -----	49
Materiales y métodos -----	51
Resultados y discusión -----	54
Conductividad eléctrica (CE) en la solución acuapónica -----	54
Variables asociadas a la calidad de fruto -----	56
Conclusiones -----	59
Literatura citada -----	60
Capítulo III. Análisis económico de la producción de tilapia y tomate en un sistema acuapónico a escala familiar -----	66
Resumen -----	66
Abstract -----	67
Introducción -----	67

Resultados y discusión-----	73
Análisis de costos-----	73
Análisis de ingresos -----	74
La rentabilidad del sistema acuapónico Home Food Production Systems -----	75
Escenarios posibles para incrementar la rentabilidad -----	75
Conclusiones -----	77
Literatura citada -----	77
DISCUSIÓN GENERAL -----	79
CONCLUSIONES GENERALES-----	82

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y temperatura del efluente en las tinas de peces y tinas hidropónicas durante el ciclo de 103 días después de la siembra de los peces.....	36
Cuadro 2. Rendimiento, peso seco de parte aérea (a los 103 ddt), y altura de plantas de jitomate ‘Cid’ cultivado en acuaponía e hidroponía.	40
Cuadro 3. Concentración de nutrientes minerales en el tejido foliar de plantas de jitomate ‘Cid’ a los 42, 72 y 103 días después del trasplante.....	42
Cuadro 4. Concentración promedio, máxima y mínima de nutrimentos producidos en las tinas hidropónicas con los diferentes tratamientos durante 121 días del experimento.....	56
Cuadro 5. Efecto de los tratamientos acuapónicos e hidropónico sobre la calidad química de frutos de tomate variedad Cid a madurez de consumo.	57
Cuadro 6. Costo de inversión de los materiales utilizados en el proyecto acuapónico y la vida útil considerada para la depreciación.....	73
Cuadro 7. Costos variables del sistema acuapónico en un año de operación.....	74
Cuadro 8. Ingresos anuales de la producción acuapónica en el sistema Home Food Production Systems.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del sistema acuapónico.	8
Figura 2. Clarificador con separador mecánico de sólidos con deflectores (a, Fuente: Somerville et al., 2014), filtros biológicos (b) y desgasificador (c).	11
Figura 3. Módulos acuapónicos con diferentes sistemas de producción de plantas a) cama con sustrato, b) balsas flotantes y c) técnica de película nutritiva (NFT).	12
Figura 4. Ciclo del nitrógeno dentro del sistema acuapónico (Elaborado a partir de Tyson et al., 2011; Pantella, 2012).	16
Figura 5. Concentración de NH_4^+ (A) y NO_3^- (B) en las tinas acuícolas e hidropónicas durante el experimento.	38
Figura 6. Contenido nutrimental en materia seca de la parte aérea de plantas de jitomate ‘Cid’ a los 103 días después del trasplante.	43
Figura 7. Conductividad eléctrica del agua en las tinas hidropónicas durante el ciclo de cultivo.	55
Figura 8. Sistema acuapónico Home Food Production Systems de Nelson and Pade®. 1) Tanques de peces, 2) clarificadores, 3) mineralizadores, 4) desgasificador, 5) tinas hidropónicas, 6) bomba de recirculación y 7) aireador.	71

INTRODUCCIÓN GENERAL

La pesca y la acuicultura son asuntos de seguridad nacional y parte esencial del quehacer económico y social del país. La acuicultura representa una alternativa real para ampliar la oferta y seguridad alimentaria, generar divisas, crear fuentes permanentes de empleo y estimula el desarrollo regional (Montero, 2005). Según la FAO (2010), la acuicultura es el sector de más rápido crecimiento. Ha crecido, desde 1970 a 2008, a una tasa promedio de 6.6% y se espera se supere a la pesca de captura.

Este crecimiento acelerado se debe a la expansión de las áreas de producción, el aumento de los conocimientos técnicos en la cría y los avances en las tecnologías de producción (Fitwi *et al.*, 2012). Sin embargo, el desarrollo intensivo de la actividad implica mayor uso de insumos lo cual conduce a la explotación de los recursos naturales. Lo anterior viene acompañado en un aumento en impactos ambientales negativos, ocasionado por el proceso de producción, en donde se generan cantidades considerables de efluentes que contienen alimento no consumido y heces fecales (Read y Fernandes, 2003; Fitwi *et al.*, 2012).

La acuaponía, que se define como el cultivo de peces y plantas en un sistema de recirculación, utiliza el agua en la que sobreviven los peces, como medio nutritivo para producir cultivos de interés. La utilización de esta agua permite reutilizar los nutrientes disponibles derivados del alimento y la descomposición microbiana de los desechos de peces (Rakocy *et al.*, 2006).

La integración de la acuaponía como un agroecosistema intensifica el uso de los recursos naturales de manera sostenible, a la vez que se diversifica la producción y se promueve el reciclaje de nutrientes. Como cualquier necesidad básica, los sistemas de producción acuapónicos surgen por la necesidad de producir alimentos en un entorno donde se desarrollen actividades productivas en interacción con el medio.

Los sistemas de recirculación acuapónico están ganando cada vez más atención como biosistemas integrados en la producción de alimentos que sirven como modelo sostenible, cumpliendo los

siguientes principios (Diver, 2006): los productos de desecho de un sistema sirven como nutrientes para un segundo sistema biológico, la integración de peces y plantas resulta en un policultivo que aumenta la diversidad y produce varios productos, el agua se reutiliza a través de filtración biológica y la recirculación, y la producción de alimentos local proporciona acceso a alimentos saludables y mejora la economía local.

Bajo la perspectiva de sostenibilidad, se propone a la acuaponía como alternativa de manejo del agua que se caracteriza como un medio sistemático para aprovecharla y reciclarla. Esta actividad forma parte de las diversas maneras para practicar la agricultura familiar y puede convertirse en una alternativa de conservación productiva si se aplica para generar productos alimenticios de buena calidad nutrimental conservando recursos naturales.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la calidad nutrimental del efluente acuapónico para la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un sistema de cama flotante.

Objetivos Particulares

1. Evaluar el efluente acuapónico como solución nutritiva para la producción de tomate en camas flotantes y en tezontle comparado con la hidroponía convencional.
2. Evaluar el efecto de la fertilización foliar de micronutrientes en la calidad de frutos de tomate producidos en acuaponía.
3. Realizar un análisis económico del sistema acuapónico que integre la producción de tilapia y tomate.

HIPÓTESIS GENERAL

El efluente acuapónico genera los nutrimentos suficientes para la producción de tomate en camas flotante y tezontle sin la adición de fertilizantes químicos.

Hipótesis Particulares

1. Los nutrientes que se generan en el efluente acuapónico, son una fuente suficiente para la producción de tomate en camas flotantes y en tezontle.
2. Las aplicaciones foliares de micronutrimentos mejoran la calidad de frutos de tomate producidos en acuaponía.
3. Con la integración de la producción de tilapia y tomate en acuaponía se obtienen beneficios económicos adicionales.

REVISIÓN DE LITERATURA

¿Qué es la acuaponía?

La acuaponía es un sistema integrado por la acuicultura y la hidroponía, donde existe una relación en la cual el agua y los nutrientes se recirculan y reutilizan. La acuicultura funciona con cierta capacidad de agua que con frecuencia debe tratarse para evitar toxicidad de amoníaco y nitrito, derivados de la descomposición de alimentos, metabolitos no consumidos y los residuos fecales de los peces (Liang y Chien, 2013). El sistema hidropónico aprovecha el agua de la producción de peces mediante filtros para eliminar los sólidos en suspensión y desechos fecales, convirtiéndose en nutrientes solubles de fácil asimilación para las plantas, por acción de bacterias nitrificantes. Este último sistema ha tratado el agua y la recircula nuevamente al sistema acuícola, con concentraciones apropiadas de sustancias para el óptimo desarrollo de los peces.

Se obtienen ventajas como el ahorro económico en el tratamiento del agua para el sistema piscícola y la disminución por costos de fertilizantes para la hidroponía, aprovechando el beneficio de las salidas dobles, cosecha de peces y plantas. Por lo tanto, el crecimiento de la planta y la producción están indirectamente relacionados con estrategias de alimentación que proporcionan la mayor parte de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, la condición metabólica del pez y la actividad microbiana (Liang y Chien, 2013; Rakocy *et al.*, 2004).

El sistema de acuaponía surge como alternativa para aprovechar los recursos de forma integral, además del valor nutrimental para las poblaciones que padecen de mala alimentación y dificultad en la obtención de alimentos proporcionado por las proteínas (pescado) y fuentes de vitaminas y minerales de cultivos que se producen en el sistema.

Breve historia de la acuaponía

En México, la integración de la acuacultura con la agricultura para producir alimentos se remonta a la época de los Aztecas, con las chinampas, en donde se utilizaban el agua y la materia orgánica en descomposición para abonar las tierras, y que fue una de las formas más intensivas de la agricultura (Adams, 2005) a partir del reciclaje de nutrientes.

Lewis *et al.* (1978) trabajaron con el primer sistema acuapónico con bagre y jitomate, el cual fue desarrollado para operar con una alta densidad de población de peces. La concentración de NO_3^- fue baja de 6 a 10 mg L^{-1} , por lo que se adicionaron fertilizantes para apoyar el crecimiento del cultivo y con ello lograron obtener 4.9 kg planta^{-1} . Concluyeron que los bajos niveles de NO_3^- , junto con altas cantidades de alimento para peces, estaban produciendo la desnitrificación del NO_3^- a nitrógeno gaseoso. Sin embargo, esto último no se demostró.

Según Diver (2010) de 1970 a 1980 se empezaron a desarrollar en Estados Unidos de América los sistemas acuícolas en recirculación que integran la producción de peces y vegetales en hidroponía. En estos años se generaron trabajos sobre la acuaponía en la Universidad de las Islas Vírgenes y

en la Universidad Estatal de Carolina del Norte dando origen a dos vertientes principales que desarrollaron dichas universidades. La primera, comandada por el Dr. James Rakocy quién desarrolló un sistema de acuaponía en dónde las plantas crecían en un sistema hidropónico en balsa flotantes. Por otro lado, las investigaciones de Mark McMurtry y Doug Sanders de la Universidad Estatal de Carolina del Norte desarrollaron el sistema Aqua-vegeculture, que a diferencia del sistema de Rakocy, las plantas que estaban en arena eran regadas con el efluente de los peces por medio de riego por goteo. McMurtry y Sanders encontraron que la relación entre los componentes, que es la relación agua y el medio de cultivo, podrían alterarse para maximizar la rentabilidad de la producción acuapónica (Sanders y McMurtry, 1988; McMurtry *et al.*, 1990). Sin embargo, Sanders y McMurtry (1988) no discute la rentabilidad, solo los aspectos económicos de la acuaponía y mencionan que el sistema ofrece rendimientos económicos de vegetales y peces.

En 1984 se evaluó un sistema acuapónico de recirculación al aire libre de tilapia y tomate en las Islas Vírgenes. Se construyó de materiales fácilmente disponibles y diseñados para minimizar los costos de capital, el uso de energía y agua. La producción de tomate en las diferentes condiciones en las que se desarrollaron varió de 0.48 a 3,69 kg planta⁻¹ (Watten y Busch 1984). En general, los bajos rendimientos se debieron a la baja concentración de nutrientes en el sistema y mencionan que el NO₃⁻ osciló entre 1.95 a 8.75 mg L⁻¹.

A principios de 1990, Tom y Paula Speraneo, propietarios y operadores de S & S Aqua Farm en Missouri, modificaron el sistema de la Universidad Estatal de Carolina del Norte a lo que llamaron el “sistema Speraneo”. Las dimensiones del invernadero eran de 15 m x 24 m, 6 tanques de peces de 4 242 L colocados por arriba del suelo en donde cada tanque está conectado a seis camas hidropónicas de 20 cm de profundidad llenas de grava de río. Utilizaron tilapias que toleraba temperaturas más bajas que las utilizadas por McMurtry y Sanders. Cultivaron albahaca, tomates, pepinos, lechugas, hierbas y plantas ornamentales. Aunque este sistema fue adoptado en operaciones comerciales, no contienen información financiera sustancial respecto a la acuaponía (Diver, 2010).

En 1998, The Conservation Fund's Freshwater Institute publicó un manual centrándose en como diseñar y operar un sistema en acuaponía. Crearon el "sistema Tallmansville" basado en el "sistema Speraneo" agregándole un sistema de calefacción para el sistema radical y un sistema hidropónico alternativo en donde el sustrato era inundado y drenado en lugar de riego por goteo (The Conservation Fund's Freshwater Institute, 1997 y 1998).

Las aportaciones de Rakocy y su equipo de la Universidad de la Estación Experimental Agrícola Islas Vírgenes fueron fundamental en la acuaponía. El sistema incluía equipos y componentes tales como clarificadores, filtros, tanques de desgasificación, difusores de aire, tanque receptor y tanques de adición de base (control del pH). Este sistema fue diseñado para maximizar la productividad y crecimiento (Diver, 2010).

En su investigación de 1989, Rakocy estimó la relación óptima entre la cantidad de alimento de los peces y el área de cultivo de lechuga Bibb y fue de 57 g de alimento m⁻² día, con esto la acumulación de nutrientes disminuyó y el subsistema hidropónico proporcionó suficientes nutrientes al cultivo (Rakocy, 1989). Actualmente, esta proporción se ha ampliado de 60 a 100 g de alimento m⁻² día dependiendo del tipo de cultivo (Rakocy *et al.*, 2004b; Rakocy *et al.*, 2006).

En 1993, se estableció que mientras mayor es la cantidad de alimentos que se les proporcione a tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) los nutrientes se acumulaban a niveles que excedían los límites máximos recomendados para las soluciones nutritiva en hidroponía (2,000 mg L⁻¹ como sólidos disueltos solubles) (Rakocy *et al.*, 1993).

En el sistema de Rakocy más de 30 tipos vegetales han sido cultivados en sistemas integrados con bases experimentales (Rakocy *et al.*, 1992). Resumió la productividad en el sistema hidropónico e informó de una máxima productividad de 9,07 a 9.98 kg planta⁻¹ para tomate, 181.4 g planta⁻¹ para lechuga, de 2.35 a 4.03 kg planta⁻¹ de pepino, 2.5 kg planta⁻¹ de calabacín, de 408.23 a 498.95 g planta⁻¹ de pac choi y 589.67 g planta⁻¹ de col, esto dependiendo de la cepa de pez utilizada.

Los estudios realizados por Graber y Junge (2009) mencionan que la acuaponía debe tener una orientación hacia la producción intensiva en pequeña escala y que además será una actividad sustentable. El inconveniente de la acuaponía es lograr el compromiso de condiciones óptimas de crecimiento para plantas y peces y producirse bajo las mismas condiciones ambientales. Una nueva tendencia ha surgido a partir de lo anterior, que consiste principalmente en separar los elementos del sistema acuapónico; es decir, proporcionarle las condiciones óptimas a cada uno de los componentes del sistema y únicamente aprovechar el agua para la producción de peces y plantas (Goddek *et al.*, 2016; Kloas *et al.*, 2015). Con esta nueva tecnología se obtiene una producción de peces de 75.9 kg m^{-3} y 8.89 kg m^{-2} de tomate (Kloas *et al.*, 2015).

Elementos del sistema acuapónico

En la Figura 1 se muestran los componentes principales que deberían tener los sistemas acuapónicos. El agua de los tanques de peces pasa al sistema de filtrado mecánico en donde a través de los clarificadores se remueven los sólidos suspendidos, producto de residuos fecales y restos de alimento no consumido; que de no desecharse la materia orgánica se puede acumular y descomponer anaeróbicamente en el fondo del tanque, provocando la liberación de productos tóxicos que deterioren el agua y dañen a los peces. Los biofiltros sirven para la la formación de colonias de bacterias nitrificantes para convertir el amonio tóxico, liberado por los peces, en nitrato; además para retener sólidos finos. Los sistemas hidropónicos, comúnmente utilizados son balsas flotantes, sistema NFT y cama con sustrato. Por último, es común un tanque receptor donde el agua se recolecta y redirecciona nuevamente al tanque de los peces (Rakocy *et al.*, 2006; Tyson *et al.*, 2004), aunque se puede conectar directamente una bomba de uso continuo conectada al flujo de agua para retornarla a los tanques de peces.

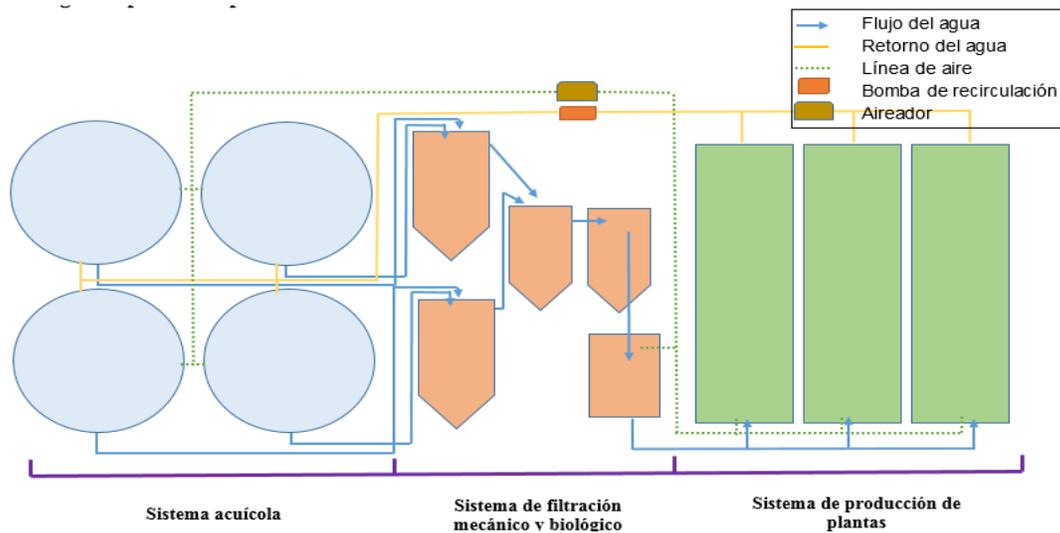


Figura 1. Diagrama general del sistema acuapónico.

Subsistema acuícola

Según Rakocy *et al.* (2006), la tilapia es el pez más cultivado en sistemas de acuaponía. Las principales variables de calidad que se deben monitorear en el sistema acuapónico son: oxígeno disuelto, temperatura, pH y amoníaco total (Timmons *et al.*, 2002). El oxígeno disuelto es el parámetro más importante y requiere un constante monitoreo, y puede proporcionarse con aireadores a una saturación del 80 a 90% que soportaría una densidad de peces a la cosecha de 60-70 kg m⁻³, de incrementarse la densidad será necesario el suministro de oxígeno puro (Timmons *et al.*, 2002; Pantanella, 2012).

La aireación proporcionada a través del aireador ocurre para mantener el agua oxigenada para la respiración de los peces, para mejorar la nitrificación y la mineralización de los sólidos, y el oxígeno adecuado en la raíz de los cultivos (Pantanella, 2012). La mayoría de los peces de agua cálida se desarrollan mejor a concentraciones de oxígeno de 5 mg L⁻¹.

La temperatura influye directamente en los procesos fisiológicos, como la tasa de respiración, la eficiencia de alimentación y la asimilación, crecimiento, comportamiento y reproducción. Cada

especie necesita valores óptimos para el máximo crecimiento posible (Person-Le Ruyet *et al.*, 2006; Björnsson *et al.*, 2007). La temperatura adecuada del agua aumenta la demanda de alimentos de peces, incrementando la probabilidad de crecimiento (Mizanur y Bai, 2014) y a bajas temperatura se retarda la digestión del alimento por los peces (Park *et al.*, 2012).

El pH tiene influencia en una variedad de reacciones de equilibrio y solubilidad, de las cuales la más importante es la relación entre la forma ionizada y la no ionizada del amoníaco y nitrito. Tyson *et al.* (2004) concluyeron que el intervalo de pH para la nitrificación en acuaponía es 6.5 a 7.0. El amoníaco total es la suma del NH_3 y NH_4^+ , y su concentración relativa es función del pH, la salinidad y la temperatura.

La alimentación es la fuente de nutrientes implicados como biomasa de los peces y plantas. Por lo tanto, el crecimiento de la planta y la producción están indirectamente relacionados con estrategias de alimentación, condición metabólica de los peces y la actividad microbiana (Liang y Chien, 2013). El suministro de alimento balanceado es importante para el crecimiento de los peces, especialmente durante los períodos de crecimiento iniciales (larvas y alevines). Debe haber un equilibrio para satisfacer las necesidades de crecimiento. Primeramente, una sobrealimentación eleva los costos de producción del alimento, adicional a esto, se deteriora la calidad del agua que eventualmente reduce el crecimiento de los peces. Con una pobre alimentación no se obtienen peces con crecimientos óptimos (Cho *et al.*, 2003). Los motivos anteriores determinan la tasa óptima y la frecuencia de alimentación para el crecimiento de los peces que es fundamental, desde puntos de vista económicos y biológicos.

En los sistemas acuapónicos comerciales los se manejan en una producción escalonada lo que significa que cada tanque tiene peces del mismo tamaño que en general es en etapa preadulto (20 a 50 g). Lo anterior permite mantener una biomasa de peces constante, que eventualmente mantiene las concentraciones de nutrientes para las plantas (Pantanella, 2012).

