



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA
SALUD
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA**

IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

**Evaluación de los rendimientos productivos y económicos
de dos sistemas de agro-acuicultura integrada**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA
EN ECOLOGÍA APLICADA PRESENTA**

Ocean. Ana Guadalupe Fracchia Durán

Matrícula: 2142800479

COMITÉ TUTORAL

Dr. Luis Amado Ayala Pérez
Director

M. en C. Aída del Rosario Malpica Sánchez
Codirectora

M. en C. Juan Alfredo Corbalá Bermejo
Asesor

Ciudad de México

Julio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Me siento muy agradecida de estos años intensos que viví durante la maestría. Llenos de aprendizaje y crecimiento, en todos los aspectos. Siento como si lo vivido y aprendido correspondiera a mucho más tiempo del que realmente pasó; y que la formación que tuve durante la maestría se extendiera, fusionara y unificara a una formación de vida.

Quiero agradecer al gran comité con el que tuve el gusto de trabajar, Luis Ayala, Aída Malpica y Alfredo Corbalá; por su valiosa presencia, guía y acompañamiento, durante este proyecto de maestría. Ha sido muy enriquecedor trabajar con ustedes y he recibido muchos aprendizajes a su lado.

Especialmente te quiero agradecer Aída por el apoyo y soporte que me has dado durante este tiempo, que me ha permitido continuar con el proceso de la maestría, así como me ha dado estabilidad para seguir creciendo y pasando a través de los retos que la vida trae. Haz sido un apoyo clave para mí durante todo este tiempo, ¡muchas gracias!

En mi experiencia, como Mujer, es importante que la fuerza y energía que se dedica para el aprendizaje y crecimiento profesional, se dirija de igual manera para el desarrollo de otros aspectos del ser y de la vida, como es el corazón, el amor. Me siento agradecida del compartir, convivir, aprender y crecer junto a tantos seres tan maravillosos y grandiosos. Y que me impulsan a seguir puliéndome constantemente. Estoy muy agradecida con Ustedes y con mi experiencia de vida!

(Ustedes saben quienes son!!!)

El Jurado asignado por la Comisión Académica de la Maestría en Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, aprobó la Idónea Comunicación de Resultados titulada:

**EVALUACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS PRODUCTIVOS Y ECONÓMICOS DE
DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA**

Que presentó:

OCEAN. ANA GUADALUPE FRACCHIA DURÁN

El día 18 de julio de 2017 en la Ciudad de México para obtener el
Grado de Maestra en Ecología Aplicada

JURADO DE EXAMEN

FIRMA

GRADO Y NOMBRE (Institución)

Presidente

GRADO Y NOMBRE (Institución)

Secretario

GRADO Y NOMBRE (Institución)

Vocal

ÍNDICE

CAPÍTULO I: CALIDAD DEL AGUA DE DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA.....	10
Resumen.....	10
Abstract.....	10
Introducción	11
Antecedentes	14
Objetivo.....	16
Material y Método	16
Medición de parámetros de calidad del agua	19
Resultados.....	20
Acumulación de nutrientes.....	23
Discusión y Conclusiones.....	27
Acumulación de nutrientes.....	33
Consideraciones sobre la densidad de confinamiento de peces y su influencia en la calidad del agua	36
Bibliografía	37
CAPÍTULO II: CRECIMIENTO DE CARPAS KOI Y LECHUGAS EN DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA.....	41
Resumen.....	41
Abstract.....	41
Introducción	42
Antecedentes.....	44
Objetivo.....	46
Material y Método	46
Biometrías de las carpas	49
Medición de parámetros de calidad del agua	50
Evaluaciones para el cultivo de lechugas	51
Resultados.....	52
Lechugas.....	57
Discusión y Conclusiones.....	62
Experimento 1.....	62

Experimento 2.....	64
Consideraciones para el cultivo de lechuga	65
Bibliografía	72
CAPÍTULO III: ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE DOS SISTEMAS DE AGRO- ACUICULTURA INTEGRADA.....	76
Resumen.....	76
Abstract.....	76
Introducción	78
Antecedentes.....	80
Objetivo.....	84
Material y Método	84
Evaluaciones para el cultivo de lechugas	87
Análisis económicos.....	88
Resultados.....	91
Discusión y Conclusiones.....	98
Sistema acuapónico	98
Sistema de cultivo basado en recambios	101
Bibliografía	103
CAPÍTULO IV: RENDIMIENTOS PRODUCTIVOS DE DOS SISTEMAS DE AGRO- ACUICULTURA INTEGRADA POR UNIDAD DE ÁREA, VOLUMEN DE AGUA, Y COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	108
Resumen.....	108
Abstract.....	108
Introducción	110
Antecedentes.....	114
Objetivo.....	115
Material y Método	115
Biometrías de las carpas	117
Medición de parámetros de calidad del agua	118
Evaluaciones para el cultivo de lechugas	118
Costos de producción	120
Rendimientos productivos	122
Por unidad de volumen.....	122

Rendimientos productivos: capacidad media y máxima de cada sistema	123
Resultados	123
Discusión y Conclusiones	126
Bibliografía	131
CAPÍTULO V: SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA COMO HERRAMIENTAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL	135
Resumen	135
Abstract	135
Introducción	136
Antecedentes	138
Objetivo	144
Metodología	145
Resultados	147
Reunión con productores acuícolas	147
Reunión con el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México	148
Experiencia directa con un productor interesado en implementar acuaponia	149
Pláticas impartidas	150
Discusión y Conclusiones	153
Bibliografía	156
ANEXOS	158

Índice de Figuras

Capítulo I: Calidad del agua de dos sistemas de agro-acuicultura integrada

Figura		Página
1	Concentración de amonio no ionizado (NH_3) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	19
2	Concentración de nitritos (NO_2^{-1}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	20
3	Concentración de nitrato (NO_3^{-1}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	21
4	Concentración de fosfato (PO_4^{-3}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	22
5	Concentración de sulfato (SO_4^{-2}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	22
6	Concentración de óxido de potasio (K_2O) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	23
7	Concentración de magnesio (Mg^{+2}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	23
8	Concentración de calcio (Ca^{+2}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales	24

Capítulo II: Crecimiento de carpas koi y lechugas en dos sistemas de agro-acuicultura integrada

Figura		Página
1	Incremento de peso en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental	54
2	Incremento de la longitud total y estándar en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental	54
3	Incremento de la longitud dorso-ventral y del grosor en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental	55

Índice de Tablas

Capítulo I: Calidad del agua de dos sistemas de agro-acuicultura integrada

Tabla		Página
1	Promedio, máximos y mínimos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto para los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	18
2	Macronutrientes acumulados en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	25

Capítulo II: Crecimiento de carpas koi y lechugas en dos sistemas de agro-acuicultura integrada

Tabla		Página
1	Incremento en peso, FCA y sobrevivencia de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	52
2	Incremento en longitud total de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)...	52
3	Incremento en longitud estándar de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	52
4	Promedios, máximos y mínimos de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, amonio y nitritos para los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	56
5	Macronutrientes acumulados en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar)	57
6	Parámetros físicos de suelo de Milpa Alta. *Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra <i>et al.</i> (2013)	58
7	Parámetros químicos del suelo de Milpa Alta. *Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra <i>et al.</i> (2013)	58
8	Parámetros físicos del humus. *Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra <i>et al.</i> (2013)	59
9	Parámetros químicos del humus. *Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra <i>et al.</i> (2013)	59

Capítulo III: Análisis costo beneficio de dos sistemas de agro-acuicultura integrada

Tabla		Página
1	Precios de venta (al mayoreo y menudeo) de carpas koi en el Mercado de Peces de Morelos	87
2	Costos de inversión del Sistema Basado en Recambios	89
3	Costos de inversión del Sistema Acuapónico F5 (Nelson & Pade, Inc)	89
4	Costos de producción de los dos sistemas de agro-acuicultura integrada	90
5	Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de dos SAAI bajo condiciones experimentales	91
6	Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de dos SAAI cultivados a su capacidad media y máxima	92
7	Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de tres SAAI con potencial para realizar transferencias tecnológicas	94
8	Síntesis de los análisis económicos realizados en cinco SAAI, considerando su capacidad productiva media y precios de mayoreo	95

Capítulo IV: Rendimientos productivos de dos sistemas de agro-acuicultura integrada por unidad de área, volumen de agua, y costos de producción

Tabla		Página
1	Precios de venta (al mayoreo y menudeo) de carpas koi en el Mercado de Peces de Morelos	118
2	Rendimientos productivos de dos SAAI por unidad de volumen (m ³) y área (m ²), Índice de Valor del Agua y costos de producción derivados de los cultivos	122

Capítulo V: Sistemas de agro-acuicultura integrada como herramientas de educación ambiental

Tabla		Página
1	Uso del agua en la agricultura a escala local y nacional	137
2	Infraestructura y tecnología empleada en la Ciudad de México y a escala nacional	138
3	Algunas condiciones socioeconómicas limitantes para el desarrollo agrícola a escala local y nacional	139

CAPÍTULO I: CALIDAD DEL AGUA DE DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA

Resumen

Actualmente se requiere que el sector primario incremente sus rendimientos productivos mediante un uso eficiente de los insumos, así como minimice el impacto ambiental derivado de sus prácticas debido al contexto ambiental existente de degradación de los bienes y servicios ecosistémicos y a la necesidad de garantizar seguridad alimentaria. Los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) son aquellos donde converge la producción agrícola y acuícola a través del aprovechamiento de recursos que se pueden emplear en común, generando beneficios productivos, ambientales y socioeconómicos. En el presente trabajo se evaluó la calidad del agua para el cultivo de carpa koi y lechuga en dos SAAI: un sistema acuapónico de raíz flotante, y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación. Se monitorearon de manera diaria los parámetros de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, y semanalmente las concentraciones de amonio y nitritos, así como la acumulación de macronutrientes (nitrato, fosfato, potasio, sulfato, calcio y magnesio). En ambos SAAI, los valores promedio de calidad del agua permanecieron dentro del rango óptimo o de tolerancia para dichas especies, sin embargo el sistema acuapónico mantuvo una calidad del agua más apropiada para la integración de estos cultivos, así como una mayor acumulación de nutrientes.

Abstract

Because of world population growth rate, the necessity to ensure food security, and the global context of environmental degradation and loss of ecosystem services, it is important that the primary sector manages to increase its productive yields through an efficient use of the natural resources and other supplies, and at the same time minimizes the environmental impact of its activities. The integrated agro-aquaculture systems (SAAI) are those where the aquaculture and agriculture practices converge through the mutual use of resources, generating and achieving productive, environmental and social-economic benefits. In the present study, water quality was evaluated for the cultivation of koi carp and lettuce in two different SAAI: a raft aquaponics system, and a system that relies on water exchange for irrigation. Temperature, pH, dissolved oxygen and electrical conductivity were monitored daily, whereas ammonium, nitrite and macronutrients such as nitrate, phosphate, potassium, sulphate, calcium and magnesium were monitored weekly. Both SAAI maintained an adequate water quality for the culture of these species, but throughout the experiment, the aquaponic system had a better and more stable water quality and achieved more nutrient accumulation as well.

Introducción

Actualmente la acuicultura es indispensable en el abastecimiento de alimentos para la población mundial, siendo el sector de producción de alimentos con mayor crecimiento (Dediu *et al.* 2012). Desde 1970 ha presentado una tasa promedio anual de crecimiento del 8.9%, mientras que para el mismo periodo de tiempo, la pesca y ganadería han presentado una tasa de crecimiento promedio de 1.2% y 2.8% respectivamente (FAO 2004). En el 2012, este sector participó con el 42.2% del total del abastecimiento de peces a nivel mundial (FAO 2014^a).

En México la acuicultura también ha presentado una rápida tasa de crecimiento. En el periodo 2004- 2006, alcanzó el décimo lugar dentro de los países con mayor tasa de crecimiento en este sector, con un incremento promedio anual de 23.3% (FAO 2008). Por otro lado, desde el punto de vista productivo, en 2007 México fue el décimo-noveno país con mayor participación acuícola en el contexto mundial. Dentro de la producción de camarón cultivado, para ese mismo año, fue el séptimo país productor (CONAPESCA 2010).

Sin embargo, la acuicultura, bajo las actuales prácticas dominantes, ha generado una serie de problemáticas ambientales, entre las que sobresale, en lo referente al recurso agua, su uso desmedido y contaminación debido a los altos niveles de recambios que se realizan en esta actividad productiva, seguidos de su descarga sin tratamiento. Ejemplo de ello es el volumen de recambios de agua que necesita una granja, dependiendo de su tamaño, puede llegar a varios cientos de metros cúbicos por día, impactando así a los cuerpos hídricos receptores, deteriorando la calidad del agua, e inclusive eutrofizándolos (De Schryver *et al.* 2008).

En la escala mundial, aproximadamente el 70% del gasto de agua dulce es realizada por el sector primario mientras que en México, dicha extracción corresponde al 77% (AQUASTAT 2012).

Aunque no se cuentan con datos precisos de la participación de la acuicultura en dicha extracción, se ha reportado que este sector sobresale en la tasa de gasto de agua por tonelada de producto cosechado, cuando se compara con otras actividades del sector primario, secundario y terciario (Yeo *et al.* 2004). Por ejemplo actualmente es común encontrar sistemas de cultivo donde el uso de agua es poco eficiente, y por kilogramo de producto cosechado se usan de 45 hasta 53.6 m³. En comparación, los sistemas intensivos de recirculación pueden utilizar 0.5 m³ o volúmenes menores por kilogramo cosechado (considerando el agua que se tiene que abastecer durante todo el ciclo de cultivo por las pérdidas por evaporación o por los recambios de agua necesarios para la limpieza de los biofiltros). La diferencia entre los volúmenes de agua empleados durante la producción acuícola está relacionada con las estrategias productivas utilizadas para mantener la calidad del agua de los cultivos y la intensidad productiva que dichos sistemas de cultivo pueden sostener. Es por ello que mantener una buena calidad del agua y optimizar este recurso, es un tema central desde un punto de vista productivo, ambiental, económico y social (Verdegem *et al.* 2006; Wilson 2005; Timmons *et al.* 2009).

Los sistemas de agro-acuicultura integrada (SAAI) son aquellos donde se converge la producción agrícola y acuícola a través del aprovechamiento de recursos que se pueden emplear en común, como el agua, con beneficios productivos para ambas actividades. Los SAAI presentan una serie de beneficios socioeconómicos y ambientales al diversificar la producción, optimizar y hacer un uso eficiente de los insumos (como el agua y alimento empleado en la acuicultura), aprovechar los productos de desecho para aumentar la producción (en vez de verterlos sin tratamiento), y disminuir la aplicación de fertilizantes inorgánicos en la agricultura ya que los efluentes y lodos acuícolas son ricos en nutrientes. Estos sistemas se pueden implementar en diferentes contextos productivos, desde cultivos extensivos, semi-intensivos o

intensivos. Algunos ejemplos de esta integración son el empleo de los efluentes acuícolas que contienen nutrientes disueltos para el riego de hortalizas (Wang *et al.* 2011), el composteo de los lodos que se producen en la acuicultura para su posterior aplicación como fertilizantes (Janes *et al.* 2005), y la acuaponía. La acuaponía es un sistema de cultivo intensivo y con mayor tecnificación, donde se integra la acuicultura con la hidroponía a través de la recirculación del agua, aprovechando así los nutrientes provenientes del cultivo de especies acuáticas para la fertirrigación, en vez de depender totalmente de una fertilización inorgánica (Rakocy *et al.* 2006; Dediu *et al.* 2012). La acuaponía permite sostener producciones mayores a 120 kg/m³ de peces con una buena calidad del agua si se cuenta con sistemas de filtración y oxigenación eficientes, lo cual demuestra su potencial productivo, el cual a su vez genera beneficios socioeconómicos (Timmons *et al.* 2009).

Existen estudios donde se demuestran las ventajas de los SAAI, en términos de rendimientos productivos, ganancias económicas, impacto social y ecológico (FAO 2004; Dey *et al.* 2006; Bakhsh 2008; Pantanella 2008; Endut *et al.* 2009; CARDI 2010; Wang *et al.* 2011; Gurung 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013). Sin embargo existen pocos estudios donde se evalúa la calidad del agua y la acumulación de macronutrientes en estos sistemas a lo largo del periodo experimental. Así mismo, no se tiene conocimiento de estudios que comparen estos parámetros de calidad del agua entre SAAI que pueden ser empleados en diferentes contextos socioeconómicos y productivos. Por lo cual en el presente trabajo se evalúa la calidad del agua (incluyendo la acumulación de macronutrientes) de un sistema acuapónico de raíz flotante, y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para el riego de hortalizas.

Antecedentes

Actualmente se requiere que el sector primario incremente sus rendimientos productivos mediante un uso eficiente de los insumos, así como minimice el impacto ambiental derivado de sus prácticas debido al contexto ambiental existente de degradación de los bienes y servicios ecosistémicos, a la par de la creciente demanda sobre los recursos como el agua y suelo, y la necesidad de garantizar seguridad alimentaria (Neori *et al.* 2004; Crab *et al.* 2007; FAO 2013).

En México, la optimización del agua por parte de este sector es indispensable ya que el país presenta un alto estrés hídrico, lo cual significa que se realizan extracciones entre el 40-80% del agua renovable existente (Gassert *et al.* 2013); esto es evidente sobretodo en el norte y centro de la república, donde importantes cuencas hidrográficas se encuentran muy o extremadamente explotadas (UNESCO 2012). En este sentido, se resalta la importancia de que estos sectores incrementen su eficiencia productiva por unidad de superficie y volúmenes de agua utilizados, así como se basen en esquemas de producción sustentables.

La producción sustentable se basa en los principios y definición del desarrollo sustentable o sostenible (la cual fue publicada por la Comisión de Brundtland en 1987 y sirvió como referencia para los documentos de Cumbre de Río de 1992), donde se busca cubrir las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias; por lo cual, las actividades productivas se deben realizar preservando los sistemas naturales (Tréllez-Solís 2004). Esto significa que debe existir un balance entre las metas productivas, económicas, ambientales y de desarrollo social, y que las propuestas se deben enfocar y adaptar de manera integral al contexto local (Jhamtani 2007; Keating y Jacobsen 2012).

Debido a esto es importante conocer el contexto productivo del país, para identificar áreas de oportunidad y estrategias necesarias para incrementar los rendimientos productivos mediante prácticas amigables con el ambiente, donde se optimice el recurso agua.

La acuicultura en el país está conformada por dos formas productivas principales: las pesquerías acuaculturales y los sistemas controlados, con porcentajes similares en la participación acuícola a nivel nacional (CONAPESCA 2011). Dentro de los sistemas controlados, en México se ha observado una relación entre el nivel de tecnificación y productividad, y la tenencia de la tierra; donde el sector privado suele presentar cultivos más intensivos que el ejidal (DeWalt *et al.* 2002). El sector rural está más enfocado a la piscicultura, sobre todo al cultivo de tilapia y carpa, sea a escala comercial o de subsistencia, y la producción se caracteriza por presentar baja inversión, capitalización y rendimientos productivos (Segovia Quintero 2011). Un factor clave para incrementar la productividad es la capacitación y asistencia técnica que presenten los productores. Sin embargo, en general la acuicultura en México (a excepción de la camaricultura) se caracteriza por presentar baja asistencia técnica (INEGI 2011).

En el país es común que los acuicultores rurales estén familiarizados con la agricultura, por ello los SAAI son una alternativa interesante para aumentar la eficiencia productiva y optimizar los insumos, sobre todo cuando existe baja asistencia técnica y rendimientos productivos.

El presente trabajo se enfoca en evaluar la calidad de agua de dos SAAI que pueden ser dirigidos a diferentes contextos socioeconómicos y productivos. El sistema de cultivo basado en recambios podría ser empleado en sistemas de cultivo ya establecidos que no cuenten con infraestructura adecuada para la recirculación del agua, o en contextos socioeconómicos cuya capacidad de inversión y dominio técnico sea menor a lo requerido para mantener sistemas

acuapónicos. En este método de cultivo, el agua de recambios, en vez de ser desechada, se puede dirigir para el cultivo agrícola directamente en suelo. Estos sistemas podrían representar un primer eslabón en la intensificación de los cultivos, en el reuso de productos de desecho e incremento de la eficiencia productiva por unidad de superficie y volúmenes de agua empleados. Esto da oportunidad a que con el tiempo sea más viable la implementación de técnicas más intensivas y que requieren mayor dominio técnico, como es la acuaponía. Los sistemas acuapónicos se pueden dirigir a nuevos proyectos productivos, o aquellos que cuenten con la infraestructura adecuada (o puedan invertir en ella), así como puedan sostener técnicamente la capacidad productiva de dichos sistemas.

Objetivo

Evaluar la calidad del agua de dos sistemas de agro-acuicultura integrada dirigidos al cultivo de carpa koi y lechuga.

Material y Método

El desarrollo experimental se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC) de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.

El Sistema Acuapónico (SA) es un sistema de tipo raíz flotante producido por Nelson y Pade, Inc. (modelo F5). Dicho sistema cuenta con un tanque para el cultivo de peces de 110 galones (416.4 litros), un sistema de filtros (sedimentador, mineralizador y desgasificador), y dos camas

para la producción de hortalizas de 3 x 5 pies (91.4 x 152.4 cm), con una capacidad de 90 plantas. Tanto el sedimentador como el mineralizador cuentan con una compuerta en la parte inferior para poder extraer la materia orgánica proveniente del estanque de cultivo. El agua es recirculada continuamente, con un flujo que permite que el volumen total del estanque pase por los filtros cada hora. Cuenta con sistemas de aireación en el estanque de cultivo, desgasificador y en las camas de cultivo. Su volumen total es 871 litros y tiene una capacidad máxima de cultivo de peces de 20.4 kg. El consumo eléctrico total entre la recirculación y aireación del agua es 288 watts·hr⁻¹.

El Sistema de cultivo basado en Recambios (SBR) está compuesto por un estanque circular de plástico (bebedero circular Rotoplas con capacidad de 1000 L.), que se llenó con el mismo volumen del SA. Los sedimentos se extrajeron con un sifón manual.

Se realizaron dos periodos experimentales, E1 y E2. En ambos experimentos se cultivó carpa koi con la misma densidad de confinamiento entre sistemas y bajo las mismas prácticas de alimentación. A continuación se describen las condiciones experimentales:

E1: El periodo de cultivo fue de 18 semanas, del 16 de noviembre del 2015 al 17 de marzo del 2016. Se iniciaron los cultivos con cien peces con un peso promedio de 4.46 ± 0.787 g. en el SBR y de 4.86 ± 0.94 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 446.1 y 486.1 g. respectivamente. Se otorgó alimento peletizado de 3.5 mm. de la marca Silver Cup de El Pedregal que cuenta con un mínimo de 32% proteína, 5% grasa, 5% de fibra, 5% ceniza y 12% humedad. El alimento se trituró y se proporcionó *ad libitum*, haciendo registro de la cantidad de alimento dado por día. En ambos sistemas se utilizaron termostatos sumergibles con capacidad

de mil litros (y consumo de 1,000 watts hr⁻¹) para mantener el agua a una temperatura promedio de 22°C.

- SBR: Los recambios de agua se hicieron de manera semanal principalmente para remover sólidos sedimentados. El promedio del total de agua reabastecida por evaporación y recambios fue 2.6%/día. La aireación del estanque se realizó únicamente durante la noche utilizando un soplador regenerativo de 1/16 Hp, con un consumo de 46.6 watts·hr⁻¹.
- SA: Debido a que durante el inicio del experimento, mientras se desarrollaba el biofiltro, se presentaron concentraciones de nitritos mayores a 1 m/l, se agregó sal marina para evitar problemas de mortalidad. Posteriormente se realizaron recambios de agua para remover la sal. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios fue de 2 %/día.

E2: El periodo de cultivo fue de 22 semanas, del 16 de mayo al 11 de octubre del 2016. Previo al inicio del cultivo se vaciaron ambos sistemas y volvieron a llenar con agua potable. Durante el vaciado no se realizó una limpieza de estos para mantener las poblaciones bacterianas existentes y ahorrar así el tiempo necesario para su desarrollo. Se iniciaron los cultivos con 200 peces con un peso promedio de 1.60 ± 0.58 g. en el SBR y de 1.69 ± 0.42 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 320.3 y 338 g. respectivamente. Se alimentó con alimento peletizado llamado “migaja,” el cual tiene de un tamaño menor a un milímetro de la marca Nutripec de Purina, que cuenta con un mínimo de 50% proteína y 15% grasa. La tasa de alimentación fue de 4 % biomasa al día, con un mínimo de tres raciones por día. No fue necesario utilizar termostato para mantener la temperatura dentro del intervalo óptimo para el crecimiento de la carpa. Por

deficiencia en la disponibilidad de agua en la zona experimental durante el E2, los recambios fueron menores durante este periodo. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios en los SBR y SA fueron de 1.71 y 0.78 %/día respectivamente. Debido a ello, en el SBR se mantuvo la aireación las 24 horas del día para favorecer la nitrificación en suspensión y mejorar así la calidad del agua. La aireación se llevó a cabo con tres bombas de aire de doble salida, que generaron un consumo total de 9 watts·hr⁻¹ debido a que la potencia del soplador regenerativo utilizado en el primer experimento era mayor de lo requerido.

Medición de parámetros de calidad del agua

Se realizaron mediciones diarias de pH, temperatura y conductividad eléctrica utilizando un equipo portátil HANNA modelo HI991300. Así mismo se monitoreó el oxígeno disuelto con un sensor portátil de la marca HACH modelo Sension 6. Las mediciones se realizaron aproximadamente a las 18:00 horas.

Durante el E1 y en el primer mes de cultivo, se midieron dos veces por semana los niveles de nitritos, nitratos, amonio no ionizado (o amoniaco) y fosfatos. Posteriormente y también durante el E2 se midieron los parámetros de manera semanal. Adicionalmente se monitorearon de manera semanal, otros nutrientes de importancia agrícola como potasio, calcio, magnesio, y sulfato. El monitoreo de estos seis macronutrientes se consideran dentro de las mediciones de calidad del agua, por su importancia para el cultivo de las plantas superiores (Licamele 2009). Las mediciones realizaron utilizando el equipo HI 83225 Nutrient Analyses de HANNA.

Los parámetros de calidad de agua se evaluaron considerando los requerimientos de carpas koi y lechugas, como modelo experimental de un sistema de agro-acuicultura integrada.

Resultados

En ambos sistemas de agro-acuicultura integrada, los valores de temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto, permanecieron dentro del rango óptimo o de tolerancia para los cultivos de carpa koi y lechuga (**Tabla 1**). La conductividad fue adecuada para el cultivo de estas especies a pesar de que se tuvo que adicionar sal marina para evitar problemas de mortalidad en las carpas por metahemoglobinemia cuando se presentaron concentraciones altas de nitritos durante el experimento. La conductividad eléctrica en ambos sistemas fue incrementado conforme el paso del tiempo debido a la acumulación de nutrientes. La tendencia del pH fue a disminuir durante el desarrollo experimental debido al proceso de nitrificación.

Tabla 1: Promedio, máximos y mínimos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto para los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	S. Recambios E1	S. Recambios E2	S. Acuapónico E1	S. Acuapónico E2
Temperatura (°C)				
Promedio	22.27 \pm 1.23	21.54 \pm 1.51	21.37 \pm 1.44	22.59 \pm 1.70
Mínimo	19.15 \pm 0.13	18.30 \pm 0.10	16.80 \pm 0.42	19.13 \pm 0.14
Máximo	24.60 \pm 0.29	25.90 \pm 0.10	24.10 \pm 0.06	26.72 \pm 0.12
pH				
Promedio	8.51 \pm 0.34	8.36 \pm 0.28	7.83 \pm 0.21	7.69 \pm 0.27
Mínimo	7.70 \pm 0.01	7.71 \pm 0.15	7.58 \pm 0.01	7.30 \pm 0.14
Máximo	9.06 \pm 0.02	9.52 \pm 0.04	8.38 \pm 0.02	8.35 \pm 0.05
Conductividad eléctrica (mS/cm)				
Promedio	0.54 \pm 0.11	0.65 \pm 0.17	1.10 \pm 0.47	0.59 \pm 0.07
Mínimo	0.47 \pm 0.01	0.32 \pm 0.00	0.47 \pm 0.01	0.45 \pm 0.01
Máximo	0.87 \pm 0.01	0.86 \pm 0.01	2.32 \pm 0.01	0.75 \pm 0.01
Oxígeno disuelto (mg/l)				
Promedio	7.84 \pm 3.13	-	7.15 \pm 1.01	-
Mínimo	3.89 \pm 0.75	-	5.47 \pm 0.64	-
Máximo	15.39 \pm 0.96	-	9.32 \pm 0.80	-

Amonio no ionizado (amoniaco)

Para los SAAI se recomienda presentar concentraciones de amonio no ionizado menores a 1 mg/l debido a la toxicidad que este compuesto presenta en los peces. Como se muestra en la Figura 1, en general en el Sistema Acuapónico se mantuvo una concentración de amoniaco menor a 1 mg/l, con un promedio de 0.49 mg/l considerando ambos periodos experimentales. El SBR presentó un promedio de 0.77 y 0.84 mg/l en E1 y E2 respectivamente. Durante ambos experimentos se presentaron concentraciones altas de amonio no ionizado que sobrepasaron el rango óptimo. Se puede observar que la concentración de amoniaco fluctuó más en el SBR, mientras que en Sistema Acuapónico fue más estable y se mantuvo casi en su totalidad por debajo de los 0.5 mg/l.

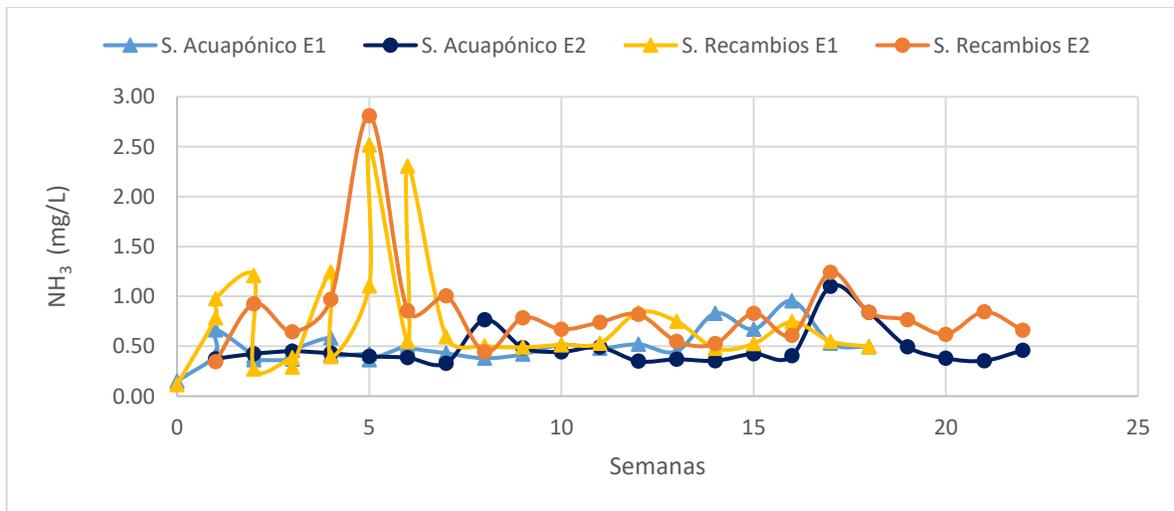


Figura 1: Concentración de amonio no ionizado (NH₃) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

Nitritos

La concentración de nitritos en el Sistema Acuapónico se mantuvo casi en totalidad por debajo de 1 mg/l, con un promedio de 0.53 y 0.32 mg/l durante el E1 y E2 respectivamente. En el SBR existieron variaciones considerables de nitritos entre el E1 y E2 (con un promedio de 0.75 y 2.86 mg/l respectivamente), debido a las condiciones y variaciones en las que se efectuaron los cultivos, el cambio que se tuvo que efectuar en el manejo técnico de estos y al efecto que esto tuvo en su funcionamiento y desarrollo. Como se muestra en la Figura 2 con la acumulación de nitritos, durante el E1 la asimilación de nitrógeno por parte de las bacterias nitrificantes empezó a dominar hasta el final del experimento, mientras que en E2 el proceso de nitrificación sobresale desde la cuarta semana. En el E2 se tuvo que adicionar sal marina para contrarrestar los efectos de este compuesto en la salud de los peces.

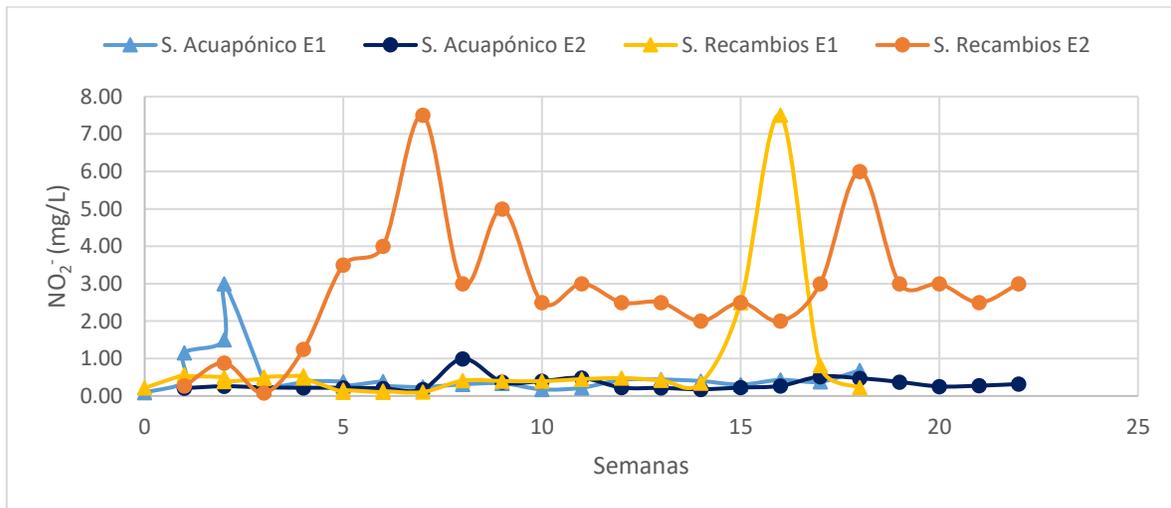


Figura 2: Concentración de nitritos (NO₂⁻¹) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

Acumulación de nutrientes

Como se muestra en las Figuras 3 a 7, el Sistema Acuapónico presentó una mayor capacidad de acumulación de nutrientes que el SBR. Esto se puede observar durante ambos periodos experimentales, para nutrientes como nitrato, fosfato, sulfato, potasio y magnesio. En el caso del calcio, se presentó una mayor acumulación en el SBR (Figura 8). Los valores promedio, máximos y mínimos de cada macronutriente en dichos sistemas de cultivo se muestran en la Tabla 2.

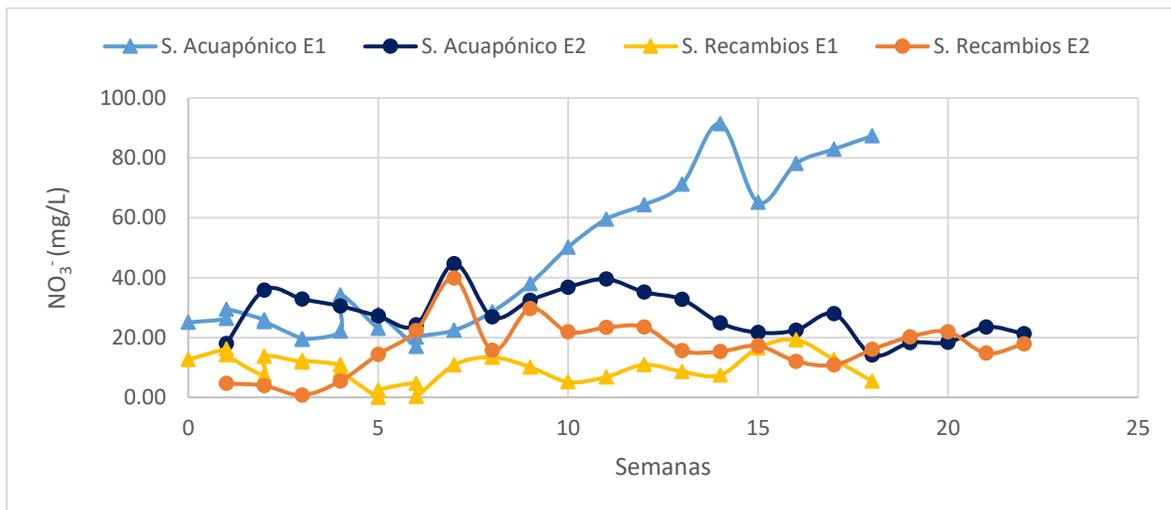


Figura 3: Concentración de nitrato (NO₃⁻) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

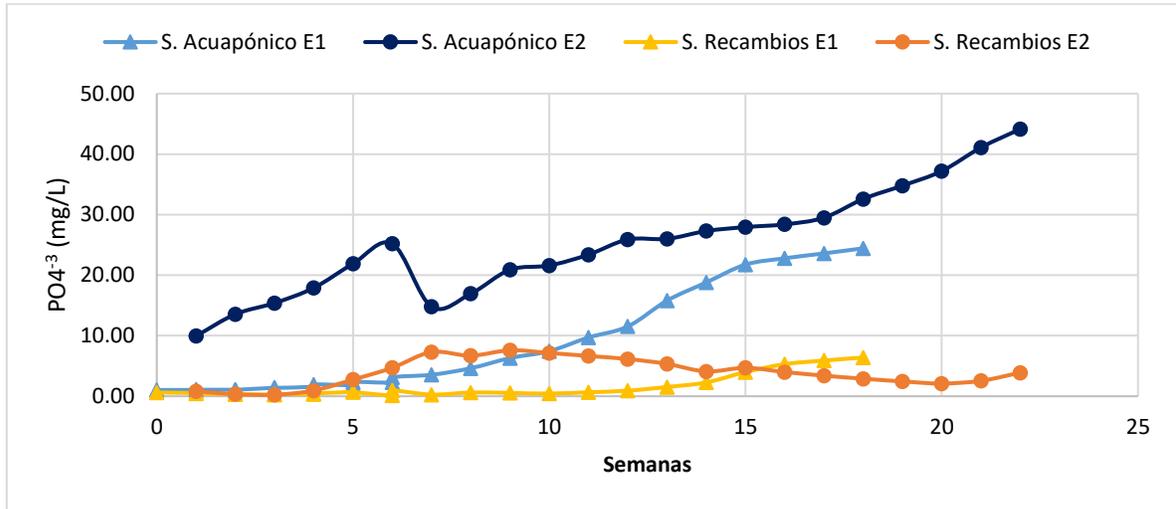


Figura 4: Concentración de fosfato (PO_4^{3-}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

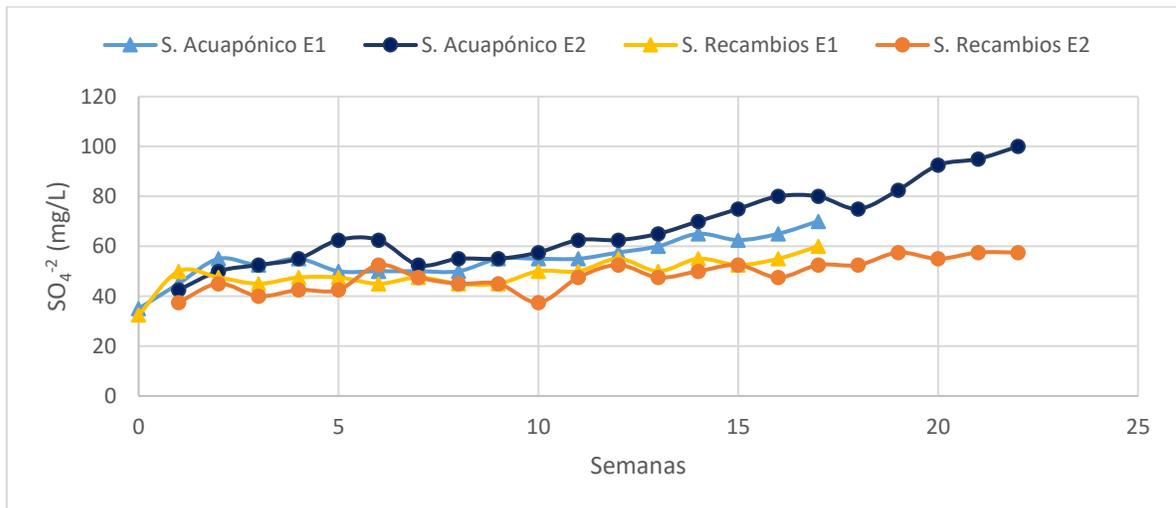


Figura 5: Concentración de sulfato (SO_4^{2-}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

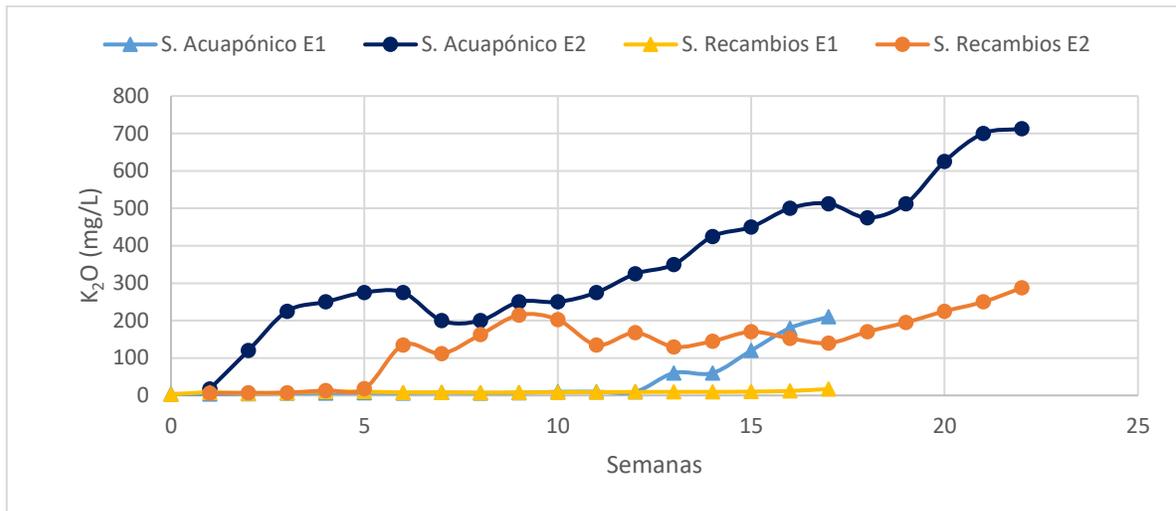


Figura 6: Concentración de óxido de potasio (K_2O) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

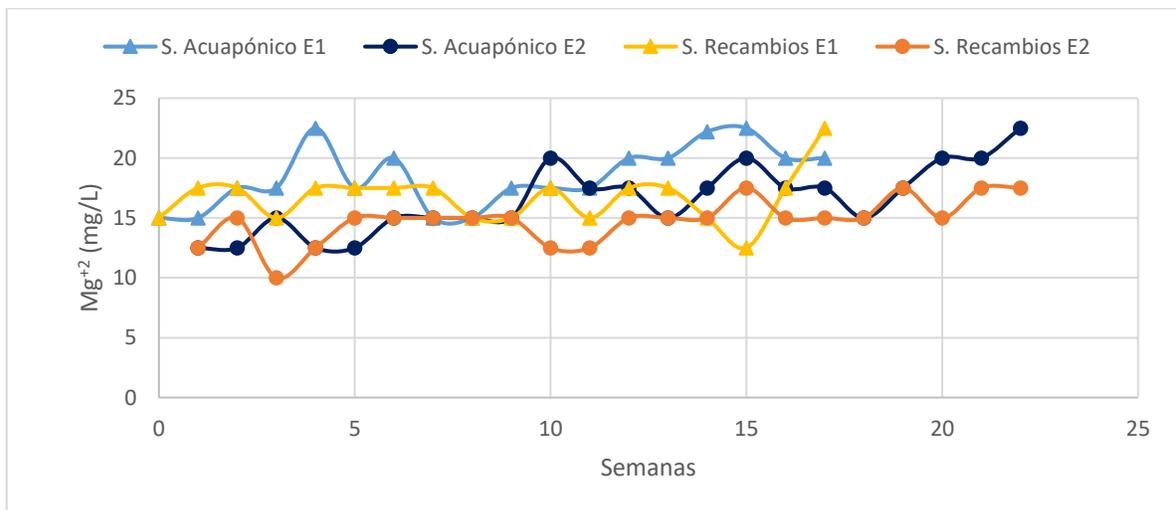


Figura 7: Concentración de magnesio (Mg^{+2}) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

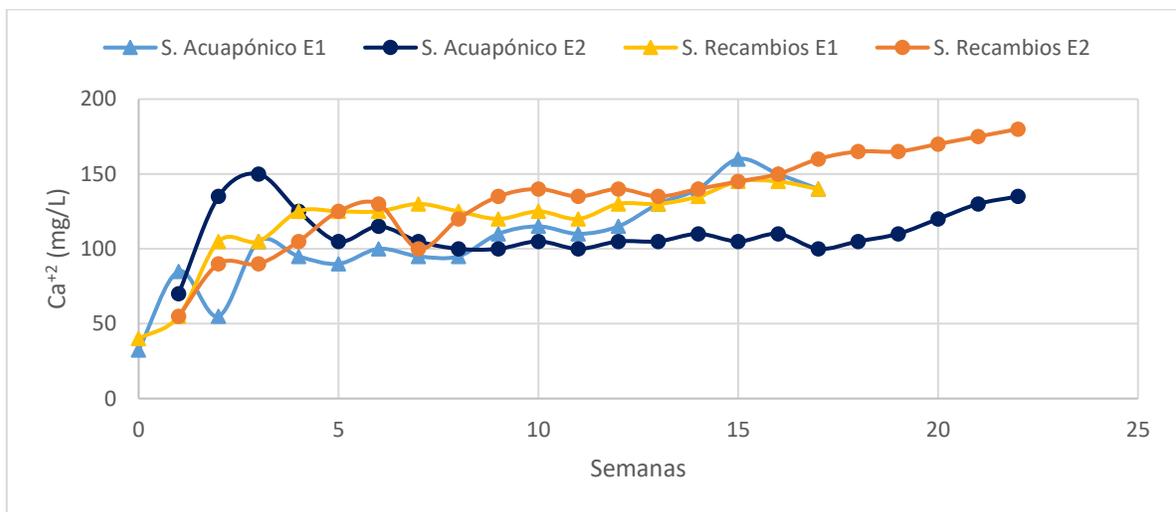


Figura 8: Concentración de calcio (Ca²⁺) en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales.

Tabla 2: Macronutrientes acumulados en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	S. Recambios E1	S. Recambios E2	S. Acuapónico E1	S. Acuapónico E2
Nitrato (mg/l)				
Promedio	9.69 \pm 4.92	16.69 \pm 8.87	42.17 \pm 24.73	27.68 \pm 7.90
Mínimo	0 \pm 0.0	0.75 \pm 1.06	17 \pm 3.11	14.15 \pm 3.89
Máximo	19.2 \pm 1.13	39.85 \pm 6.72	91.4 \pm 8.91	44.6 \pm 0.71
Fosfato (mg/l)				
Promedio	1.41 \pm 1.87	3.95 \pm 2.32	7.67 \pm 8.36	25.29 \pm 8.95
Mínimo	0.14 \pm 0.06	0.25 \pm 0.07	1.035 \pm 0.47	9.95 \pm 0.21
Máximo	6.4 \pm 0.14	7.6 \pm 0.28	24.45 \pm 0.71	44.15 \pm 0.49
Sulfato (mg/l)				
Promedio	48.89 \pm 5.89	48.41 \pm 6.15	54.86 \pm 8.11	67.5 \pm 15.66
Mínimo	32.5 \pm 3.54	37.5 \pm 3.54	35 \pm 0.0	42.5 \pm 3.54
Máximo	60 \pm 0.0	57.5 \pm 3.54	70 \pm 0.0	100 \pm 0.0
Potasio (mg/l)				
Promedio	8.98 \pm 2.83	138.5 \pm 82.15	55 \pm 83.99	360.21 \pm 183.3
Mínimo	3 \pm 0.0	6.3 \pm 0.42	3.5 \pm 0.0	17.2 \pm 0.42
Máximo	17 \pm 1.41	287.5 \pm 10.61	275 \pm 35.36	712.5 \pm 17.68
Magnesio (mg/l)				
Promedio	16.67 \pm 2.10	14.77 \pm 1.88	18.46 \pm 2.57	16.48 \pm 2.85
Mínimo	12.5 \pm 3.54	10 \pm 0.0	15 \pm 0.0	12.5 \pm 3.54
Máximo	22.5 \pm 3.54	17.5 \pm 3.54	22.5 \pm 3.54	22.5 \pm 3.54
Calcio (mg/l)				
Promedio	118.06 \pm 27.98	134.10 \pm 31.31	106.81 \pm 31.64	111.14 \pm 16.54
Mínimo	40 \pm 14.14	55 \pm 7.07	32.5 \pm 3.54	70 \pm 0.0
Máximo	145 \pm 7.07	180 \pm 0.0	160 \pm 0.0	150 \pm 28.28

Discusión y Conclusiones

El Sistema Acuapónico mantuvo una calidad del agua más apropiada para la integración de los cultivos de carpa koi y lechuga bajo las condiciones experimentales de biomasa inicial de peces, porcentaje de alimentación diario y de recambios de agua. Sin embargo, ambos sistemas pueden

sostener cultivos integrales, ya que presentaron niveles de temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, amoníaco y nitritos adecuados para el cultivo de dichas especies.