Dependiendo de la etapa de crecimiento de los peces, se administran dietas diferentes a los animales. Las dietas para peces preadultos son en realidad más ricas en proteínas (40-50% de

proteínas), mientras que las de madurez varían entre 30 y 40%. Cuanto mayor sea el contenido de proteína y la cantidad de alimento dado a los peces, mayor será el nitrógeno suministrado a las plantas (Pantarella, 2012).

Subsistema de filtración mecánico y biológico

La filtración mecánica es la separación y eliminación de los desechos sólidos y suspendidos, como excretas y alimentos no consumido. Los clarificadores son tanques que utilizan las propiedades de agua para separar las partículas (Somerville *et al.*, 2014), pueden ser de fondo cónico donde se depositan los sólidos con un tiempo de retención del agua de 20 minutos que pueden eliminar hasta el 59% de los sólidos totales extraíbles (Timmons *et al.*, 2002). Si la materia orgánica se acumula, disminuye la concentración el oxígeno disuelto y al descomponerse anaeróbicamente se producirá CO_2 , NH_3 , CH_4 y H_2S que son tóxicos para los peces. También, los sólidos en suspensión necesitan ser eliminados ya que su presencia obstruye las raíces de las plantas. Sin embargo, la mineralización de los sólidos permite que más nutrientes sean liberados en el agua (Rakocy *et al.*, 2006).

Los tanques de filtración biológicos tienen en su interior sustratos como medio para el crecimiento de colonias bacterianas nitrificantes. Las bacterias son el motor biológico, crucial y fundamental en la acuaponía. Eliminan los desechos tóxicos transformándolos en nutrientes accesibles para las plantas. Las bacterias nitrificantes convierten los desechos de los peces que entran en el sistema principalmente en forma de amoníaco en nitrato, que es el fertilizante para las plantas.

La nitrificación es la transformación del NH_3 , que liberan los peces como desecho metabólico a través de las branquias, a nitrato. Primeramente, el NH_3 se oxida a NO_2^- , que es tóxico, y luego a NO_3^- . Estos procesos están mediados principalmente por dos grupos de bacterias, nitrosomonas y nitrobacter (Rakocy *et al.*, 2006). Las bacterias nitrificantes necesitan de oxígeno disuelto, niveles adecuados de pH y temperatura. La nitrificación es reacción oxidativa por lo que requiere oxígeno, los niveles óptimos son de 4 a 8 mg L^{-1} . En la acuaponía, un rango de pH apropiado es de 6 a 7

porque este rango es mejor para las plantas y los peces. El rango de temperatura ideal para el crecimiento y la productividad de las bacterias es 17-34 °C (Somerville *et al.*, 2014).

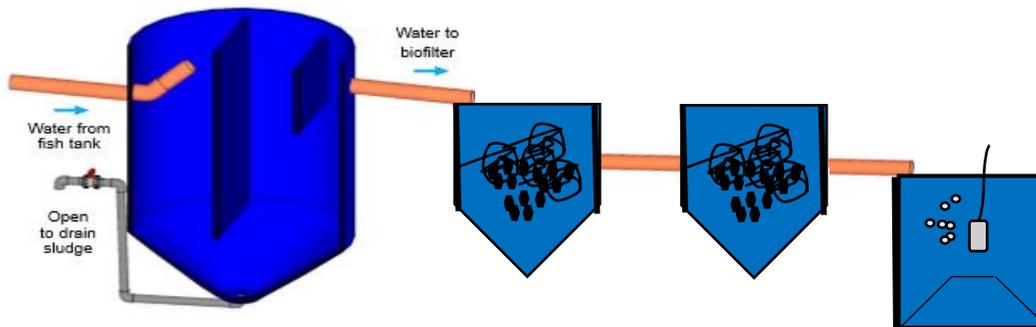


Figura 2. Clarificador con separador mecánico de sólidos con deflectores (a, Fuente: Somerville *et al.*, 2014), filtros biológicos (b) y desgasificador (c).

En la Figura 2 se observa que el agua proveniente de los tanques de peces es desviada por el deflector disminuyendo la velocidad del agua, obligando a que los sólidos se concentren en la parte inferior para posteriormente retirarlo. El agua sin partículas gruesas sale por la parte superior a través de un tubo y desemboca en los biofiltros. En los biofiltros ocurren los procesos de nitrificación y mineralización a través del cual los nutrientes se generan para que el sistema hidropónico los aproveche. El flujo del agua continúa hacia el desgasificador, este puede o no puede estar presente pero su función radica que mediante aireación constante se volatilicen los gases como el sulfuro de hidrógeno, metano y dióxido de carbono que son tóxicos para los peces.

Subsistemas de producción de plantas

Son las camas de cultivo donde crecen las plantas. Los diseños más comunes son: balsas flotantes, cama con sustrato y técnica de película de nutrientes (NFT, nutrient film technique) (Somerville *et al.*, 2014). Las plantas crecen utilizando los nutrientes del agua. En realidad, el subsistema hidropónico funciona como otro filtro biológico que limpia el agua que retorna hacia los tanques de peces. Cada método de producción tiene ventajas y desventajas (Somerville *et al.*, 2014). Las camas con sustrato sirven para soportar a las plantas que al mismo tiempo funciona como filtro mecánico y biológico. Las desventajas de las camas de sustrato es que son de difícil de manejar y

relativamente caras a escalas más grandes. Los sustratos pueden obstruirse si las densidades de población de peces exceden la capacidad de carga de las camas, y esto puede requerir de filtración separada. La evaporación del agua es mayor en las camas con sustratos con más superficie expuesta al sol. En los sistemas NFT las plantas se colocan dentro de los agujeros en la parte superior de los tubos, y son capaces de utilizar esta delgada película de agua rica en nutrientes. Se requiere menos volumen de agua por unidad de cultivo comparado con los sistemas de camas de sustrato y de balsas flotantes pero es más complicada y costosa. La pérdida de agua por evaporación del agua es mucho menor. Al igual que en balsas flotantes, los filtros mecánicos y biológicos deben ser construidos deliberadamente.

En las balsas flotantes las plantas están suspendidas en una hoja de poliestireno con las raíces colgando en el agua. En este sistema las raíces están en contacto con el agua lo que conduce a una constante disponibilidad de nutrientes. También, hay menor evaporación de agua lo que permite una tasa baja de reposición.

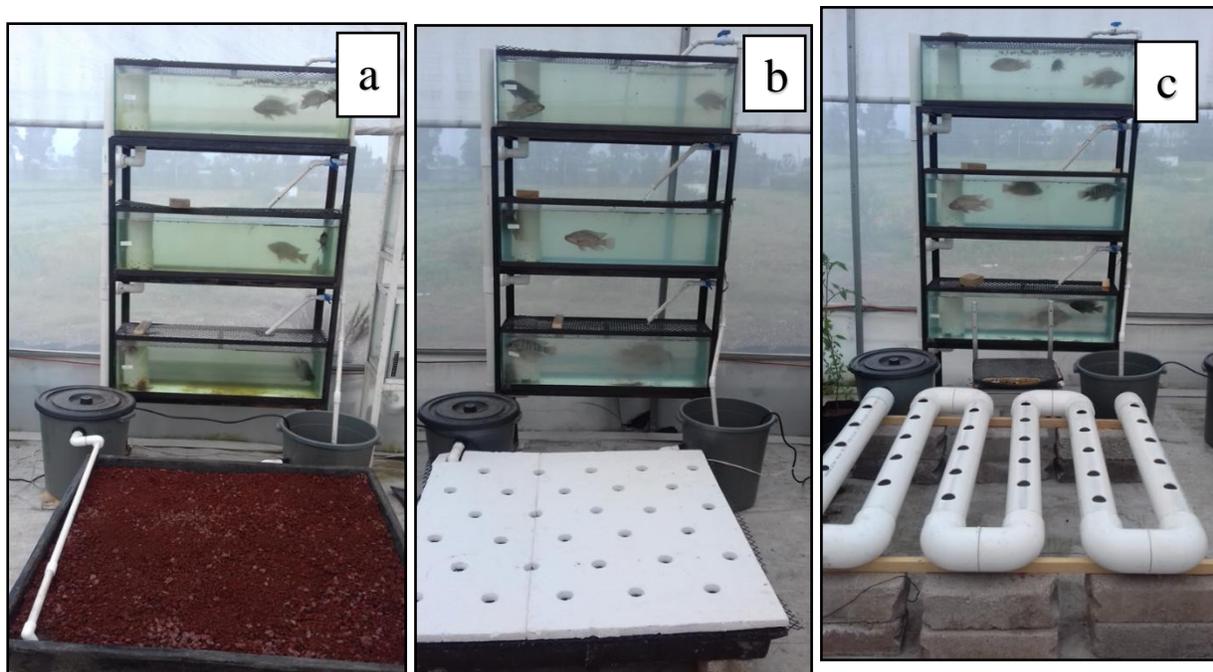


Figura 3. Módulos acuapónicos con diferentes sistemas de producción de plantas a) cama con sustrato, b) balsas flotantes y c) técnica de película nutritiva (NFT).

Bomba de recirculación y aireación

En los sistemas acuapónicos la recirculación es fundamental por lo que las bombas de recirculación serán necesarias. La capacidad de flujo de la bomba depende del volumen total de agua en el sistema. Las bombas de aire inyectan aire en el agua a través de tuberías de aire y las piedras aireadoras que se encuentran en el interior de los tanques de agua, lo que aumenta los niveles de oxígeno disuelto en el agua. Las burbujas pequeñas tienen una mayor superficie, y por lo tanto liberan oxígeno en el agua mejor que las burbujas grandes; esto hace que el sistema de aireación más eficiente y contribuye a ahorrar en costos (Somerville *et al.*, 20014).

Interdependencia entre peces, plantas y bacterias

El funcionamiento de un sistema acuapónico se basa en que los desechos producidos por los peces como el amoníaco y aquellos derivados de la descomposición de alimento no consumido y las heces fecales se transformen en formas no tóxicas para los peces.

Es necesaria la biofiltración del amoníaco del agua del sistema por las bacterias nitrificantes para el mantenimiento de la calidad del agua mediante la conversión a nitrato, que es relativamente no tóxico para los peces y puede ser utilizado por las plantas (Tyson *et al.*, 2008). La acumulación de amonio se da porque es el producto final del metabolismo de las proteínas que consume el pez. Es este el factor que contribuye a la acumulación del alto contenido de nitrógeno en el agua. Según Timmons *et al.* (2002), en el agua el NH_3 y NH_4^+ están en equilibrio, en función del pH y la temperatura. Estos pueden ser tóxicos para los peces, pero el amoníaco no ionizado es la forma más tóxica.

Por lo tanto, en un sistema acuapónico las bacterias juegan un papel importante no solo para la transformación de NH_3 a NO_3^- sino que también participan en la mineralización de los residuos sólidos que se producen en el sistema convirtiéndolos en nutrientes solubles de fácil asimilación para las plantas. El sistema hidropónico aprovecha el agua con nutrientes para la generar biomasa

vegetal, y así; el agua retorna al sistema acuícola, con concentraciones apropiadas de sustancias para el óptimo desarrollo de los peces.

El ecosistema dentro de la unidad acuapónica es dependiente de las bacterias ya que si estas no están presentes la concentración de amoníaco puede incrementarse ocasionando un desequilibrio en el sistema y la muerte de los peces (Somerville *et al.*, 2014).

Ciclo del nitrógeno en el sistema acuapónico

En acuaponía el ciclo inicia con la adición de proteína contenida en el alimento de los peces (Figura 4). El alimento es ingerido por los peces y asimila del 19 a 24% de la proteína (Hu *et al.*, 2015), el resto es excretado a la fase acuosa en forma de nitrógeno amoniacal total (NAT, $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$), restos de alimento y heces fecales.

En los filtros mecánicos se colecta la materia orgánica más gruesa (restos de alimento y heces fecales) y se sacan del sistema para tratarlos mediante composteo, vermicomposteo o utilizarlo como abono orgánico para tierras de cultivo.

Las partículas más finas de sólidos son retenidas en los filtros de mallas que sirven como sustrato para las bacterias heterótrofas que realizan la mineralización, que aportará más nutrientes al agua y que podrán ser utilizados por las plantas.

El nitrógeno amoniacal total (NAT) es la suma del NH_3 y NH_4^+ . El NAT está en equilibrio en el agua y su concentración relativa es función del pH, la salinidad y la temperatura, $\text{TAN}=\text{NH}_4^+\leftrightarrow\text{NH}_3 + \text{H}^+$ (Campbell y Reese, 2002). El NH_4^+ es aprovechado por las plantas y el NH_3 es utilizado como sustrato para la nitrificación.

En el agua, el amoníaco es oxidado en nitrito (NO_2^-) por las bacterias oxidantes del amoníaco (BOA, nitrosomonas), se convierte a nitrato (NO_3^-) por las bacterias oxidantes del nitrito (BON, *Nitrobacter* spp. y *Nitrospira* spp.) y es absorbido por las plantas. Todo lo anterior ocurre en los

biofiltros o nitrificadores. Esta agua rica en nutrientes en lugar de ser descargados al ambiente, el NO_3^- y el NAT residuales son absorbidos por las plantas en cierta proporción (Hu *et al.* 2015).

El NO_3^- que se produce en la nitrificación puede desnitrificarse, que consiste en la reducción desimilativa del NO_3^- a N_2 ; siendo intermediarios el NO_2^- , NO, N_2O . El proceso es realizado por bacterias heterótrofas en condiciones anóxicas y usa NO_3^- como aceptor de electrones en presencia de una fuente de carbono y energía (Phillips y Love, 1998).

El N_2O es un producto intermedio inevitable de la desnitrificación y es considerado como un importante gas de efecto invernadero con el potencial de calentamiento global 296 veces más que el CO_2 (IPCC, 2007).

En acuaponía se aprovecha gran parte del N y se distribuye entre 51-70% en biomasa de peces, biomasa vegetal, en el agua, bacterias y poco en alimento no consumido (Hu *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2016). El porcentaje restante se puede perder como N_2O o N_2 .

La absorción de nitrógeno es la principal vía de reciclaje de nitrógeno en hortalizas en sistemas acuapónicos (Wongkiew *et al.*, 2017). En acuaponía las plantas absorben más NO_3^- debido a que su concentración es mayor que las NH_4^+ y NO_2^- (Hu *et al.*, 2015). En combinación con tilapia se han producidos tomates y pak choi con concentraciones de 5 a 18 y 16 a 31 mgL^{-1} de NO_3^- (Hu *et al.*, 2015); espinaca y bagre africano con 5.4 a 20.1 mg L^{-1} de NO_3^- (Endut *et al.* 2010); pak choi y carpa común con 16 a 50 mg L^{-1} de NO_3^- (Zou *et al.* 2016) y espinaca y tilapia con 0.1 a 40 mg L^{-1} de NO_3^- (Liang y Chien 2013).

Al final, en los sistemas acuapónicos los productos de interés son dobles, peces y plantas; a partir de una sola entrada.

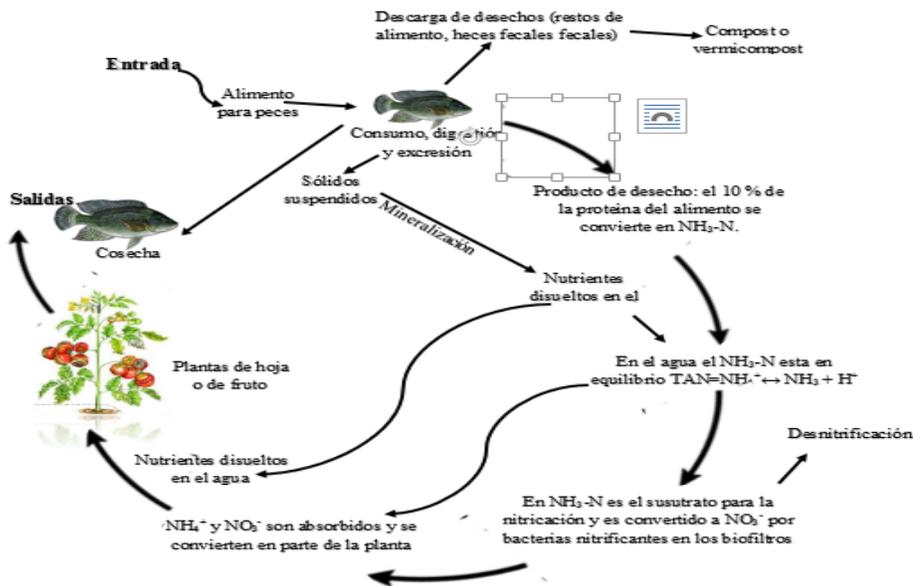


Figura 4. Ciclo del nitrógeno dentro del sistema acuapónico (Elaborado a partir de Tyson *et al.*, 2011; Pantella, 2012).

Sedimentos y carga nutrimental del agua de la acuicultura

El agua del sistema de acuicultura contiene cantidades considerables de nutrientes que pueden utilizarse para la producción de cultivos. Sin embargo, otra fuente de nutrientes que se genera es por medio de los sedimentos producto de las heces fecales y los restos de alimentos en proceso de descomposición. Estos tienen una carga nutrimental que pueden aprovecharse directamente en el sistema hidropónico o fuera, con la idea de optimizar al máximo cada componente. La cantidad de sedimentos que se produzca y la asimilación de los nutrientes del alimento dependen de la especie y el ciclo de vida de los peces, de sus características alimentarias, el tamaño y la velocidad de descomposición de materiales orgánicos. La acumulación de lodos y el desarrollo de las condiciones anaeróbicas puede limitar el crecimiento de los peces (Avnimelech y Ritvo, 2001). Por eso, el sistema de acuaponía considera un clarificador, en donde los sedimentos se acumulan, y evitar posibles daños.

Para demostrar el aporte nutrimental de los sedimentos, a partir de la alimentación, Rafiee y Saad (2005) evaluaron el ciclo de los nutrientes en cinco etapas de crecimiento de la tilapia roja. Encontraron que el lodo sedimentado captura, en porcentaje, una tasa promedio de 23.93 de Fe, 86.05 de Mn, 46.17 de Zn, 21.49 de Cu, 15.71 de Ca, 88.87 de Mg, 5.55 de N, 5.85 de K, y 17.90 de P de la alimentación de entrada. Esto indica que la proteína del alimento no se aprovecha en su totalidad por los peces y gran parte de ella queda en los sedimentos. Por lo tanto, el lodo puede tener un impacto positivo, al utilizarlo como fuente de nutrientes en el suelo.

Danaher (2009) utilizó bolsas geotextiles de polipropileno que conserva el material orgánico y permite que drene el agua, dando como resultado la deshidratación y eficiente reducción del volumen de los residuos orgánicos. El proceso de filtración conserva nutriente que son aprovechados por los cultivos en el sistema hidropónico y el material seco retenido se puede utilizar como fuente orgánica en el suelo para la producción de cultivos.

Graber y Junge (2009) combinaron el uso del agua de la piscicultura, en los sistemas acuícolas de recirculación, con la producción de tomate, berenjena y pepino. Utilizaron un diseño especial de filtros para proporcionar la nitrificación del agua de peces. Encontraron que el tomate elimina mayor cantidad de nutrientes del agua de peces, en un periodo de más de tres meses; los frutos retiran 0.52 , 0.11 y $0.8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para N, P y K en hidroponía y 0.43 , 0.07 y $0.4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para N, P y K en acuaponía. Concluyen que el rendimiento en plantas de acuaponía es similar al de los sistemas de producción hidropónicos convencionales.

Los sedimentos se pueden aprovechar de manera directa o indirecta, en el sistema hidropónico. Al tener una concentración elevada de nutrientes se puede compostar o vermicompostar, y obtener lixiviados que posteriormente pueden aplicarse a los cultivos vía foliar. De esta manera, cada elemento que compone el sistema de acuaponía se utiliza y aprovecha al máximo.

Una ventaja para la acuaponía: producción de nitrógeno y fósforo en sistemas acuícolas

Los efluentes y sedimentos de la acuicultura poseen una variedad de componentes como materia orgánica disuelta y particulada, sólidos suspendidos totales y nutrientes, como nitrógeno y fósforo, que en 75% no se utilizan y permanecen como residuo en el agua, ocasionando impactos negativos al ambiente (Piedrahita, 2003; Gutiérrez-Wing y Malone, 2006).

El nitrógeno y el fósforo están asociados con la eutrofización de los cuerpos de agua, por descargas de efluentes ricos en estos elementos que se producen a partir del alimento no consumido y el excremento (Barak *et al.*, 2003). Los peces solo retienen del 20-50% de nitrógeno y de 15-65% de fósforo del alimento (Schneider *et al.*, 2005). Para producir 1 kg de pez vivo es necesario de 1-3 kg de alimento (Naylor *et al.*, 2000). Alrededor de 36% del alimento se excreta, porque la digestión del pez es limitada (Brune *et al.*, 2003). Los peces contienen entre 65-70% de proteína y la utilizan para obtener energía. Por último, la acumulación de amonio se da porque es el producto final del metabolismo de las proteínas que consume el pez. Es este el factor que contribuye a la acumulación del alto contenido de nitrógeno en el agua de la acuicultura.

Según Timmons *et al.* (2002), en el agua el NH_3 y NH_4^+ están en equilibrio, en función del pH y la temperatura. Estos pueden ser tóxicos para los peces, pero el amoníaco no ionizado es la forma más tóxica, atribuible al hecho de que no está cargado y es soluble en lípidos y, en consecuencia, atraviesa las membranas biológicas más fácilmente que los iones cargados e hidratados de NH_4^+ (Körner *et al.*, 2001). El NH_3 , en concentraciones superiores a 1.5 mg/L es tóxico. Por lo que un nivel aceptable de NH_3 en sistemas acuícolas es 0.025 mg L^{-1} (Neori *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2006). Son dos elementos que se deben monitorear constantemente.

En la acuicultura, para eliminar el nitrógeno, se utilizan contactores biológicos rotatorios, filtros percoladores y biofiltros de arena, para no afectar el desarrollo de los peces. Los tratamientos de purificación del agua más comunes son: lagunas de tratamiento de tierra o embalses y una combinación de eliminación de sólidos y tanques de nitrificación (Crab *et al.*, 2007). El fosfato se puede eliminar por desnitrificadores que son capaces de almacenar fósforo en exceso, más allá de

sus necesidades metabólicas, bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas. A diferencia de organismos que acumulan polifosfato, la absorción de fosfato por estos desnitrificadores no requiere cambios entre condiciones aeróbicas/ anaeróbicas y, en lugar de polihidroxicanoatos, el carbono orgánico sirve como energía y fuente de carbono (Barak y Van Rijn, 2000).

Si bien, en la acuicultura las concentraciones de nitrógeno y fósforo son un problema, en la acuaponía es un recurso que se puede aprovechar, para obtener beneficios adicionales a la producción de peces. Las distintas especies vegetales demandan cantidades diferentes de nutrientes para una buena producción, por lo que significaría un ahorro considerable en fertilizantes. No obstante, si el sistema acuícola no es suficiente para satisfacer la demanda nutrimental del cultivo, será necesaria la aplicación de fertilizantes inorgánicos, pero en menor cantidad. Además de los beneficios económicos, también se reduce la cantidad de agua utilizada en un ciclo de cultivo.

Fertilización foliar como suplemento en la acuaponía

Para que un cultivo exprese su máximo potencial es necesario que los nutrientes estén en las concentraciones adecuadas y de forma disponible para la asimilación de las plantas. De lo contrario, la calidad y productividad disminuiría, así como la competitividad y los ingresos económicos.

El propósito principal de la fertilización foliar es incorporar los nutrientes esenciales en los metabolitos que se están generando a través de la fotosíntesis. Generalmente se utilizan para corregir deficiencias que se presentan durante el desarrollo de los cultivos y que no abastece el medio donde crecen. Se reporta que en los sistemas de acuaponía basados únicamente como fuente de nutrientes el alimento de peces los elementos nutrimentales que se encuentran en bajas concentraciones son el fósforo, potasio, hierro, manganeso y azufre (Seawright *et al.*, 1998; Graber y Junge, 2009). Por lo tanto, según Rakocy *et al.* (1997) para ser más productivo será necesaria la aplicación de estos nutrientes en los sistemas acuapónicos.

La incorporación de un cultivo en los sistemas de acuaponía es función de la capacidad de abastecimiento nutrimental del sistema hacia las plantas en crecimiento. Para ello, Villarroel *et al.* (2011) mencionan que es necesario tener conocimiento sobre los iones residuales producidos por los peces para que se pueda satisfacer la demanda de las plantas. Concluyeron que la mayor ganancia en miliequivalentes por kilogramo de alimento proporcionado fue mayor para NO_3^- seguido de Ca^{2+} , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} y SO_4^{2-} para la producción de fresa.

El crecimiento de las plantas se ve afectado por el elevado pH que se genera en los efluentes de la acuaponía. El pH afecta la solubilidad de los iones en solución y la forma iónica de varios nutrientes (Epstein y Bloom, 2005). El aumento de la solubilidad de iones facilita su disponibilidad para las raíces. La precipitación de Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} a sales insolubles y no disponibles puede ocurrir en solución de nutrientes a $\text{pH} > 7$.

La investigación ha demostrado efectos positivos de la aplicación foliar. En Chile la aplicación de 0.5 g L^{-1} de Fe^{2+} con FeSO_4 y en menta, rábano, perejil y cilantro con 0.5 g L^{-1} de K^+ con K_2SO_4 mostraron los valores más altos en crecimiento vegetativo y reproductivo (Roosta y Mohsenian, 2012; Roosta, 2014a) y el caso particular de las plantas tratadas con K acumulan más Fe en la parte aérea que en aquellas plantas no tratadas. Al generarse predominantemente un ambiente alcalino en la solución acuapónica algunos nutrientes no están disponibles, y por ello es necesario su aplicación. En tomate la aplicación de macro y micronutrientes (K, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu) con 0.5 g L^{-1} de sulfato de potasio (K_2SO_4), sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ácido etilendiamino-N, N'-bis (Fe-EDDHA), sulfato de manganeso ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ácido bórico (H_3BO_3), cloruro de Zinc (ZnCl_2), y sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), como era de esperarse, aumentan las concentraciones en las hojas de plantas desarrolladas bajo este sistema al igual que en frutos (Roosta y Hamidpour, 2013).

Importancia del pH en acuaponía

El sistema acuapónico al estar integrado por peces, bacterias y plantas tienen diferentes valores óptimos de pH. La especie de tilapia (*Oreochromis*) tolera un pH de entre 3.7 y 11 pero se desarrolla mejor en pH de 7 a 9 (McAndrew *et al.*, 2002) y como lo han documentado El-Sherif y El-Feky (2009) quienes encontraron que a pH 6 disminuye el hematocrito y la hemoglobina por lo que concluyen que un pH de 7 y 8 podría ser más adecuado para el cultivo de tilapias para un crecimiento y rendimiento óptimo, y la tasa de supervivencia. Mientras la eficiencia de las bacterias nitrificantes es mayor en solución alcalina. Tyson *et al.* (2004) y Tyson *et al.* (2008) encontraron que la mayor remoción de nitrógeno amoniacal total en acuaponía fue a pH 8 y 8.5 con un potencial de aumento de las concentraciones de amoníaco (NH₃), que es tóxico para los peces y la reducción de la absorción de nutrientes para las plantas por la precipitación de micronutrientes, pero no hubo diferencias estadísticas en el rendimiento total de pepino en un rango de pH de 6 a 8 (Tyson *et al.*, 2004). Un pH 7 se recomienda en el agua de acuaponía para la nitrificación y producción de plantas y como estrategia sería complementar con otra fuente los nutrientes para no depender únicamente de los peces y la nitrificación (Tyson *et al.*, 2008). Las plantas requieren valores de entre 5.5 y 6.5 para mejorar la absorción de los nutrientes.

LITERATURA CITADA

- Adams, R. E.W. 2005. Prehistoric Mesoamerica. University of Oklahoma press, Norman, OK, USA. 544 pp.
- Adler, P. R., Harper, J. K., Takeda, F., Wade, E. M. and Summerfelt, S. T. 2000. Economic evaluation of hydroponics and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. *HortScience* 35: 993-999.
- Avnimelech, Y. and Ritvo, G. 2001. Aeration, mixing and sludge control in shrimp ponds. *Global Aquaculture Advocate* 4: 51-53.
- Barak Y., Cytryn, E., Gelfand, I., Krom, M. and Van Rijn, J. 2003. Phosphorus removal in a marine prototype, recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 220: 313-326.

- Björnsson B., Steinarsson, A. and Árnason, T. 2007. Growth model for Atlantic cod (*Gadus morhua*): effects of temperature and body weight on growth rate. *Aquaculture* 271: 216-226.
- Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J. and Yin, Y. 2017. The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering* 78: 146-154.
- Brune D. E., Schwartz, G., Eversole, A. G., Collier, J. A. and Schwedler, T. E. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. *Aquacultural Engineering* 28: 65-86.
- Campbell, N.A. and Reese, J. B. 2002. *Biology*, 6th ed. Pearson Education, San Francisco, CA.
- Chen, S., Ling, J. and Blancheton, J. P. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering* 34: 179-197.
- Cho S. H., Lim, Y. S., Lee, J. H., Lee, J. K., Park, S. and Lee, S. M. 2003. Effects of feeding rate and feeding frequency on survival, growth, and body composition of ayu post-larvae *Plecoglossus altivelis*. *Journal of the World Aquaculture Society* 34: 85-91.
- Danaher, J. 2009. Evaluating geotextile technology to enhance sustainability of agricultural production systems in the U. S. University of the Virgin Islands. *Technical Bulletin* 14: 4 p.
- Diver, S. 2006. Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA- National Sustainable Agriculture Information Service. 1-28.
- El-Sherif, M. S. and El-Feky, A. M. I. 2009. Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. I. Effect of pH. *International Journal of Agriculture and Biology* 11: 297-300.
- Endut, A., Jusoh A., Ali, N., Wan Nik W.B. and Hassan, A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology* 101:1511–1517.
- Epstein, E. and Bloom, A. J. 2005. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. Sinauer Associates Publishers. Sunderland, MA. 400 p.
- Fageria, N. K., Filho, M. B., Moreira, A. and Guimaraes, C. M. 2009. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition* 32: 1044-1064.

- FAO. 2010. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2010. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO. Roma, Italia. 242 p.
- Fitwi, S. B., Wuertz, S., Schroeder, J. P. and Schulz C. 2012. Sustainability assessment tools to support aquaculture development. *Journal of Cleaner Production* 32: 183-192.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H. and Thorarinsdottir, R. 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7: 4199-4224.
- Graber, A. and Junge, R. 2009. Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246: 147-156.
- Gutierrez-Wing M. T. and Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering* 34: 163-171.
- Heidemann, K. 2015a. Commercial Aquaponics Case Study 1: Economic analysis of Lily Pad Farms AEC 2015-03. University of Kentucky. [En línea]. Disponible en <http://www.uky.edu/Ag/AgEcon/pubs/extaec2015-0330.pdf>. (Revisado el 11 de noviembre de 2017).
- Heidemann, K. 2015b. Commercial Aquaponics Case Study 2: Economic Analysis of Traders Hill Farms AEC 2015-04. University of Kentucky. En [línea]. Disponible en <http://www.uky.edu/Ag/AgEcon/pubs/extaec2015-0330.pdf>. (Revisado el 11 de noviembre de 2017).
- Heidemann, K. 2015c. Commercial Aquaponics Case Study 3: Economic Analysis of the University of the Virgin Islands Commercial Aquaponics System. University of Kentucky. En [línea]. Disponible en <https://www.uky.edu/Ag/AgEcon/pubs/extaec2015-1821.pdf> (Revisado el 11 de noviembre de 2017).
- Holliman, J. 2006. An economic analysis of integrating hydroponic tomato production into an indoor recirculating Aquacultural production system. MS Thesis. Auburn University, AL. 52 p.
- Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C. and Khanal, S. K. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* 188: 92-98.

- IPCC, 2007. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing. S. Solomon (Ed.). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge: 114–143.
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Staaks G., Suhl J., Tschirner M., Wittstock B., Wuertz S., Zikova A., and Rennert B. 2015. A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions* 7: 179-192.
- Körner, S., Das, S. K., Veenstra, S. and Vermaat, J. E. 2001. The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. *Aquatic Botany* 71:71-78.
- Lewis, W. M., Yopp, J. H., Jr. Schramm, H. L. and Brandenburg, A. M. 1978. Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Transactions of the American Fisheries Society* 107: 92-99.
- Liang, J. Y. and Chien, Y. H. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 693-700.
- McAndrew, B. J., Turner, G. F., Robinson, R. L., Beveridge, M. C. M., Baird, D. J., Ross, L. G., Lowe-McConnell, R. H., Lorenzen, K., Penman, D. J. and Little, D. C. 2002. *Tilapias: Biology and Exploitation*; Beveridge, M. C. M., McAdrew, B. J., Eds.; Springer: Heidelberg. The Netherlands. 508 p.
- McMurtry, M. R., Nelson, P. V., Sanders, D. C. and Hodges, L. 1990. Sand culture of vegetables using. *Applied Agricultural Research* 5: 280-284.
- Mizanur R. M. and Bai, S. C. 2014. The optimum feeding frequency in growing korean rockfish (*Sebastes schlegeli*) raring at the temperature of 15 C and 19 C. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 27: 1319-1327.
- Montero, R. M. 2005. Visión general del sector acuícola nacional – México. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO. [En línea]. Disponible en

- http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_mexico/es (Revisado el 15 de noviembre de 2017).
- Naylor R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. and Troell, M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405: 1017-1024.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., Shpigel, M. and Yarish, C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231: 361-391.
- Pantanella, E. 2012. Nutrition and quality of aquaponic systems. Università degli studi della Tuscia. Doctoral thesis. 124 p.
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E. and Marcucci, A. 2012. Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae* 927: 887-893.
- Park I. S., Kim, C. H. and Choi, J. V. 2012. Histological observations and regeneration of barbules in juveniles of the Chinese Longsnout catfish *Leiocassis longirostris*. *Fisheries and Aquatic Sciences* 15: 299-303.
- Person-Le Ruyet J., Buchet, V., Vincent, B., Le Delliou H. and Quemener L. 2006. Effects of temperature on the growth of pollack (*Pollachius pollachius*) juveniles. *Aquaculture* 251: 340-345.
- Phillips, J. B., and Love, N. G. 1998. Biological denitrification using upflow biofiltration in recirculating aquaculture systems: pilot-scale experience and implications for full-scale. In *The Second International Conference on Recirculating Aquaculture, Cooperative Extension/Sea Grant, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia*: 171-178.
- Piedrahita R, H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226: 35-44.
- Rafiee, G. and Saad, C. R. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244: 109-118.

- Rakocy, J. E. 1989. Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. University of the Virgin Islands, Agricultural Experiment Station, Island Perspectives 3:4-10.
- Rakocy, J. E., Losordo, T. M., Masser, M. P. 1992. Recirculating aquaculture tank production systems: integrating fish and plant culture Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication 254: 1-7.
- Rakocy, J.E., Hargreaves, J. A. and Bailey, D. S. 1993. Nutrient accumulation in a recirculating aquaculture system integrated with hydroponic vegetable production. 148-158 in J.K. Wang, editor. Proceedings of the Aquaculture Engineering Conference on Techniques for Modern Aquaculture. Aquacultural Engineering Group, American Society of Agricultural Engineers.
- Rakocy, J.E., Bailey, D. S., Shultz, K. A. and Cole, W. M. 1997. Evaluation of a commercial scale aquaponic unit for the production of tilapia and lettuce. pp. 357-372. In: K. Fitzsimmons (ed.). Tilapia Aquaculture: Proceedings of the Fourth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Orlando, Florida.
- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, R.C., Thoman, E.S. 2004a. Update on Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system, New Dimensions on farmed Tilapia: proceedings of the sixth international symposium on Tilapia in aquaculture. Held September, 12–16.
- Rakocy, J.E., Shultz, R.C., Bailey, D.S. and Thoman, E.S. 2004b. Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. Acta Horticulturae 648: 63-69.
- Rakocy, J. E., D. S. Bailey, R. C. Shultz, and E. S. Thoman. 2004c. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture. 12-16.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P. and Losordo, T. M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication 454: 1-16.
- Read, P. and Fernandes, T. 2003. Management of environmental impacts of marine aquaculture in Europe. Aquaculture 226: 139–163.

- Roosta, H. R. 2014a. Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system. *Journal of Plant Nutrition* 37: 2236-2254.
- Roosta, H.R. 2014b. Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic: aquaponic solutions. *Journal of Plant Nutrition* 37: 1782-1803.
- Roosta, H.R. and Hamidpour, M. 2011. Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 129: 396-402.
- Roosta, H. R. and Hamidpour, M. 2013. Mineral nutrient content of tomato plants in aquaponic and hydroponic systems: effect of foliar application of some macro-and micro-nutrients. *Journal of Plant Nutrition* 36: 2070-2083.
- Roosta, H. R. and Mohsenian, Y. 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae* 146: 182-191.
- Rupasinghe, J. W. and Kennedy, J. O. 2010. Economic benefits of integrating a hydroponic-lettuce system into a barramundi fish production system. *Aquaculture Economics & Management* 14: 81-96.
- Sainju, U. M., Dris, R. and Singh, B. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture and Environment* 1:176-183.
- Salam, M. A.; Jahan, N.; Hashem, S. and Rana, K. M. S. 2014. Feasibility of tomato production in aquaponic system using different substrates. *Progressive Agriculture* 25: 54-62.
- Sanders, D. and McMurtry, M. 1988. Fish Increase Greenhouse Profits. *American Vegetable Grower* 1-3.
- Savidov, N.A., Hutchings, E. and Rakocy, J.E. 2005. Fish and plant production in are circulating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. *International Conference and Exhibition on Soilless Culture: ICESC-742*: 209–221.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T. and Junge, R. 2016. Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water* 8: 1-21.
- Schneider O., Sereti, V., Eding, E.H. and Verreth, J. A. J. 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 32: 379-401.

- Seawright, D. E, Stickney, R. R. and Walker R. B. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponic systems. *Aquaculture* 160: 215-237.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., and Lovatelli, A. 2014. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 589 pp.
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G. and Schmidt, U. 2016. Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management* 178: 335-344.
- The Conservation Fund's Freshwater Institute. 1997. The freshwater institute natural gas powered aquaponic system- design manual shepherdstown, West Virginia. 1-37.
- The Conservation Fund's Freshwater Institute. 1998. 880-Gallon aquaculture system installation guide. Shepherdstown, West Virginia. 1-13.
- Timmons M.B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W. Summerfelt, S. T. and Vinci B. J. 2002. Recirculating aquaculture systems. Second edition. NRAC Publication. 959 p.
- Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., Davis, M. and White, J. M. 2008. Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. *Journal of Plant Nutrition* 31: 2018-2030.
- Tyson, R. V., Simonne, E. H., White, J. M. and Lamb E. B. 2004. Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: the pH levels. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 117: 79-83.
- Tyson, R.V., Treadwell, D. D. and Simonne, E.H., 2011. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology* 21: 6-13.
- Villarroel, M., Alvariño, J. M. R., and Duran, J. M. 2011. Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 537-545.
- Watten, B. J. and Busch R. L. 1984. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system. *Aquaculture* 41: 271-283.

- Yurtseven, E., Kesmez, G. D. and Ünlükara, A. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). *Agricultural Water Management* 78: 128-135.
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C., and Fang, Y. 2016. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresource Technology* 210: 81-87.

CAPÍTULO I. Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L.

Maciel Reyes-Flores¹, Manuel Sandoval-Villa^{1§}, Nieves Rodríguez-Mendoza¹, Libia I. Trejo-Téllez¹, Julio Sánchez-Escudero¹ y Juan Reta-Mendiola²

¹Colegio de Postgraduados- Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. ²Colegio de Postgraduados- Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz, km 88.5. C. P. 91690. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz.

[§]Autor para correspondencia: msandoval@colpos.mx.

Resumen

La acuaponía es una alternativa para producir cultivos sin la utilización de fertilizantes inorgánicos y contribuye al reciclaje de agua y nutrientes. El objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad y la concentración de nutrientes; y comparar el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental foliar de plantas de *Solanum lycopersicum* L. en acuaponía e hidroponía. Se utilizó un sistema acuapónico comercial (Home Garden de Nelson & Pade). Se colocaron 24 tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*) de peso promedio en cuatro tinas: tina 1, 32.1 g; tina 2, 72.5 g; tina 3, 77.3 g y tina 4, 152.2 g. Los tratamientos evaluados fueron: 1) ACU, acuaponía; 2) ACUFF, acuaponía más fertilización foliar con 5 mg Fe L⁻¹; 3) HEA, hidroponía, riego con efluente acuapónico; y 4) HID, hidroponía, riego con solución nutritiva Steiner (1984) con conductividad eléctrica de 2 dS m⁻¹. El HID tuvo el mayor rendimiento (2.97 kg planta⁻¹), altura de planta (324.4 cm) y peso seco de la parte aérea (130.8 g planta⁻¹). En ACU, ACUFF y HEA el rendimiento disminuyó 60, 76 y 83%; la altura de planta 18, 28 y 60%; y peso seco de la parte aérea 58, 65 y 78%, respectivamente. La concentración de P, K, Ca y Mg en las plantas acuapónicas fue similar a hidroponía; sin embargo; esto no se reflejó en altura de planta, biomasa aérea y rendimiento de frutos.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., acuaponía, amoniaco, amonio, hidroponía.

Abstract

The aquaponics is an alternative to produce crops without the use of inorganic fertilizers and contributes to recycling of water and nutrients. The objective of this research was to evaluate the quality and concentration of nutrients; and compare the growth, yield and leaf nutrient concentration plant *Solanum lycopersicum* L. in aquaponics and hydroponics. A was used commercial aquaponic system (Home Garden de Nelson & Pade). It were placed 24 Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) average weight in four tubs: tubs 1, 32.1 g; tubs 2, 72.5 g; tubs 3, 77.3 g and tubs 4, 152.2 g. The treatments were: 1) ACU, aquaponics; 2) ACUFF, aquaponics more foliar fertilization 5 ppm Fe L⁻¹; 3) HEA, hydroponics, irrigation aquaponic effluent; and 4) HID, hydroponics, irrigation with nutrient solution Steiner (1984) with electrical conductivity of 2 dS m⁻¹. The HID treatment had the highest yield (2.97 kg plant⁻¹), plant height (324.4 cm) and dry weight of the aerial part (130.8 g plant⁻¹). In ACU, ACUFF HEA performance and decreased 60, 76 and 83%; height 18, 28 and 60% plant; and dry weight of aerial parts 58, 65 and 78%, respectively. The concentration of P, K, Ca and Mg in the aquaponic plants was similar to hydroponics; however; this was not reflected in plant height, aboveground biomass and fruit yield. **Keywords:** *Solanum lycopersicum* L., ammonia, ammonium, aquaponics, hydroponics.