El desarrollo óptimo de la carpa koi se presenta en temperaturas entre los 18 y 24°C, y toleran temperaturas desde los 0-35°C (Watson *et al.* 2004). Como se muestra en la Tabla 1, la temperatura promedio de ambos sistemas se mantuvo dentro del rango óptimo de esta especie, mientras que las máximas y mínimas, dentro del intervalo de tolerancia. En el caso de la lechuga, la temperatura del agua óptima para su cultivo está entre los 15 y 22°C (FAO 2014^b). Es importante mantener la temperatura dentro de este rango ya que al sobrepasarlo se genera un sabor amargo en las hojas y cuando son mayores a los 26°C por varios días se desarrolla el vástago floral (Licea-Zepeda 2012).

En los sistemas de agro-acuicultura integrada, los niveles óptimos en la conductividad eléctrica normalmente están definidos por la tolerancia de las plantas que se cultiven, ya que existen especies cuya sensibilidad a este parámetro es mayor a la de los peces de agua dulce en general. Este es el caso de las lechugas las cuales requieren de conductividades eléctricas bajas, presentando una tolerancia máxima en la zona de raíces de 1.3 mS/cm cuando es cultivada en suelo (Maroto *et al.* 2000), o menores a 2 mS/cm en soluciones acuapónicas o hidropónicas (FAO 2014^b). Como se muestra en la Tabla 1, en promedio no se rebasó la conductividad recomendada para esta especie.

La concentración de oxígeno disuelto fue adecuada en ambos sistemas de cultivo ya que se mantuvo en general por encima de los 4 mg/l. Dicha concentración es la recomendada para los SAAI considerando los requerimientos de los peces, plantas y microorganismos como son las bacterias nitrificantes. El SBR presentó una concentración mayor gracias a la producción de

oxígeno por parte de las microalgas de día, las cuales liberan 4.18 g. de O₂ por gramo de nitrógeno que consumen (Ebeling *et al.* 2006^a), y por la aireación por la noche. Mientras que la presencia de oxígeno disuelto en el SA se debe a la aireación mecánica (bomba de aire y recirculación del agua).

El pH en general se mantuvo por encima de los niveles óptimos para el cultivo de estas especies (Tabla 1). La carpa koi se desarrolla mejor en un pH neutro aunque tolera niveles entre los 5 y 9 (Watson *et al.* 2004). El pH ideal para el cultivo de lechugas es entre 5.8 y 6.2, pero pueden crecer bien en un pH neutro o ligeramente básico (7.5). Cuando el pH se encuentra por encima de esta magnitud se afecta directamente la capacidad que presentan las plantas para asimilar los nutrientes a pesar que estos existan en abundancia en el medio de cultivo (FAO 2014^b). En los SAAI, lo ideal es mantener un pH neutro o ligeramente ácido (6.5-7) considerando los requerimientos de los peces, hortalizas y bacterias nitrificantes (Connolly y Trebic 2010).

El SBR mantuvo un pH más básico que el acuapónico, con un promedio de 8.51 y 8.36 en los E1 y E2 respectivamente, mientras que en el SA los promedios fueron de 7.83 y 7.69. A pesar de esto, en los dos sistemas la tendencia del pH fue acidificarse con el tiempo, manteniéndose al final con un pH de 7.7 y 7.71 en el SBR (considerando ambos periodos experimentales); y de 7.58 y 7.30 en el sistema acuapónico. Estos valores finales son más adecuados para integrar el cultivo de hortalizas.

En promedio, el amonio no ionizado también se mantuvo dentro de lo recomendado en ambos sistemas (< 1 mg/l), sin embargo el SBR presentó concentraciones mayores y fue más inestable que el SA, sobrepasando la concentración máxima recomendada para peces en varias ocasiones. Sin embargo, se ha reportado que la concentración letal de amonio (CL) para el 50% de la

población de carpas a las 96 horas de exposición es de 2.2 mg/l de $\text{NH}_3\text{-N}$, lo cual equivale a 2.68 mg/l de amonio no ionizado (Lawson 1995). En el SBR la concentración máxima obtenida fue de 2.81 mg/l, pero no sobrepasó la duración en exposición reportada para llegar a problemas de mortalidad en peces, ni en plantas (> 30 mg/l; FAO 2014^b).

En el caso de los nitritos, es importante que se mantenga una concentración por debajo de 1 mg/l debido a la toxicidad que puede presentar en mayores concentraciones tanto para los peces como para las plantas. En el caso de presentar concentraciones más altas se puede agregar sal marina para evitar la mortalidad de los peces por la enfermedad de la “sangre color café.” Sin embargo, se debe cuidar que la conductividad eléctrica se mantenga dentro del rango óptimo para el cultivo de hortalizas, de lo contrario se deben hacer recambios de agua (Licamele 2009; FAO 2014^b).

Los niveles de nitritos fueron apropiados en Sistema Acuapónico, y en el SBR durante el E1, sin embargo este sistema obtuvo un promedio de 2.86 mg/l en el E2, lo cual dificulta se consoliden cultivos integrados bajo el manejo particular que se realizó en ese periodo experimental.

Particularmente, durante el E2, hubo deficiencia en la disponibilidad de agua potable en la zona experimental por lo cual se tuvieron que realizar recambios de agua muy bajos (menores de 2% por día), y en el SBR no se extrajeron los lodos acuícolas con la regularidad necesaria. Se mantuvo el sistema con aireación las 24 horas del día (en vez de solamente en la noche como en el E1) con motivo de favorecer la nitrificación suspendida como en los sistemas de producción intensivos llamados “Sistemas de cultivo en tanques de agua verde” (Greenwater tank culture systems); y mejorar así la calidad del agua bajo las condiciones existentes.

En los sistemas de cultivo fotoautotróficos, o donde dominan las microalgas, como el caso del E1, usualmente presentan niveles bajos de nitritos, mientras que aquellos en los que la nitrificación se lleva a cabo en mayor proporción, se suelen presentar mayores concentraciones de este compuesto (Ebeling *et al.* 2006^b). Se puede observar a través del proceso de acumulación de nitritos (Figura 2) y de nitratos (Figura 3), que en el SBR durante el E2 hubo un mayor proceso de nitrificación, sin embargo, no se logró estabilizar este proceso como en los sistemas acuapónicos o en los sistemas de cultivo en tanques de agua verde, ya que en dichos sistemas es muy importante presentar una remoción eficiente de los sólidos sedimentables, de preferencia diaria, y una aireación y recirculación vigorosa (Martin *et al.* 2000; Hargreaves 2006), lo cual no fue posible realizar durante el experimento.

En general, el SBR presentó una mayor remoción del nitrógeno inorgánico a través de la biosíntesis microalgal. Esto es evidente durante las primeras 14 semanas del E1 (Figura 2) y al inicio del E2, y se puede apreciar a través de muchos parámetros del cultivo, desde el color verde del agua que presentó dicho sistema, las variaciones del pH durante el día y la noche, su tendencia básica, los altos niveles de oxígeno, y las fluctuaciones del amonio dependiendo de las condiciones ambientales que afectan directamente la capacidad fotosintética y de crecimiento de las microalgas. Se ha reportado que factores como la temperatura, disponibilidad e intensidad de luz, y disponibilidad de nutrientes y pH afectan directamente la fotosíntesis y crecimiento microalgal. La tasa de crecimiento de estos microorganismos está en su máxima capacidad cuando existe saturación en la intensidad luminosa, la cual depende de muchas condiciones ambientales como nubosidad, variaciones diurnas y estacionales (Juneja *et al.* 2013). Por ello, el Sistema Basado en Recambios es más propenso a presentar fluctuaciones en la concentración de nitrógeno amoniacal dependiendo de estas condiciones ambientales

existentes. El pH básico en el SBR se debe a la abundancia de microalgas presentes, las cuales durante su metabolismo diurno consumen dióxido de carbono en una proporción que usualmente sobrepasa la cantidad de CO₂ liberado por la respiración (Tucker y Abramo 2008).

En el Sistema Acuapónico, la remoción del nitrógeno inorgánico se lleva a cabo principalmente por bacterias nitrificantes. La tasa de crecimiento y de remoción de amonio de estos organismos también se ve afectada por condiciones ambientales como temperatura, oxígeno disuelto, luz, pH, concentración de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes (Ward 2013). Sin embargo, a diferencia de cultivos que dependen de la acción de las microalgas, en el caso de las bacterias nitrificantes es más fácil controlar el efecto de la luz en su actividad metabólica, ya que estos organismos son fotosensibles, por lo cual hay que proteger el sistema de cultivo de la luz directa del sol (sobre todo en los primeros días en lo que colonizan superficies; FAO 2014^b). Es decir son organismos autótrofos, no fotoautotróficos como el fitoplancton, por lo cual si hay menor disponibilidad de luz ambiental, no se verá afectada la tasa de remoción de amonio y de nitritos (Ebeling *et al.* 2006^b).

En general, la tendencia del pH en los sistemas acuapónicos es a irse acidificando debido a que la oxidación del amonio por parte de las bacterias nitrificantes libera H⁺ y disminuye la alcalinidad (al consumir carbón inorgánico en forma de carbonato de calcio principalmente; Ebeling *et al.* 2006^b). De igual manera, los cultivos piscícolas tienden a acidificar el pH por la liberación de dióxido de carbono durante la respiración, el cual, se convierte de manera natural en ácido carbónico al entrar en contacto con el agua (FAO 2014^b). Sin embargo, debido a que la densidad de confinamiento inicial fue baja en ambos experimentos y la fuente de agua que se utiliza para reponer el agua que se pierde por evaporación y para los recambios, es básica

(iniciando los cultivos con un pH de 8.33 ± 0.12), el proceso de acidificación del sistema fue lento. El ácido generado de manera natural en el SA durante el periodo experimental no fue suficiente para reaccionar con las bases amortiguantes presentes en el agua utilizada, por lo cual no se llegó a un pH neutro; pero sí fue bajando y aproximándose a la neutralidad conforme el transcurso del experimento.

En los sistemas acuapónicos, es común que al principio del cultivo se presenten concentraciones de amonio y nitritos por encima de lo recomendado. Esto se debe a que usualmente toma de 25-40 días (dependiendo de las condiciones del cultivo) que se establezcan colonias bacterianas en cantidad suficiente para metabolizar los compuestos nitrogenados generados durante el cultivo de los peces. Se puede observar que esto sucedió durante el E1, mientras que en el E2 este suceso ya no se repitió debido a que las poblaciones ya estaban establecidas desde el experimento anterior (Figuras 1 y 2). Posteriormente, y cómo se observa en dichas figuras, las concentraciones de amonio y de nitritos se mantuvieron casi en su totalidad por debajo de 1 mg/l. Así mismo la concentración de nitritos fue menor que en la fase experimental E2 que en la que le precedió, posiblemente debido a que ya se había establecido en el sistema una mayor biomasa bacteriana.

Acumulación de nutrientes

La acumulación de nutrientes es un aspecto importante dentro de la calidad del agua de los SAAI, considerando los requerimientos nutricionales de las hortalizas, la tolerancia de los peces y la salud humana.

El SA presentó una mayor capacidad de acumulación de nutrientes que el SBR (Figuras 3-8 y Tabla 2). Esto se puede observar durante ambos periodos experimentales y para todos los macronutrientes menos calcio. Esto se debe a que en el SBR un porcentaje importante de los nutrientes fueron consumidos por las microalgas. Además de sus requerimientos en carbono, hidrógeno y oxígeno para la formación de biomasa celular, el fitoplancton requiere de macronutrientes como nitrógeno en forma de amonio o nitratos, calcio, potasio, fósforo, magnesio, sulfuro, y otros micronutrientes como hierro, silicio, entre otros. Aunque las bacterias nitrificantes también consumen parte de los nutrientes disponibles, la biomasa bacteriana que se forma por cada gramo de nitrógeno, es 79 veces menor a la de las microalgas, por lo cual existe menor consumo de estos y quedan disponibles en mayor proporción para las plantas superiores (Timmons *et al.* 2009). Adicionalmente, una ventaja de que las bacterias nitrificantes mantengan la calidad del agua de los sistemas acuapónicos en comparación con las microalgas, es que el amonio y los nitritos son las fuentes de nitrógeno que utilizan para su metabolismo, y al oxidarlos, existe una acumulación de nitratos que es la principal forma nitrogenada que aprovechan las hortalizas, mientras que las microalgas pueden consumir nitratos mas no producirlos (Richmond 2004).

Existen estudios de sistemas acuapónicos donde se muestra la acumulación de nutrientes por alimento otorgado (g/kg peso seco de alimento). Timmons *et al.* (2009) reportan que la mayor acumulación de macronutrientes en sistemas acuapónicos es de potasio, seguido de nitrato y calcio, y existen variaciones en las proporciones de fósforo, sulfato y magnesio, sin embargo, se presentan en menor concentración que los tres primeros. Esta menor concentración en los últimos tres nutrientes se debe a que su proporción en el alimento otorgado a los peces es baja. Estas proporciones concuerdan con lo obtenido en el presente trabajo.

La concentración de nitratos obtenida para ambos sistemas de cultivo y periodos experimentales no sobrepasa los niveles recomendados para el cultivo de hortalizas (<250 mg/l), ni para el cultivo de peces (\leq 400 mg/l). Se recomienda mantenerlo en una concentración máxima de 150 mg/l para que su acumulación en las hojas de las hortalizas no sea riesgosa para la salud humana (Connelly y Trebic 2010; FAO 2014^b).

En el presente trabajo, en ambos sistemas existió acumulación de nutrientes a pesar de que la biomasa final de los peces fue baja (menor a 1.5 kilos para cada sistema y periodo experimental). Por lo cual, a mayor biomasa de cultivo, se puede esperar una mayor carga de nutrientes que pueden tener un aprovechamiento agrícola. Esto refleja el potencial que tienen estos sistemas acuícolas para proporcionar una fuente de fertirrigación para la agricultura.

Lo anterior concuerda con los múltiples trabajos donde se promueven estos sistemas de agro-acuicultura integrada, ya que además de optimizar el uso del agua al emplear una misma fuente para producciones sucesivas acuícolas y agrícolas; se le da un mayor aprovechamiento al alimento otorgado a los peces al darle uso a los efluentes y los lodos acuícolas como fertilizantes agrícolas (FAO 2004; Dey *et al.* 2006; Pantanella 2008; CARDI 2010; Wang *et al.* 2011; Gurung 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013). Esta integración resuelve problemáticas de cultivos agrícolas y acuícolas convencionales como el uso irracional del agua, contaminación de este recurso, la dependencia excesiva en fertilizantes inorgánicos de uso agrícola, y el impacto ambiental derivado del vertido de los productos de desecho acuícolas (Rakocy *et al.* 2006; Bakhsh 2008; Endut *et al.* 2009; Dediu *et al.* 2012). Adicionalmente, esta mayor eficiencia productiva deriva en beneficios socioeconómicos y también ambientales (Wang *et al.* 2011).

Aunque el SBR presentó una menor acumulación de nutrientes sigue siendo una alternativa en contextos donde no se cuente con infraestructura adecuada para sistemas acuapónicos o donde por motivos socioeconómicos, la capacidad de inversión y de dominio técnico sea menor a lo requerido para mantener sistemas acuapónicos. La implementación de SAAI en estos escenarios generaría mayores beneficios socioeconómicos y ambientales que seguir con las prácticas convencionales de manejar el agua de recambios y lodos acuícolas como productos de desecho.

Consideraciones sobre la densidad de confinamiento de peces y su influencia en la calidad del agua

La calidad del agua de un SAAI se puede ver comprometida por múltiples aspectos que van desde la calidad inicial de la fuente del agua, el diseño del sistema de cultivo, grado de tecnificación, el manejo técnico existente, condiciones ambientales, entre otras. La densidad de confinamiento de los peces es un factor muy importante a considerar, ya que se debe garantizar que el sistema de cultivo tenga la capacidad de remover los sólidos sedimentables, el amonio y los nitritos generados, y proveer oxígeno disuelto suficiente para los organismos en cultivo. En el presente estudio se evaluó la calidad del agua de dos SAAI que llegaron a una biomasa final menor a 1.5 kg/m^3 . Bajo este contexto se observó que el SA es más estable en mantener una calidad del agua apropiada que el SBR. De cultivar a mayor densidad de confinamiento, la calidad del agua se puede ver comprometida si se supera la capacidad de carga del sistema.

Se ha reportado que los sistemas acuapónicos pueden llegar a mantener densidades de confinamiento finales mayores a 120 kg/m^3 de peces con una buena calidad del agua si se cuenta con sistemas de filtración y oxigenación eficientes (Timmons *et al.* 2009). Por otro lado, en

sistemas acuapónicos de pequeña escala, como el utilizado durante el experimento, que cuenten con sistemas de filtración menos sofisticados, se ha reportado una capacidad máxima de producción de 20 kg de peces/m³ manteniendo una calidad adecuada (FAO 2014^b); lo cual concuerda con lo reportado para el equipo utilizado (Nelson y Pade Inc. 2012).

En el caso del SBR, en sistemas de cultivo similares, que utilizan recambios de agua (sin llegar a ser sistemas con un recambio o flujo continuo de ésta) y aireación para el mantenimiento de la calidad del agua, se ha reportado producciones que van de los 0.9-4.5 kg/m² (Watanabe *et al.* 2002). Mientras que para los Sistemas de cultivo en tanques de agua verde (“Greenwater tank culture systems”), que se asemejó más al SBR del E2, se reporta una capacidad de producción máxima que va desde 12.8 hasta 37.1 kg/m³ dependiendo del grado de tecnificación. Sin embargo, para llegar a estas producciones con una buena calidad del agua se requiere de un sistema eficiente de remoción diaria de sólidos sedimentables, y de una aireación y recirculación vigorosa (Martin *et al.* 2000), siendo mucho más tecnificado que el sistema empleado en el presente experimento.

Bibliografía

- AQUASTAT. 2012. Water withdrawal by sector, around 2006. FAO, AQUASTAT database.
- Bakhsh K. 2008. Integrated Culture, Hydroponics and Aquaponics System. University Malaysia Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia, 75p.
- CARDI. 2010. A manual on integrated farming systems (IFS). Prepared by Caribbean Agricultural Research and Development Institute (CARDI), for Agriculture Enterprise Development for Rural Belize (AED), 58p.
- CONAPESCA. 2010. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2008. SAGARPA, 207p.
- CONAPESCA. 2011. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2011. SAGARPA, 311p.

- Connolly K., Trebic T. 2010. Optimization of backyard aquaponic food production system. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, McGill University, 74p.
- Crab R., Avnimelech Y., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W. 2007. Review article: Nitrogen removal techniques in aquaculture for sustainable production. *Aquaculture* 270: 1-14.
- De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete, W. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value of aquaculture. *Aquaculture* 277: 125-137.
- Dediu L., Cristea V., Xiaoshuan Z. 2012. Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology* 11(9): 2349-2358.
- DeWalt B.R., Ramírez Zavala J.R., Noriega L., González R.E. 2002. Shrimp Aquaculture, the People and the Environment in Coastal Mexico. Report prepared under the World Bank, NACA, WWF and FAO Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment. Work in Progress for Public Discussion. Published by the Consortium, 73p.
- Dey M., Kambewa P., Prein M., Jamu D., Paraguas F., Pemsil D., Briones R. 2006. Impact of development and dissemination of integrated aquaculture-agriculture (IAA) technologies in Malawi. *NAGA, World Fish Center Quarterly* 29 (1 & 2): 28- 35.
- Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. 2006^a. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257: 346–358.
- Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. 2006^b. Understanding photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic bacterial based systems using basic water quality parameters. 6th International Recirculating Aquaculture Conference, Roanoke, VA, 10p.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.B., Hassan A. 2009. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculation system. *Desal. Wat. Treat.*, 5: 19–28.
- FAO. 2004. Agro-acuicultura integrada. Manual básico. FAO documento técnico de pesca 407. Roma, Italia, 163p.
- FAO. 2008. Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura. Factores que afectan su sustentabilidad en America Latina. Taller técnico regional de FAO. Puerto Montt, Chile, 377.
- FAO. 2013. FAO Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture. Roma, Italia, 307p.
- FAO. 2014^a. El estado mundial de la pesca y acuicultura. Oportunidades y desafíos. Roma, Italia, 274p.
- FAO. 2014^b. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589. Roma, Italia, 288p.
- Gassert F., Landis M., Luck M., Reig P., Shiao T. 2013. Aquaduct Metadata Document. Aqueduct global maps 2.0. World Resources Institute Working Paper. Washington D.C., EUA, 20p.

- Gurung T.B. 2012. Integrated aquaculture within agriculture irrigation for food security and adaptation to climate change. *Hydro Nepal, Special Issue*, 73-77p.
- Hargreaves J.A. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34: 344-363.
- INEGI. 2011. Pesca y acuicultura. Censos Económicos 2009. México, 83p.
- Janes H., Cavazzoni J., Alagappan G., Specca D., Willis J. 2005. Landfill gas to energy: A demonstration controlled environment agriculture system. *HortScience* 40 (2): 279-282.
- Jhamtani H. 2007. Putting farmers first in sustainable agriculture practices. Third World Network, Penang, Malaysia, 31p.
- Juneja A., Ceballos R.M., Murthy G.S. 2013. Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: A review. *Energies* 6: 4607-4638.
- Keating M., Jacobsen K. 2012. Sustainable agriculture. University of Kentucky. College of Agriculture, 5p.
- Lawson T.B. 1995. Fundamentals of aquacultural engineering. Chapman and Hall, N.Y., 355p.
- Licamele J. 2009. Biomass production and nutrient dynamic in an aquaponic system. University of Arizona, 172p.
- Maroto J., García A., Baixauli S. 2000. La lechuga y la escarola. Valencia; Caja Rural de Valencia. Fundación Ediciones Mundi-Prensa. España, 242p.
- Martin, J.M., Rakocy, J.E., Cole, W.M., 2000. Greenwater tank culture of tilapia. En: Creswell, R.L. (ed.) Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute. No. 51, Gulf and Caribbean Fisheries Institute, c/o Harbor Branch, Oceanographic Institution, Florida, 330–340p.
- Murshed-E-Jahan K., Crissman C., Antle J. 2013. Economic and social impacts of integrated aquaculture-agriculture technologies in Bangladesh. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems. Penang, Malaysia. Working Paper: AAS-2013-02, 15p.
- Nelson y Pade Inc. 2012. Fantastically Fun Fresh Food Factory- F5. System specifications. Nelson &Pade, Inc.
- Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A., Kraemer G., Halling C., Shpigel M., Yarish C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231: 361-391.
- Pantanella E. 2008. Pond aquaponics: new pathways to sustainable integrated aquaculture and agriculture. *Aquaculture News* 34: 10-11.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M. 2006. Recirculation aquaculture tank production systems: aquaponics — integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454, 16p.
- Richmond A. 2004. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Blackwell Science Ltd, Iowa, USA, 577p.

- Segovia Quintero M. 2011. An overview on desert aquaculture in Mexico. En: Crespi V., Lovatelli A. (eds). *Aquaculture in desert and arid lands: development constraints and opportunities*. FAO Technical Workshop. 6–9 July 2010, Hermosillo, Mexico. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 20. Rome, FAO, 187–200 pp.
- Timmons M.B., Ebeling J.M., Piedrahita R.H. 2009. *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Editorial Cayuga Aqua Ventures, primera edición, 959p.
- Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W., Summerfelt S.T., Vinci B.J. 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd Edition. Cayuga Aqua Ventures, New York, 769p.
- Tréllez-Solís E. 2004. *Manual guía para educadores. Educación ambiental y conservación de la biodiversidad en los procesos educativos*. Centro de Estudios para el Desarrollo, Proyecto CHI/01/G36 “Conservación de la biodiversidad y manejo sustentable del Salar del Huasco,” 72p.
- Tucker C.S., Abramo L.R. 2008. *Managing high pH in freshwater ponds*. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication 4604, 5p.
- UNESCO. 2012. *Managing water under uncertainty and risk*. The United Nations World Water Development Report 4, volume 1. France, 407p.
- Verdegem M.C.J., Bosma R.H., Verreth J.A.J. 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. *Water Resources Development* 22 (1): 101-113.
- Wang X., He X., Chen B., Xie C. 2011. Rice field for the treatment of pond aquaculture effluents. *African Journal of Biotechnology* 10 (34): 6456-6465.
- Ward B.B. 2013. *Nitrification*. Princeton University. Elsevier, Inc., 8p.
- Watanabe W.O., Losordo T.M., Fitzsimmons K., Hanley F. 2002. *Tilapia Production Systems in the Americas: Technological Advances, Trends, and Challenges*. *Reviews in Fisheries Science*, 10 (3 & 4): 465-498.
- Watson C., Hill J., Poudel D. 2004. *Species profile: Koi and Goldfish*. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication 7201, 6p.
- Wilson J. 2005. *Submission on water use in aquaponics*. Aquaponics Network Australia, 3 p.
- Yeo S.E., Binkowski F.P., Morris J.E. 2004. *Aquaculture effluents and waste by-products. Characteristics, potential recovery, and beneficial reuse*. North Central Regional Aquaculture Center (NCRAC), EUA, 47p.