Introducción

La utilización del efluente acuícola para la producción de plantas es una posibilidad para disminuir la inversión en fertilizantes, por eso la investigación en esta área, se enfoca en la búsqueda de estrategias para hacer la acuaponía más rentable y sustentable. El desarrollo intensivo de la acuicultura implica mayor uso de insumos, lo cual conduce a la explotación de los recursos naturales y a un mayor impacto ambiental negativo por la generación de efluentes que contienen compuestos orgánicos o inorgánicos del alimento no consumido, y heces fecales (Fitwi *et al.*, 2012).

La acuaponía integra la acuicultura y la hidroponía, donde el agua y los nutrientes se recirculan y reutilizan. En la acuicultura debe evitarse toxicidad de NH_3 , NH_4^+ y NO_2^- , derivados de la descomposición de alimentos y los residuos fecales de los peces (Liang y Chien, 2013).

En sistemas acuapónicos es viable la producción de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Graber y Junge, 2009; Salam *et al.*, 2014) berenjena (*Solanum melongena* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.) en acuaponía (Graber y Junge, 2009). El efluente tiene concentraciones de NO_3^- y P para la producción de lechuga (*Lactuca sativa*) (Blidariu *et al.*, 2013a; Blidariu *et al.*, 2013b), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) (Salam *et al.*, 2014), hierba buena (*Mentha spicata* L.), albahaca (*Ocimum basilicum* L.) y menta (*Mentha piperita* L.) (Espinosa-Moya *et al.*, 2014) y taro (*Colocasia esculenta* L.) (Salam *et al.*, 2014). Estas plantas son eficientes como filtros biológicos; sus estructuras radiculares reducen los niveles de nutrientes en el agua; y eliminan NH_3 , NO_2^- y NO_3^- que a ciertas concentraciones son tóxicos para los peces.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar y comparar el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental foliar de plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) desarrolladas en sistemas acuapónicos y compararlas contra las que crecen en sistemas hidropónicos. y comparar el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental foliar de plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) desarrolladas en sistemas acuapónicos y compararlas contra las que crecen en sistemas hidropónicos.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de 60 m², tipo túnel de forma semicircular con ventilas laterales, orientado de norte a sur, con cubierta plástica UVII calibre 720 y transmitancia de 85% de luz. Durante el experimento se mantuvo una temperatura ambiente promedio de 24 °C con una temperatura media mínima de 10 °C y máxima de 47 °C. La humedad relativa osciló entre 21 y 85%.

El sistema acuapónico utilizado fue un diseño comercial (Home Garden de Nelson & Pade) con capacidad de 2 855 L. Este sistema consiste en cuatro tanques para peces (de 200 L cada uno), dos clarificadores (cilíndricos y terminación cónica en la parte inferior, de 86 L cada uno), dos biofiltros (cilíndricos y terminación cónica en la parte inferior, de 35 L cada uno), un desgasificador (rectangular, de 79 L) y tres tinas hidropónicas (rectangulares de 578 L cada una). Los peces se obtuvieron en el centro piscícola San Diego Acapulco, Atlixco, Puebla. Se colocaron 24 tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*) de diferentes pesos promedios: Tina 1, 32.1 g; Tina 2, 72.5 g; Tina 3, 77.3 g y Tina 4, 152.2 g. Los peces fueron alimentados a las, 9:00, 12:00 y 16:00 h, con diferente porcentaje de proteína y de alimento sobre el peso vivo del pez; Tina 1 44 y 4%, Tina 2 35 y 3%, Tina 3 35 y 2% y Tina 4, 32 y 1.5%.

Se utilizaron peces de diferentes tallas para mantener estable el sistema de producción de peces y en cuanto al porcentaje de alimento esto depende de la etapa de desarrollo del pez; es decir; mientras más jóvenes, se requiere mayor contenido de proteína y disminuye en la etapa de engorda con un factor de conversión mayor. La concentración inicial del agua utilizada de NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , P, Ca, Mg, Fe, Cu y B fueron 0.03, 0.1, 15, 0.9, 32.3, 32.9, 0.022, 0.017 y 0.025 mg L⁻¹. Se utilizó el híbrido Cid de *Solanum lycopersicum* L., tipo saladettee de crecimiento indeterminado. Para la germinación de semillas se empleó una charola de poliestireno de 200 cavidades de 25 mL de volumen cada cavidad. El trasplante se efectuó 45 días después de la siembra (dds) en las tinas hidropónicas y en las bolsas con tezontle.

El experimento se condujo bajo un diseño experimental al azar con tres repeticiones donde seis plantas constituyeron una unidad experimental en los sistemas acuapónico e hidropónico. Los tratamientos fueron ACU, acuaponía; ACUFF, acuaponía más fertilización foliar con 5 mg Fe L⁻¹; (30, 45 y 60 días después del trasplante); HEA, hidroponía, riego con efluente acuapónico e HID, hidroponía, riego con solución nutritiva Steiner (1984) con 2 dS m⁻¹ de salinidad. Para los tratamientos ACU y ACUFF; las plantas se trasplantaron en las tinas hidropónicas de 1.72 de largo, 1.12 de ancho y 0.3 m de profundidad sobre placas de poliestireno de 1.2*0.6 perforadas a una separación de 40 cm en donde se colocaron las plantas.

Las plantas en los tratamientos HEA e HID se colocaron en bolsas de polietileno negro de 30*40 cm llenas de tezontle rojo con granulometría de 1 a 10 mm, densidad aparente promedio de 0.82 g cm⁻³, 50% porosidad total, 45% porosidad de aireación, 5.42% de agua fácilmente disponible, sin capacidad de intercambio de cationes y conductividad eléctrica cercana a cero. La concentración de N-NO₃⁻, P-H₂PO₄²⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, S-SO₄²⁻ y Fe²⁺ de la solución Steiner fueron: 168, 31, 273, 180, 48, 112 y 3 mg L⁻¹, respectivamente. Las características de calidad del agua que se midieron fueron pH y conductividad eléctrica (CE; Conductronic PC18), oxígeno disuelto (OD) (Extech modelo 407510), y las temperaturas máximas y mínimas con un termómetro (modelo 3101), amonio (Hanna Instrument HI-733 y nitrato (Horiba Laqua Twin).

Las mediciones de NH₄⁺, NO₃⁻, pH, CE en acuaponía se hicieron en los siguientes puntos: tinas de peces (muestra compuesta de los 4 tanques), salida de los clarificadores (entrada al primer nitrificador), en la salida del segundo nitrificador, en la entrada al desgasificador, en el desgasificador, en las camas hidropónicas y finalmente en el retorno (entrada a la tina de peces). El OD se midió en los tanques de los peces, al igual que la temperatura mínima y máxima; asimismo, se midió en los nitrificadores y en las tinas hidropónicas. Los nutrientes minerales en el efluente acuapónico se obtuvo de una muestra compuesta y se determinó P, K, Ca y Mg, Mn, Cu, Fe, B y Zn en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-OES, Varian 725, Australia).

Se registró la altura de planta a los 46, 83 y 103 ddt. Para obtener el peso seco de la parte aérea (103 ddt) se colocó en una estufa durante 72 h a una temperatura de 65 °C, y después se determinó el peso en gramos con una balanza (Core balance™ modelo CQT1501). La cosecha se realizó cortando frutos de 6 racimos por planta para evaluar el rendimiento pesando los frutos en una balanza portátil (ADIR, modelo 1676).

Para obtener la concentración de nutrientes en el tejido foliar, se colectaron tres hojas recientemente maduras de cada planta para formar una muestra compuesta a los 42, 72 y 103 ddt. Se secaron en una estufa durante 72 h a 70 °C para posteriormente ser molidas y analizadas. En el

caso del N, se determinó por el método de Kjeldahl (Bremner, 1965). La determinación de P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Fe, B y Zn se hizo con un equipo ICP-OES (Varian 725, Australia).

Los resultados obtenidos se procesaron estadísticamente de acuerdo con el diseño experimental. Se realizó un análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM y la comparación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el uso del programa SAS 9.3 (SAS Institute, 2010).

Resultados

Oxígeno disuelto (OD) en efluente acuapónico

En el experimento la concentración mínima y máxima de OD fue de 4.3 y 8 mg L⁻¹ (Cuadro 1), pero según DeLong *et al.* (2009) no afecta el crecimiento y la conversión alimenticia, como lo haría a una concentración por debajo de 3.5 mg L⁻¹. En sistemas acuícolas en operación el rango de OD debe oscilar entre 5 y 7.5 mg L⁻¹ (DeLong *et al.*, 2009). Para tomate el OD en un rango de 3 a 7 mg L⁻¹ no afecta el crecimiento y producción (Soto-Bravo, 2015); por lo que, el OD en las tinas hidropónicas se mantuvo en los rangos reportados (3.5 a 6.7 mg L⁻¹ (Cuadro 1). Según Zheng *et al.* (2007) concentraciones superiores a 8.5 mg L⁻¹ reducen el crecimiento en tomate, y de 1 a 2 mg L⁻¹ de OD se incrementa la respiración de las raíces de pepino y tomate (Shirong, 2000), además disminuye la absorción de agua y nutrientes.

El OD es uno de los factores que regula el consumo de alimento y la saciedad de los peces (Tran-Duy *et al.*, 2008); por ello, la importancia de mantenerlo en niveles adecuados.

pH

En los tanques de peces el pH varió entre 6.6 y 8.5 (Cuadro 1); rango similar al que encontraron DeLong *et al.* (2009) y El-Sherif y El-Feky (2009), de 6 a 9; donde el crecimiento es óptimo, y la tasa de supervivencia de peces es mayor. El-Sherif y El-Feky (2009) indican que a pH menor de 6 disminuyen las concentraciones de hemoglobina y de hematocrito en los peces.

En las tinas hidropónicas el pH osciló entre 6.6 y 8.5 (Cuadro 1); por arriba de lo óptimo para el desarrollo de la mayoría de los cultivos, que se encuentra entre 5.5 y 6.5. El pH alto afecta la solubilidad de los iones en solución y la forma iónica de diversos nutrientes (Epstein y Bloom, 2005). Con el pH alcalino disminuye la disponibilidad, y aumenta la posibilidad de precipitación, de Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Resh, 2013).

Cuadro 1. Oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y temperatura del efluente en las tinas de peces y tinas hidropónicas durante el ciclo de 103 días después de la siembra de los peces.

Parámetros	Tinas de peces			Tinas hidropónicas		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
OD (mg L^{-1})	4.3	6.0	8	3.5	5.4	6.7
pH	6.6	7.8	8.5	6.6	7.8	8.6
CE (dS m^{-1})	0.6	0.7	0.9	0.6	0.7	0.9
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	15	22.1	30	15	22.5	30

Conductividad eléctrica (CE)

En las tinas acuícolas e hidropónicas, la CE osciló entre 0.6 a 0.9 dS m^{-1} (Cuadro 1), lo que implica baja concentración de iones en el efluente y por lo tanto; el abastecimiento de los nutrientes no cubre las necesidades del cultivo, lo que también es señalado por Krauss *et al.* (2006); se requiere una CE óptima de 3 dS m^{-1} para obtener mejores rendimientos y firmeza del fruto de tomate.

En acuaponía la concentración de sales en el agua depende de la mineralización; que es la conversión de desechos sólidos de los peces a nutrientes inorgánicos de fácil asimilación por las plantas (Rakocy *et al.*, 2006). Por lo tanto, el incremento en la densidad de peces, hasta cierto punto, juega un papel importante; dado que a mayor alimento suministrado habría más nutrientes, como lo reportó Villarroel *et al.* (2011) que con tan solo 2 kg m^{-3} de peces y proporcionando de 1 a 12 kg de alimento obtuvo una CE de 0.5 dS m^{-1} para la producción de fresa, menor a lo reportado en esta investigación.

Temperatura

Según Timmons *et al.* (2009) la temperatura en el agua de los peces influye en la tasa de respiración, la eficiencia de alimentación y la asimilación, crecimiento, comportamiento y reproducción de los peces. Se reporta que la tasa de conversión alimenticia y la ganancia diaria de peso fueron mejores de 26 a 30 °C y no se afecta la tasa de supervivencia (Azaza *et al.*, 2008); aunque la temperatura máxima se logró alcanzar en el experimento, la mínima fue de 15 °C (Cuadro 1); sin llegar a temperaturas mortales menores a 13.6 °C, condición en donde las tilapias perecen en poco tiempo; lo que genera estrés en los peces propiciado un pobre crecimiento y conduce a una alta mortalidad en épocas de bajas temperaturas (Charo-Karisa *et al.*, 2005). En raíces de plantas de jitomate, a una temperatura de 35 °C se afecta el transporte de membrana; por lo tanto, la absorción de nutrientes y agua disminuyen. También se reduce la solubilidad del oxígeno y la concentración de N, K y Ca en la savia del xilema de la raíz, disminuyen a valores inferiores a los de la solución nutritiva (Falah *et al.*, 2010).

Concentración de amonio (NH_4^+) en el efluente acuapónico

En sistemas con recirculación hay que mantener debajo de 3 mg L⁻¹ el nitrógeno amoniacal total (NAT; $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) (Timmons *et al.*, 2009). La concentración de NH_4^+ y el pH del agua pueden ser indicadores para predecir que especie está presente en el efluente, como lo documentan Da Silva *et al.* (2013) cuyos resultados demuestran a partir de pH neutro (7.2) y alcalino (8.8) la concentración de NH_3 aumenta de 0.06 a 1.5 mg L⁻¹ con la adición de NH_4Cl (0, 0.25 y 0.5 g). El pH durante el desarrollo del experimento estuvo por arriba de 7; y por los resultados de Da Silva *et al.* (2013) se infiere la presencia de NH_3 (aunque no se midió) en concentraciones mayores a 1 mg L⁻¹ propuesto como límite por El-Shafai *et al.* (2004) como seguros para la acuicultura.

En jitomate, Bialczyk *et al.* (2007) informan que aplicando de 25% de N- NH_4^+ y 75% de N- NO_3^- aumenta el rendimiento en 20%, en comparación con las plantas que solo se les suministró N- NO_3^- . Mientras que la nutrición únicamente con N- NH_4^+ reduce el rendimiento, y la acumulación de

azúcares en frutos en 20%. En promedio, la concentración de NH_4^+ (1.2 mg L^{-1}) que se produjo en acuaponía es baja; lo que no implica riesgo alguno para las plantas (Figura 5a).

Nitrato (NO_3^-)

El NO_3^- , producto final de la nitrificación, no es tóxico para los peces excepto a concentraciones mucho mayores a las utilizadas en solución de nutrientes para la producción cultivos hidropónicos (Tyson *et al.*, 2007). El N- NO_3^- en concentraciones de 50 a 280 mg L^{-1} (Resh, 2013) es la fuente de nitrógeno más adecuada para las plantas de tomate ya que el N- NH_4^+ aplicado en grandes cantidades es tóxico (Souri *et al.*, 2009 y Souri y Römheld, 2009); aunque su asimilación es energéticamente más favorable que la del N- NO_3^- (Martínez-Andújar *et al.*, 2013). La acumulación más alta de NO_3^- en efluente fue de 85 mg L^{-1} (18.7 mg L^{-1} de N- NO_3^-) 11% de lo requerido para el cultivo de tomate (Figura 5b).

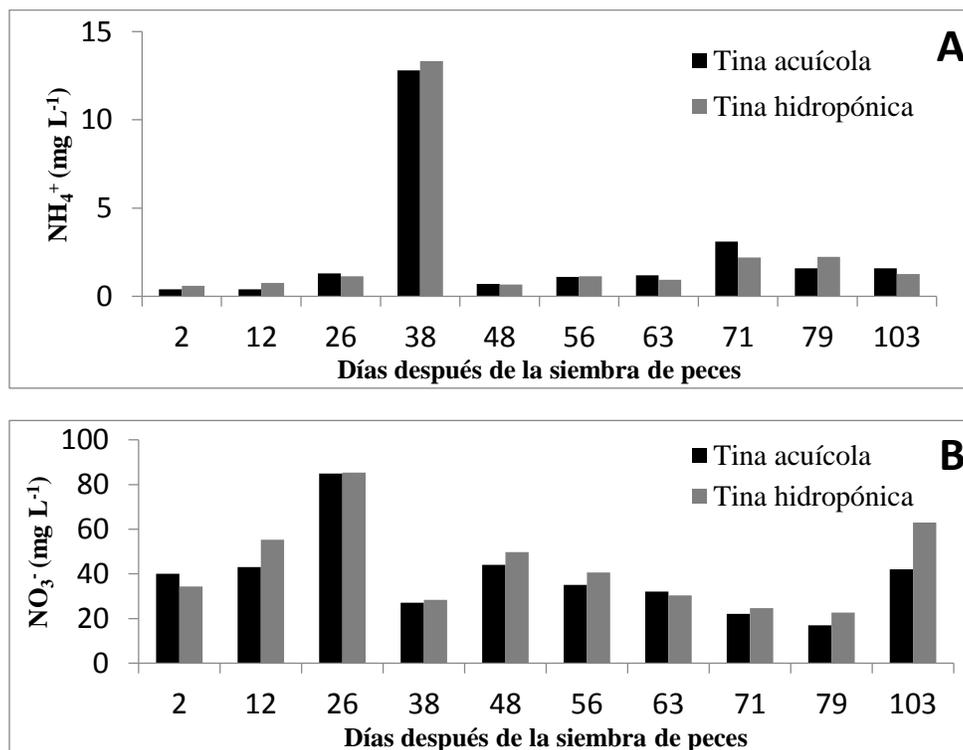


Figura 5. Concentración de NH_4^+ (A) y NO_3^- (B) en las tinas acuícolas e hidropónicas durante el experimento.

El cultivo de plantas influye en el diseño del sistema acuapónico, al considerar la demanda nutrimental para maximizar la eliminación de nutrientes que se producirán. Por lo tanto, en acuaponía se necesita entre 1 a 12 kg de alimento (35% de proteína) con una densidad de 2 kg m⁻³ de peces para obtener un meq L⁻¹ de NO₃⁻, Ca₂⁺, H₂PO₄⁻ y K⁺ (Villaruel *et al.*, 2011). Lo anterior puede ser más eficiente si la temperatura y OD son adecuadas durante el crecimiento de los peces.

Una gran variedad de cultivos se han utilizado para remover los nutrientes en acuaponía. El Taro (*Colocasia esculenta* L.), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) al tener diferentes estructuras radiculares demostraron ser capaces de reducir los niveles de nutrientes en el agua (Salam *et al.*, 2014). En tomate se ha producido 4.4 kg planta⁻¹ en 115 días con menos de 2.5 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ (Salam *et al.*, 2014) y 5.2 kg planta⁻¹ en un rango de 12.1 a 95 mg L⁻¹ de N- NO₃⁻ (Graber y Junge, 2009).

Concentración de P, K, Ca, Mg y micronutrientes en el efluente

En general, la concentración de P, K, Ca y Mg fueron deficientes en el efluente y oscilaron de 0.2 a 13.4, 2 a 13.8, 20.8 a 78.2 y 8.9 a 66.4 mg L⁻¹; respectivamente, a lo largo del experimento. Los micronutrientes en la solución acuapónica se encontraron en una concentración deficiente. La concentración varió de 0.022 a 0.063, 0.003 a 0.023, 0.006 a 0.029, 0.024 a 0.144, 0.010 a 0.081 y 0.024 a 0.104 mg L⁻¹ de Fe, Cu, Zn, B, Mn y Mo, respectivamente, excepto el Mo estuvo en concentraciones suficientes.

En hidroponía la concentración de nutrimentos en la solución es de 168, 31, 273, 180, 48 y 3 mg L⁻¹ para N, P, K, Ca, Mg e Fe; respectivamente. Sin embargo, en el efluente acuapónico se alcanzaron 10.1, 3, 3, 37.9, 32.8 y 0.045 mg L⁻¹ de los nutrimentos mencionados. Es decir, en acuaponía son menores las concentraciones en 94, 90.3, 99, 79, 33.3 y 98.5%, respectivamente. Bajo estas condiciones no se logrará igualar los rendimientos con la hidroponía, pero se aprovechan los nutrimentos generando, además de la proteína de los peces, frutos que son un producto adicional del sistema.

Altura de las plantas de jitomate

Los tratamientos afectaron la altura ($p \leq 0.05$) en cada una de las fechas de muestreo. La mayor altura la alcanzaron las plantas en HID (324.4 cm) superando en 18.4, 27.6 y 60.2% a los tratamientos ACU, ACUFF y HPE en ese mismo orden (Cuadro 2). Estas diferencias se deben principalmente al aporte de nutrientes en cada uno de los tratamientos. En hidroponía, el mayor suministro, y continuo, de nutrimentos permitieron un mejor desempeño que se expresa en plantas más vigorosas y productivas.

Cuadro 2. Rendimiento, peso seco de parte aérea (a los 103 ddt), y altura de plantas de jitomate ‘Cid’ cultivado en acuaponía e hidroponía.