CAPÍTULO II: CRECIMIENTO DE CARPAS KOI Y LECHUGAS EN DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA

Resumen

Para el sector primario el incremento en los rendimientos productivos es esencial desde un punto de vista técnico, socioeconómico y ambiental, cuando el manejo de los cultivos está encaminado hacia una producción sustentable. En los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) se busca favorecer el crecimiento de las especies al mejorar las condiciones de los cultivos mediante la integración de ambos componentes, optimizando a la vez los recursos requeridos y reutilizando los productos de desecho generados en ambas actividades. En el presente trabajo se evaluó el crecimiento de carpas koi cultivadas en dos SAAI: un sistema acuapónico de raíz flotante (SA) y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación (SBR). Se realizaron dos corridas experimentales (E1 y E2), con diferentes condiciones ambientales y de manejo. Se midieron el peso, longitud total y estándar de las carpas y realizaron los siguientes análisis: crecimiento absoluto, relativo, tasa de crecimiento absoluto, relativo y específico, factor de conversión alimenticia y sobrevivencia. Adicionalmente se monitorearon diario parámetros de calidad de agua, y semanalmente las concentraciones de macronutrientes de importancia agrícola. Estos análisis sirvieron como base comparativa para evaluar las ventajas de integrar el cultivo de lechuga en cada sistema. También se analizó una muestra de suelo con uso agrícola de la región para conocer sus propiedades y evaluar los beneficios de implementar SAAI. Finalmente se realizó una lombricomposta con desechos acuícolas con los mismos objetivos. Durante el E1, se obtuvieron mayores rendimientos productivos en el SBR debido a la abundancia de alimento vivo presente en el sistema. Sin embargo, en condiciones limitantes de disponibilidad de agua (E2), los rendimientos productivos en el SA fueron notoriamente mayores. El SA mantuvo una mejor calidad del agua para la integración del cultivo de lechuga, así como una mayor acumulación de nutrientes; sin embargo ambos sistemas demostraron presentar características apropiadas para la integración agrícola.

Abstract

For the primary sector, yield increase is very important from a technical, socio-economic and environmental point of view, when crop management is geared towards sustainable production. Integrated agro-aquaculture systems (SAAI) seeks to promote the growth of species by improving the culture conditions through the integration of both components, while optimizing the required resources and reusing the waste products generated by both activities. In the present study, the growth of koi carp cultivated in two different SAAI was evaluated: a raft aquaponics system (SA), and a system that relies on water exchange for irrigation (SBR). Two experiments were performed (E1 and E2) with different environmental and management conditions. Total weight, total and standard length of koi carp were measured and the following analyzes were performed: absolute and relative growth; absolute, relative and specific growth rate, feed conversion factor and survival. In addition, parameters of water quality were monitored daily,

and the macronutrient concentrations were monitored every week. These analyzes served as a comparative basis to evaluate the benefits of integrating lettuce cultivation into each system. A soil sample from an agricultural plot in the region was also analyzed to know its physicochemical properties and evaluate the benefits of implementing SAAI. Finally, a vermicompost was made with aquaculture waste for the same objectives. During E1, higher productive yields were obtained in the SBR due to the abundance of live food present in the system. However, under limited water conditions (E2), productive yields in the SA were notoriously higher. The SA maintained a better water quality for the integration of lettuce cultivation, as well as a greater accumulation of nutrients; however both systems proved to present appropriate characteristics for agricultural integration.

Introducción

Para el sector primario el incremento en los rendimientos productivos es esencial desde un punto de vista técnico, socioeconómico e inclusive ambiental, cuando el manejo de los cultivos está encaminado hacia una producción sustentable. Por ello, las prácticas productivas buscan satisfacer los requerimientos físicos, químicos y biológicos de las especies en cultivo al proporcionar un ambiente idóneo para su crecimiento y desarrollo (Mallya 2007).

En los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) se busca favorecer el crecimiento de las especies en cultivo al mejorar las condiciones de estos mediante la integración de ambos componentes (FAO 2004). Particularmente en los sistemas acuapónicos, el crecimiento de los peces se ve beneficiado por el control que se cuenta en la calidad del agua gracias a la acción de las bacterias nitrificantes, las cuales oxidan el amonio y los nitritos, compuestos que en general son tóxicos para los peces en concentraciones mayores a 1 mg/l, a nitratos, el cual es el principal nutriente nitrogenado de las plantas superiores. Las plantas a su vez se ven beneficiadas por la constante fertirrigación, la cual proviene de la acumulación de nutrientes disueltos del componente acuícola, resultado de la alimentación y metabolismo de los peces, y de la recirculación constante del agua entre los sub-sistemas de cultivo acuícola y agrícola. Tanto las

plantas como los peces se ven favorecidos por la continua oxigenación del agua que se logra a través de la recirculación y la aireación (FAO 2014).

En sistemas menos tecnificados, donde no existe una constante recirculación del agua debido a que no es aplicable por el manejo de los cultivos que se tiene e infraestructura que se cuenta, también se puede fertirrigar al extraer agua del componente acuícola con esta finalidad, así como a través de la elaboración de huertos flotantes sobre los estanques acuapónicos (Pantanella 2008; Wang *et al.* 2011). El crecimiento de las hortalizas también se ve favorecido por la aplicación de humus proveniente del composteo de los lodos que se producen en la acuicultura por la acumulación de desechos orgánicos (FAO 2004; Janes *et al.* 2005).

Dentro de los estudios enfocados al crecimiento de especies en SAAI, existen trabajos comparativos entre diferentes sistemas acuapónicos (Lennard y Leonard 2006) y estudios donde se comparan tratamientos como flujos de agua (Lennard y Leonard 2004; Endut *et al.* 2009) y balance de masas (Endut *et al.* 2010). También existen estudios comparativos entre sistemas acuapónicos e hidropónicos (Wilson 2005; Licamele 2009), entre SAAI con baja tecnificación y sistemas de producción similares pero que no realizan la integración de estos componentes productivos (Dey *et al.* 2006; Rasowo *et al.* 2008; Gurung 2012), y entre SAAI y sistemas con fertilización inorgánica (Pantanella 2010; Abdul-Rahman *et al.* 2011; Wang *et al.* 2011). Sin embargo, no se tiene conocimiento de que exista un estudio donde se compare el crecimiento de carpa koi y lechuga entre un sistema acuapónico y un SAAI con menor grado de tecnificación, como se presenta en este trabajo.

Antecedentes

En los sistemas de agro-acuicultura integrada, se ha demostrado que el crecimiento del componente agrícola se ve favorecido por el aporte constante de nutrientes a través de la fertirrigación. Se ha reportado que existe un mayor aprovechamiento de los nutrientes al otorgarlos de manera líquida; ejemplo de ello es el trabajo de Hussein (2009), donde se comparó el crecimiento de diferentes variedades de maíz bajo prácticas tradicionales de fertilización inorgánica, así como con la aplicación líquida de los mismos. Posteriormente, Abdul-Rahman *et al.* (2009) reportan que en los cultivos de maíz y de rábano, el riego con el efluente acuícola puede emplearse en vez de la aplicación de fertilizantes inorgánicos e inclusive generar mayores rendimientos productivos. Dichos autores observaron que a pesar de que la concentración de nutrientes en el efluente acuícola es menor a la otorgada comúnmente en cultivos comerciales mediante la fertilización inorgánica, el aporte continuo de ellos, a través del aprovechamiento del efluente, permite una absorción más efectiva.

Pantanella (2010) comparó el crecimiento de hortalizas en huertos flotantes sobre estanques acuícolas utilizando diferentes sustratos, entre ellos cáscaras de arroz y humus de compostas (de necesitar fertilización complementaria). Adicionalmente comparó el crecimiento de estos métodos de cultivo con sistemas hidropónicos de raíz flotante y con sistemas de cultivo en suelo que utilizan altos insumos externos. Los resultados obtenidos muestran que la producción en los SAAI fue similar e inclusive mayor que los cultivos en suelo, sin embargo menor que los cultivos hidropónicos.

También se ha reportado que se puede favorecer el crecimiento de los cultivos agrícolas al combinar la fertirrigación proveniente del efluente acuícola con la aplicación complementaria

de fertilizantes inorgánicos. Ejemplo de ello es el estudio de Wang *et al.* (2011), enfocado al tratamiento y aprovechamiento de los efluentes acuícolas en el cultivo de arroz. Estos autores reportan que el cultivo de esta especie es eficiente para la purificación de estas descargas acuícolas, sin embargo se necesita de la aplicación complementaria de fertilizantes inorgánicos para mantener la producción a escala comercial.

Los SAAI también surgen como sistemas de cultivo que permiten hacer un uso más eficiente del agua y contar con este recurso en época de secas, lo cual incrementa los rendimientos productivos en zonas donde el agua escasea o donde la agricultura es de temporal. Esto se debe a que en los SAAI se busca establecer una reserva de agua (por ejemplo mediante la captación de agua de lluvia) donde se establece el cultivo de peces y con la cual también se puede regar durante la época de secas. Gracias a este abastecimiento adicional de agua y a los nutrientes provenientes del componente acuícola se genera un mayor crecimiento en los cultivos agrícolas que en sistemas aledaños que carecen de esta integración y realizan únicamente cultivos de temporal (Moya *et al.* 1986; Panigrahi *et al.* 2001; Panigrahi y Panda 2003; Narayan-Sethi *et al.* 2005).

Existen varios trabajos que comparan el crecimiento de hortalizas entre sistemas acuapónicos en específico e hidropónicos. Wilson (2005) reporta que al iniciar un cultivo acuapónico, la producción es menor a la de sistemas hidropónicos debido a que aún no existe un desarrollo en magnitud suficiente de colonias de bacterias nitrificantes, así como la acumulación de nutrientes puede ser menor a lo requerido por las hortalizas. Sin embargo, a medida que los sistemas acuapónicos van madurando, es decir, van incrementando las colonias de bacterias nitrificantes así como la biomasa de peces, los rendimientos productivos de los sistemas acuapónicos pueden

sobrepasar los hidropónicos. Por otro lado Licamele (2009) demuestra que a una biomasa de 5 kg m⁻³ de peces, no existen diferencias significativas entre las producciones de lechuga y concentraciones de clorofila obtenidas en ambos sistemas al suplementar el cultivo acuapónico con fierro, manganesio y zinc. Pantanella (2010) reporta que no existen diferencias significativas en producción entre los sistemas hidropónicos y acuapónicos siempre que se mantenga la concentración de nitrógeno por encima de 20 ppm, aunque sí se pueden apreciar diferencias en pigmentación a esta concentración. Sin embargo, no se conoce de trabajos donde se evalúe el crecimiento peces y hortalizas entre sistemas acuapónicos y SAAI con menor grado de tecnificación.

Objetivo

Evaluar parámetros de crecimiento de carpas koi y lechugas en los dos sistemas de agroacuicultura integrada.

Material y Método

El desarrollo experimental se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC) de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.

El Sistema Acuapónico (SA) es un sistema de tipo raíz flotante producido por Nelson y Pade, Inc. (modelo F5). Dicho sistema cuenta con un tanque de 110 galones (416.4 litros) para el cultivo de peces, un sistema de filtros (sedimentador, mineralizador y desgasificador), y dos

camas para la producción de hortalizas de 3 x 5 pies (91.4 x 152.4 cm), con una capacidad de 90 plantas. Tanto el sedimentador como el mineralizador cuentan con una compuerta en la parte inferior para poder extraer la materia orgánica proveniente del estanque de cultivo. El agua es recirculada continuamente, con un flujo que permite que el volumen total del estanque pase por los filtros cada hora. Cuenta con sistemas de aireación en el estanque de cultivo, desgasificador y en las camas de cultivo. Su volumen total es 871 litros y tiene una capacidad máxima de cultivo de peces de 20.4 kg. El consumo eléctrico total entre la recirculación y aireación del agua es 288 watts·hr⁻¹.

El SAAI con menor grado de tecnificación se denominó Sistema de cultivo basado en Recambios (SBR) y está compuesto por un estanque circular de plástico (bebedero circular Rotoplas con capacidad de 1000 L.), que se llenó con el mismo volumen del SA. Los sedimentos se recolectaron manualmente a través de un sifón.

Se realizaron dos periodos experimentales, E1 y E2. En ambos experimentos se cultivó carpa koi con la misma densidad de confinamiento entre sistemas y bajo las mismas prácticas de alimentación. A continuación se describen las condiciones experimentales:

E1: El periodo de cultivo fue de 18 semanas, del 16 de noviembre del 2015 al 17 de marzo del 2016. Se iniciaron los cultivos con cien peces con un peso promedio de 4.46 ± 0.787 g. en el SBR y de 4.86 ± 0.94 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 446.1 y 486.1 g. respectivamente. Se otorgó alimento peletizado de 3.5 mm. de la marca Silver Cup de El Pedregal que cuenta con un mínimo de 32% proteína, 5% grasa, 5% de fibra, 5% ceniza y 12% humedad. El alimento se trituró y se proporcionó *ad libitum*, haciendo registro de la cantidad de

alimento dado por día. En ambos sistemas se utilizaron termostatos para mantener el agua a una temperatura promedio de 22°C.

- SBR: Los recambios de agua se hicieron de manera semanal principalmente para remover sólidos sedimentados. El promedio del total de agua reabastecida por evaporación y recambios fue 2.6%/día. La aireación del estanque se realizó únicamente durante la noche utilizando un soplador regenerativo de 1/16 Hp, con un consumo de 46.6 watts·hr⁻¹.
- SA: Debido a que durante el inicio del experimento, mientras se desarrollaba el biofiltro, se presentaron concentraciones de nitritos mayores a 1 m/l, se agregó sal marina para evitar problemas de mortalidad. Posteriormente se realizaron recambios de agua para remover la sal. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios fue de 2 %/día.

E2: El periodo de cultivo fue de 22 semanas, del 16 de mayo al 11 de octubre del 2016. Previo al inicio del cultivo se vaciaron ambos sistemas y volvieron a llenar con agua potable. Durante el vaciado no se realizó una limpieza de estos para mantener las poblaciones bacterianas existentes y ahorrar así el tiempo necesario para su desarrollo. Se iniciaron los cultivos con 200 peces con un peso promedio de 1.60 ± 0.58 g. en el SBR y de 1.69 ± 0.42 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 320.3 y 338 g. respectivamente. Se alimentó con alimento peletizado llamado “migaja,” el cual tiene de un tamaño menor a un milímetro de la marca Nutripec de Purina, que cuenta con un mínimo de 50% proteína y 15% grasa. La tasa de alimentación fue del 4% biomasa al día, con un mínimo de tres raciones por día. No fue necesario utilizar termostato para mantener la temperatura dentro del intervalo óptimo para el crecimiento de la

carpa. Por problemáticas de disponibilidad de agua en la zona experimental durante el E2, los recambios fueron menores durante este periodo. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios en los SBR y SA fueron de 1.71 y 0.78 %/día respectivamente. Debido a ello, en el SBR se mantuvo la aireación las 24 horas del día para favorecer la nitrificación en suspensión y mejorar así la calidad del agua. La aireación se llevó a cabo con tres bombas de aire de doble salida, que generaron un consumo total de 9 watts·hr⁻¹ debido a que la potencia del soplador regenerativo utilizado en el primer experimento era mayor de lo requerido.

Biometrías de las carpas

Durante ambos experimentos se realizaron las siguientes mediciones: longitud total, longitud patrón y peso del 25% de los organismos. Durante el E1, las carpas se midieron y pesaron al principio y al final del experimento, mientras que durante el E2 las mediciones se realizaron cada 15 días y adicionalmente se midieron la altura (longitud dorso-ventral) y el grosor o ancho de las carpas. Todas las mediciones se realizaron utilizando un ictiómetro de 30 cm. También se registró la mortalidad de los organismos. Con las mediciones biométricas realizadas se calculó la biomasa inicial, biomasa final, el crecimiento absoluto (CA), la tasa de crecimiento absoluto (TCA), el crecimiento relativo (CR), la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de crecimiento específico (TCE) considerando tanto el peso como las longitudes de los organismos, de acuerdo a las fórmulas propuestas por Ricker (1979) y Busacker *et al.*(1990). Adicionalmente se calculó el factor de conversión alimenticia (FCA) y la sobrevivencia como lo reportan Castell y Tiews (1980). Las fórmulas se muestran a continuación:

$$\text{Biomasa inicial} = (N_i)(W_i) \quad \text{Biomasa final} = (N_f)(W_f)$$

$$CA = Y_f - Y_i T \quad CA = \frac{CA}{t_f - t_i}$$

$$CR = \frac{CA}{Y_i} \cdot 100 \quad TCR = \frac{CA}{Y_i(t_f - t_i)} \cdot 100$$

$$TCE (\% \text{ día}^{-1}) = \frac{(\ln Y_f - \ln Y_i)}{t_f - t_i} \cdot 100 \quad FCA = \frac{\text{Alimento otorgado}}{W_f - W_i}$$

$$\text{Sobrevivencia (\%)} = \frac{N_f}{N_i} \cdot 100$$

Dónde: N= número total de organismos, W= peso, i= inicial, f=final, Y= puede representar peso húmedo, longitud total o longitud patrón, t= tiempo (en días), ln= logaritmo natural.

Medición de parámetros de calidad del agua

Se realizaron mediciones diarias de pH, temperatura y conductividad eléctrica utilizando un equipo portátil HANNA modelo HI991300. Así mismo se monitoreó el oxígeno disuelto con un sensor portátil de la marca HACH modelo Sension 6. Las mediciones se realizaron aproximadamente a las 18:00 horas.

Durante el E1 y en el primer mes de cultivo, se midieron dos veces por semana los niveles de nitritos, nitratos, amonio y fosfatos. Posteriormente y también durante el E2 se midieron estos parámetros de manera semanal. Adicionalmente se monitorearon de manera semanal, otros

nutrientes de importancia agrícola como potasio, calcio, magnesio, y sulfato. El monitoreo de estos seis macronutrientes se consideran dentro de las mediciones de calidad del agua, por su importancia para el cultivo de las plantas superiores (Licamele 2009). Las mediciones realizaron utilizando el equipo HI 83225 Nutrient Analyses de HANNA.

Evaluaciones para el cultivo de lechugas

En estos periodos experimentales no se realizó el cultivo directo de lechuga, sin embargo se evalúa la acumulación de nutrientes obtenida y calidad del agua de ambos sistemas para valorar y comparar cómo sería el desempeño de estos cultivos considerando se realizaran huertos flotantes en el SBR que es el equivalente al cultivo de raíz flotante que se cuenta en el Sistema Acuapónico.

También se analizaron los parámetros fisicoquímicos de una muestra de suelo obtenida de una parcela en Milpa Alta, Ciudad de México, para conocer sus propiedades y evaluar los beneficios de aprovechar el riego del efluente acuícola de un sistema como el SBR para el cultivo de hortalizas directamente en el suelo.

Los parámetros físicos que se analizaron fueron densidad aparente, densidad real, porosidad, conductividad eléctrica y textura. Los parámetros químicos que se analizaron fueron pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico total (CICT), nitrógeno total, fósforo asimilable, potasio intercambiable, calcio y magnesio. Se siguió la metodología propuesta en la NOM-021-SEMARNAT-2000 para la medición de cada parámetro mencionado.

Finalmente se realizó una lombricomposta aprovechando productos de desecho de estanques dedicados al cultivo del ajolote *Ambystoma mexicanum* en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca, con la finalidad de conocer sus propiedades fisicoquímicas y evaluar los beneficios de integrarla en SAAI. Debido al alimento otorgado a los organismos (*Tubifex rivolorum*), la densidad de confinamiento y las prácticas de recambio realizadas en dicho Centro, el volumen de lodos generados es bajo, y fue insuficiente para realizar una composta únicamente a partir de este desecho acuícola. Por ello, y con el propósito de aprovechar residuos o subproductos derivados de estos cultivos acuícolas, se incorporaron a la composta plantas acuáticas de los géneros *Wolffia*, *Mougeotia*, así como las especies *Ceratophyllum demersum* y la lentejilla *Lemna Gibba*, que se propagan en los estanques de cultivo. La relación en volumen de lodo acuícola, plantas acuáticas, chayotillo (*Sicyos deppei*) y suelo fue 1:1:1:0.1 respectivamente. El proceso de composteo duró cinco meses.

Los parámetros físicos que se analizaron fueron densidad aparente, densidad real, porosidad, conductividad eléctrica y textura. Los parámetros químicos que se analizaron fueron pH, materia orgánica, CICT, nitrógeno total, fósforo asimilable y potasio intercambiable. La metodología así como los resultados obtenidos se llevaron a cabo y analizaron de acuerdo a la NMX-FF-109-SCFI-2007 para la producción y comercialización del humus de lombriz.

Resultados

Durante el primer periodo experimental, los mayores rendimientos productivos (peso y biomasa final, longitud total, longitud estándar, crecimiento absoluto, tasa de crecimiento absoluto, crecimiento relativo, tasa de crecimiento relativo, tasa de crecimiento específico y factor de

conversión alimenticia) se obtuvieron en el SBR (Tablas 1, 2 y 3). Sin embargo, en este sistema también se presentó la mayor mortalidad, presentando una sobrevivencia final del 73% contra el 84% en el sistema acuapónico.

Durante el segundo periodo experimental, se presentaron variaciones en las condiciones de cultivo con respecto al E1, así como la presencia del piojo de las carpas (*Argulus japonicus*) en los cultivos. Los resultados obtenidos contrastan con los obtenidos durante el primer periodo experimental. En este caso los rendimientos productivos así como la sobrevivencia fueron mayores en el Sistema Acuapónico (Tablas 1, 2 y 3).

Se comparó el incremento en longitud total y estándar (Tablas 2y3) debido a las diferencias que pueden existir en las aletas caudales de estos peces de ornato. Sin embargo, las tendencias en los resultados fueron similares: a mayor longitud total, también hubo mayor longitud estándar para ambos sistemas y experimentos.

Tabla 1: Incremento en peso, FCA y sobrevivencia de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	E1		E2	
	SBR	SA	SBR	SA
Peso inicial (g)	4.46 \pm 0.787	4.86 \pm 0.94	1.60 \pm 0.58	1.69 \pm 0.42
Peso final (g)	20.32 \pm 5.07	17.18 \pm 6.30	4.24 \pm 2.45	8.49 \pm 4.31
Biomasa total inicial (g)	446.1	486.1	320.3	338.0
Biomasa total final (g)	1,483	1,443	534.6	1,290.3
CA (g)	15.86	12.32	2.64	6.80
TCA (g/día)	0.16	0.12	0.02	0.05
CR (%)	355.40	253.40	164.90	402.28
TCR (%/día)	3.52	2.51	1.31	3.19
TCE (%/día)	1.50	1.25	0.77	1.28
FCA	1.73	2.06	9.39	3.63
Sobrevivencia	73	84	63	76

Tabla 2: Incremento en longitud total de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	E1		E2	
	SBR	SA	SBR	SA
LT inicial (cm)	6.35 \pm 0.54	6.52 \pm 0.68	4.71 \pm 0.48	4.54 \pm 0.46
LT final (cm)	11.22 \pm 0.89	10.54 \pm 0.97	6.32 \pm 1.01	7.85 \pm 1.35
CA (cm)	4.87	4.02	1.60	3.31
TCA (cm/día)	0.05	0.04	0.01	0.03
CR (%)	76.73	61.63	33.99	72.84
TCR (%/día)	0.76	0.61	0.27	0.58
TCE (%/día)	0.56	0.48	0.23	0.43

Tabla 3: Incremento en longitud estándar de carpa koi en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	E1		E2	
	SBR	SA	SBR	SA
LE inicial (cm)	4.73 \pm 0.53	4.76 \pm 0.46	3.48 \pm 0.47	3.49 \pm 0.31
LE final (cm)	8.03 \pm 1.003	7.63 \pm 0.99	4.87 \pm 0.91	6.13 \pm 1.11
CA (cm)	3.30	2.87	1.39	2.64
TCA (cm/día)	0.03	0.03	0.01	0.02
CR (%)	69.76	60.37	40.05	75.69
TCR (%/día)	0.69	0.60	0.32	0.60
TCE (%/día)	0.52	0.47	0.27	0.45

En la Figura 1 se muestra el incremento de peso en las carpas koi durante el segundo periodo experimental. Se puede observar que la ganancia en peso fue menor en el SBR e inclusive disminuyó del 5 al 11 de agosto. En este sistema y en esas fechas específicas la propagación de *Argulus* fue la mayor. El 13 de agosto se agregó Dimilin® en ambos SAAI para combatir la presencia de este ectoparásito. Se puede observar que a partir de la fecha de aplicación de este insecticida (regulador del crecimiento), la ganancia en peso en el SBR aumentó notoriamente, mientras que en el Sistema Acuapónico, la presencia de *Argulus* así como la aplicación de Dimilin® no mostraron un efecto en la tasa de crecimiento de las carpas.