Tratamiento	Rendimiento (kg planta ⁻¹)	Peso seco de la parte aérea (g planta ⁻¹)	Altura (cm)		
			46 [¥]	86 [¥]	103 [¥]
ACU	^z 1.16 b	54.5 b	48.6 c	164.6 b	264.8 b
ACUFF	0.70 b	45.9 b	48.0 c	156.5 b	234.9 b
HEA	0.47 b	29.4 c	81.7 b	116.3 c	129.3 c
HID	2.97 a	130.8 a	121.9 a	225.8 a	324.4 a
^Y DMSH	0.7	13.5	9.7	28.3	46.7
^X CV (%)	62.3	23.5	14.9	19.4	22.2

^Zvalores con letra distinta, dentro de columnas, son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); ^YDMSH= diferencia mínima significativa honesta; ^XCV= coeficiente de variación; [¥]evaluación a los 46, 86 y 103 dds; ACU= acuaponía; ACUFF= acuaponía más fertilización foliar con 5 mg Fe L⁻¹; HEA= hidroponía, riego con efluente acuapónico; HID= hidroponía.

El suministro nutrimental en ACU y ACUFF es bajo, pero este es continuo, lo que aumenta el área de exploración de las raíces y permite absorber más nutrientes; en estos tratamientos se observa en el Cuadro 2 que no hubo diferencias estadísticas en altura, por lo que la aplicación foliar de Fe no modificó esta variable. Por el contrario, en HEA las plantas solo cuentan con los nutrientes que se le proporcionan en cada riego, razón por la cual manifestaron menor vigor a lo largo del ciclo del cultivo.

Peso seco de la parte aérea

Los tratamientos afectaron la producción de biomasa aérea ($P \leq 0.05$). El mayor suministro, y continuo, de nutrimentos en HID permite obtener mayor peso seco de la parte aérea (130.8 g), a diferencia de los tratamientos ACU (54.5 g) y ACCUF (45.9) que estadísticamente fueron iguales; y en HEA (22.47 g), en donde el suministro de nutrientes es menor y por lo consiguiente el peso de la planta disminuye. La producción de biomasa disminuyó en 58.3, 64.9 y 77.5% en ACU, ACUFF y HEA en relación con HID, como se indica en los valores de peso seco (Cuadro 2).

Rendimiento de frutos

Hubo diferencias altamente significativas ($p \leq 0.05$) en el rendimiento de frutos atribuibles a los tratamientos. El rendimiento de los tratamientos ACU, ACUFF y HEA corresponden a 39, 24 y 16%, en ese mismo orden, de lo alcanzado con HID; 2.97 kg planta⁻¹ (Cuadro 3). La cantidad de nutrientes suministrados al tomate influye en el rendimiento (Sainju *et al.*, 2003) y en los tratamientos ACU y ACUFF las deficiencias de nutrimentos ocasionaron baja producción, aunque estadísticamente no hubo diferencia en el rendimiento.

Sin embargo, el rendimiento de ACU (1.16 kg planta⁻¹) es mayor a lo obtenido por Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) que fue de 0.73 kg planta⁻¹ a partir del efluente donde crecen camarones (*Litopenaeus vannamei*) y por Khater *et al.* (2015) quienes incrementaron el rendimiento de jitomate de 1.06 a 1.37 kg planta⁻¹ con el aumento del flujo en el sistema acuapónico de 4 a 6 L h⁻¹. Por otro lado, Pickens (2015) demostró que los rendimientos en plantas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. Cerasiforme) regadas con efluentes acuícola son iguales a los producidos cuando se utilizan fertilizantes comerciales; contrario a lo obtenido en este trabajo donde no se igualó al rendimiento en hidroponía, aunque se trata de dos cultivos con diferentes demandas nutrimentales. El tratamiento HEA presentó un rendimiento de 0.47 kg planta⁻¹, menor a lo obtenido por Salam *et al.* (2014) que trabajando con tilapias en un sistema de recirculación obtuvieron rendimientos de fruto en grava con 1.59 kg planta⁻¹ y en ladrillo, y grava con aserrín de 0.72 y 0.68 kg planta⁻¹ en 116 días.

Concentración y contenido de nutrientes en hojas

La concentración de macronutrientes en el tejido vegetal mostró diferencias altamente significativas ($P \leq 0.05$). Excepto la concentración foliar de Ca a los 42 ddt y Ca y Mg a los 72 ddt. La concentración foliar de B a los 42 y 72 ddt y Cu a los 103 ddt no fue afectada por los tratamientos en las tres fechas (Cuadro 3). La concentración de N, P, K, Ca y Mg en el tratamiento HEA a los 42 y 72 ddt son iguales o superiores al tratamiento HID; este es un efecto de dilución nutrimental; es decir, hay mayor crecimiento en las plantas HID por tanto presentan menor concentración nutrimental (Cuadro 3).

Cuadro 3. Concentración de nutrientes minerales (g kg^{-1}) en el tejido foliar de plantas de jitomate ‘Cid’ a los 42, 72 y 103 días después del trasplante.

Trat	^s N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	27 a 50	2.5 a 7	25 a 50	9 a 32	3 a 9	50 a 100	5 a 16	20 a 50	40 a 200	25 a 75
42 dds										
ACU	17.9 b ^z	2.0 b	3.0 b	7.4 a	5.2 b	48.3 b	1.4 b	11.3 b	34.9 b	33.8 a
ACUFF	45.2 a	4.7 a	5.6 ab	7.2 a	9.6 a	58.5 b	4.2 a	115.1 a	125.1 a	37.4 a
HEA	47.1 a	5.3 a	6.4 a	8.4 a	9.9 a	62.4 b	5.0 a	122.8 a	134.4 a	39.1 a
HID	41.1 a	1.8 b	6.9 a	9.2 a	5.9 b	138.6 a	5.3 a	15.8 b	123.1 a	37.0 a
DMSH	1.27	0.14	0.29	0.39	0.20	35.85	2.38	28.54	29.31	7.54
72 dds										
ACU	17.6 c	1.9 b	2.5 b	8.2 a	6.7 a	49.4 b	0.6 c	11.6 b	42.5 b	31.9 a
ACUFF	45.1 ab	5.3 a	6.1 a	8.5 a	7.9 a	54.6 b	5.2 ab	62.9 a	88.7 b	25.7 a
HEA	50.0 ab	6.5 a	7.8 a	8.6 a	7.4 a	58.9 b	6.9 a	58.5 a	82.5 b	24.4 a
HID	26.8 bc	2.0 b	7.8 a	8.7 a	5.8 a	168.9 a	3.2 bc	15.8 b	235.8 a	28.3 a
DMSH	1.935	0.163	0.24	0.43	0.45	104.63	3.07	14.75	137.64	10.48
103 dds										
ACU	24.6 bc	6.3 a	1.5 b	4.1 b	13.2 a	65.6 b	1.7 a	36.4 a	21.0 b	59.3 a
ACUFF	32.0 ab	7.7 a	1.7 b	6.7 a	14.8 a	86.6 b	3.3 a	50.8 a	21.5 b	69.5 a
HEA	18.2 c	3.3 b	0.8 b	6.7 a	11.9 a	136.0 a	3.6 a	8.7 b	50.2 b	62.6 a
HID	41.9 a	2.3 b	7.8 a	3.1 b	4.3 b	78.9 b	2.5 a	38.3 b	145.1 a	45.7 b
DMSH	1.14	0.24	0.15	0.23	0.48	30.16	3.42	21.88	33.11	11.90

^zValores con letra distinta dentro de columnas, son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$). ^ssuficiencia nutrimental según la clasificación de Jones Jr. (2007). DMSH= diferencia mínima significativa honesta; ACU= acuaponía; ACUFF= acuaponía más fertilización foliar con 5 mg Fe L⁻¹; HEA= hidroponía, riego con efluente acuapónico; HID= hidroponía.

Estadísticamente, la concentración de nutrimentos en HID no siempre fue mayor; pero en la acumulación (contenido; concentración nutrimental multiplicada por el peso de la materia seca) a los 103 ddt se observó un valor mayor para HID, lo cual indica que existió mayor crecimiento (Figura 6). Contrario a lo que ocurre con ACU, ACUFF y HEA que concentraciones similares de nutrimentos no expresan mayor biomasa.

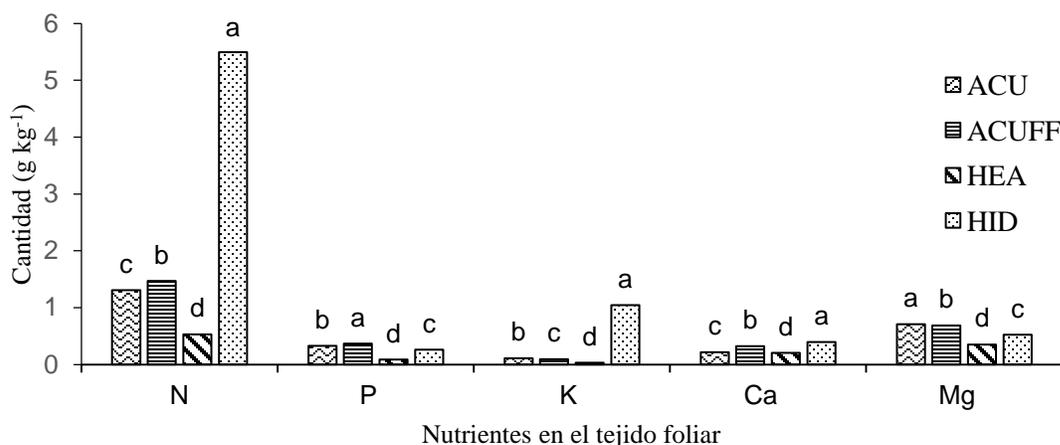


Figura 6. Contenido nutrimental en materia seca de la parte aérea de plantas de jitomate ‘Cid’ a los 103 días después del trasplante.

El N, Ca y Mg estuvieron en cantidades inadecuadas en HID, solo P y K estuvieron por debajo de la suficiencia nutrimental en las tres fechas de muestreo. Con respecto a los micronutrientes, únicamente Cu y Zn fueron deficientes. Los otros tratamientos quedaron dentro de los rangos nutrimentales para tomate en cada fecha de muestreo, incluso similares a HID; sin embargo, aunque se encontraron en niveles suficientes no se expresa el potencial productivo en el rendimiento como lo manifestó HID (Cuadro 3).

En cuanto al Fe, el valor más alto se presentó en HID a los 42 y 72 ddt y disminuyó a los 103 ddt. En tanto que ACUFF no modificó la concentración de Fe en tejido foliar con respecto a ACU (Cuadro 3).

Conclusiones

El rendimiento y crecimiento del cultivo de jitomate en sistemas acuapónicos, bajo las condiciones en las que se desarrolló esta investigación, son menores a los que se obtienen en la hidroponía convencional; sin embargo, la acuaponía provee nutrimentos para obtener producción aceptable sin utilizar fertilizantes.

En los tratamientos acuaponía, acuaponía más fertilización foliar con 5 mg Fe L-1 e hidroponía regadas con efluente acuapónico; el rendimiento en frutos disminuye 61, 76 y 84% en comparación con el tratamiento hidroponía.

Literatura citada

- Azaza, A., Dhraief, M. N. and Kraiem, M. M. 2008. Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia. *Journal of Thermal Biology* 33: 98-105.
- Bialczyk J.; Lechowski, Z.; Dziga, D and Mej, E. 2007. Fruit yield of tomato cultivated on media with bicarbonate and nitrate/ammonium as the nitrogen source. *Journal of Plant Nutrition* 30: 149-161.
- Blidariu, F. C.; Drasovean, A. and Grozea, A. 2013b. Evaluation of phosphorus level in green lettuce conventional grown under natural conditions and aquaponic system. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-napoca. Animal Science and Biotechnologies* 70:128-135.
- Blidariu, F., Alexandru, D.; Adrian, G.; Isidora, R. and Dacian, L. 2013a. Evolution of nitrate level in green lettuce conventional grown under natural conditions and aquaponic system. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies* 46: 244-250.
- Bremner, J. 1965. *Methods of soil analysis. Part. 2.* Black, C. A. Ed. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. 1146 p.
- Charo-Karisa, H.; Rezk, M. A.; Bovenhuis, H. and Komen, H. 2005. Heritability of cold tolerance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, juveniles. *Aquaculture*. 249:115-123.

- Da Silva, F. J. R., dos Santos Lima, F. R. do Vale, D. A. and do Carmo, M. V. 2013. High levels of total ammonia nitrogen as NH_4^+ are stressful and harmful to the growth of Nile tilapia juveniles. *Acta Scientiarum Biological Sciences* 35: 475-481.
- DeLong, D.; Losordo T. and Rakocy J. 2009. Tank culture of Tilapia. Southern Regional Aquaculture Center, Publication. 282 pp.
- El-Shafai, S. A.; El-Gohary, F. A.; Nasr, F. A.; van der Steen, N. P. and Gijzen, H. J. 2004. Chronic ammonia toxicity to duckweed-fed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 232: 117-127.
- El-Sherif, M. S. and El-Feky, A. M. I. 2009. Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. I. Effect of pH. *International Journal of Agriculture & Biology* 11: 297-300.
- Enduta, A.; Jusoh, A.; Ali, N. and Wan Nik, W. B. 2011. Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment* 32: 422-430.
- Epstein, E. and A. J. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives. Sinauer Associates Publishers. Sunderland, MA. 400 p.
- Espinosa-Moya. E. A.; Angel-Sahagún, C. A.; Mendoza-Carrillo, J. M.; Albertos-Alpuche, P. J.; Álvarez-González, C. A. and Martínez-Yañez, R. 2014. Herbaceous plants as part of biological filter for aquaponics system. *Aquaculture Research* 1: 1-11.
- Falah, M. A. F.; Wajima, T.; Yasutake, D.; Sago, Y. and Kitano, M. 2010. Responses of root uptake to high temperature of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in soil-less culture. *Journal of Agricultural Technology* 6: 543-558.
- Fitwi, S. B.; Wuertz, J. S.; Schroeder, P. and Schulz, C. 2012. Sustainability assessment tools to support aquaculture development. *Journal of Cleaner Production* 32: 183-192.
- Graber, A. and Junge, R. 2009. Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*. 246:147-156.
- Jones, Jr. J. B. 2007. Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden. CRC press. Boca Raton. FL, USA. 65 p.
- Khater, E. S. G.; Bahnasawy, A. H.; Shams, A. E. H. S.; Hassaan, M. S. and Hassan, Y. A. 2015. Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation. *Ecological Engineering* 83: 199-207.

- Krauss, S.; Schnitzler, W. H.; Grassmann, J. and Voitke, M. 2006. The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 441-448.
- Liang, J. Y. and Chien, Y. H. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 693-700.
- Mariscal-Lagarda, M. M.; Páez-Osuna, F.; Esquer-Méndez, J. L.; Guerrero-Monroy, I.; del Vivar, A. R. and Félix-Gastelum, R. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture*. 336-367:76-84.
- Martínez-Andújar, C.; Ghanem, M. E.; Albacete, A. and Pérez-Alfocea, F. 2013. Response to nitrate/ammonium nutrition of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants over expressing a prokaryotic NH₄⁺ dependent asparagine synthetase. *Journal of Plant Physiology* 170: 676-687.
- Pickens, J. M. 2015. Integrating effluent from recirculating aquaculture systems with greenhouse cucumber and tomato production. Doctoral dissertation, Auburn University. 104 p.
- Rakocy, J. E.; Masser, M. P. and Losordo, T. M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publication 454:1-16.
- Resh, H. M. 2013. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 276 p.
- Sainju, U. M.; Dris, R. and Singh, B. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment* 1: 176-183.
- Salam, M. A.; Jahan, N.; Hashem, S. and Rana, K. M. S. 2014. Feasibility of tomato production in aquaponic system using different substrates. *Progressive Agriculture*. 25: 54-62.
- Shirong, G. 2000. Effect of dissolved oxygen concentrations in nutrient solution on the respiratory intensity of cucumber and tomato roots. *Acta Horticulturae Sinica* 27:141-142.
- Soto-Bravo, F. 2015. Oxifertirrigación química mediante riego en tomate hidropónico cultivado en invernadero. *Agronomía Mesoamericana* 26: 277-289.

- Souri M. K. and Römheld V. 2009. Split daily applications of ammonium toxicity in tomato plants. *Horticulturae Environment and Biotechnology* 50: 384-391.
- Souri, M. K.; Neumann, G. and Römheld, V. 2009. Nitrogen forms and water consumption in tomato plants. *Horticulturae Environment and Biotechnology* 50: 377-383.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute. 2004. SAS user's guide. Statistics. Version 8. SAS/STAT® 9.1. SAS Inst., Cary, NC. USA. Quality, and elemental removal. *J. Environ. Qual.* 19:749-756.
- Steiner, A. A. 1984. The universal solution. Proceedings of the Sixth Int.Congr. on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands. 633-649.
- Timmons, M. B.; Ebeling, J. M. and Piedrahita, R. H. 2009. Acuicultura en sistemas de recirculación. New York, USA. Cayuga aqua ventures. 959 p.
- Tran-Duy, A.; Schrama, J. W.; van Dam, A. A. and Verreth, J. A. 2008. Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*. 275: 152-162.
- Tyson, R. V.; Simonne, E. H.; Davis, M.; Lamb, E. M.; White, J. M. and Treadwell, D. D. 2007. Effect of nutrient solution, nitrate nitrogen concentration, and pH on nitrification rate in perlite medium. *Journal of Plant Nutrition* 30: 901-913.
- Tyson, R. V.; Simonne, E. H.; Treadwell, D. D.; Davis, M. and White, J. M. 2008. Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. *Journal of Plant Nutrition* 31: 2018-2030.
- Villarroel, M.; Rodríguez-Alvariño, J. M. and Duran Altisent, J. M. 2011. Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 537-545.
- Zheng, Y.; Wang, L. and Dixon, M. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae* 113:162-165.

Capítulo II. Calidad de tomate (*solanum lycopersicum l.*) producido en acuaponía complementado con fertilización foliar de micronutrientos

Maciel Reyes-Flores¹, Manuel Sandoval-Villa^{1§}, Nieves Rodríguez-Mendoza¹, Libia I. Trejo-Téllez¹, Julio Sánchez-Escudero¹ y Juan Reta-Mendiola²

¹Colegio de Postgraduados- Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. ²Colegio de Postgraduados- Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz, km 88.5. C. P. 91690. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz.

[§]Autor para correspondencia: msandoval@colpos.mx.

Resumen

En acuaponía la calidad del fruto de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) puede verse afectada por el suministro de bajas concentraciones de nutrientes esenciales, en particular se ve afectada la disponibilidad de micronutrientos por el valor alcalino del pH. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de las aplicaciones foliares de micronutrientos en la calidad de frutos de tomate producido en acuaponía. Los tratamientos fueron ACU, acuaponía; ACUFF1 acuaponía más fertilización foliar 1 (en mg L⁻¹) con 12.50 Fe, 5.83 Mn, 1.17 Zn, 1.08 B, 0.47 Cu, 0.43 Mo y ACUFF2, acuaponía más fertilización foliar 2 (en mg L⁻¹) 25.0 Fe, 11.67 Mn, 2.33 Zn, 2.17 B, 0.93 Cu y 0.87 Mo. Los resultados de calidad de frutos en acuaponía se compararon con un tratamiento en hidroponía convencional, HID, con la solución nutritiva Steiner. Para evaluar los sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), relación SST/AT, conductividad eléctrica (CE), pH y el contenido de licopeno se utilizaron frutos maduros (completamente rojos). Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares en acuaponía no afectaron los SST, la AT, relación SST/AT y la concentración de licopeno pero si hubo una ligera diferencia en el pH del jugo de tomate. La AT, el pH, relación SST/AT y el licopeno en los tratamientos acuapónicos no mostraron diferencias significativas y únicamente los SST disminuyeron 22.2 % en ACU, 26.6 % en ACUFF1 y 31.7 % en ACUFF2 comparado con HID. Debido al aporte de nutrientes del agua en acuaponía, las aplicaciones foliares de micronutrientos no influyeron positivamente en los atributos de calidad química de frutos de tomate.

Palabras clave: acuaponía, licopeno, pH, nutrientes.

Abstract

In aquaponics the quality of the tomato fruit (*Solanum lycopersicum* L.) can be affected by the supply of low concentrations of essential nutrients, in particular the availability of micronutrients due to the alkaline pH value. The objective of this research was to evaluate the effect of foliar applications of micronutrients on the quality of tomato fruit produced in aquaponics. The treatments were ACU, aquaponics; ACUFF1 aquaponics plus foliar fertilization 1 (in mg L⁻¹) with 12.50 Fe, 5.83 Mn, 1.17 Zn, 1.08 B, 0.47 Cu, 0.43 Mo and ACUFF2, aquaponics plus foliar fertilization 2 (in mg L⁻¹) 25.0 Fe, 11.67 Mn, 2.33 Zn, 2.17 B, 0.93 Cu and 0.87 Mo. The fruit quality results in aquaponics were compared with a conventional hydroponics treatment, HID, with the Steiner nutrient solution. To evaluate total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), TSS/TA ratio, electrical conductivity (EC), pH and lycopene content, ripe fruits (completely red) were used. The results showed that the foliar applications in aquaponics did not affect the TSS, the TA, the TSS/TA ratio and the lycopene concentration, but there was a slight difference in the pH of the tomato juice. The TA, pH, TSS/TA ratio and lycopene in the aquaponics treatments did not show significant differences and only the TSS decreased 22.2% in ACU, 26.6% in ACUFF1 and 31.7% in ACUFF2 compared to HID. Due to the contribution of water nutrients in aquaponics, foliar applications of micronutrients did not positively influence the chemical quality attributes of tomato fruits.

Key words: aquaponics, lycopene, pH, nutrients.

Introducción

Los sistemas acuapónicos han resultado como una estrategia para producir plantas utilizando desechos de la acuicultura. Tiene como principios el reciclaje del agua y nutrientes, y la producción sustentable de alimentos. El principio clásico es proporcionar los nutrientes contenidos en el agua de la acuicultura a unidades de cultivos de plantas hidropónicas que la depuren para retornarla a los tanques de peces (Goddek *et al.*, 2016).

En acuaponía la fuente del aporte de los nutrientes es el alimento de peces. El efluente contiene nutrientes disueltos que excretan los peces a través de las branquias como es el N (en forma de amoníaco) y P (Lennard, 2012), por la orina y heces fecales que comprenden compuestos orgánicos que necesitan mineralizarse y solubilizarse en forma iónica en el agua y estén disponibles para las plantas (Goddek *et al.*, 2015; Lennard, 2012).

Los desechos de los peces no proporcionan los nutrientes esenciales en cantidades adecuadas para el cultivo de tomate en acuaponía (Reyes-Flores *et al.*, 2016) lo que se manifiesta en la reducción del rendimiento y de la calidad del tomate (Sainju *et al.*, 2003). Para corregir deficiencias de algunos nutrientes en acuaponía, éstos pueden aplicarse al medio de cultivo (Goddek *et al.*, 2016) o mediante aspersión foliar; esta última es una alternativa eficiente en la nutrición de plantas (Roosta y Hamidpour, 2013).

El valor del pH y las concentraciones de NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , son esenciales para mantener el equilibrio en el ecosistema acuapónico de los tres organismos que lo integran: peces, bacterias y plantas (Somerville *et al.*, 2014). Por un lado, en sistemas acuapónicos se recomienda mantener el pH entre 7 y 8 para aumentar la nitrificación (Tyson *et al.*, 2008); por el otro, en hidroponía valores de pH clasificados como ligeramente (6.1 a 6.5) y medianamente ácidos (5.6 a 6) favorecen la solubilidad de las formas iónicas absorbidas por las plantas (Epstein y Bloom, 2005), ya que a pH por arriba de 7 puede ocurrir precipitación de Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Resh, 2013). Por tanto, una alternativa es la aplicación foliar de nutrientes específicos para compensar la baja disponibilidad de algunos micronutrientes a pH mayores de 7 en el cultivo de tomate en acuaponía.

Las aplicaciones foliares de K, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu incrementaron las concentraciones de elementos aplicados en las hojas y frutos de tomate que crecieron en condiciones alcalinas (pH 7.0 a 7.7) (Roosta y Hamidpour, 2013); y en Chile la fertilización foliar con Fe tuvo un efecto benéfico en la absorción y transporte de nutrientes esenciales con pH alcalino de la solución acuapónica (7.5 a 7.8) (Roosta y Mohsenian, 2012). Respecto a la calidad del tomate, se reporta que la aplicación foliar conjunta de Fe, Mn, Cu, Zn, B y Mo (Kumari, 2012) y de Zn más Fe (Kazemi,

2013) incrementan la concentración de los sólidos solubles totales (SST) y licopeno, y los efectos individuales o combinados de Zn y B mejoran los SST y la relación SST: acidez titulable (Meena *et al.*, 2015). La importancia de la fertilización foliar está en que es un medio eficaz para mejorar la calidad de tomate (Trejo-Téllez *et al.*, 2004) e incrementar el rendimiento en sistemas acuapónicos en donde la concentración de nutrientes es menor y que pueden resolverse mediante este medio de fertilización (Roosta y Hamidpour, 2011).

Aun cuando la calidad del fruto está definida por muchos factores, los desequilibrios nutrimentales constituyen una amenaza y pueden afectar gravemente la calidad del tomate (Afzal *et al.*, 2015). Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de las aplicaciones foliares de micronutrientes en la calidad de frutos de tomate producido en acuaponía.

Materiales y métodos

Sistema acuapónico

El experimento se desarrolló en un módulo acuapónico en condiciones de invernadero, empleando un sistema de acuaponía comercial Home Garden de Nelson & Pade[®] con capacidad de 2855 L de agua. El sistema consiste en cuatro tanques para peces (de 200 L cada uno), dos clarificadores (de 86 L cada uno), dos biofiltros (de 35 L cada uno), un desgasificador (de 79 L) y tres tinas hidropónicas (de 578 L cada una). Se utilizó el agua del sistema acuapónico como solución nutritiva y se complementó la nutrición del cultivo con aspersiones foliares de micronutrientes y se evaluó su efecto en la calidad de frutos de tomate (*Solanum lycopersicon* L.) var. Cid tipo Saladatte de crecimiento indeterminado. El valor del pH del agua fue de 7.8 al inicio y no se ajustó durante el experimento que osciló de 7.3 a 7.8 en las tinas de peces y de 7.5 a 8.1 en las tinas hidropónicas. La pérdida de agua por evapotranspiración y por eliminación de sedimentos acumulados se repuso con agua de la llave. El método de cultivo de plantas en el sistema acuapónico fue en balsas flotantes.

Peces

Se colocaron 50 tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus* L.) en cada uno de los tanques: tanque 1, 1739 g; tanque 2, 2371 g; tanque 3, 3064 g y tanque 4, 4243 g de biomasa. Los peces fueron alimentados a las 10:00, 13:00 y 17:00 h *ad libitum* con alimento marca NutripecPurina® con 44% de proteína y tamaño de pellet de 1.5 mm. Las concentraciones de nutrimentos del alimento obtenidas en el laboratorio fueron las siguientes, de macronutrientes en g kg⁻¹: 76 de N, 10 de P, 0.6 de K, 4.2 de Ca, 1.0 de Mg y micronutrientes en mg kg⁻¹: 252.5 de Fe, 18.9 de B, 7.8 de Cu, 105.7 de Zn, 21.6 de Mn y 5.0 de Mo.

Plantas

Las semillas de tomate germinaron en charolas de poliestireno de 200 cavidades de 25 mL de volumen cada cavidad usando turba Growing Mix® como sustrato. A los 50 días después de la siembra (dds) se transfirieron al componente hidropónico del sistema acuapónico y al testigo en bolsas con tezontle en hidroponía convencional.

Diseño de tratamientos

En acuaponía se colocaron tres tratamientos, los cuales fueron ACU, acuaponía; ACUFF1 acuaponía más fertilización foliar 1 de micronutrientes y ACUFF2, acuaponía más fertilización foliar 2 de micronutrientes. La concentración de micronutrientes en las aspersiones foliares fueron (en mg L⁻¹): 12.50 Fe, 5.83 Mn, 1.17 Zn, 1.08 B, 0.47 Cu, 0.43 Mo en ACUFF1 y 25.0 Fe, 11.67 Mn, 2.33 Zn, 2.17 B, 0.93 Cu y 0.87 Mo en ACUFF2. Dichas concentraciones se aplicaron en función de la baja disponibilidad de micronutrientes en soluciones con pH alcalinos. Para esto se utilizaron 166.6 y 333.3 mg L⁻¹, respectivamente del producto comercial TradeCorp® AZ. Las aplicaciones foliares se realizaron 32, 39, 54 y 68 días después del trasplante (ddt). Los resultados de calidad de frutos en acuaponía se compararon con un tratamiento en hidroponía convencional, HID, a partir de la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) y su composición base fue en mol_c m⁻³: 12 NO₃⁻, 1 H₂PO₄⁻, 7 SO₄²⁻, 7 K⁺, 4 Mg²⁺ y 9 Ca²⁺ a un pH de 5.5. Se utilizó agua destilada para

preparar la solución foliar con un pH 6.6. Se empleó un surfactante penetrante en solución acuosa, INEX-A de Cosmocel® a una concentración de 1 mL L⁻¹. En cada aspersión se utilizaron 50 mL del fertilizante foliar, aplicados con un atomizador hasta punto de goteo por planta.

Variables estudiadas

En el componente hidropónico del sistema de acuaponía se realizaron muestreos cada 20 días para medir el pH, la conductividad eléctrica (CE) con un equipo Conductronic PC18 (Puebla, México) y la concentración de nutrientes. El NO₃⁻ se midió con un sensor Horiba Laqua twin, el NH₄⁺ con un espectrofotómetro portátil Hanna Instrument HI-83225. La cuantificación de P, K, Ca, Mg, Mn, Cu y Fe se realizó en un equipo ICP-OES (Varian 725, Australia).

Se colocaron 18 plantas por tratamiento de las cuales cuatro se utilizaron para hacer las determinaciones. Se colectó el segundo fruto del cuarto racimo en el estado de madurez rojo 9 (Cantwell y Kasmire, 2002) en cada uno de los tratamientos. Para la determinación SST se cortó el fruto longitudinalmente, se colectaron dos gotas de jugo y se colocaron sobre la celda de un refractómetro manual ATAGO N-1E con escala de 0-32 %. Para determinar el pH se pesó una muestra de 10 gramos de fruto fresco y se licuaron en 50 mL de agua destilada, en el jugo colectado se midió directamente el pH y CE usando un equipo Conductronic PC18 (Puebla, México) (Rodríguez, 1997). La acidez titulable (AT) se midió en la mezcla obtenida para el pH, por el método de neutralización (Boland, 1990) tomando una alícuota de 10 mL y se tituló con NaOH 0.1 N, utilizando fenolftaleína como indicador. La AT se calculó como porcentaje de ácido cítrico empleando la siguiente fórmula:

$$AT (\%) = \frac{(mL \text{ NaOH gastados}) (N_{\text{NaOH}}, \text{ meq mL}) (\text{meq del ácido cítrico}, 0.064) (\text{volumen total de la muestra}, \text{ mL}) (100)}{(\text{Peso de la muestra}) (\text{volumen de alícuota titulada})}$$

La relación sólidos solubles totales: acidez titulable (SST/AT) se calculó como el cociente de SST y AT.

Los valores de color L*, a* y b* se obtuvieron de la superficie de los tomates en el centro del fruto cuatro veces en la misma zona en diferentes ángulos (0°, 90°, 180° y 270°) utilizando un colorímetro Minolta CR-410 (Konica Minolta, Osaka, Japón) con un cabezal de 50 mm de diámetro de área de medición y una iluminación difusa/visión 0° (Minolta, 2013). Con éstos valores se estimó la concentración de licopeno mediante la fórmula propuesta por Arias *et al.* (2000): licopeno (mg 100 g⁻¹) = 11.878 (a*/b*) + 1.5471.

Análisis estadístico

El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones, donde una planta de cada tina hidropónica constituyó una unidad experimental. Se realizó un análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM y la comparación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el uso del programa SAS 9.3 (SAS Institute, 2010).

Resultados y discusión

Conductividad eléctrica (CE) en la solución acuapónica

Durante el cultivo de los peces se suministró alimento como fuente de nutrimentos en el sistema acuapónico lo que provocó un ligero aumento de la CE, 40% con respecto a la CE inicial del agua, en los primeros 60 ddt en las tinas hidropónicas (Figura 7). Este incremento en la CE no fue significativo, ya que para la producción de tomate se requieren CE desde 2.1 a 5.1 dS m⁻¹ (Dorais *et al.*, 2001). El ligero incremento de la CE es debido al aumento de los iones derivados de la mineralización de la materia orgánica acumulada proveniente del alimento y de las heces fecales de los peces (Lian y Chien, 2013).

La CE puede afectar el rendimiento y la calidad de tomate, valores mayores que 3 dS m⁻¹ disminuyen el rendimiento (Rosadi *et al.*, 2014); mientras que los SST se incrementan a valores que oscilan de 4.5 a 6.1 °Brix a CE desde 2.3 a 6.5 dS m⁻¹ (Wu y Kubota, 2008; Krauss *et al.*, 2006). En acuaponía es común encontrar CE menores que 1 dS m⁻¹ (Reyes-Flores *et al.*, 2016;

Salam *et al.*, 2014; Lian y Chien, 2013), y se esperaría que la calidad de los frutos de tomate disminuyera; sin embargo, Rosadi *et al.*, (2014) encontraron, en hidroponía, que únicamente el 5.1% se redujeron los SST a CE de 1 y 3 dS m⁻¹.

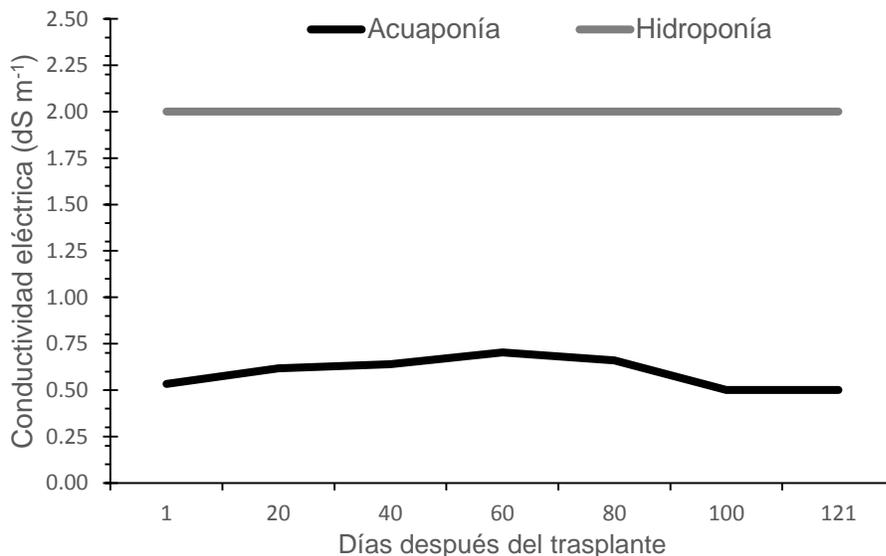


Figura 7. Conductividad eléctrica del agua en las tinas hidropónicas durante el ciclo de cultivo.

La concentración de nutrientes esenciales para las plantas en acuaponía fue menor que la de hidroponía (solución Steiner, 1984). El N fue 9.5 veces menor, el P 15.5, el K 52.5, el Ca 7.5, el Mg 1.9, el Fe 535.7, el Cu 33.3, el Zn 3.8, el B 6.3 y el Mn 266.6. Sin embargo, con estas concentraciones se obtuvo calidad aceptable de los frutos de tomate. La concentración de nutrientes en acuaponía fluctuó durante el ciclo productivo de las plantas (Cuadro 4). En acuaponía se ha documentado que los niveles de N-NO₃⁻ oscilan de 5 a 18 mg L⁻¹ (Hu *et al.*, 2015), por debajo de lo recomendado, en la producción de tomate hidropónico (50 a 250 mg N-NO₃⁻ L⁻¹; Resh, 2013). Graber y Junge (2009) reportaron la producción de tomate con concentraciones que van desde 12.1 a 95 mg N-NO₃⁻ L⁻¹ y de 0.06 a 0.68 mg N-NH₄⁺ L⁻¹. Sin embargo, no informan sobre el efecto de los nutrientes en la calidad del fruto.

Cuadro 4. Concentración promedio, máxima y mínima de nutrimentos producidos en las tinas hidropónicas con los diferentes tratamientos durante 121 días del experimento.

Nutrientes	Tinas hidropónicas					
	ACU		ACUFF1		ACUFF2	
	Media (mg L ⁻¹)	Mín-máx (mg L ⁻¹)	Media (mg L ⁻¹)	Mín-máx (mg L ⁻¹)	Media (mg L ⁻¹)	Mín-máx (mg L ⁻¹)
N-NH ₄ ⁺	1.1	0.7-1.7	1.1	0.9-1.7	1.1	0.9-1.5
N-NO ₃ ⁻	16.5	7.7-29.3	17.8	15.9-31.6	17.1	15.3-31.6
P	1.9	0.4-3.0	2.0	0.4-2.8	2.1	0.4-3.2
K	5.0	2.1-8.5	5.3	2.4-8.1	5.4	2.4-8.1
Ca	23.6	19.4-26.9	24.0	20.6-27.4	24.0	21.6-26.8
Mg	24.4	17.1-30.0	25.5	17.7-28.9	25.9	23.4-29.4
Fe	0.005	0-0.012	0.004	0-0.017	0.008	0-0.022
Cu	0.004	0-0.013	0.002	0-0.008	0.004	0-0.013
Zn	0.072	0-0.150	0.086	0.036-0.185	0.064	0-0.184
B	0.039	0.019- 0.054	0.043	0.027-0.054	0.042	0.030-0.065
Mn	0.011	0-0.065	*	0-0.002	0.001	0-0.002

ACU: acuaponía; ACUFF1: acuaponía más fertilización foliar 1; ACUFF2: acuaponía más fertilización foliar 2; HID: hidroponía. *no está presente.

Variables asociadas a la calidad de fruto

En el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos al evaluar los diferentes tratamientos en acuaponía e hidroponía en la calidad del fruto. No hubo diferencias significativas en el pH del jugo de tomate en hidroponía con respecto a los tratamientos acuapónicos. En acuaponía, las aplicaciones foliares incrementaron de manera significativa el pH del fruto aunque se mantuvieron a pH por debajo de 4.5 que es lo recomendado para la industrialización, para controlar el deterioro microbiano en el producto final (Giordano *et al.*, 2000). Las aplicaciones foliares de micronutrientes aumentaron el pH de 4.12 a 4.25; 3 % respecto a ACU. En hidroponía, Hernández-Leal *et al.* (2013) obtuvieron un pH del jugo de tomate en la variedad Cid de 4.7, valor

superior al aquí obtenido en el tratamiento hidropónico (HID). La CE de 0.25 a 5 dS m⁻¹ no modifica el valor de pH en tomate (Yurtseven *et al.*, 2005).

Cuadro 5. Efecto de los tratamientos acuapónicos e hidropónico sobre la calidad química de frutos de tomate variedad Cid a madurez de consumo.

Tratamientos	pH	CE (dS m ⁻¹)	AT (% ácido cítrico)	SST (%)	SST/AT	Licopeno (mg 100 g ⁻¹ PF)
ACU	4.12 ^z b	0.69 a	0.114 a	3.50 b	31.21 ab	15.98 a
ACUFF1	4.25 a	0.68 a	0.119 a	3.30 b	28.02 ab	15.85 a
ACUFF2	4.25 a	0.68 a	0.126 a	3.07 b	24.54 b	17.08 a
HID	4.17 ab	0.74 a	0.107 a	4.50 a	43.09 a	15.45 a
^y DMSH	0.11	0.10	0.03	0.64	15.45	1.76
^x CV (%)	1.28	6.81	15.32	8.52	23.21	5.23

^zValores con letra distinta, dentro de columnas, son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); ^yDMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ^xCV: coeficiente de variación; ACU: acuaponía; ACUFF1: acuaponía más fertilización foliar 1; ACUFF2: acuaponía más fertilización foliar 2; HID: hidroponía; CE: conductividad eléctrica; AT; acidez titulable; SST: sólidos solubles totales; PF=Peso fresco

Las aplicaciones foliares en tomate acuapónico no afectaron el contenido de SST. Los tratamientos de acuaponía mostraron valores inferiores (3.07 a 3.50 %) a lo reportado por Hernández-Leal *et al.* (2013) en la variedad Cid en hidroponía convencional que fue de 4.8 %, que incluso fue mayor a lo obtenido en HID. Por otro lado, las aplicaciones foliares conjuntas de Fe, Mn, Cu, Zn, B y Mo de 100 mg L⁻¹ de cada micronutriente incrementaron 15.7 % los SST; 3.55 % en plantas no tratadas a 4.11 % (Kurami, 2012). La aplicación foliar de 100 mg Zn L⁻¹ más 200 mg Fe L⁻¹ se recomienda para lograr 5.85 ° Brix (Kazemi, 2013) y los efectos individuales o combinados de Zn y B (50, 100 y 150 mg L⁻¹) incrementan los SST hasta 5.66 % (Mushtaq *et al.*, 2016) y 5.05 % (Meena *et al.*, 2015) en tomate. Sin embargo, en este trabajo la aspersion de micronutrientes provocó una reducción de SST de 5.7 % y 12.3% en ACUFF1 y ACUFF2 con respecto a ACU y 26.7 % y 31.8 % en relación con HID.

El porcentaje de SST en ACUFF1 y ACCUFF2 está ligeramente por debajo del límite inferior del rango obtenido por Turhan y Seniz (2009) en varios genotipos; 3.4 a 5.5 %, considerando que se desarrollaron bajo condiciones nutrimentales adecuadas. Los resultados se obtuvieron a pesar de la diferencia en CE promedio entre los tratamientos acuapónicos e hidropónico (de 0.58 y 2 dS m⁻¹). Yurtseven *et al.* (2005) reportan que valores de CE de 0.25 a 5 dS m⁻¹ no afectó los SST, resultados diferentes a esta investigación; en donde la magnitud de la CE en hidroponía y acuaponía originó la diferencia en SST.

En acuaponía, la deficiencia de nutrimentos es uno de los factores que podría disminuir la calidad de las cosechas; pero el constante abastecimiento de nutrimentos, aunque en pequeñas concentraciones, permite obtener valores de SST dentro de los rangos aceptados, según Turhan y Seniz (2009), como se observa en ACU sin la necesidad de las aspersiones foliares.