En la Figura 2 se muestra el incremento en longitud total y estándar de las carpas durante el segundo periodo experimental, mientras que en la Figura 3 se observa el incremento en la longitud dorso-ventral y en el grosor o ancho de estos peces. En estas mediciones biométricas también se observa una tendencia similar a la obtenida en la ganancia de peso: en el SBR el incremento de estos parámetros es menor, la longitud dorso-ventral y el grosor de los peces disminuyen del 5-11 de agosto e incrementan a partir de la aplicación de Dimilin®.

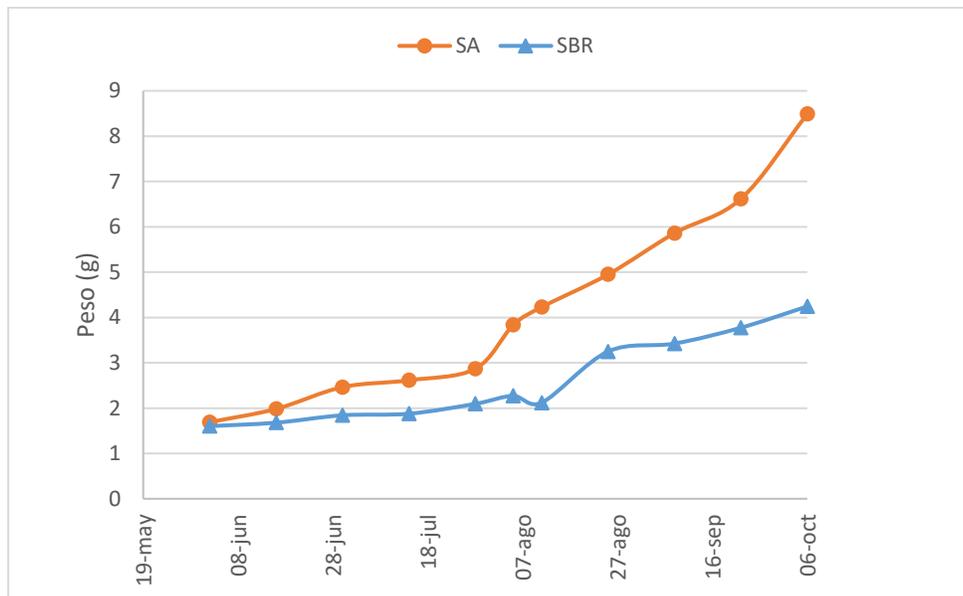


Figura 1: Incremento de peso en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental.

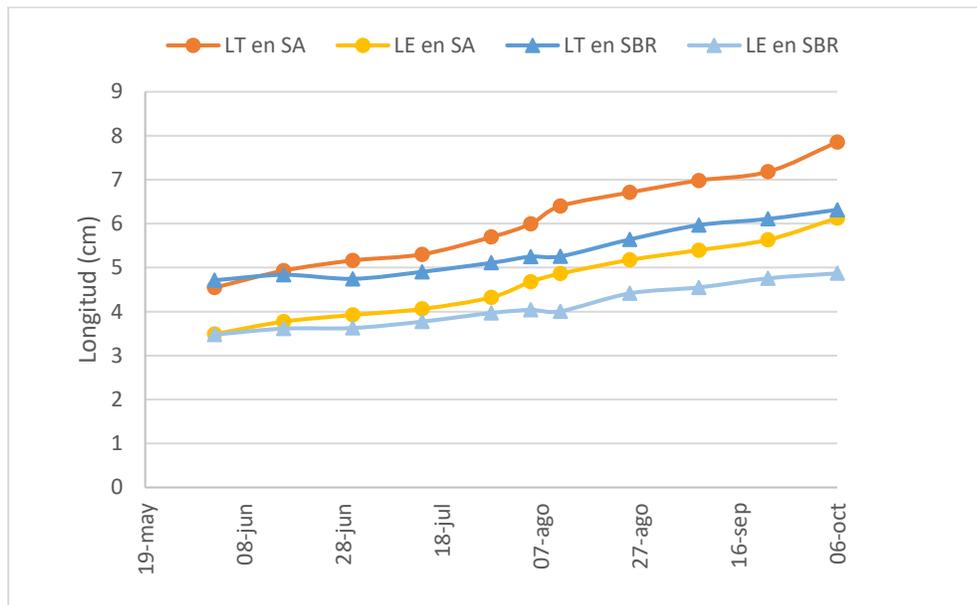


Figura 2: Incremento de la longitud total y estándar en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental.

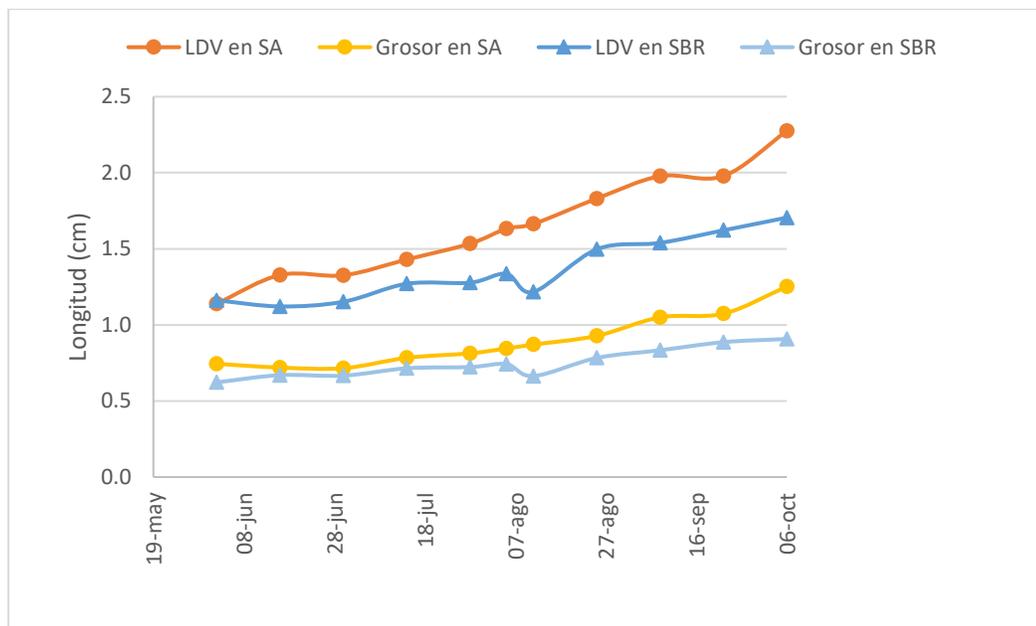


Figura 3: Incremento de la longitud dorso-ventral y del grosor en carpas koi cultivadas en dos SAAI durante el segundo periodo experimental.

Lechugas

En ambos sistemas de agro-acuicultura integrada, los valores de calidad del agua (temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto, amonio y nitritos) permanecieron dentro del rango óptimo o de tolerancia para el cultivo de lechuga, a excepción de los nitritos en el SBR durante el segundo periodo experimental, donde se rebasó la concentración promedio de 1 mg/l (Tabla 4). También, en ambos SAAI se acumularon nutrientes lo cual permite aprovechar el agua de los cultivos de peces para la fertirrigación (Tabla 5).

Sin embargo, el Sistema Acuapónico mantuvo una calidad del agua más apropiada para la integración de los cultivos de carpa koi y lechuga (pH más cercano a la neutralidad, menor concentración de nitritos), así como una mayor acumulación de nutrientes. Esto se puede observar durante ambos periodos experimentales, para nutrientes como nitrato, fosfato, sulfato, potasio y magnesio. En el caso del calcio, se presentó una mayor acumulación en el SBR (Tabla 5).

Tabla 4: Promedios, máximos y mínimos de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, amonio y nitritos para los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	S. Recambios E1	S. Recambios E2	S. Acuapónico E1	S. Acuapónico E2
Temperatura (°C)				
Promedio	22.27 \pm 1.23	21.54 \pm 1.51	21.37 \pm 1.44	22.59 \pm 1.70
Mínimo	19.15 \pm 0.13	18.30 \pm 0.10	16.80 \pm 0.42	19.13 \pm 0.14
Máximo	24.60 \pm 0.29	25.90 \pm 0.10	24.10 \pm 0.06	26.72 \pm 0.12
pH				
Promedio	8.51 \pm 0.34	8.36 \pm 0.28	7.83 \pm 0.21	7.69 \pm 0.27
Mínimo	7.70 \pm 0.01	7.71 \pm 0.15	7.58 \pm 0.01	7.30 \pm 0.14
Máximo	9.06 \pm 0.02	9.52 \pm 0.04	8.38 \pm 0.02	8.35 \pm 0.05
Conductividad eléctrica (mS/cm)				
Promedio	0.54 \pm 0.11	0.65 \pm 0.17	1.10 \pm 0.47	0.59 \pm 0.07
Mínimo	0.47 \pm 0.01	0.32 \pm 0.00	0.47 \pm 0.01	0.45 \pm 0.01
Máximo	0.87 \pm 0.01	0.86 \pm 0.01	2.32 \pm 0.01	0.75 \pm 0.01
Oxígeno disuelto (mg/l)				
Promedio	7.84 \pm 3.13	-	7.15 \pm 1.01	-
Mínimo	3.89 \pm 0.75	-	5.47 \pm 0.64	-
Máximo	15.39 \pm 0.96	-	9.32 \pm 0.80	-
Amonio no ionizado (mg/l)				
Promedio	0.77 \pm 0.57	0.84 \pm 0.48	0.49 \pm 0.16	0.48 \pm 0.19
Mínimo	0.12 \pm 0.04	0.35 \pm 0.21	0.15 \pm 0.07	0.33 \pm 0.01
Máximo	2.52 \pm 0.02	2.81 \pm 0.00	0.96 \pm 0.43	1.4 \pm 0.20
Nitritos (mg/l)				
Promedio	0.75 \pm 1.48	2.86 \pm 1.70	0.53 \pm 0.60	0.32 \pm 0.18
Mínimo	0.09 \pm 0.02	0.09 \pm 0.02	0.09 \pm 0.02	0.18 \pm 0.00
Máximo	7.5 \pm 2.12	7.5 \pm 0.71	3.0 \pm 0.00	1.00 \pm 0.01

Tabla 5: Macronutrientes acumulados en los sistemas de agro-acuicultura integrada durante dos periodos experimentales. (Promedio \pm Desviación Estándar).

Parámetro	S. Recambios E1	S. Recambios E2	S. Acuapónico E1	S. Acuapónico E2
Nitrato (mg/l)				
Promedio	9.69 \pm 4.92	16.69 \pm 8.87	42.17 \pm 24.73	27.68 \pm 7.90
Mínimo	0 \pm 0.0	0.75 \pm 1.06	17 \pm 3.11	14.15 \pm 3.89
Máximo	19.2 \pm 1.13	39.85 \pm 6.72	91.4 \pm 8.91	44.6 \pm 0.71
Fosfato (mg/l)				
Promedio	1.41 \pm 1.87	3.95 \pm 2.32	7.67 \pm 8.36	25.29 \pm 8.95
Mínimo	0.14 \pm 0.06	0.25 \pm 0.07	1.035 \pm 0.47	9.95 \pm 0.21
Máximo	6.4 \pm 0.14	7.6 \pm 0.28	24.45 \pm 0.71	44.15 \pm 0.49
Sulfato (mg/l)				
Promedio	48.89 \pm 5.89	48.41 \pm 6.15	54.86 \pm 8.11	67.5 \pm 15.66
Mínimo	32.5 \pm 3.54	37.5 \pm 3.54	35 \pm 0.0	42.5 \pm 3.54
Máximo	60 \pm 0.0	57.5 \pm 3.54	70 \pm 0.0	100 \pm 0.0
Potasio (mg/l)				
Promedio	8.98 \pm 2.83	138.5 \pm 82.15	55 \pm 83.99	360.21 \pm 183.3
Mínimo	3 \pm 0.0	6.3 \pm 0.42	3.5 \pm 0.0	17.2 \pm 0.42
Máximo	17 \pm 1.41	287.5 \pm 10.61	275 \pm 35.36	712.5 \pm 17.68
Magnesio (mg/l)				
Promedio	16.67 \pm 2.10	14.77 \pm 1.88	18.46 \pm 2.57	16.48 \pm 2.85
Mínimo	12.5 \pm 3.54	10 \pm 0.0	15 \pm 0.0	12.5 \pm 3.54
Máximo	22.5 \pm 3.54	17.5 \pm 3.54	22.5 \pm 3.54	22.5 \pm 3.54
Calcio (mg/l)				
Promedio	118.06 \pm 27.98	134.10 \pm 31.31	106.81 \pm 31.64	111.14 \pm 16.54
Mínimo	40 \pm 14.14	55 \pm 7.07	32.5 \pm 3.54	70 \pm 0.0
Máximo	145 \pm 7.07	180 \pm 0.0	160 \pm 0.0	150 \pm 28.28

En las Tablas 6 y 7 se muestran las características físicoquímicas del suelo de Milpa Alta. Se puede apreciar que es un suelo franco-arenoso, no salino, con porosidad media, rico en materia orgánica y extremadamente rico en nitrógeno total (Nt), aunque pobre en fósforo y con un nivel de potasio intercambiable bajo, una CICT muy baja y un nivel medio de calcio y magnesio.

Tabla 6: Parámetros físicos de suelo de Milpa Alta.*Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra *et al.* (2013).

	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Textura
Suelo	1.07± 0.01	2.24 ± 0.09	52.50± 1.87	0.2± 0.03	Porcentaje de arena: 68.2 ± 0.00 Porcentaje de limo: 22.36± 0.51 Porcentaje de arcilla: 9.44± 0.51
Categoría*	Media (1-1.25)	Baja (2.1-2.5)	Media (36-55)	No salino (0-2)	Franco arenosa

Tabla 7: Parámetros químicos del suelo de Milpa Alta. *Criterios de valoración para el análisis de suelos. Fuente: Muñoz-Inestra *et al.* (2013).

Parámetro	Suelo	Categoría*
pH	6.545 ± 0.02	Ligeramente ácido (6.2-6.6)
Materia orgánica (%)	7.84 ± 0.00	Rico (5.1-10)
CICT (cmol/kg)	9.64 ± 0.72	Muy bajo (<10)
Nt (%)	1.29 ± 0.51	Extremadamente rico (> 0.50)
Fósforo asimilable (ppm)	1.94 ± 0.38	Pobre (< 3 ppm)
Potasio intercambiable (ppm)	11.65 ± 0.71	Bajo (<39)
Ca (cmol+/kg)	12.57 ± 0.40	Medio (6.1- 14.0)
Mg (cmol+/kg)	2.66 ± 0.32	Medio (2.1-6.0)

En cuanto al humus generado con desechos acuícolas, todos los parámetros evaluados cumplen con los criterios y especificaciones de calidad establecidas por la norma NMX-FF-109-SCFI-2007 a excepción del nitrógeno total, ya que se obtuvieron bajas concentraciones de este nutriente (Tablas 8 y 9). El humus obtenido cuenta con una densidad aparente y real muy bajas, lo cual resulta en una alta porosidad. Así mismo, la conductividad eléctrica es baja, entrando

dentro de la categoría de no salino, lo cual es benéfico ya que no afecta el cultivo y la productividad de las especies sensibles o poco tolerantes a rangos altos de este parámetro, como es la lechuga. En cuanto a los parámetros químicos, el humus tuvo un pH neutro, lo cual es óptimo en estos abonos, y altos valores de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico total (CICT), y fósforo y potasio asimilables.

Tabla 8: Parámetros físicos del humus. *Criterios de valoración para el análisis de suelos.
Fuente: Muñoz-Inestra *et al.* (2013).

	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)	Conductividad eléctrica (mS/cm)
Humus	0.467 ± 0.001	1.33 ± 0.01	65.007 ± 0.992	0.014 ± 0.003
Categoría*	Muy baja (0.5-0.75)	Muy baja (<2.00)	Alta (56-70)	No salino (0-2.0)
NMX-FF-109- SCFI-2007	0.40-0.90	Sin especificaciones	Sin especificaciones	< 4

Tabla 9: Parámetros químicos del humus. *Criterios de valoración para el análisis de suelos.
Fuente: Muñoz-Inestra *et al.* (2013).

	pH	Materia orgánica (%)	CICT (cmol/kg)	Nt (%)	Fósforo asimilable (ppm)	K intercambiable (ppm)
Humus	7.09 ± 0.05	28.04 ± 1.02	45.89 ± 0.18	0.063 ± 0.007	60.562 ± 0.146	396.26 ± 154.85
Categoría*	Neutro (6.7- 7.4)	Extremadamente rico (>10)	Alto (36-60)	Medianamente pobre (0.06- 0.008)	Extremadamente rico (>20)	Alto (>156)
NMX-FF- 109-SCFI- 2007	5.5- 8.5 preferente 7	20-50	> 40	1-4%	Sin especificaciones	Sin especificaciones

Discusión y Conclusiones

Experimento 1

Al evaluar la tasa de crecimiento de peces bajo diferentes tratamientos, es necesario considerar la calidad del agua de los cultivos debido a que ésta afecta directamente en la salud, sobrevivencia y crecimiento de los organismos. También hay que considerar otras variables que pueden incidir en el crecimiento, como el alimento otorgado o la presencia de alimento vivo (Mallya 2007).

La calidad del agua en ambos sistemas fue adecuada para el cultivo de carpa koi (Tabla 4), ya que la temperatura se mantuvo en el rango óptimo para promover el crecimiento de la carpa (18-24°C), el pH se mantuvo dentro de su rango de tolerancia (5-9; aunque el pH óptimo es 7), la concentración de oxígeno disuelto fue adecuada en ambos sistemas de cultivo ya que se mantuvo en general por encima de los 4 mg/l, y el promedio de amonio no ionizado y nitritos se mantuvo por debajo de 1 mg/l, la cual es la concentración máxima recomendada (Watson *et al.* 2004; FAO 2014). A pesar que durante este experimento, el Sistema Acuapónico presentó menores concentraciones de amonio y nitritos, así como un pH más cercano a la neutralidad, el Sistema de cultivo basado en Recambios presentó mayores rendimientos productivos que el sistema acuícola (Tablas 1, 2 y 3).

El mayor crecimiento obtenido en el SBR se debe posiblemente a la mayor abundancia de alimento vivo complementario en el sistema. Existen múltiples trabajos donde se ha presenciado que los sistemas de cultivo con microalgas presentan mayor incremento en peso, talla y FCA (Martin *et al.* 2000; Rakocy *et al.* 2000; Mohammed y Ramnarine 2014; Cadiz *et al.* 2016) que sistemas que no cuentan con esta fuente de alimento complementario.

La biomasa de bacterias nitrificantes, que se origina de manera natural en el Sistema Acuapónico es mucho menor a la biomasa de organismos fotoautótrofos que se generan en el SBR, lo cual significa que el sistema acuapónico presenta menor cantidad de alimento vivo suplementario para los peces. Esto se debe a que las microalgas generan 15.85 g de sólidos suspendidos volátiles (indicador en este caso de producción de biomasa fotoautótrófica) por cada gramo de nitrógeno disponible (amonio o nitratos), mientras que las bacterias nitrificantes o autótrofas quimiosintetizadoras producen sólo 0.20 g. de sólidos suspendidos volátiles por gramo de amonio disponible (Ebeling *et al.* 2006^a).

En cuanto a las tasas de crecimiento obtenidas en ambos sistemas, existen pocos trabajos que evalúen el crecimiento de la carpa koi en particular. Específicamente para las tallas con las que se trabajó en el presente estudio, no se identificaron trabajos que analicen estos parámetros productivos. Únicamente existe un trabajo de Vasantha *et al.* (2003), en donde analizan el crecimiento de la carpa koi con diferentes pesos y tratamientos, algunos de los cuales coinciden con el presente estudio. En dicho trabajo se reporta una tasa de crecimiento específico (TCE) de 1.02%/día para organismos con peso inicial de 8.42 g y peso final de 14.89 g. También se reporta una TCE de 0.41%/día para organismos que fueron cultivados de los 14.89 a los 18.76 g. Durante el cultivo realizaron recambios totales cada tercer día, se otorgó alimento peletizado con 45% proteína y se alimentó al 5% del peso corporal. Esto contrasta con el manejo efectuado durante el presente estudio donde los recambios fueron menores al 5% por día, se alimentó con 32% de proteína y se proporcionó alimento *ad libitum*. Las TCE reportadas por dichos autores son menores a las obtenidas durante el presente experimento tanto para el Sistema Acuapónico (1.25%/día), como para el SBR (1.5%/día).

Experimento 2

Durante el segundo periodo experimental, la calidad del agua de ambos sistemas también fue adecuada para el cultivo de carpas koi a excepción de la concentración de nitritos obtenida en el SBR, la cual fue de 2.86 ± 1.70 mg/l (Tabla 4). El Sistema Acuapónico en general presentó una mayor temperatura, pH más neutro, y menores concentraciones de nitritos y amonio, lo cual puede favorecer directamente el crecimiento de las carpas, pero adicionalmente, se pudo observar que esta mejoría en la calidad del agua tuvo influencia directa en la salud de los peces (Mallya 2007) ya que favoreció a que se propagara en menor medida el piojo de las carpas (*Argulus japonicus*) y no se volviera un problema grave para el cultivo como en el caso del SBR.

Particularmente durante el E2, hubo deficiencia de disponibilidad de agua potable en la zona experimental por lo cual se tuvieron que realizar recambios de agua muy bajos (menores de 2% por día), y en el SBR no se extrajeron los lodos acuícolas con la regularidad necesaria. Debido a ello se optó por mantener el sistema con aireación las 24 horas del día (en vez de solamente en la noche como en el E1) con motivo de favorecer la nitrificación suspendida como en los sistemas de producción intensivos llamados “Sistemas de cultivo en tanques de agua verde” (Greenwatertank culture systems); y mejorar así la calidad del agua bajo las condiciones existentes. Al hacer esto se promovió que el amonio fuera metabolizado por bacterias nitrificantes en mayor medida que las microalgas. Se puede observar en la Tabla 4, que existió una mayor acumulación de nitritos y nitratos en el SBR durante este periodo experimental. Sin embargo, a diferencia de los “Sistemas de cultivo en tanques de agua verde” comerciales y los sistemas acuapónicos, no se logró estabilizar el proceso de nitrificación por lo cual las

concentraciones de amonio y nitritos se mantuvieron altas durante el periodo experimental. En estos sistemas también es importante presentar una remoción eficiente de los sólidos sedimentables, de preferencia diaria, y una aireación y recirculación vigorosa (Martin *et al.* 2000; Hargreaves 2006), lo cual no fue posible realizar durante el experimento.

Durante este periodo experimental, se obtuvieron rendimientos productivos notoriamente mayores en el Sistema Acuapónico (Tablas 1, 2 y 3). La biomasa final en este sistema fue de 1,290.3 g, mientras que en el SBR fue de 534.6 g. Esto se debe a que en el SBR hubo mayor mortalidad, y menor ganancia de peso tanto por problemas de calidad de agua como por la acción del *Argulus*. Adicionalmente, el sistema contaba con menos alimento vivo que durante el E1, porque se promovió un mayor crecimiento de bacterias nitrificantes en vez de microalgas. Por todo esto, el FCA fue mucho mayor en el SBR.

Consideraciones para el cultivo de lechuga

Los valores obtenidos de calidad de agua y acumulación de nutrientes muestran que en ambos sistemas se puede integrar el cultivo de lechuga, sin embargo, el Sistema Acuapónico mantuvo una calidad del agua más apropiada para la integración agrícola bajo las condiciones experimentales de biomasa inicial de peces, porcentaje de alimentación diario y de recambios de agua. Esto se debe a que en el SA se presentó una mayor capacidad de acumulación de nutrientes que el SBR (Tabla 5), lo cual se puede observar durante ambos periodos experimentales y para todos los macronutrientes menos calcio. Esto sucede debido a que en el SBR un porcentaje importante de los nutrientes fueron consumidos por las microalgas. Además de sus requerimientos en carbono, hidrógeno y oxígeno para la formación de biomasa celular,

el fitoplancton requiere de macronutrientes como nitrógeno en forma de amonio o nitratos, calcio, potasio, fósforo, magnesio, sulfuro, y otros micronutrientes como hierro, silicio, entre otros. Aunque las bacterias nitrificantes también consumen parte de los nutrientes disponibles, la biomasa bacteriana que se forma por cada gramo de nitrógeno, es 79 veces menor a la de las microalgas, por lo cual existe menor consumo de estos y quedan disponibles en mayor proporción para las plantas superiores (Timmons *et al.* 2009). Adicionalmente, una ventaja de que las bacterias nitrificantes mantengan la calidad del agua de los sistemas acuapónicos en comparación con las microalgas, es que el amonio y los nitritos son las fuentes de nitrógeno que utilizan para su metabolismo, y al oxidarlos, existe una acumulación de nitratos que es la principal forma nitrogenada que aprovechan las hortalizas, mientras que las microalgas pueden consumir nitratos más no producirlos (Richmond 2004).

Adicionalmente, el pH ideal para el cultivo de lechugas está entre 5.8 y 6.2, pero pueden crecer bien en un pH neutro o ligeramente básico (7.5). Cuando el pH se encuentra por encima de esta magnitud se afecta directamente la capacidad que presentan las plantas para asimilar los nutrientes a pesar que estos existan en abundancia en el medio de cultivo (FAO 2014). En los SAAI, lo ideal es mantener un pH neutro o ligeramente ácido (6.5-7) considerando los requerimientos de los peces, hortalizas y bacterias nitrificantes (Connolly y Trebic 2010). En el SBR mantuvo un pH más básico que el acuapónico, con un promedio de 8.51 y 8.36 en los E1 y E2 respectivamente, mientras que en el SA los promedios fueron de 7.83 y 7.69. A pesar de esto, en los dos sistemas la tendencia del pH fue irse acidificando con el tiempo, concluyendo con un pH de 7.7 y 7.71 en el SBR (considerando ambos periodos experimentales); y de 7.58 y 7.30 en el sistema acuapónico. Estos valores finales son más adecuados para integrar el cultivo de hortalizas.

A pesar que en el presente trabajo se demuestra la capacidad de acumulación de nutrientes de cada SAAI, cabe señalarse que la biomasa de peces con las que se iniciaron y finalizaron ambas corridas experimentales es baja para mantener producciones agrícolas. En los sistemas acuapónicos se requiere de una mayor biomasa de peces para generar suficientes nutrientes disueltos y sostener así el cultivo de hortalizas a escala comercial. Esto se debe a que los nutrientes derivados del componente acuícola son la fuente principal que se otorga a las hortalizas, y únicamente se suelen agregar de manera complementaria aquellos micronutrientes que el alimento para los peces no contiene en suficiente concentración (Timmons *et al.* 2009).

Por ejemplo, Licamele (2009), determinó que una cantidad de 5 kg m^{-3} de tilapias, siendo alimentadas al 2% de su biomasa al día, permiten producir 4.7 kg m^{-2} de lechugas en 35 días. También determinó que cada lechuga, de $176.75 \text{ g.} \pm 31.03 \text{ g.}$, asimila aproximadamente 5.96 gramos de nitrógeno. Es decir que bajo dichas condiciones experimentales, un kilogramo de peces permite producir únicamente 6.4 lechugas (con un peso total de 1.13 kg), las cuales fijan 38.13 g. de nitrógeno.

En este experimento el SA tuvo una concentración máxima de nitratos de $91.4 \pm 8.91 \text{ mg/l}$ (Tabla 5), con una biomasa final de 1.44 kg. El sistema cuenta con un volumen total de 871 litros, lo cual equivale aproximadamente a un total de 79.7 g. de nitrógeno, es decir, al cultivo de 13.4 lechugas. Esto corresponde a un total de 9.31 lechugas por kilo de peces, siendo mayor a lo reportado por dicho autor, sin embargo, en el presente trabajo se cultivaron carpas koi en vez de tilapias, y las tallas de cultivo, alimentos otorgados, programas y tasas de alimentación también fueron diferentes.

Por otro lado, el SBR obtuvo una concentración máxima de nitratos de 39.85 ± 6.72 , lo cual equivale al cultivo de 5.8 lechugas, si se cultivaran como huertos flotantes.

En los sistemas acuapónicos a mayor biomasa de peces existe una mayor tasa de alimentación y acumulación de nutrientes (Wilson 2005), sin embargo, en sistemas de cultivo fotoautotróficos no sucede lo mismo debido al consumo por parte de las microalgas pero también a que el incremento en biomasa suele venir acompañado de mayores recambios de agua, o de la implementación de sistemas más tecnificados e intensivos donde las microalgas no son la fuente principal de remoción de amonio, sino son las bacterias nitrificantes o heterotróficas como el caso del biofloc (Martin *et al.* 2000; Watanabe *et al.* 2002; Ebeling *et al.* 2006^a; Ebeling *et al.* 2006^b; Hargreaves 2006).

Sin embargo, en el SAAI como en el SBR, se pueden también realizar cultivos en suelo utilizando el agua del componente agrícola para fertirrigar. De esta manera se cuenta con nutrimentos adicionales provenientes de este sustrato de cultivo, así como de la aplicación de otros tipos de fertilizantes, como el humus. Se pueden integrar además prácticas para mejorar el estado del suelo, aumentar su retención hídrica, mejorando así la eficiencia productiva y la sustentabilidad del cultivo (FAO 2011).

Por ello se analizó una muestra de suelo obtenida de una parcela de Milpa Alta (Tablas 6 y 7). El nitrógeno total de este suelo equivale a tener 12.9 g/kg de suelo, lo cual es muy alto. Es decir, en cuanto a este macronutriente se refiere, un kilogramo de suelo tiene suficiente nutrientes para el cultivo de 2.2 lechugas. Sin embargo, en este suelo existen deficiencias de otros nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio, y también cuenta con una CICT muy baja. El agua del SBR cuenta con dichos nutrientes, y las concentraciones de calcio y magnesio obtenidas

fueron altas, similares a las del Sistema Acuapónico. La fertirrigación utilizando el efluente acuícola del SBR podría servir como fuente de nutrientes complementaria, y favorecer el desarrollo social, la seguridad alimentaria así como incrementar los rendimientos productivos y disminuir a su vez el costo o impacto ambiental al reutilizar los productos de desecho.

Adicionalmente el humus producido a partir de productos de desecho provenientes de cultivos acuícolas, resultó ser rico en fósforo, así como presentar altas concentraciones de potasio intercambiable y una CICT alta también, lo cual carece el suelo muestreado, y por ello, este fertilizante sería benéfico para el suelo de la región. Además, el humus generado presenta una densidad aparente y densidad real muy baja, así como una porosidad alta, lo cual mejora las características físicas del suelo muestreado en Milpa Alta.

Finalmente, cabe resaltar que la concentración de nitrógeno total obtenida en el humus fue baja debido a las características particulares de los sistemas de los cuales fueron extraídos los lodos (se otorga alimento vivo en vez de peletizado, baja densidad de confinamiento, existe una abundante propagación de plantas acuáticas en los estanques las cuales consumen del nitrógeno disponible, existen prácticas de recambios de agua y poca generación de lodos). Sin embargo otros estudios han reportado mayores concentraciones de nitrógeno en lodos acuícolas y en humus proveniente del composteo de este residuo. Piedrahita (2003) recopila concentraciones de nitrógeno total reportadas en filtros, estanques de sedimentación, y clarificadores de diversos cultivos acuícolas, las cuales van de 0.2 a 3.5 g/l. ECOING (2009) publicó una guía de aplicación de lodos de piscicultura en suelos, y tras la recapitulación y estudio de estos residuos en varias granjas chilenas y europeas, reporta que los lodos acuícolas son ricos en materia orgánica, nitrógeno y fósforo, por lo que aportan a la fertilidad del suelo. La presencia de

nitrógeno total es variable, y en sus estudios fluctuó entre 0.65 y 49.5%. Márquez (2005) estudió la composición de sedimentos de dos granjas acuícolas chilenas posterior a su tratamiento en lagunas de oxidación y encontró concentraciones de nitrógeno total de 92.4-105.6 g/kg (base seca). Danahar y Shultzs (2013) realizaron tres compostas con diferentes proporciones de lodos acuícolas y heno, y obtuvieron concentraciones finales de 0.15-0.16 g/kg de nitrógeno disponible para las plantas.

El contenido de nitrógeno en los lodos acuícolas suele ser alto ya que aproximadamente 36% del alimento suministrado a los peces se pierde en forma de materia orgánica y se deposita como lodos o sedimentos (Brune *et al.* 2003). Debido a ello, la relación del volumen de heces generadas por tonelada de organismos producidos, es similar a lo producido por especies pecuarias importantes, a pesar de la diferencia en tamaños. También se observan concentraciones de nitrógeno total similares (Yeo *et al.* 2004).

- Ambos sistemas pueden sostener cultivos integrales de carpa koi y lechuga, ya que los valores promedio de calidad del agua permanecieron dentro del rango óptimo o de tolerancia para dichas especies, sin embargo el sistema acuapónico mantuvo una calidad del agua más apropiada para la integración de estos cultivos, así como una mayor acumulación de nutrientes.
- Durante el primer periodo experimental, los rendimientos productivos fueron mayores en el SBR, posiblemente debido a la mayor abundancia de alimento vivo complementario en el sistema, ya que la calidad del agua fue similar en ambos sistemas, e inclusive el Sistema Acuapónico presentó menores concentraciones de amonio y

nitritos, así como un pH más cercano a la neutralidad. Existen múltiples trabajos donde se ha presenciado que los sistemas de cultivo con microalgas presentan mayor incremento en peso, talla y FCA.

- En condiciones limitantes de disponibilidad de agua (E2), el Sistema Acuapónico obtuvo rendimientos productivos mucho mayores que el SBR. En este ciclo de cultivo además de presentarse la limitante en este recurso, existieron problemas por la presencia de *Argulus* en los cultivos. Se observó que el hecho que el Sistema Acuapónico mantuviera una mejor calidad de agua favoreció a que fuera menor la propagación del piojo de las carpas en este sistema, y no se volviera un problema grave para el cultivo como en el caso del SBR. Así mismo hubo mayor crecimiento, sobrevivencia y un mejor FCA.
- La aplicación de Dimilin® fue una medida de control efectiva contra este parásito y se observó una mayor tasa de crecimiento en el SBR a partir de su aplicación.
- A pesar que en el presente trabajo se demuestra la capacidad de acumulación de nutrientes de cada SAAI, cabe señalarse que la biomasa de peces con las que se iniciaron y finalizaron ambas corridas experimentales es baja para mantener producciones agrícolas. En los sistemas acuapónicos se requiere de una mayor biomasa de peces para generar suficientes nutrientes disueltos y sostener así el cultivo de hortalizas a escala comercial. Esto se debe a que los nutrientes derivados del componente acuícola son la fuente principal que se otorga a las hortalizas, y únicamente se suelen agregar de manera complementaria aquellos micronutrientes que el alimento para los peces no contiene en suficiente concentración. Sin embargo, en el SBR, el riego del efluente acuícola tiene la función de otorgar el agua requerida por las hortalizas y ser una fuente complementaria

de nutrientes para los cultivos, ya que también se cuenta con los nutrientes del propio suelo, y se pueden agregar otros fertilizantes, como humus. Adicionalmente se pueden integrar otras prácticas para mejorar la fertilidad del suelo, aumentar su retención hídrica, e incrementar así la eficiencia productiva y la sustentabilidad de los cultivos.

- Se observó en la muestra de suelo de Milpa Alta que existen deficiencias de nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio, y también cuenta con una CICT muy baja. El agua del SBR cuenta con dichos nutrientes, y las concentraciones obtenidas de calcio y magnesio obtenidas fueron altas, similares a las del Sistema Acuapónico. La fertirrigación utilizando el efluente acuícola del SBR podría servir como fuente de nutrientes complementaria. Adicionalmente el humus producido a partir de productos de desecho provenientes de cultivos acuícolas, resultó ser rico en fósforo y potasio intercambiable y presentó una CICT alta, mientras que el suelo muestreado presentó deficiencias en estos parámetros; por lo cual este fertilizante sería un complemento benéfico para el suelo de la región. Además, el humus generado presenta una densidad aparente y densidad real muy baja, así como una porosidad alta, lo cual mejora las características físicas del suelo muestreado en Milpa Alta.

Bibliografía

- Abdul-Rahman S., Saoud P., Owaied M.K., Holail H., Farajalla N., Haidar M., Ghanawi J. 2011. Improving water use efficiency in semi-arid regions through integrated aquaculture/agriculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 23: 212-230.
- Brune D.E., Schwartz G., Eversole A.G., Collier J.A., Schwedler T.E. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. *Aquac. Eng.* 28: 65–86.

- Busacker P.G., Adelman R.I., Goolish M.E. 1990. Growth. 363-387. En: Schreck, B.C., B. P. Moyle. Methods for Fish Biology. American Fisheries Series 13. Great Britain, 684p.
- Cadiz R.E., Traifalgar R.F.M., Sanares R.C., Andrino-Felarca K.G.S., Corre V.L. 2016. Comparative efficacies of tilapia green water and biofloc technology (BFT) in suppressing population growth of green Vibrios and *Vibrio parahaemolyticus* in the intensive tank culture of *Penaeus vannamei*. AACL Bioflux 9(2): 195-203.
- Castell J.D., Tiews K. 1980. Report of the EIFAC, IUNS and ICES working group on the standardization of methodology in fish nutrition research. EIFAC technical paper 36. Hamburg, Federal Republic of Germany, 21–23 March, 1979, 24p.
- Connolly K., Trebic T. 2010. Optimization of backyard aquaponic food production system. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, McGill University, 74p.
- Danahar J., Shultz C. 2013. Aprovechamiento de residuos de la acuicultura. Presentación en Cuarto Congreso Internacional de Acuaponia. Aquagreenexpo, Toluca, México, 71p.
- Dey M., Kambewa P., Prein M., Jamu D., Paraguas F., Pems D., Briones R. 2006. Impact of development and dissemination of integrated aquaculture-agriculture (IAA) technologies in Malawi. NAGA, World Fish Center Quarterly 29 (1 & 2): 28- 35.
- Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. 2006^a. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture 257: 346–358.
- Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. 2006^b. Understanding photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic bacterial based systems using basic water quality parameters. 6th International Recirculating Aquaculture Conference, Roanoke, VA, 10p.
- ECOING. 2009. Guía de aplicación de lodos de piscicultura en suelos. Reporte interno de ECOING LTDA para el Ministerio de Agricultura (SAG), Gobierno de Chile, 21p.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan-Nik W.N.S., Hassan A. 2009. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. Desalination and Water Treatment, 5 (1-3): 19-28
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan-Nik W.N.S., Hassan A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. Bioresource Technology 101:1511-1517.
- FAO. 2004. Agro-acuicultura integrada. Manual básico. FAO documento técnico de pesca 407. Roma, Italia, 163p.
- FAO. 2011. The state of world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. FAO Fiat Panis y Earthscan, Rome Italy, 308p.
- FAO. 2014. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589. Roma, Italia, 288p.
- Gurung T.B. 2012. Integrated aquaculture within agriculture irrigation for food security and adaptation to climate change. Hydro Nepal, Special Issue: 73-77.

- Hargreaves J.A. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34: 344-363.
- Hussein A.H.A. 2009. Phosphorous use efficiency by two varieties of maize at different phosphorous fertilizer application rates. *Res. J. Appl. Sci.* 4(2): 85–93.
- Janes H., Cavazzoni J., Alagappan G., Specca D., Willis J. 2005. Landfill gas to energy: A demonstration controlled environment agriculture system. *HortScience* 40 (2): 279-282.
- Lennard W.A., Leonard B.V. 2004. A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponics test system. *Aquaculture International* 12: 539-553.
- Lennard W.A., Leonard B.V. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in a Aquaponic test system. *Aquaculture International* 14: 539-550.
- Licamele J.D. 2009. Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. The University of Arizona, 173p.
- Mallya Y.J. 2007. The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture. The United Nations University, Fisheries Training Programme, 30p.
- Márquez C. F. 2005. Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio. Universidad Católica de Temuco, Ciencias de la Ingeniería, Temuco, Chile, 75p.
- Martin J.M., Rakocy J.E., Cole W.M. 2000. Greenwater tank culture of tilapia. En: Creswell, R.L. (ed.) *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*. No. 51, Gulf and Caribbean Fisheries Institute, c/o Harbor Branch, Oceanographic Institution, Florida, 330–340 pp.
- Mohammed R.S., Ramnarine I.W. 2014. Comparison between greenwater and clearwater hatchery systems during the masculinization process of silver tilapia, *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae). *Global Science Research Journals* 2 (5): 177-181.
- Moya T. B., De la Vina W.C., Bhuiyan S.I. 1986. The potential of farm reservoir use in increasing productivity in rainfed rice areas. *Philipp. J. Crop Sci.* 11: 125-132.
- Muñoz-Iniestra D.J., Soler-Aburto A., López-Galindo F., Hernández-Moreno M.M. 2013. *Edafología. Manual de Métodos de análisis de suelos*. Coordinación Editorial de la Universidad Nacional Autónoma de México, México, 139p.
- Murshed-E-Jahan K., Crissman C., Antle J. 2013. Economic and social impacts of integrated aquaculture-agriculture technologies in Bangladesh. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems. Penang, Malaysia. Working Paper: AAS-2013-02, 15p.
- Narayan-Sethi L., Panda S.N., Pholane L.P. 2005. Economic viability of rice-fish integration with the on-farm reservoir of rainfed ecosystem in eastern India. *Journal: Food, Agriculture and Environment (JFAE)* 3 (3&4): 194-199.
- Panigrahi B., Panda S. N. 2003. Optimal sizing of on-farm reservoirs for supplemental irrigation. *J. Irrig. & Drain. Engg. (ASCE)*, 129 (2): 117-128.

- Panigrahi B., Panda S.N. 2001. Simulation of ponding and soil moisture status through water balance model for rainfed upland rice. *Agric. Engg. J., Asian Assoc. of Agric. Engineers*, 10: 39-56.
- Pantanella E. 2008. Pond aquaponics: new pathways to sustainable integrated aquaculture and agriculture. *Aquaculture News* 34: 10-11.
- Pantanella E. 2010. New aquaponics research in Italy. *Aquaponics Journal* 56: 25-27.
- Piedrahita R.H. 2003. Reducing the potential environmental impact in tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226: 35-44.
- Rakocy J.E., Bailey D.S., Martin J.M., Shultz R.C. 2000. Tilapia production systems for the lesser Antilles and other resource-limited tropical areas. En: Fitzsimmons K., Carvalho Filho J. (Eds). *Tilapia Aquaculture in the 21st Century: Proceedings from the Fifth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, Rio de Janeiro, Brazil, 651-662 pp.
- Rasowo J., Auma E., Ssanyu G., Ndunguru M. 2008. Does African catfish (*Clarias gariepinus*) affect rice in integrated rice-fish culture in Lake Victoria Basin, Kenya? *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2(10): 336- 241.
- Ricker W. 1979. Growth rates and models. En: Hoar W., Randall D., Brett J. (Eds). *Fish Physiology. Volume VIII; Bioenergetics and Growth*. Academic Press, New York, USA, 677-743 pp.
- Richmond A. 2004. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science Ltd, Iowa, USA, 577p.
- Timmons M.B., Ebeling J.M., Piedrahita R.H. 2009. *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Editorial Cayuga Aqua Ventures, primera edición, 959p.
- Vasanthan L., Jeyakumar A., Pitchai M.A. 2003. Influence of music on the growth of Koi Carp, *Cyprinus carpio* (Pisces: Cyprinidae). *NAGA, World Fish Center Quarterly* 26 (4): 25-26.
- Wang X., He X., Chen B., Xie C. 2011. Rice field for the treatment of pond aquaculture effluents. *African Journal of Biotechnology* 10 (34): 6456-6465.
- Watanabe W.O., Losordo T.M., Fitzsimmons K., Hanley F. 2002. Tilapia production systems in the Americas: Technological advances, trends, and challenges. *Reviews in Fisheries Science*, 10 (3 & 4): 465-498.
- Watson C., Hill J., Poudel D. 2004. Species profile: Koi and Goldfish. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication No. 7201, 6p.
- Wilson G. 2005. Greenhouse aquaponics proves superior to inorganic hydroponics. *Aquaponics Journal*, 4th Quarter (39): 14-17.
- Yeo S.E., Binkowski F.P., Morris J.E. 2004. Aquaculture effluents and waste by-products. Characteristics, potential recovery, and beneficial reuse. North Central Regional Aquaculture Center (NCRAC), EUA, 47p.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA

Resumen

Dentro del marco de la sustentabilidad, en los proyectos productivos y de transferencia tecnológica debe existir un balance y se deben cuidar los aspectos económicos, sociales y ambientales; por ejemplo implementando tecnologías amigables con el ambiente que permitan un desarrollo socioeconómico y sean viables para las condiciones locales. La agricultura en la Ciudad de México se caracteriza por presentar condiciones limitantes en extensión de tierra, cantidad y calidad de agua en comparación a la media nacional. En este contexto, la promoción e implementación en mayor escala de sistemas de producción sustentables en donde se optimice el agua, espacio e insumos utilizados, y se incrementen los rendimientos productivos y la rentabilidad, beneficiaría directamente a los productores. Los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) cumplen con estas características, por lo cual se realizaron una serie de Análisis Costo Beneficio (ACB) de dos SAAI que pueden implementarse en diferentes contextos socioeconómicos y productivos dentro de la misma ciudad: un sistema acuapónico de raíz flotante (SA) y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación (SBR), ambos enfocados al cultivo de carpa koi y lechuga. Los ACB se realizaron con los rendimientos y costos de producción obtenidos durante el desarrollo experimental pero también se hicieron proyecciones considerando su capacidad productiva media y máxima, así como precios de venta al menudeo y mayoreo. Adicionalmente, se realizaron estos análisis económicos para SAAI similares a los utilizados pero de marcas mexicanas, las cuales son más viables de transferir. Los resultados muestran que a densidades de confinamiento bajas solo el SBR es rentable, mientras que cultivando a la capacidad productiva media y máxima, ambos sistemas son rentables. Sin embargo considerando los precios de venta al mayoreo el SBR presenta una RBC baja, de 1.2 y 1.4 para la producción media y máxima del sistema. El SA presentó RBC mayores, de 2.3 y 3.3 respectivamente. Los sistemas acuapónicos evaluados para la transferencia de tecnología presentaron RBC iguales o mayores al SA utilizado durante el experimento, pero con costos de inversión más bajos. El ACB es una herramienta útil cuantificar los costos y beneficios totales de cada SAAI y para informar a los productores; sin embargo la decisión de qué sistema implementar depende también de las condiciones productivas, socioeconómicas y ambientales que ellos presenten.

Abstract

Within the framework of sustainability, in production and technology transfer projects there must be a balance and care must be taken in economic, social and environmental aspects; For example by implementing environmentally friendly technologies that allow socio-economic development and are feasible for local conditions. Agriculture in Mexico City is characterized by limiting conditions in terms of land extent, quantity and quality of water compared to the

national average. In this context, the promotion and scale-up of sustainable production systems where water, space and inputs are optimized, and productive yields and profitability are increased, would directly benefit producers. The Integrated Agro-Aquaculture Systems (SAAI) comply with these characteristics. A series of Cost Benefit Analysis (ACB) of two SAAI were carried out, which can be implemented in different socioeconomic and productive contexts within the city: A raft aquaponics system (SA) and a culture system based on water exchange for irrigation (SBR), both focused on the cultivation of koi carp and lettuce. The ACBs were carried out with the yields and production costs obtained during the experimental period but also surveys were made considering their average and maximum productive capacity, as well as retail and wholesale prices. In addition, these economic analyzes were performed for SAAI similar to those used but of Mexican brands. The results show that at low confinement densities only the SBR is profitable, while growing the average and maximum productive capacity, both systems are profitable. However, considering the wholesale prices, the SBR has low RBCs of 1.2 and 1.4 for the average and maximum production capacity of the system. The SA showed higher RBCs, of 2.3 and 3.3 respectively. The aquaponics systems evaluated for the transfer of technology showed RBCs equal to or greater than the SA used during the experiment, but with lower investment costs. The CBA is a useful tool to quantify the total costs and benefits of each SAAI and to inform the producers; However the decision of which system implement also depends on the productive, socioeconomic and environmental conditions that they present.

Introducción

Actualmente el análisis costo beneficio (ACB) es el método más utilizado en la evaluación de proyectos, programas y de políticas relacionadas con el uso de los recursos naturales. Se utiliza como herramienta para la toma de decisiones, con base en el criterio de obtener el máximo flujo de beneficios económicos o utilidades netas, al menor costo posible (Carpenter *et al.* 2009, Daily *et al.* 2009). En el caso de proyectos productivos y transferencias tecnológicas, se requiere indiscutiblemente que los sistemas de producción involucrados sean rentables. De no ser así, el interés por parte de los productores de adoptar dichas tecnologías se verá mermado (IFAD 2008).

Sin embargo, dentro de la economía neoclásica, en los ACB se tienden a maximizar las utilidades al no internalizar (o no en su totalidad) los costos derivados de las externalidades negativas generadas (ambientales y sociales), ni considerar los servicios ecosistémicos afectados, sino únicamente los bienes de aprovisionamiento. En este contexto, las actividades económicas no convergen con lo socialmente deseable en cuanto al estado ecosistémico, ya que la sociedad es quien paga y vive el daño generado por los agentes económicos (Xepapadeas 2009; Wegner y Pascual 2011).

En el marco de la sustentabilidad, la rentabilidad de un proyecto productivo, no es el único factor importante a considerar. Por definición, mediante el desarrollo sustentable se busca cubrir las actuales necesidades humanas sin poner en riesgo las de generaciones futuras, por lo cual, las actividades productivas se deben realizar preservando los sistemas naturales (Tréllez-Solís 2004). Esto significa que en los sistemas de producción debe existir un balance entre las metas

económicas, ambientales y de desarrollo social, y que las propuestas se deben enfocar y adaptar de manera integral al contexto local (Jhamtani 2007; Keating y Jacobsen 2012).