La AT observada en los tratamientos acuapónicos fue similar a la de HID. Las aplicaciones foliares de Zn y B individual o combinados no mostraron diferencias significativas en esta variable (de 0.45 a 0.56%) (Meena *et al.*, 2015). Sin embargo, Tigist *et al.* (2013) encontraron que la AT osciló entre 0.25 y 0.34 % en cinco variedades de tomate, valores por arriba de los encontrados en este estudio. Lo anterior se atribuye a que los ácidos orgánicos disminuyen conforme el fruto madura (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2008) ya que las mediciones de calidad de fruto se realizaron cuando éstos estaban completamente maduros. La disminución de la AT en los frutos de los tratamientos acuapónicos obedece a los bajos niveles de azúcares, porque como lo mencionan Getinet *et al.*, 2008 menciona que las plantas con altos niveles de azúcares generalmente tienen más ácidos orgánicos libres y menos concentración de iones de hidrógeno que las plantas con bajo contenido de azúcares. Aunque es tendencia no se conserva en HID que a pesar de tener más SST la AT es estadísticamente igual que ACU, ACUFF1 y ACCUFF2.

En general, al incrementarse la AT disminuye el pH (Anthon *et al.*, 2011); no obstante, los resultados de esta investigación arrojan que al no haber diferencia significativa en la AT no se modifica el pH con las aspersiones foliares.

Los tratamientos acuapónicos no afectaron la relación SST/AT. Mientras que con aplicaciones foliares con Zn y B a una concentración de 100 mg L⁻¹ se obtuvo una relación de 10.98 (Meena *et al.*, 2015). Tigist *et al.* (2013) reportaron relaciones de 12.1 a 18.5 en cinco variedades de tomates para consumo en fresco. El valor máximo SST/AT de 43.09 en HID se debe al bajo valor de AT.

El comportamiento de las relaciones SST/AT en los tratamientos acuapónicos se atribuye a la disminución de SST dado que la AT no fue diferente a la de HID.

La estimación de licopeno por colorimetría de frutos maduros no fue afectada por los tratamientos. En ACU fue de 15.98 mg 100 g⁻¹, estadísticamente iguales a ACUFF1, ACUFF2 e HID. Esto significa que los frutos producidos en los tratamientos de acuaponía con bajas concentraciones de nutrimentos no modificaron la concentración de licopeno. Sin embargo, Fanasca *et al.* (2006a, 2006b) reportan que el licopeno se incrementó por cambios en la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva, resultados que difieren a lo encontrado en este estudio en donde HID a pesar de contener los nutrimentos esenciales no presentó cambios en la concentración de licopeno. El grado de madurez influye en la concentración de licopeno; ésta es mayor en la etapa de madurez rojo intenso (Arias *et al.*, 2000) antes del ablandamiento excesivo. La concentración de licopeno en genotipos nativos mexicanos oscila desde 12.4 a 22.9 mg 100 g⁻¹ (Méndez *et al.*, 2011) y 12.2 mg 100 g⁻¹ (Arias *et al.* 2000), 8.5 a 13.56 mg 100 g⁻¹ (Radzevičius *et al.*, 2009) en variedades comerciales y de 9.6 a 16.8 mg 100 g⁻¹ en líneas de tomate (Peralta *et al.*, 2012).

Conclusiones

La fertilización foliar con micronutrimentos en acuaponía no afectaron la conductividad eléctrica del fruto (CE), la acidez titulable (AT) y la relación sólidos solubles totales (SST)/acidez titulable (AT) de los frutos de tomate, comparables con lo obtenido en hidroponía (HID) excepto los SST que disminuyeron 22.2 % en acuaponía (ACU), 26.6 % en acuaponía con fertilización foliar de baja dosis (ACUFF1) y 31.7 % en acuaponía con fertilización foliar de alta dosis (ACUFF2). Solo el pH del jugo del fruto fue ligeramente modificado por los tratamientos acuapónicos. La concentración de licopeno en frutos maduros con y sin aspersiones foliares en acuaponía no fue

afectada por los tratamientos, incluso con HID en dónde la nutrición vegetal fue óptima. Los atributos de calidad de frutos en el sistema acuapónicos no se afectan por la aplicación de nutrientes vía foliar, lo cual indica que no es necesaria esta práctica bajo las condiciones en que se desarrolló el experimento.

Literatura citada

- Afzal, I., Hussain, B., Basra, S. M. A., Ullah, S. H., Shakeel, Q. and Kamran, M. 2015. Foliar application of potassium improves fruit quality and yield of tomato plants. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus* 14: 3-13.
- Al-Hafedh, Y.S.; Alam, A. and Beltagi, M.S. 2008. Food production and water conservation in a recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *Journal of the World Aquaculture Society* 39: 510-520.
- Anthon, G. E., LeStrange, M. and Barrett, D. M. 2011. Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91: 1175-1181.
- Arias, R., Lee, T. C., Logendra, L., and Janes, H. 2000. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 1697-1702.
- Boland, F.E. 1990. Fruit and fruit products. *In: Helrich, K. (ed.). Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemist (AOAC). 15th edition. Arlington, VA.*
- Cantwell, M. I. and Kasmire, R. F. 2002. Postharvest handling systems: fruits vegetables. *In: Postharvest technology of horticultural crops. 3rd edition. (ed.) A. Kader. University of California. Publication 3311. 407-421.*
- Casierra-Posada, F., y Aguilar-Avenidaño, Ó. E. 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana*, 26: 300-307.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. and Gosselin, A. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21:367-383.

- Endut, A.; Jusoh, A.; Ali, N.; Wan Nik, W.B. and Hassan, A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology* 101: 1511-1517.
- Epstein, E. and Bloom, A.J. 2005. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. Sinauer Associates Publishers. Sunderland, MA. 400 pp.
- Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupael, Y., Azzini, E. and Saccardo, F. 2006a. Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 4319-4325.
- Fanasca, S., Colla, G., Roupael, Y., Saccardo, F., Maiani, G., Venneria, E. and Azzini, E. 2006b. Evolution of nutrient value of two tomato genotypes grown in soilless culture as affected by macrocation proportions. *HortScience* 41: 1584-1588.
- Getinet, H., Seyoum, T. and Woldetsadik, K. 2008. The effect of cultivar, maturity stage and storage environment on quality of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 87: 467-478.
- Giordano L. D. B., Silva J. B. C. and Barbosa V. 2000. Escolha de cultivares e plantio. *In: Tomate para processamento industrial*. (eds) J. B. C. Silva and L. D. B. Giordano. Emprapa. Brasilia, Brazil. 36-59.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H. and Thorarinsdottir, R. 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7: 4199-4224.
- Goddek, S., Espinal, C. A., Delaide, B., Jijakli, M. H., Schmutz, Z., Wuertz, S., and Keesman, K. J. 2016. Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water* 8:1-29.
- Graber, A. and Junge, R. 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246: 147-156.
- Hernández-Leal, E., Lobato-Ortiz, R., García-Zavala, J. J., Reyes-López, D., Méndez-López, A., Bonilla-Barrientos, O., y Hernández-Bautista, A. 2013. Comportamiento agronómico de poblaciones F2 de híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 209-215.
- Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C. and Khanal, S. K. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* 188: 92-98.

- Kazemi, M. 2013. Effects of Zn, Fe and their combination treatments on the growth and yield of tomato. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 3: 109-114.
- Krauss, S., Schnitzler, W. H., Grassmann, J. and Voitke, M. 2006. The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 441-448.
- Kumari, S. 2012. Effect of micronutrients on quality of fruit and seed in tomato, *Solanum lycopersicum* L. *International Journal of Farm Sciences* 2: 43-46.
- Lennard, W. 2012. Aquaponic system design parameters: Fish to plant ratios (feeding rate ratios). *Aquaponic Fact Sheet Series*: 1-12.
- Liang, J. Y. and Chien, Y. H. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85: 693-700.
- Meena, D. C., Maji, S., Meena, J. K., Kumawat, R., Meena, K. R., Kumar, S. and Sodh, K. 2015. Improvement of growth, yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Azad T-6 with foliar application of zinc and boron. *International Journal of Bio-Resource & Stress Management* 6: 598-601.
- Méndez, I. I. and Vera G. A. M. 2011. Quality of fruits in Mexican tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) landraces. *Vitae* 18: 26-32.
- Minolta, K. 2013. Manual de instrucciones: chroma meter CR-400/410. Kónica Minolta Sensing, Japan. 156 p.
- Mushtaq, N., Mushtaq, F., Rasool, F., Jan, R., Berjis, S., Ganaie, M. A. and Mushtaq, R. 2016. Effect of foliar application of boron and zinc on growth and fruit quality parameters of tomato (*Solanum lycopersicon* L.) cv. Shalimar 1 under temperate conditions in Kashmir valley. *The Bioscan* 11: 1299-1301.
- Nelson, R.L. 2008. Aquaponic food production. Nelson and Pade. Press, Montello, WI, USA, 218 pp.
- Peralta, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chavez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., y Pérez-León, I. 2012. Variación de caracteres agronómicos y licopeno en líneas avanzadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Phyton* 81: 15-22.

- Radzevičius, A., Karkleliene, R., Viškelis, P., Bobinas, C., Bobinaite, R., Sakalauskiene, S. and Metspalu, L. 2009. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit quality and physiological parameters at different ripening stages of Lithuanian cultivars. *Agronomy Research* 7: 712-718.
- Rakocy E. J, S. D. Bailey, C. R. Shultz and S. E. Thoman. 2004a. Update on tilapia and vegetable production in the aquaponic system. University of the Virgin Islands: 15 p.
- Rakocy, J.E., Shultz, R.C., Bailey, D.S. and Thoman, E.S. 2004b. Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Horticulturae* 648: 63-69.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P. and Losordo, T. M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC publication 454: 1-16.
- Resh, H. M. 2013. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 276 pp.
- Reyes-Flores. M., M. Sandoval-Villa., M. N. Rodríguez-Mendoza., L. I. Trejo-Téllez., J. Sánchez-Escudero y J. Reta-Mendiola. 2017. Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 17: 3529-3542.
- Rodríguez M., M. N. 1997. Fertilización foliar en el cultivo del tomate en condiciones de invernadero. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Roosta, H. R., and Hamidpour, M. 2011. Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 129: 396-402.
- Roosta, H. R. and Hamidpour, M. 2013. Mineral nutrient content of tomato plants in aquaponic and hydroponic systems: effect of foliar application of some macro and micro-nutrients. *Journal of Plant Nutrition* 36: 2070-2083.
- Roosta, H. R. and Mohsenian, Y. 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae* 146: 182-191.

- Rosadi, R. B., Senge, M., Suhandy, D., and Tusi, A. 2014. The effect of EC levels of nutrient solution on the growth, yield, and quality of tomatoes (*Solanum lycopersicum*) under the hydroponic system. *Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology* 2: 7-12.
- Sainju, U. M., Dris, R., and Singh, B. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment* 1: 176-183.
- Salam, M. A., Jahan, N., Hashem, S., and Rana, K. M. S. 2014. Feasibility of tomato production in aquaponic system using different substrates. *Progressive Agriculture* 25: 54-62.
- SAS, Statistical Analysis System. 2010. SAS Institute Inc. SAS/STAT® 9.3. User's Guide Cary, NC: SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. and Lovatelli, A. 2014. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 589 p.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. *In: Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC. Lunteren, Wageningen. The Netherlands.* pp: 633-650.
- Tigist, M., Workneh, T. S. and Woldetsadik, K. 2013. Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology* 50: 477-486.
- Trejo-Téllez, L. I., Rodríguez-Mendoza, M.N., Alcántar-González, G. and Gómez-Merino, F.C. 2004. Micronutrient foliar fertilization increases quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) in alkaline soils. *Acta Horticulturae (ISHS)* 729: 301-306
- Turhan, A., and Şeniz, V. 2009. Estimation of certain chemical constituents of fruits of selected tomato genotypes grown in Turkey. *African Journal of Agricultural Research* 4: 1086-1092.
- Tyson, R. V., Simonne E. H., Treadwell D. D., White J. M. and Simonne A. 2008. Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience* 43: 719-724.

- Wu, M. and Kubota, C. 2008. Effects of high electrical conductivity of nutrient solution and its application timing on lycopene, chlorophyll and sugar concentrations of hydroponic tomatoes during ripening. *Scientia Horticulturae* 116: 122-129.
- Yurtseven, E., Kesmez, G. D. and Ünlükara, A. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central Anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). *Agricultural Water Management* 78: 128-135.

Capítulo III. Análisis económico de la producción de tilapia y tomate en un sistema acuapónico a escala familiar

Maciel Reyes-Flores¹, Manuel Sandoval-Villa^{1§}, Nieves Rodríguez-Mendoza¹, Libia I. Trejo-Téllez¹, Julio Sánchez-Escudero¹ y Juan Reta-Mendiola²

¹Colegio de Postgraduados- Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. ²Colegio de Postgraduados- Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz, km 88.5. C. P. 91690. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz.

[§]Autor para correspondencia: msandoval@colpos.mx.

Resumen

La acuaponía está diseñada para producir peces y plantas dentro de un sistema de circuito cerrado. Los desechos metabólicos de los peces, principalmente nitrógeno, proporcionan nutrientes para el crecimiento vegetal. Se realizó una evaluación económica de la producción utilizando el sistema acuapónico Home Food Production Systems de la empresa Nelson and Pade®. Se consideraron los diferentes costos operativos destinados a la compra de peces, alimento, costo de electricidad, de agua, de plántulas de jitomate, la mano de obra y el mantenimiento. En este artículo se presenta un análisis de flujo de efectivo de un sistema de acuaponía con cultivos de tilapia y la producción de tomate que utiliza datos recabados de la experiencia en el módulo acuapónico del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. Se determinó que los productos obtenidos, tilapia y tomate son fuentes de ingresos insuficientes para compensar los costos cuando funciona como un sistema con fines de lucro, esto debido a la inversión inicial en el sistema acuapónico e invernadero. Sin embargo, es posible alcanzar la rentabilidad en acuaponía. Un posible escenario es la fabricación del sistema acuapónico e invernadero rústico con materiales más económicos. Incluso, un proyecto acuapónico podría prescindir del invernadero, dependiendo de la zona donde se desearía implementar y con ello obtener mejores beneficios. Antes de iniciar una operación acuapónica se debe realizar un análisis y planificación para lograr que la actividad sea rentable o buscar las maneras para aumentar el margen de la rentabilidad.

Palabras clave: rentabilidad, autoconsumo, sostenibilidad, combate a la pobreza.

Abstract

Aquaponics is designed to produce fish and plants within a closed circuit system. Metabolic wastes from fish, provide nutrients for plant growth, mainly nitrogen. An economic evaluation of the production was carried out using the Home Food Production Systems aquaponics system of the company Nelson and Pade[®]. The different operating costs were considered for the purchase of fish, food, cost of electricity, water, tomato seedlings, labor and maintenance. This article presents a cash flow analysis of an aquaponics system with tilapia culture and tomato production using data collected from the experience in the aquaponics module of the “Colegio de Postgraduados”, Campus Montecillo, Mexico. It was determined that the products obtained, tilapia and tomato are sources of insufficient income to offset the costs when operating as a system for profit, this due to the initial investment in the aquaponics system and greenhouse. However, it is possible to achieve profitability in aquaponics. A possible scenario is the manufacture of the aquaponics system and rustic greenhouse with cheaper materials. Even an aquaponics project could do without the greenhouse, depending on the area where it would be desirable to implement and thus obtain better benefits. Before starting an aquaponics operation, an analysis and planning must be carried out to make the activity profitable or to look for ways to increase the margin of profitability.

Key words: profitability, self-consumption, sustainability, fight against poverty.

Introducción

La acuaponía, por su doble propósito, podría ser una solución sostenible en algunos países en donde el suministro de pescado y verduras es bajo (Bosma *et al.*, 2017); sin embargo, todavía presenta desafíos y problemas económicos (Engle, 2015). Al respecto, Love *et al.* (2015), al evaluar 257 empresas de acuaponía en todo el mundo, concluyeron que la mayoría de las pequeñas empresas de acuaponía sufrieron pérdidas. En estos sistemas raramente discuten los aspectos financieros y cuando ocurre solo se examinan los costos o los ingresos (Goodman, 2011).

Por otro lado, con una gran cantidad de sistemas acuapónicos comerciales disponibles, es necesario realizar una cuidadosa planificación financiera para garantizar el éxito del negocio. Dicha planificación implica el uso de herramientas y análisis económicos para comprender a fondo las potenciales fortalezas y debilidades financieras de una empresa (Engle, 2012).

Sin embargo, Heidemann (2015a, 2015b) reporta casos de estudios que utilizan datos de empresas en funcionamiento. Consideran los costos totales para obtener los indicadores económicos; el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) y estos son positivos. Además, dichos empresarios insisten en la construcción de los sistemas acuapónicos y no comprarlos a empresas comerciales.

Es importante que los interesados en la acuaponía conozcan algunas de las variables económicas que son de utilidad en la evaluación y toma decisiones de lo que dependerá la aprobación o cancelación de la inversión.

Los indicadores económicos más utilizados para evaluar la rentabilidad de un proyecto son: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), periodo de la recuperación de la inversión y la relación beneficio: costo (RBC). El VAN es la suma de los valores presente de los flujos netos experimentados en un proyecto durante un período de tiempo (Heidemann, 2015). Los beneficios netos de un período son los ingresos menos los costos en ese período en particular, y posteriormente se actualizan utilizando una tasa de descuento y luego se suman para la duración del proyecto.

La TIR es la tasa de rendimiento que hace que el VAN de los flujos de caja sea igual a cero (Heidemann, 2015), se puede considerar como la máxima tasa de interés que puede soportar el proyecto; que supone un retorno de la inversión a tasas de interés altos. El VAN y la TIR se utilizan a menudo para determinar el atractivo de una inversión o empresa comercial.

La RBC se define como la razón entre la suma de los ingresos y los egresos generados por el proyecto en un período específico. Es un indicador de la rentabilidad de una inversión: indica las

ganancias, cuando es mayor que 1, que se obtendrán, cuando la RBC es inferior a 1, no se recomienda iniciar un proyecto ya que se obtendrían pérdidas porque los costos son mayores que los ingresos (Bosma *et al.*, 2017).

El periodo de recuperación de la inversión (PRI) es el número de años hasta que el flujo de efectivo acumulado sea positivo (Bosma *et al.*, 2017). Es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su inversión inicial. Por su facilidad de cálculo y aplicación, el PRI es considerado un indicador que mide tanto la liquidez del proyecto como también el riesgo relativo pues permite anticipar los eventos en el corto plazo. Se obtiene restando a la inversión inicial el saldo del flujo de fondos hasta que se hace positivo (Vaquiro, 2013).

En este documento analizamos los indicadores económicos para evaluar la viabilidad financiera de una inversión en un sistema de acuaponía familiar a pequeña escala.

Materiales y métodos

Para determinar la viabilidad económica de la acuaponía se instaló en un invernadero de 72 m², en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, el sistema acuapónico Home Food Production Systems) de Nelson and Pade[®].

El análisis de costos e ingresos se utilizaron para desarrollar flujos de efectivo para la producción de tilapia y la producción de tomate. Además, se desarrollaron flujos de efectivo para dos escenarios adicionales de producción acuapónicas que presentan la misma combinación. Los flujos de efectivo se desarrollaron para los tres escenarios con periodos de amortización calculados para cada inversión de capital inicial.

Costos fijos y variables

Se realizó un análisis de costos generales asociados con la producción acuapónica. En el valor de costo fijo utilizado se consideró la depreciación de los activos fijos, en este caso el invernadero y

el sistema acuapónico. Se calculó por el método de depreciación lineal sin considerar valor de rescate (Arboleda, 2014).

En el sistema acuapónico para autoconsumo se consideraron los siguientes costos: el costo de los peces, el alimento balanceado para peces, la energía eléctrica, la cantidad de agua, la adquisición de plántulas, la mano de obra y el mantenimiento. Se calcularon los costos fijos y variables y luego se combinaron para determinar el costo anual total para la construcción y el funcionamiento del sistema acuapónico.

El sistema acuapónico

El sistema consta de tres componentes principales: cría de peces, eliminación de sólidos para el tratamiento del agua (dos clarificadores, dos tanques de filtración y un tanque de desgasificación) y tinas de producción de vegetales hidropónicos (Figura 8). El volumen total de agua del sistema acuapónico fue 2855 L. Cuatro tanques de peces (200 L cada uno), dos clarificadores (86 L cada uno), dos tanques de mineralización (35 L cada uno), un desgasificador (79 L) y tres tinas hidropónicas (578 L cada una). El sistema tiene una bomba que circula el agua desde la salida de las tinas hidropónicas hacia los tanques de peces, y una bomba de aire que oxigena el agua en los tanques de peces, el tanque de desgasificación y las tinas hidropónicas.