Particularmente, en la Ciudad de México existe una gran competencia por recursos como la tierra y el agua, lo cual ha condicionado que la agricultura de riego se realice con agua tratada de menor calidad, afectando directamente a los productores (González-Pozo, 2010). Ejemplo de ello es que a nivel nacional el 86.8% de las Unidades de Producción Agrícola (UPA) de riego utilizan agua blanca proveniente de ríos, presas y pozos profundos, mientras que en la Ciudad el 87.7% utilizan agua tratada. Adicionalmente, la agricultura en la Cd. de México se desarrolla en condiciones limitantes de extensión de tierra en comparación de la media nacional. La extensión promedio de las UPA a escala nacional es de 8.05 hectáreas, mientras que en la Ciudad, la agricultura se lleva a cabo predominantemente en minifundios de temporal (88.4% de las UPA), con una superficie media de 1.65 hectáreas (0.84 ha. por UPA de riego y 1.71 ha. por UPA de temporal). Además de las condiciones limitantes de disponibilidad de agua y extensión de tierra, tanto a escala local como nacional, menos del 50% de las UPA reportan utilizar tecnologías como abonos y agroquímicos. Sin embargo, en la Ciudad las tecnologías que más se utilizan son los abonos orgánicos y en menor medida los fertilizantes químicos, mientras que en la nivel nacional se recae en mayor medida en el uso de agroquímicos sintéticos como son fertilizantes, herbicidas e insecticidas (INEGI 2009; INEGI 2012).

Las condiciones limitantes de disponibilidad de agua y tierra, así como la baja fertilización pueden tener un efecto negativo sobre la productividad total y dificultan la competencia con productores de otros estados de la República que cuentan con condiciones más favorables. En este contexto, la promoción e implementación en mayor escala de sistemas de producción

sustentables en donde se optimice el agua, espacio e insumos utilizados, y se incrementen los rendimientos productivos y la rentabilidad, beneficiaría directamente a los productores de la Ciudad.

Los sistemas de agro-acuicultura integrada cumplen con estas características ya que se optimizan los insumos al aprovechar el agua de la acuicultura para la producción agrícola, lo cual permite diversificar la producción. Adicionalmente los efluentes y lodos acuícolas son ricos en nutrientes, lo cual incrementa la producción agrícola, disminuye la dependencia de fertilizantes inorgánicos, permite generar producciones orgánicas las cuales tienen un mayor valor en el mercado, y minimiza el impacto ambiental ya que se aprovechan estos productos de desecho (FAO 2004; Dey *et al.* 2006; Bakhsh 2008; Pantanella 2008; Endut *et al.* 2009; CARDI 2010; Wang *et al.* 2011; Gurung 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013).

En el presente trabajo se realizó el ACB de dos SAAI: un sistema acuapónico de raíz flotante y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación; con el objetivo de cuantificar los costos y beneficios totales de cada sistema de producción y evaluar la pertinencia de transferir las tecnologías en la Ciudad de México.

Antecedentes

Los sistemas de producción sustentables han demostrado ser rentables debido a que se basan en incrementar la eficiencia productiva mediante la optimización de los insumos y el cuidado de la calidad de los recursos naturales utilizados en el proceso productivo (ej: calidad del agua,

fertilidad del suelo); lo cual contrasta con los sistemas de cultivo convencionales que deterioran la calidad ambiental *in situ* y *ex situ* (Neely y Fynn 2010; FAO 2011).

De manera específica para los SAAI, existen estudios que reportan un aumento en los rendimientos productivos por la integración del componente agrícola y acuícola (Moya *et al.* 1986; Panigrahi *et al.* 2001; Panigrahi y Panda 2003; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Pantanella 2010; Gurung 2012) y aquellos donde se especifica que existe un incremento en ganancias económicas y rentabilidad de los sistemas (Gooley y Gavine 2003; FAO 2004; Noble 2009; Abdul-Rahman *et al.* 2011; Tran *et al.* 2013).

Sin embargo, existen pocos trabajos que reporten cuantitativamente dichas ganancias. Samuel y Mathew (2014) realizaron el análisis costo beneficio de instalar un sistema de captación de agua de lluvia en una zona de la India donde la producción agrícola es predominantemente de temporal y se utilizan bajos insumos externos para la producción. El estudio fue dirigido al aprovechamiento del agua de la reserva para el cultivo integral de coco y peces, y la relación Beneficio-Costo obtenida fue de 1.69.

Srivastava *et al.* (2004) evaluaron las relaciones Beneficio-Costo de implementar un sistema de captación de agua de lluvia y utilizarlo para cuatro modalidades de cultivo: para el cultivo de mostaza, cacahuete y arroz; la integración de frutales (papaya, plátano y sandía); adicionando el cultivo de peces; e integrando el cultivo de patos. Las relaciones Beneficio-Costo obtenidas fueron de 1.89, 2.27, 2.80 y 3.0 respectivamente.

Narayan-Sethi *et al.* (2005) realizaron un estudio comparativo entre granjas que cuentan con infraestructura para almacenar agua para el cultivo integral de tres variedades de peces, arroz y mostaza, y aquellas que no cuentan con reservas de agua ni cultivo de peces. Las relaciones

Beneficio-Costo obtenidas van desde 1.54 hasta 4.23 dependiendo de si la integración incluye tanto el cultivo de mostaza como de arroz, o sólo de arroz, así como de la altura del dique y del aliviadero, y de si las reservas están o no cubiertas de geomembrana.

Dey *et al.* (2006) realizaron un estudio que abarcó 360 granjas en Malawi, la mitad de ellas fueron granjas que adoptaron SAAI y la otra mitad permanecieron con sistemas de cultivo convencionales de la región. Las granjas elegidas son representativas del estado socioeconómico rural de Malawi. Los resultados reflejan que las granjas que adoptaron SAAI obtienen utilidades netas mayores en un 60% que granjas locales que no han adaptado dichos sistemas. Se encontró una relación positiva entre el incremento de rendimientos productivos, la rentabilidad y la adopción de SAAI. La relación Beneficio-Costo promedio fue de 1.4. La sociedad también se ha visto beneficiada ya que el costo del pescado ha disminuido.

Murshed-E-Jahan *et al.* (2013) reporta que en Bangladesh, las granjas que adoptaron SAAI incrementaron sus utilidades netas desde un 277% en granjas pequeñas y medianas, a un 349% en unidades productivas grandes.

En cuanto a SAAI con mayor grado de tecnificación e intensificación productiva, como es la acuaponía, Dediu *et al.* (2012) reportan que estos sistemas implican altos costos de inversión y de producción, pero generan mayores utilidades netas que los sistemas de cultivo convencionales. Adicionalmente, los sistemas acuapónicos son más rentables que los Sistemas Acuícolas de Recirculación (RAS) debido a que existe el valor agregado de la producción vegetal y los costos compartidos de infraestructura y operación. Adler *et al.* (2000) también concluyen que el componente hidropónico dentro de la acuaponía deriva en mayores utilidades netas que los RAS. En cuanto al crecimiento de plantas, también han demostrado ser igual o

más productivos que sistemas hidropónicos convencionales una vez que los sistemas acuapónicos tienen una biomasa de peces suficiente para mantener una concentración de nutrientes adecuada para las hortalizas (Wilson 2005; Licamele 2009; Pantanella 2010). Chaves *et al.* (1999) una tasa interna de retorno alta (27.32%) con el cultivo acuapónico de jitomate y bagre de canal.

El potencial económico de estos sistemas también ha sido reportado por Rakocy *et al.* (2006). Sin embargo, estos autores resaltan que para que los sistemas acuapónicos sean rentables, y considerando los altos costos de inversión y producción, tanto el componente acuícola como el hidropónico deben operarse en todo momento y cerca de la capacidad productiva máxima. La rentabilidad va a depender en las condiciones específicas de los cultivos (como infraestructura, costos de operación, manejo técnico, productividad), así como del mercado al que van dirigidos los productos. Para garantizar su rentabilidad, se necesitan cultivar especies con mayor precio en el mercado así como identificar nichos de mercado específicos para su venta. Ellos reportan también con datos del sistema acuapónico UVI que de nueve hortalizas cultivadas, las más redituables fueron las aromáticas como perejil, albahaca y cilantro, en comparación del jitomate, pepino y berenjena.

En los SAAI, el poder producir cultivos orgánicos es una ventaja económica. Seufert *et al.* (2012) realizaron un estudio comparativo de los rendimientos productivos de 316 cultivos tanto orgánicos (no incluye SAAI) como con aplicación de fertilización inorgánica y pesticidas; abarcando 34 especies, y considerando diferentes contextos productivos como aplicación de fertilizantes, irrigación, pH del suelo, eficiencia en las prácticas de manejo, entre otras. Se observó que el rendimiento productivo de los cultivos orgánicos es menor que el de los cultivos

convencionales, entre un 5-34% dependiendo del contexto. Sin embargo, este estudio no considera la rentabilidad, sino el rendimiento productivo. Al respecto, los sistemas convencionales están asociados a mayores costos productivos utilizados en insumos externos, y los orgánicos a mayores precios en el mercado (aproximadamente en un 50%), siendo los cultivos orgánicos más rentables (al considerar también los subsidios otorgados a este tipo de producción; Theocharopoulos *et al.* 2012). Además actualmente no se consideran en los ACB los daños ocasionados por externalidades negativas. Se ha demostrado que los daños generados por los sistemas de cultivo convencionales son substancialmente mayores a los de los cultivos orgánicos (Wood *et al.* 2006).

Objetivo

Realizar un análisis costo beneficio para cada sistema de agro-acuicultura integrada.

Material y Método

Se realizó un Análisis Costo Beneficio y se calculó la relación Beneficio-Costo (RBC) de dos sistemas de agro-acuicultura integrada: un sistema acuapónico de raíz flotante y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación. Los SAAI fueron dirigidos al cultivo de carpa koi y lechuga. Para realizar los análisis económicos se consideraron los rendimientos del primer periodo experimental efectuado durante este trabajo.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC) de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.

El Sistema Acuapónico (SA) es un sistema de tipo raíz flotante producido por Nelson y Pade, Inc. (modelo F5). Dicho sistema cuenta con un tanque para el cultivo de peces de 110 galones (416.4 litros), un sistema de filtros (sedimentador, mineralizador y desgasificador), y dos camas para la producción de hortalizas de 3 x 5 pies (91.4 x 152.4 cm), con una capacidad de 90 plantas. Tanto el sedimentador como el mineralizador cuentan con una compuerta en la parte inferior para poder extraer la materia orgánica proveniente del estanque de cultivo. El agua es recirculada continuamente, con un flujo que permite que el volumen total del estanque pase por los filtros cada hora. Cuenta con sistemas de aireación en el estanque de cultivo, desgasificador y en las camas de cultivo. Su volumen total es 871 litros y tiene una capacidad máxima de cultivo de peces de 20.4 kg. El consumo eléctrico total entre la recirculación y aireación del agua es 288 watts·hr⁻¹. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios fue de 2%/día.

El Sistema de cultivo basado en Recambios (SBR) está compuesto por un estanque circular de plástico (bebedero circular Rotoplas con capacidad de 1000 L.), que se llenó con el mismo volumen del SA. Los sedimentos se extrajeron con un sifón manual. Los recambios de agua se hicieron de manera semanal principalmente para remover sólidos sedimentados. El promedio del total de agua reabastecida por evaporación y recambios fue 2.6%/día. Para la aireación del sistema, durante el primer periodo experimental se utilizó un soplador regenerativo de 1/16 Hp, con un consumo de 46.6 watts·hr⁻¹. Sin embargo se observó que su potencia excedía la requerida

en el SBR, por lo cual durante el segundo experimento se utilizaron de manera exitosa tres bombas de aire de doble salida, que generaron un consumo total de 9 watts·hr⁻¹. Se considerará este método de aireación para los análisis económicos.

En ambos sistemas se cultivó carpa koi con la misma densidad de confinamiento y bajo las mismas prácticas de alimentación. El periodo de cultivo fue de 18 semanas, del 16 de noviembre del 2015 al 17 de marzo del 2016. Se iniciaron los cultivos con cien peces con un peso promedio de 4.46 ± 0.787 g. en el SBR y de 4.86 ± 0.94 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 446.1 y 486.1 g. respectivamente. Se otorgó alimento peletizado de 3.5 mm. de la marca Silver Cup de El Pedregal que cuenta con un mínimo de 32% proteína, 5% grasa, 5% de fibra, 5% ceniza y 12% humedad. El alimento se trituró y se proporcionó *ad libitum*, haciendo registro de la cantidad de alimento dado por día.

Durante este periodo experimental se utilizaron termostatos sumergibles con capacidad de mil litros (y consumo de 1,000 watts hr⁻¹) para mantener el agua a una temperatura promedio de 22°C. Sin embargo se observó experimentalmente (durante el segundo periodo experimental) que durante primavera, verano y otoño se puede mantener esta temperatura sin necesidad de los termostatos, por lo cual no se considerará este costo.

Biometrías de las carpas

Se realizaron las siguientes mediciones: longitud total, longitud patrón y peso del 25% de los organismos, así como se registró la mortalidad de estos. Las carpas se midieron y pesaron al principio y al final del experimento.

Evaluaciones para el cultivo de lechugas

Debido a que no se realizó el cultivo directo de lechuga, se evaluó la acumulación de nutrientes obtenida y calidad del agua de ambos sistemas para valorar y comparar cómo sería el desempeño de estos cultivos.

Para el Sistema Acuapónico se tomó como referencia la relación peces-lechugas obtenida por Licamele (2009), en donde por cada kilogramo de peces cultivados, se pudieron cosechar 6.4 lechugas con un peso final promedio de 176.75 ± 31.03 gramos. Debido a que la biomasa final de peces obtenida en el sistema acuapónico fue de 1.44 kilogramos, se considera que se pudieron haber cosechado nueve lechugas.

Para el cálculo del total de lechugas que se pueden cosechar en el Sistema Basado en Recambios, se tomó en cuenta la cantidad de nutrientes acumulados por el sistema (que servirán para fertirrigar), así como los parámetros fisicoquímicos de una muestra de suelo obtenida de una parcela en Milpa Alta, Ciudad de México, y de una lombricomposta realizada con productos de desecho de estanques dedicados al cultivo del ajolote *Ambystoma mexicanum* (aprovechando lodos acuícolas y plantas acuáticas presentes en los estanques).

Debido a que la cantidad de nutrientes presente en estas tres fuentes en conjunto (al cultivar lechugas directamente en el suelo, aplicar el humus generado como fertilizante y fertirrigar con el agua del estanque) no es un factor limitante para el cultivo de lechuga, para hacer el cálculo del total de lechugas que se pueden cosechar en este sistema se consideró el total de recambios de agua efectuadas por día durante el experimento. Recirculating Farms Coalition (2011) reportan que en cultivos convencionales en suelo, para cultivar un kilo de lechugas se requieren 132.7 litros de agua. Considerando los pesos finales de las lechugas obtenidos por Licamele

(2009), un kilo equivale a 5.66 lechugas. Es decir, se consideró que por cada 132.7 litros se pueden producir 5.66 lechugas.

Durante el periodo experimental se reabasteció diario 2.6% del volumen de agua del sistema. Aproximadamente 1% fue por evaporación del agua, mientras que 1.6% proviene de los recambios realizados. El volumen extraído, además de contener agua que puede emplearse para fertirrigar, también contiene sólidos sedimentados provenientes de las heces fecales de los peces, alimento no aprovechado y decaimientos algales, etc (lodos acuícolas). Debido a que no se pretenden aplicar los lodos acuícolas directamente en los cultivos (ya que no han pasado por un proceso de composteo aún y su DBO es alta; Yeo *et al.* 2004), y con base a observaciones experimentales, se considera que un $\frac{1}{4}$ del volumen extraído no será aprovechado debido a que representan el agua-lodo sedimentada. El agua disponible para riego es 1.2% del volumen del estanque por día, lo cual equivale 1,361 litros durante el periodo experimental y a 58 lechugas.

Análisis económicos

Para efectuar el ACB y la RBC se mantuvo el registro de todos los costos involucrados, tanto de inversión como de producción (mano de obra, gasto de agua, de luz, alimento para los peces, costo de los peces, de las semillas), así como la producción final obtenida para calcular las utilidades netas y el tiempo de recuperación de la inversión.

Los costos de inversión relacionados con material acuícola fueron obtenidos directamente con diversos proveedores ubicados en el Mercado de Peces de Morelos (Ciudad de México). El alimento se abasteció directamente con distribuidores de El Pedregal, y el costo de un costal de 20 kilos fue \$254. El costo de la mano de obra se obtuvo del Diario Oficial de la Federación del

19 de diciembre de 2016, el cual entró en vigor a partir del enero del 2017, y donde se establece que el salario mínimo es de \$80.04 pesos la jornada de trabajo. La tarifa de la luz se obtuvo directamente de la página oficial de la CFE (CFE 2017), y se consideró la tarifa “1” o de “Servicio Doméstico” debido a que los SAAI se pueden instalar y operar en traspatio. En esta tarifa el cobro bimestral por los primeros 75 Kwh es de 0.793 pesos, los siguientes 65 Kwh cuestan \$0.956, y el consumo excedente se cobra a \$2.802 pesos/Kwh. También existe una tarifa agrícola de estímulo para la operación de equipos de bombeo y rebombeo de agua para el riego, pero que sólo aplica a los productores inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios de la SAGARPA. El monto del estímulo es de \$0.58 pesos/Kwh.

El costo del agua se obtuvo directamente de la página oficial de la CONAGUA (<http://www.conagua.gob.mx/tarifas/>), y también se consideró el cargo a usuarios “Domésticos” en la Ciudad de México, debido a que la base de datos no desglosa los costos para usuarios agrícolas o acuícolas, y adicionalmente este cargo aplica cuando se efectúan cultivos de traspatio. El cargo de agua potable establecido para la Ciudad es de 21.4 pesos/m³.

Las semillas de lechuga se compraron directamente en el Rancho Los Molinos. Un paquete con 3 gramos de semillas costó \$10, y rinde para 2,400 plantas. Para calcular el costo por semilla se consideró un porcentaje de germinación del 80%.

Los precios de compra y venta de carpas koi de diferentes tallas se obtuvieron de manera presencial en el Mercado de Peces de Morelos (Tabla 1), y allí también se abastecieron los peces para el desarrollo experimental, ya que es una fuente de distribución y abasto importante de la Ciudad, y se pretendía simular las condiciones a las cuales se pueden enfrentar pequeños

productores. Las carpas son ofrecidas a un precio económico pero no son de buena calidad, ni en las mejores condiciones, lo cual tiene influencia directa en los rendimientos productivos.

Tabla 1: Precios de venta (al mayoreo y menudeo) de carpas koi en el Mercado de Peces de Morelos.

Talla (cm)	Precio mayoreo (pesos)	Precio menudeo (pesos)
<5	2-3	5
10	15	30
25	130	180

Para la venta de las lechugas también se tomaron en cuenta dos precios: al menudeo y mayoreo. El precio de venta de lechugas orgánicas en la Ciudad de México es aproximadamente de \$20 por pieza; el cual se consideró como precio de menudeo. Para mayoreo, se estableció el precio de \$10 por pieza, el cual es el costo actual de las lechugas que no son orgánicas.

Debido a que no se llegó a la capacidad productiva máxima de los sistemas, también se realizó un análisis prospectivo considerando las biomásas máximas que ambos sistemas pueden sostener. Para realizar dicha prospección, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica de los rendimientos productivos reportados para los SAAI utilizados. El Sistema Acuapónico utilizado puede sostener una biomasa máxima de 20.4 kg de peces (Nelson y Pade Inc. 2012). Para el SBR se consideró lo reportado por Watanabe *et al.* (2002), donde granjas que utilizan recambios de agua y aireación para mantener mayores densidades de confinamiento llegan a producir 4.5 kg/m².

Para los cálculos se consideraron dos escenarios, uno de alta productividad, es decir la capacidad máxima de cada sistema, y otro de productividad media. Se realizó un ACB para cada escenario y sistema, y se calculó a su vez la RBC.

Finalmente, considerando la posibilidad de transferir estos sistemas productivos, también se efectuó un ACB y se calculó la RBC de sistemas similares a los dos SAAI utilizados pero más económicos.

Resultados

Existe una diferencia considerable entre los costos de inversión de los dos SAAI empleados durante el desarrollo experimental. El Sistema Acuapónico F5 de Nelson y Pade, es un sistema caro, importado, que tiene un precio aproximadamente 12 veces mayor al SBR. Los costos de inversión de cada sistema se muestran en las Tablas 2 y 3, e incluye también los costos de materiales necesarios para efectuar los cultivos, así como para hacer mediciones básicas de calidad de agua.

Tabla 2: Costos de inversión del Sistema Basado en Recambios.

Sistema Basado en Recambios	Costo total (\$)
Bebedero circular Rotoplas (1000 l.)	3,100
Tambo (200 l.)	285
Malla sombra 50% (11 m ²)	129
Manguera (10 m)	159
Sifón (80 cm altura)	70
Bomba de aire de dos salidas (3)	255
Manguera para aire (1 kg)	85
Piedras difusoras (8)	40
Plomos	25
Red (12 pulgadas)	50
Cubeta (15 litros)	60
Almácigo (200 plántulas)	35
Regadera para riego	55
Termómetro	40
Kit Api para agua dulce de 800 muestras: pH, amonio, nitrito, nitrato	1,390
Total	5,778

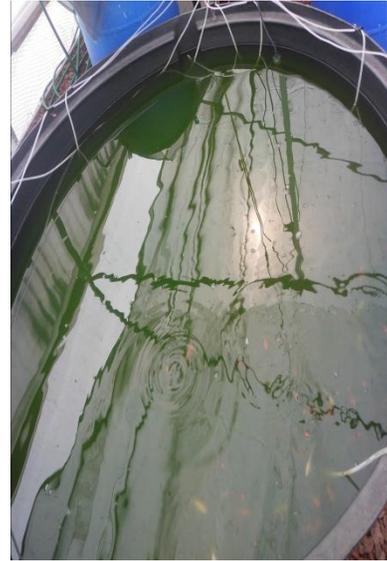
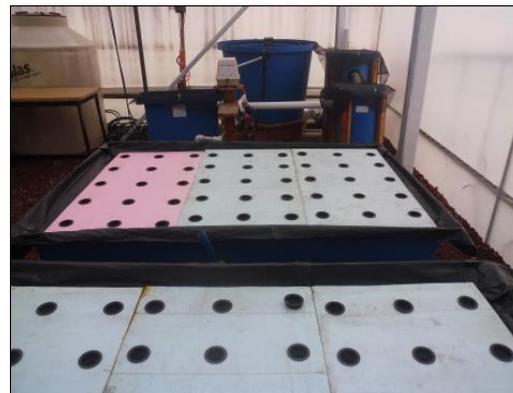


Tabla 3: Costos de inversión del Sistema Acuapónico F5 (Nelson & Pade, Inc).

Sistema Acuapónico	Costo total (\$)
Sistema acuapónico Nelson & Pade	80,000
Canastillas (90)	278
Cilindro foami agrícola (90)	182
Bio-esferas	100
Manguera (10 m)	159
Almácigo (200 plántulas)	35
Termómetro	40
Kit Api para agua dulce, de 800 muestras: pH, amonio, nitrito, nitrato.	1,390
Total	82,184



Los costos de producción de ambos SAAI reportados en la Tabla 4, fueron los obtenidos directamente durante el periodo experimental. Los mayores gastos del SBR están asociados a la mano de obra, ya que se necesita dedicar más tiempo para la extracción de lodos acuícolas de manera manual, así como para el riego de hortalizas. En el SBR se dedica aproximadamente una hora y media al día al mantenimiento de los cultivos, en comparación de media hora al día en el SA.

El SA tiene costos de producción mayores al SBR y se deben al consumo energético, ya que se consumen $288 \text{ watts}\cdot\text{hr}^{-1}$, por 24 horas y durante todo el periodo experimental; mientras que el SBR solo consume $9 \text{ watts}\cdot\text{hr}^{-1}$, por 12 horas.

Tabla 4: Costos de producción de los dos sistemas de agro-acuicultura integrada.

Costos de producción		
Insumos	SBR (\$)	SA (\$)
Semillas	0.3	0.05
Carpas (100 peces)	200	200
Alimento	32.6	37.7
Agua	82.4	65.6
Electricidad	10.8	1,815.6
Mano de obra	1,891.9	630.3
Total	2,217	2,749.3

Los ACB realizados muestran en su mayoría valores negativos debido a que durante el periodo experimental se cultivaron biomazas iniciales bajas, y no se llegó a biomazas finales de importancia comercial (Tabla 5). Bajo las condiciones experimentales, únicamente el SBR con ventas al menudeo, generaría utilidades netas positivas y tiene una RBC aceptable (>1).

Tabla 5: Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de dos SAAI bajo condiciones experimentales.