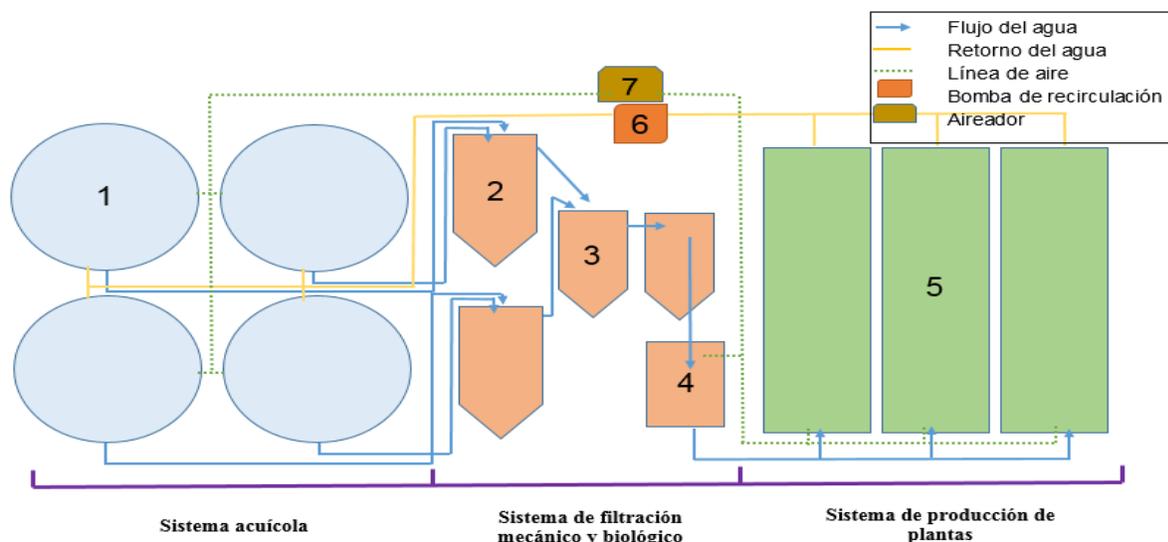


Figura 8. Sistema acuapónico Home Food Production Systems de Nelson and Pade[®]. 1) Tanques de peces, 2) clarificadores, 3) mineralizadores, 4) desgasificador, 5) tinas hidropónicas, 6) bomba de recirculación y 7) aireador.

El componente acuícola

La tasa de mortalidad se presentó al 4 % para tres etapas de desarrollo a lo largo del ciclo de producción, pre-engorda, engorda 1 y engorda 2. La biomasa inicial de tilapia fue manejada de acuerdo a un solo tamaño, peces de aproximadamente 35 g. La densidad de población fue de 50 tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) por tanque. Los peces se alimentaron tres veces por día *ad libitum* con alimento balanceado (NutripecPurina[®]) con 44% de proteína y tamaño de pellet de 1.5 mm. Se asumió que el período a cosecha duraba 33 semanas para obtener peces de 560 g.

El componente hidropónico

Esta proyección financiera considera una combinación de producción de tilapia con producción de jitomate. Las plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) var. Cid se trasplantaron a los 35 días después de la siembra y se adquirieron con un productor local. Se colocaron 54 plántulas (18

plántulas por tina) de tomate en las tinas hidropónicas sobre placas de poliestireno, de 3.5 cm de grosor. Se colocaron 18 plantas en 2.2 m². Se utilizó hule espuma en la base de la planta para sostenerse sobre la placa.

Se obtuvieron dos ciclos de seis meses, cada uno con 54 plantas de jitomate. El ciclo de cultivo de trasplante a cosecha fue de 150 días. Para el rendimiento de frutos se consideró el peso promedio de cuatro racimos por planta. Esto último, para limitar la altura de planta por la alta densidad.

Evaluación económica

Para obtener la rentabilidad del proyecto se calculó el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), periodo de recuperación de la inversión (PRI) y la relación beneficio: costo (RBC) para la duración del proyecto que para el presente caso fue de 10 años.

A continuación se presentan los cálculos para los indicadores económicos.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - C_t}{(1 + i)^t} - I_0$$

Dónde VAN= valor actual neto; Y_t= ingresos obtenidos en el año t; C_t= costo en el año t; I₀= inversión en el año cero; i= tasa de descuento.

La TIR significa la recuperación del dinero invertido y además con utilidades iguales a su porcentaje. Es la tasa de rendimiento que hace que el VAN de los flujos de efectivo sea igual a cero.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - C_t}{(1 + i)^t} - I_0 = 0$$

Para calcular el PRI de la inversión se asumió que el flujo de efectivo fue igual todos los años.

$$PRI = \frac{I_0}{F}$$

Dónde I₀= inversión inicial del Proyecto; F= valor de flujos de efectivo.

La RBC es el cociente de la división de los ingresos actualizados entre los costos actualizados:

$$RBC = \frac{Y}{C}$$

Donde Y= ingresos actualizados; C= costos actualizados.

Análisis de ingresos

Para determinar los ingresos y para propósitos del estudio se consideró que los peces y frutos de tomate producidos en el sistema serían comprados por los consumidores. Es necesario conocer cuál sería el precio comercial al menudeo de tener que adquirirlos en el mercado local. El Consejo Nacional de Evaluación de la política de Desarrollo Social (CONEVAL), quien mide la pobreza en México, muestra en la canasta alimentaria rural de septiembre de 2017; que el precio del tomate fue de \$28 kg y \$ 52 kg de pescado.

Resultados y discusión

Análisis de costos

El costo total de capital incluyó el costo del sistema acuapónico Home Food Producción Systems y el costo del invernadero (Cuadro 6).

Cuadro 6. Costo de inversión de los materiales utilizados en el proyecto acuapónico y la vida útil considerada para la depreciación.

Concepto	Costo	Vida útil (años)
Sistema acuapónico	\$56 600.00	20
Tinas acuícolas		
Filtros y tinas hidropónicas		
Equipo de acuaponía		
Bomba de recirculación	\$5600	10
Aireador	\$2800	
Invernadero	\$24 480.00	
Estructura	\$18 000	30
Plástico	\$6480	3

El costo variable total para el sistema acuapónico incluye el costo de peces, alimento para peces, energía eléctrica, agua y plántulas de tomate. Los costos variables ascendieron a \$5 938.00. Las variables que más contribuyeron a los costos totales fueron los peces, alimento y energía eléctrica. Los costos variables restantes se pueden revisar en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Costos variables del sistema acuapónico en un año de operación.

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo anual
Costos variables				\$5938
Peces	Piezas	200	\$3.00	\$1200
Alimento balanceado para peces	kg	313	\$9.50	\$2977
Energía eléctrica	kW h	2628	\$0.58 [§]	\$1524
Agua	m ³	16.425	\$4.6	\$75
Plántulas	Piezas	108	\$1.5	\$162
Costo fijo				\$4560
Mano de obra	h	182.5	\$18.75	\$3421
Mantenimiento	% ^º	-	-	\$1139
Costo de producción				\$10 498[¥]

[§] Tarifa 9-CU (2016-2017) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2017); ^º 2 % del invernadero y 1 % del sistema acuapónico. [¥] Para fines de este proyecto se hizo la suposición simplificada que los costos de operación serían constantes durante la totalidad del periodo analizado.

Análisis de ingresos

Se realizaron dos ciclos de cultivo de peces de 6 meses cada uno. Se sembraron 200 tilapias por ciclo con una tasa de mortalidad final del 4 %. De la elección de la especie de peces y el tamaño del componente acuícola dependerá la viabilidad económica de un sistema de acuaponía. Se obtuvieron 215 kg de peces de 560 g de peso (Cuadro 8).

En el componente hidropónico se trasplantaron 108 plantas y se cosecharon cuatro racimos de tomate con un peso promedio por racimo de 500 g. Al año se obtuvieron 162 kg (Cuadro 8). Los nutrimentos generados por el alimento de los peces no son suficientes para la producción de jitomate (Reyes-Flores *et al.*, 2016); debido a la alta demanda nutrimental del cultivo; lo anterior, ocasiona que el rendimiento sea menor afectando las finanzas del proyecto.

Cuadro 8. Ingresos anuales de la producción acuapónica en el sistema Home Food Production Systems.

Cultivo	Cantidad (kg)	Precio (\$)	Ingreso total (\$)
Peces	215	52	11 180
Tomate	162	28	4536
Total			15 716

La rentabilidad del sistema acuapónico Home Food Production Systems

El costo operativo anual del proyecto fue de \$10 498 y se mantiene constante en los siguientes años. El costo de la mano de obra (32.5 %) representa, generalmente, el costo operativo más alto (Bosma *et al.*, 2017); junto con la alimentación (28.3 %) para esta evaluación.

Los ingresos se originaron de las ventas de tilapias y tomate. La RBC supone que todos los productos cosechados se venden. En la operación de un año se obtuvieron \$15 716 de los cuales \$11 180 por la venta de peces y \$4 536 por jitomate.

La proyección financiera del proyecto acuapónico para 10 años, tiene un VAN estimado negativo de -\$37 962, una TIR de 0.16 % y una RBC de 0.77. El periodo de recuperación es de 18.5 años. La VAN resultó negativa debido al elevado costo de la amortización de la inversión ya que el costo del sistema de acuaponía y el invernadero resultaron demasiado costosos para la producción obtenida. Por lo tanto, la inversión producirá ganancias por debajo de la rentabilidad exigida.

Escenarios posibles para incrementar la rentabilidad

Una alternativa para aumentar el VAN es la construcción del sistema acuapónico e invernadero con materiales disponibles y económicos. Suponiendo un escenario en dónde el costo de fabricación del sistema de acuaponía es de \$13 560 y el de construcción del invernadero rustico de \$10,400. El VAN resultaría en \$8941, la TIR se ubica en 14.32 %, la RBC de 1.09 y el periodo

de recuperación de 6.5 años. En esta proyección la amortización disminuiría a \$ 1309 anuales con un flujo de efectivo positivo de \$6 013.

Otra opción es prescindir del invernadero; con esto, los indicadores son más favorables. El VAN sería de \$21 818, la TIR de 32.3 %, con un periodo de recuperación de 3.9 años y la RBC de 1.26. La amortización se reduciría a \$789 al año y el flujo incrementaría a \$6 221. En todos los escenarios los costos operativos son iguales, únicamente cambia los costos fijos y la depreciación. Estas evaluaciones económicas muestran mejores expectativas con respecto a la primera e incluyen la depreciación en los costos de producción.

En producciones acuapónicas comerciales en donde los sistemas son construidos y no comprados se han obtenidos buenos resultados. Según Heidemann (2015a, b) el VAN para estas empresas oscila de \$USD 128 072 a \$USD 181 972 y la TIR de 41.8 % a 50.9 % dependiendo del tamaño del sistema acuapónico.

Las cifras financieras de un sistema acuapónico muestran importantes costos de puesta en marcha y operación. El tiempo para que el sistema desarrolle niveles adecuados de nutrientes y para que las plantas y los peces sean comerciales es largo, antes de que pueda comenzar la cosecha. Por lo tanto, no se generarán ingresos durante bastante tiempo. Esto puede causar problemas graves de flujo de efectivo porque se continúa incurriendo en gastos operativos sin generar ingresos y eso puede ocasionar la quiebra temprana de la empresa. Todos estos problemas, y los riesgos inherentes involucrados en la producción acuapónica, deben ser considerados; y todos los problemas potenciales deben tenerse en cuenta en el plan financiero para un negocio de acuaponía comercial o de autoconsumo (Heidemann, 2015b).

Conclusiones

Un proyecto de acuaponía con tilapia y tomate no es factible dada la alta inversión inicial para la adquisición del sistema acuapónico y un invernadero. Si el sistema acuapónico es construido con materiales de menor costo de inversión, es probable que éste pueda producir ganancias económicas y ser exitoso; asimismo, las expectativas pueden mejorar si se producen peces y plantas de mayor valor comercial.

Literatura citada

- Arboleda V. G. 2014. Proyectos: identificación, formulación, evaluación y gerencia. Segunda edición. Alfaomega. México.
- Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., and Yin, Y. 2017. The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering* 78: 146-154.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2017. Tarifa 9-CU (2016 - 2017): tarifa de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola con cargo único. [En línea]. Disponible con actualizaciones en http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=9CU&Anio=2017&mes=9 (Revisado el 20 de noviembre de 2017).
- Consejo Nacional de Evaluación de la política de Desarrollo Social (CONEVAL). 2017 Medición de la pobreza. Evolución de las líneas de bienestar y de la canasta alimentaria. [En línea]. Disponible con actualizaciones en <http://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Lineas-de-bienestar-y-canasta-basica.aspx>. (Revisado el 20 de octubre de 2017).
- Engle, C.R., 2015. Economics of Aquaponics. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication 5006. 1-4.
- Goodman, E. R. 2011. Aquaponics: community and economic development. MS Thesis. Massachusetts Institute of Technology. 137 p.

- Love, D.C., Fry, J.P., Li Ximin Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K. and Thompson, K.E. 2015. Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture* 435: 67–74.
- Perkins, F., 1994. Discounted project assessment criteria. Practical cost benefit analysis: Basic concepts and applications. MacMillan Education Australia PTY, LTD, Sydney.
- Reyes-Flores, M., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, N., Trejo-Téllez, L. I., Sánchez-Escudero, J., y Reta-Mendiola, J. 2016. Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 17: 3529-3542.
- Engle, C. R. 2012a. Introduction to financial management of aquaculture business. SRAC No. 4400: 1-4.
- Heidemann, K. 2015a. Commercial Aquaponics Case Study #1: Economic analysis of Lily Pad Farms AEC 2015-03. University of Kentucky. [En línea] Disponible en <http://www.uky.edu/Ag/AgEcon/pubs/extaec2015-0330.pdf>. (Revisado el 11 de noviembre de 2017).
- Heidemann, K. 2015b. Commercial Aquaponics Case Study 2: Economic Analysis of Traders Hill Farms AEC 2015-04. En [línea] Disponible en <http://www.uky.edu/Ag/AgEcon/pubs/extaec2015-0330.pdf>. (Revisado el 11 de noviembre de 2017).
- Vaquiroy, C. J. D. 2013. Periodo de recuperación de la inversión (PRI). [En línea]. Disponible en http://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_mdl/pos/AN/PI/AM/10/Periodo.pdf. (Revisado el 10 de noviembre de 2017)

DISCUSIÓN GENERAL

Según Adler *et al.* (2000) el tratamiento de los efluentes de la acuicultura es importante porque el agua es un recurso limitado, y dependiendo del cuerpo de agua receptor, la masa total la carga de nutrientes de los efluentes puede contribuir a degradación ambiental. Es por eso que los sistemas acuapónicos es una opción viable como sistemas de producción de alimentos biointegrados.

El objetivo de alcanzar los rendimientos comparables en acuaponía, del capítulo I, con los que se obtienen en la hidroponía convencional no se logró con éxito. Se obtuvieron rendimientos totales en acuaponía de 1.16 kg planta⁻¹ mientras que en hidroponía fue de 2.97 kg planta⁻¹; datos que concuerdan con lo que mencionan Graber y Junge (2009), que los rendimientos en acuaponía son significativamente más bajos que en hidroponía.

Aunque pareciera que los sistemas acuapónicos con tilapia y lechuga en sistema en balsa flotantes parecen estar bien determinados (Tyson *et al.*, 2011), que es la combinación más utilizada, todavía el rendimiento depende de la densidad de peces y de la adición de fertilizantes para que el rendimiento se iguale a la hidroponía (Pantanella *et al.*, 2012). De igual manera, el cultivo de menta y albahaca también presentaron disminución en el crecimiento atribuible a la deficiencia de nutrientes en acuaponía (Roosta, 2014b).

La aspersión foliar no mostró efecto positivo en el rendimiento al aplicar 5 mg Fe L⁻¹ (0.71 kg planta⁻¹); si bien se sabe que las aplicaciones de Fe junto con el Mg, Zn y Mn, K, Cu son eficaces para contrarrestar las deficiencias de nutrientes en los cultivos de hortalizas (Fageria *et al.*, 2009), en esta investigación no se observó incremento en la producción. Sin embargo, Roosta y Hamidpour (2011) demostraron que se pueden producir rendimientos de tomate iguales a los de la hidroponía convencional cuando se aplican diferentes macro y micronutrientes por aplicación foliar.

De igual manera, el rendimiento de frutos al utilizar el agua residual de los peces para regar en sustrato fue muy bajo ($0.47 \text{ kg planta}^{-1}$). A pesar que con otros sustratos se han obtenido rendimientos superiores a lo reportado en este trabajo, de 0.68 a $1.59 \text{ kg planta}^{-1}$ (Salam *et al.*, 2014).

La cantidad de nutrientes suministrados al tomate influye en el rendimiento (Sainju *et al.*, 2003) y en acuaponía se puede predecir un déficit de nutrientes para las plantas cuando éstos no se añaden a la unidad hidropónica (Suhl *et al.*, 2016). Por ejemplo, el potasio tiene que ser adecuado para la producción de plantas porque la concentración liberada por los peces no es suficiente para el crecimiento. Pero también el hierro, el calcio y el fósforo son usualmente insuficientes en acuaponía y deben añadirse (Goddek *et al.*, 2015; Rakocy *et al.*, 2004a, 2006; Savidov *et al.*, 2005) aunque en la presente investigación todos los nutrientes esenciales para las plantas estuvieron muy por debajo de lo que requiere el cultivo de tomate.

En general, se sabe que la concentración de nutrientes en la acuaponía suele ser inferior a la de los sistemas hidropónicos. En los experimentos en la Estación Experimental de la Universidad de Islas Vírgenes (Rakocy *et al.*, 1992, 2004b, 2004c, 2006) se cosecharon hortalizas acuapónicas bajo los siguientes rangos de concentraciones de nutrientes: $1.8\text{-}3.0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de N-NO_3^- , $0.2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de N-NH_4^+ , $0.3\text{-}0.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de P, $11\text{-}16 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de K, $03\text{-}6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de Ca, $02\text{-}03 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ de Mg, $54\text{-}104 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Fe, $1\text{-}14 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn, $6\text{-}8 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, $05\text{-}08 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cu y $8\text{-}17 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ de B.

Poco se conoce de la calidad del fruto de tomate producido en acuaponía. Los bajas concentraciones de nutrientes en acuaponía pudieran afectar la calidad del fruto. Esto debido a que la composición mineral del tomate depende de la cantidad y el tipo de nutrientes tomados del medio de crecimiento, como el suelo, es necesario que haya una cantidad adecuada de nutrientes disponible para la producción y el contenido de nutrientes (Sainju *et al.*, 2003). Algunas de las variables que pueden modificarse a causa de la baja concentración de nutrientes es el pH y los sólidos solubles totales (SST) del fruto (Yurtseven *et al.*, 2005). En la presente investigación, los diferentes tratamientos acuapónicos no afectaron los SST, la acidez titulable (AT), relación

SST/AT y la concentración de licopeno pero si hubo una ligera diferencia en el pH del jugo de tomate; aunque es poco probable que los consumidores puedan percibir esta diferencia y, por lo tanto, no puede afirmarse realmente como una ventaja o una desventaja para los sistemas acuapónicos (Schmautz *et al.*, 2016) pero si por el lado que estas características únicamente se obtiene con los nutrientes que produce la acuaponía.

Con respecto a la viabilidad económica de las operaciones acuapónicas, un estudio reciente concluye que la acuaponía sólo es rentable en las regiones del mundo donde el pescado y los vegetales son caros (Bosma *et al.*, 2017). Sin embargo, es posible hacer de la acuaponía rentable; como los casos de éxito que informa Heidemann (2015a, 2015b, 2015c) de empresas en funcionamiento, que arrojaron indicadores económicos positivos dependiendo del tamaño del sistema acuapónico y de las especies vegetales cultivadas ya que la especie piscícola fue la misma, tilapia. El valor actual neto (VAN) fue de \$USD 128 072, \$USD 181 972 y \$USD 87 797 y la tasa interna de retorno (TIR) fue de 41.8%, 50.9% y 71.2%, respectivamente. Esta última información, contradice a la expuesto por Bosma *et al.* (2017); mostrando así el potencial de rentabilidad de la acuaponía, siempre y cuando las instalaciones sean construidas y no adquiridas a empresas comerciales. A escalas pequeñas es conveniente disminuir los costos fijos como el sistema acuapónico y el invernadero, si es que se requiere, y así las cifras financieras mejoran ofreciendo mayores probabilidades de éxito a corto plazo.

Por otro lado, la combinación de la producción acuícola de bagre o tilapia con la producción de tomate hidropónico (Holliman, 2006), la producción de perca gigante con la producción de lechuga (Rupasinghe y Kennedy, 2010) muestran resultados promisorios en esta área mejorando las perspectivas financieras de las producciones acuapónicas.

CONCLUSIONES GENERALES

La acuaponía no es tan productiva como lo es la hidroponía convencional. Los resultados del experimento indicaron que el rendimiento y crecimiento del cultivo de jitomate en sistemas acuapónicos, son menores a los que se obtienen en la hidroponía. No obstante, la acuaponía provee nutrimentos para obtener producción de tomate sin utilizar fertilizantes inorgánicos; además, de utilizar el efluente piscícola que es considerado como desecho en las producciones acuícolas.

Se demostró que las aplicaciones foliares de nutrimentos en concentraciones crecientes no afectaron calidad del fruto de tomate producido en acuaponía, con respecto en donde no se aplicó. La acidez titulable (AT) y la relación sólidos solubles totales SST/AT y la concentración de licopeno de los frutos de tomate fueron comparables con lo obtenido en hidroponía, excepto los SST que disminuyeron bajos las condiciones acuapónicas.

Un elemento importante de la acuaponía es la rentabilidad. Si bien se sabe, en acuaponía se puede producir una gran variedad de plantas y peces, también es importante la visión de negocio para considerar a la actividad una fuente de ingreso y no una pérdida económica. Por lo tanto, los sistemas integrados sólo serían posible cuando los productos tengan menores costos de producción que la agricultura tradicional o cuando la acuaponía obtenga más altas y más rápidas utilidades de las inversiones que la hidroponía. Un proyecto de acuaponía con tilapia y tomate es factible si la inversión es baja principalmente por la adquisición del sistema acuapónico y un invernadero construido con materiales de menor costo de inversión que puede hacer frente a los riesgos y ser exitoso.