Ganancias	SBR		Sistema Acuapónico	
	Mayoreo (\$)	Menudeo (\$)	Mayoreo (\$)	Menudeo (\$)
Utilidades brutas por la producción de lechuga/ciclo	580	1,160	90	180
Utilidades brutas por la producción de carpa/ciclo	1,095	2,190	1,260	2,520
Total utilidades brutas	1,675	3,350	1,350	2,700
Costos de producción primer ciclo	2,217	2,217	2,749	2,749
Utilidades netas primer ciclo	-542	1,133	-1,399	-49
Utilidades netas por año (3 ciclos/año)	-	3,399	-	-
Relación Beneficio-Costo	0.76	1.51	0.49	0.98
Costos de inversión	5,778	5,778	82,184	82,184
Tiempo para recuperar inversión (años)	-	1.7	-	-

Sin embargo, al llegar tanto a la capacidad media como máxima de cada sistema, se observa que ambos SAAI son rentables y la relación RBC >1 (existen ganancias económicas; Tabla 6).

Con precios de venta al mayoreo y llegando únicamente a la capacidad productiva media, el SBR genera utilidades netas bajas. Sin embargo, adicionalmente, el costo de mano de obra funciona como un propio salario para los productores. Mientras que en el SA, tanto con ventas al mayoreo como al menudeo, genera utilidades netas y RBC altas.

En ambos SAAI, al llegar a la capacidad media y máxima de producción de los sistemas, los costos de producción incrementan, debido a que hay un mayor número de peces, lechugas y mayor consumo de alimento. Sin embargo, adicionalmente, en el SBR se consideró que para llegar a la capacidad media de producción del sistema, se tendrían que aumentar los recambios de agua realizados durante el periodo experimental, a aproximadamente el doble (5%/día), y para llegar a la capacidad máxima, los recambios de agua nuevamente se tendrían que incrementar (10%/día). Esto genera mayores costos de producción, pero también permite

cultivar más lechugas que generan más utilidades netas. En el SBR con capacidad productiva máxima también se incrementaron los costos asociados a mano de obra y electricidad al doble. Sin embargo, en el Sistema Acupónico los costos relacionados con mano de obra, agua y electricidad permanecen los mismos, por lo cual, para que este sistema sea más rentable es importante aumentar los rendimientos productivos. Como se muestra en la Tabla 6, el llegar a la capacidad máxima del SA, permite recuperar la inversión entre 0.8-2.1 años dependiendo de si la venta es al mayoreo o menudeo, mientras que en la capacidad media se logra en 1.8-5.1 años.

Tabla 6: Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de dos SAAI cultivados a su capacidad media y máxima.

	SBR				SA: Nelson & Pade			
	Capacidad media		Capacidad máxima		Capacidad media		Capacidad máxima	
	Mayoreo	Menudeo	Mayoreo	Menudeo	Mayoreo	Menudeo	Mayoreo	Menudeo
Utilidades brutas por la producción de lechuga/ciclo	1,330	2,660	3,140	6,280	650	1,300	1,300	2,600
Utilidades brutas por la producción de carpa/ciclo	1,661	3,322	3,322	6,644	8,906	17,81	17,811	35,623
Total utilidades brutas primer ciclo	2,991	5,982	6,462	4	9,556	19,11	19,111	38,223
Costos de producción	2,396	2,396	4,772	4,772	4,193	4,193	5,874	5,874
Utilidades netas primer ciclo	594	3,585	1,690	8,152	5,363	14,91	13,237	32,349
Utilidades netas por año (3 ciclos/año)	1,783	10,75	5,070	24,45	16,08	44,75	39,712	97,047
Relación Beneficio-Costo	1.2	2.5	1.4	2.7	2.3	4.6	3.3	6.5
Costos de inversión	5,778	5,778	6,033	6,033	82,18	82,18	82,386	82,386
Tiempo para recuperar inversión (años)	3,2	0,5	1,2	0,2	5,1	1,8	2,1	0,8

Para la transferencia tecnológica de estos sistemas de producción integrada se consideraron SAAI similares a los utilizados durante el experimento, pero de compañías mexicanas (Altagri y Aquacultivos; Ambystomania) o con materiales más económicos (SBR). El SBR para la transferencia cuenta con los mismos componentes que el sistema utilizado, a excepción de un estanque de cultivo más económico.

El sistema acuapónico Bendagui 4 de Altagri y Aquacultivos cuenta con 4 estanques de fibra de vidrio de 300 litros con capacidad total de 60 kg de peces, así como 7 ductos de 1.5 m. de largo que permiten el cultivo de 56 lechugas por mes. Tiene un sistema de filtrado de dos pasos, consume aproximadamente 40 watts·hr⁻¹, y tiene un costo de \$18,000.

El sistema acuapónico tipo NFT de Ambystomania, tiene un estanque de madera cubierto con geomembrana con una capacidad de 1 m³, que permite el cultivo de 20 kg de peces y 90 lechugas/mes. Cuenta también con un sistema de filtrado de dos pasos, sistemas de aireación y recirculación (consumiendo 33 watts·hr⁻¹) y un costo total de \$7,000.

El análisis costo beneficio de cada uno de estos sistemas, la RBC y tiempo de recuperación de la inversión se muestran en la Tabla 7. Estos análisis económicos se calcularon con los rendimientos productivos obtenidos en el experimento realizado a fin de obtener resultados comparables, y se calcularon con el precio de venta a mayoreo. En los costos de inversión también se consideraron materiales adicionales necesarios, como el kit o reactivos para medición de calidad de agua.

Tabla 7: Análisis Costo Beneficio, Relación Beneficio-Costo y tiempo para recuperar la inversión de tres SAAI con potencial para realizar transferencias tecnológicas.

	SBR		SA: Altagri y Aquacultivos		SA: Ambystomania	
	Cap. media	Cap. máxima	Cap. media	Cap. máxima	Cap. media	Cap. máxima
Utilidades brutas por la producción de lechuga/ciclo	1,330	3,140	1,920	2,240	650	1,300
Utilidades brutas por la producción de carpa/ciclo	1,661	3,322	26,193	52,387	8,906	17,811
Total utilidades brutas primer ciclo	2,991	6,462	28,133	54,627	9,556	19,111
Costos de producción primer ciclo	2,397	4,772	5,760	10,703	4,193	4,768
Utilidades netas primer ciclo	595	1,690	22,353	43,924	5,363	14,344
Utilidades netas por año (3 ciclos)	1,783	5,070	67,059	131,771	16,088	43,031
Relación Beneficio-Costo	1.2	1.4	4.9	5.1	2.3	4.0
Costos de inversión	4,078	4,078	19,465	18,000	9,090	9,090
Tiempo para recuperar inversión (años)	2.3	0.8	0.3	0.1	0.6	0.2

Finalmente, en la Tabla 8 se comparan los análisis económicos de los cinco SAAI evaluados anteriormente (los dos utilizados durante el experimento y tres para la transferencia). Para el análisis se consideró la capacidad media de producción de cada uno de los sistemas y el precio de mayoreo.

Los resultados muestran que el Sistema Bendagui 4 de Altagri y Aquacultivos es el más rentable debido a que tiene una capacidad productiva mayor por m³ de agua y consumo eléctrico, seguido del SA de Ambystomania. En ambos se recupera la inversión realizada en menos de un año. La RBC más alta fue también del sistema Bendagui 4 (de 4.9), mientras que el de Ambystomania y Nelson y Pade obtuvieron los mismos valores (2.3). Sin embargo, el costo de inversión del último sistema es mucho mayor, por lo cual el tiempo de recuperación de la inversión es mayor a 5 años. Ambos sistemas también obtuvieron los mismos costos productivos, sin embargo en

el Nelson & Pade predomina el costo energético, mientras que en el de Ambystomania, la mano de obra.

El SBR genera utilidades netas positivas, sin embargo la RBC es baja (1.2) generando utilidades netas menores a \$2,000 por año. Sin embargo, al igual que en los demás SAAI, cabe resaltar que adicionalmente los productores reciben como salario el costo de producción relacionado como mano de obra. Por otro lado los sistemas acuapónicos presentaron utilidades netas mayores a \$16,000 pesos/año.

Tabla 8: Síntesis de los análisis económicos realizados en cinco SAAI, considerando su capacidad productiva media y precios de mayoreo.

	SBR	SA: Nelson & Pade	SBR transferencia	SA: Altagri y Aquacultivos	SA: Ambystomania
Utilidades brutas primer ciclo	2,991	9,556	2,991	28,113	9,556
Costos de producción primer ciclo	2,397	4,193	2,397	5,760	4,193
Utilidades netas primer ciclo	595	5,363	595	22,353	5,363
Utilidades netas por año (3 ciclos)	1,783	16,089	1,783	67,059	16,088
Relación Beneficio-Costo	1.2	2.3	1.2	4.9	2.3
Costos de inversión	5,778	82,184	4,078	19,465	9,090
Tiempo recuperación inversión (años)	3.2	5.1	2.3	0.3	0.6

Discusión y Conclusiones

Sistema acuapónico

Los resultados obtenidos para los sistemas acuapónicos concuerdan con lo reportado por Rakocy *et al.* (2006), que debido a los altos costos de inversión y producción, estos sistemas productivos deben operarse cerca de su capacidad máxima, y debe dirigirse al cultivo de especies con alto

valor en el mercado. En el presente trabajo se observó que únicamente el SA cultivado a su capacidad máxima productiva, o a precios altos en el mercado (en este caso derivados de la venta al menudo), generan ingresos suficientes para recuperar los costos de inversión entre 0.8-2.1 años, lo cual es un tiempo de retorno aceptable.

FAO (2014) reporta que el tiempo de retorno de la inversión de un sistema acuapónico de traspatio (del cual dan las indicaciones de cómo construir) con un volumen total de 1 m³, con una capacidad productiva de peces de 10-20 kg, y un área de cultivo de 3 m², es de 1.6 años. Este sistema tiene una capacidad de producción similar al sistema acuapónico utilizado durante el presente experimento, y a los sistemas acuapónicos evaluados en este trabajo. La RBC reportada por FAO es de 2.4, mientras que en el presente trabajo se obtuvo una RBC calculada de 2.3, ambos cultivando a la capacidad media del sistema acuapónico. Sin embargo, es interesante resaltar que la RBC reportada por esta institución fue para el cultivo de tilapia, con un precio de mercado de \$8 USD/kilo, y en el presente experimento, de haber cultivado esta especie, la RBC obtenida sería mucho menor debido al bajo precio en el mercado que tienen las tilapias en el país.

Las elecciones de qué especies cultivar, variedades, a qué tallas, si se le dará un valor agregado al producto, y a qué mercados dirigir la producción son indispensables para la rentabilidad de los cultivos (Hartley-Alcocer 2007; Fracchia-Durán 2013). Al respecto, el presente trabajo evaluó la rentabilidad del cultivo de carpa koi (con longitudes finales de 10 cm) y lechuga. Sin embargo, esta especie también presenta demanda en tallas de 25 cm o mayores, así como también existen otras variedades y especies con mayor valor en el mercado que tienen potencial para cultivarse en sistemas acuapónicos. También es importante evaluar la rentabilidad de

cultivar otras plantas, como por ejemplo aromáticas, con las cuales se pueden hacer cosechas parciales de manera periódica y se han reportado mayores utilidades netas derivadas de su cultivo (Rakocy *et al.* 2006).

Para realizar cultivos de altas densidades de confinamiento en los sistemas acuapónicos (llegando a la capacidad media o máxima del sistema), se debe considerar que para poder sostener estas biomasas se debe primero madurar el sistema, es decir que se desarrollen colonias de bacterias nitrificantes en magnitud suficiente dentro del sistema para oxidar el amonio y los nitritos a nitratos, y no presentar riesgos de mortalidad por problemas en la calidad del agua (Nelson y Pade 2012). Problemas con el suministro de luz también pueden ser un factor de riesgo para el cultivo, ya que los sistemas acuapónicos dependen de la continua recirculación y aireación para mantener la calidad del agua y sostener los requerimientos de oxígeno de los peces, plantas y bacterias nitrificantes (FAO 2014), por lo cual se recomienda tener una fuente alterna de energía, sea una planta eléctrica o paneles solares con batería de almacenamiento.

La demanda energética del sistema acuapónico se pudo observar al comparar los consumos energéticos del SA y SBR utilizados durante el periodo experimental, el cual fue 64 veces mayor. Esto es semejante a lo reportado por Lages-Barbosa *et al.* (2015) entre sistemas de recirculación y tradicionales para el cultivo de lechugas, donde los sistemas hidropónicos resultaron en mayores rendimientos productivos y menor consumo de agua que sistemas de cultivo en suelo, sin embargo presentaron un consumo energético 82 veces mayor.

Sin embargo, en los SA evaluados con el cultivo de carpa koi y lechuga, se obtienen utilidades netas mayores a los \$16,000 anuales cuando se operan a la capacidad media de producción, y

mayores de \$39,000 cuando se llevan a su capacidad máxima (precio de mayoreo), lo cual es al menos 8 veces mayor que las utilidades netas obtenidas en el SBR.

Sistema de cultivo basado en recambios

Las RBC obtenidas para el SBR (de 1.2 y 1.4 para la capacidad media y máxima del sistema, respectivamente, con precios de mayoreo, y 2.5 y 2.7 con precios de menudeo) son similares a lo reportado por diversos autores, donde la RBC en general es menor a 3 (Srivastava *et al.* 2004; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Dey *et al.* 2006; Samuel y Mathew 2014). Lo cual contrasta con los sistemas acuapónicos donde las RBC fueron de 2.3-6.5.

Debido a que la capacidad de producción de peces en el SBR es más baja que en el SA, se obtuvieron utilidades semejantes en el cultivo de lechugas y de peces, mientras que en los sistemas acuapónicos, el principal ingreso provino notoriamente del cultivo de peces. Es por ello que en SBR como el utilizado, el cultivo de mayor importancia es el agrícola, el cultivo acuícola es el secundario. Debido a esto, estos sistemas se ven favorecidos cuando se incrementa la tasa de recambio de agua, lo cual permite hacer cultivos de riego más extensos, generar mayor producción y utilidades. Sin embargo esto únicamente es viable cuando hay disponibilidad de agua para realizar una mayor tasa de recambios de agua y riego. Por ejemplo cuando se cuenta con reservas o pozas de captación de agua, se puede implementar el cultivo de peces que generaría una fuente adicional de nutrientes para el cultivo agrícola, y un ingreso adicional para los productores (así como proteína de calidad para el autoconsumo; Srivastava *et al.* 2004; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Samuel y Mathew 2014).

A pesar que las RBC del SBR no fue tan alta como las obtenidas en los sistemas acuapónicos, estos sistemas ofrecen también una serie de beneficios a los productores: un salario adicional (costo de mano de obra) por dedicar menos de dos horas al día para el mantenimiento del cultivo, diversificar la producción, productos agrícolas y acuícolas para el autoconsumo o la venta, fuentes orgánica de fertilización para los cultivos agrícolas (efluentes y lodos acuícolas) lo cual disminuye la dependencia en fertilizantes inorgánicos y los costos asociados a su aplicación, así como mayor producción por volumen de agua utilizado (en comparación con sistemas de cultivo convencionales).

Cabe señalar que en la acuicultura en México, se ha observado que existe una relación entre el nivel de tecnificación, productividad y la tenencia de la tierra; donde el sector privado suele presentar cultivos más intensivos que el ejidal (DeWalt *et al.* 2002). El sector rural está más enfocado a la piscicultura, sobre todo al cultivo de tilapia y carpa, sea a escala comercial o de subsistencia, y la producción se caracteriza por presentar baja inversión, capitalización, rendimientos productivos, capacitación y asistencia técnica (Segovia Quintero 2011; INEGI 2011).

Los sistemas acuapónicos necesitan de un gran dominio técnico, ya que errores o incidentes en el manejo técnico del sistema pueden derivar en el colapso del cultivo (Love *et al.* 2015). También están asociados a altos costos de producción e inversión, y deben ser operados a su capacidad máxima para ser rentables. Por estos motivos, existen limitaciones o debilidades para transferir estos sistemas de cultivo al sector acuícola ejidal del país (lo cual tampoco excluye la oportunidad), aunque sí presenta mayor potencial de implementarse por el sector privado.

Por ello, sistemas de agro-acuicultura integrada más rústicos como el SBR, siguen siendo una opción para transferirse en el país, y estos sistemas son más sustentables que cultivos agrícolas y acuícolas convencionales que no presentan dicha integración. Adicionalmente, el SBR permite la integración de la acuicultura y la agricultura en contextos productivos donde tradicionalmente se realizan cultivos en suelo, o ya se cuenta con infraestructura acuícola donde no es viable implementar cultivos acuapónicos.

El ACB es una herramienta útil para cuantificar los costos y beneficios totales de cada SAAI y para informar a los productores sobre los rendimientos que presenta cada sistema; sin embargo la decisión de qué sistema implementar depende también de las condiciones productivas, socioeconómicas y ambientales que ellos presenten.

Bibliografía

- Abdul-Rahman S., Saoud P., Owaied M.K., Holail H., Farajalla N., Haidar M., Ghanawi J. 2011. Improving water use efficiency in semi-arid regions through integrated aquaculture/agriculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 23: 212-230.
- Adler P.R., Harper J.K., Wade E.M., Takeda F., Summerfelt S.T. 2000. Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International Journal of Recirculating Aquaculture* 1:15–34.
- Bakhsh K. 2008. *Integrated Culture, Hydroponics and Aquaponic System*. University Malaysia Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia, 75p.
- CARDI. 2010. *A manual on integrated farming systems (IFS)*. Prepared by Caribbean Agricultural Research and Development Institute (CARDI), for Agriculture Enterprise Development for Rural Belize (AED), 58p.
- Carpenter S.R., Mooney H.A., Agard K., Capistrano D., DeFries R.S., Díaz S., Dietz T., Duraiappah A.K., Oteng-Yeboah A., Pereira H.M., Perrings C., Reid W.V., Sarukhan J., Scholes R.J., Whyte A. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 106(5): 1305-1312.

- CFE. 2017. Tarifa 1 2017. Disponible en: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&anio=2017. Visitado: 3 de abril, 2017.
- Chaves P.A., Sutherland R.M., Laird L.M. 1999. An economic and technical evaluation of integrating hydroponics in a recirculation fish production system. *Aquaculture Economics & Management* 3(1): 83-91.
- Daily G.C., Polasky S., Goldstein J., Kareiva P.M., Mooney H.A., Pejchar L., Ricketts T.H., Salzman J., Shallenberger R. 2009. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1): 21-28.
- Dediu L., Cristea V., Xiaoshuan Z. 2012. Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology* 11(9): 2349-2358.
- DeWalt B.R., Ramírez Zavala J.R., Noriega L., González R.E. 2002. Shrimp Aquaculture, the People and the Environment in Coastal Mexico. Report prepared under the World Bank, NACA, WWF and FAO Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment. Work in Progress for Public Discussion. Published by the Consortium, 73p.
- Dey M., Kambewa P., Prein M., Jamu D., Paraguas F., Pemsil D., Briones R. 2006. Impact of development and dissemination of integrated aquaculture-agriculture (IAA) technologies in Malawi. *NAGA, World Fish Center Quarterly* 29 (1 & 2): 28- 35.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan-Nik W.N.S., Hassan A. 2009. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Desalination and Water Treatment*, 5 (1-3): 19-28
- FAO. 2004. Agro-acuicultura integrada. Manual básico. FAO documento técnico de pesca 407. Roma, Italia, 163p.
- FAO. 2011. The state of world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. FAO Fiat Panis y Earthscan, Rome Italy, 308p.
- FAO. 2014. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589. Roma, Italia, 288p.
- Fracchia-Durán A.G. 2013. Caracterización y diversificación de la acuicultura en el estado de Colima. Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Marianas, 267p.
- González-Pozo A. 2010. Las chinampas de Xochimilco al despuntar el siglo XXI: inicio de su catalogación. UAM-Xochimilco, 1ª edición, México, D.F., 279p.
- Gooley G.J., Gavine F.M. 2003. Integrated agri-aquaculture systems. A resource handbook for Australian industry development. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC), 189p.
- Gurung T.B. 2012. Integrated aquaculture within agriculture irrigation for food security and adaptation to climate change. *Hydro Nepal, Special Issue*, 73-77 pp.
- Hartley-Alcocer A.G. 2007. Tilapia as a global commodity; a potential role for Mexico? University of Stirling, Scotland, UK., 307p.

- IFAD. 2008. Agricultural technology choices for poor farmers in less-favored Areas of South and East Asia. Fifth discussion paper produced by the Asia and Pacific Division (IFAD). 82p.
- INEGI. 2009. Estados Unidos Mexicanos. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Ags., 193p.
- INEGI. 2011. Pesca y acuicultura. Censos Económicos 2009. México, 83p.
- INEGI. 2012. El recurso tierra en las unidades de producción. Censo Agropecuario 2007. Aguascalientes, Ags., 55p.
- Jhamtani H. 2007. Putting farmers first in sustainable agriculture practices. Third World Network, Penang, Malaysia, 31p.
- Keating M., Jacobsen K. 2012. Sustainable agriculture. University of Kentucky- College of Agriculture, 5p.
- Lages-Barbosa G., Almeida-Gadelha F.D., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G.M., Halden R.U. 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12(6): 6879-6891.
- Licamele J.D. 2009. Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. The University of Arizona, 173p.
- Love D.C., Uhl M.S., Genello L. 2015. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering* 68: 19-27.
- Moya T. B., De la Vina W.C., Bhuiyan S.I. 1986. The potential of farm reservoir use in increasing productivity in rainfed rice areas. *Philipp. J. Crop Sci.* 11: 125-132.
- Murshed-E-Jahan K., Crissman C., Antle J. 2013. Economic and social impacts of integrated aquaculture-agriculture technologies in Bangladesh. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems. Penang, Malaysia. Working Paper: AAS-2013-02, 15p.
- Narayan-Sethi L., Panda S.N., Pholane L.P. 2005. Economic viability of rice-fish integration with the on-farm reservoir of rainfed ecosystem in eastern India. *Journal: Food, Agriculture and Environment (JFAE)* 3 (3&4): 194-199.
- Neely C., Fynn A. 2010. Critical choices for crop and livestock production systems that enhance productivity and build ecosystem resilience. SOLAW Background Thematic Report TR11. Rome, FAO, 38p.
- Nelson y Pade Inc. 2012. Fantastically Fun Fresh Food Factory- F5. System specifications. Nelson &Pade, Inc.
- Noble A. 2009. Potential role of integrated farming systems (IFS) for poverty alleviation in the Mekong Basin: An assessment of farmer-based networks in promoting IFS. International Water Management Institute (IWMI), 22p.
- Panigrahi B., Panda S. N. 2003. Optimal sizing of on-farm reservoirs for supplemental irrigation. *J. Irrig. & Drain. Engg. (ASCE)*, 129 (2): 117-128.

- Panigrahi B., Panda S.N. 2001. Simulation of ponding and soil moisture status through water balance model for rainfed upland rice. *Agric. Engg. J., Asian Assoc. of Agric. Engineers*, 10: 39-56.
- Pantanella E. 2008. Pond aquaponics: new pathways to sustainable integrated aquaculture and agriculture. *Aquaculture News* 34: 10-11.
- Pantanella E. 2010. New aquaponics research in Italy. *Aquaponics Journal* 56: 25-27.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M. 2006. Recirculation aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454, 16p.
- Recirculating Farms Coalition 2011. Water usage in recirculating farms. Recirculating Farms Coalition Fact sheet, 2p.
- Samuel M.P., Mathew A.C. 2014. Improving water use efficiency by integrating fish culture and irrigation in coconut based farming system: A case study in Kasaragod District of Kerala (India). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(2): 36-44.
- Segovia Quintero M. 2011. An overview on desert aquaculture in Mexico. En: Crespi V., Lovatelli A. (eds). *Aquaculture in desert and arid lands: development constraints and opportunities*. FAO Technical Workshop. 6–9 July 2010, Hermosillo, Mexico. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 20. Rome, FAO, 187–202 pp.
- Seufert V., Ramankutty N., Foley J. 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485: 229-232.
- Srivastava R.C., Singhandhupe R.B., Mohanty R.K. 2004. Integrated farming approach for runoff recycling systems in humid plateau areas of eastern India. *Agricultural Water Management* 64: 197–212.
- Theocharopoulos A., Aggelopoulos S., Papanagiotou P., Melfou K., Papanagiotou E. 2012. Sustainable farming systems vs conventional agriculture: A socioeconomic approach. En: *Sustainable Development- Education, Business and Management- Architecture and Building Construction - Agriculture and Food Security*, Prof. ChaoukiGhenai (Ed.), InTech, 249-272 p. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-development-education-business-andmanagement-architecture-and-building-construction-agriculture-and-food-security/sustainable-farmingsystems-vs-conventional-agriculture-a-socioeconomic-approach>
- Tran N., Crissman C., Chijere A., Chee H.M., Jiau T.S., Valdivia R.O. 2013. Ex-ante assessment of integrated aquaculture-agriculture adoption and impact in Southern Malawi. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems, Working Paper: AAS-2013-03, 20p.
- Tréllez-Solís E. 2004. Manual guía para educadores. Educación ambiental y conservación de la biodiversidad en los procesos educativos. Centro de Estudios para el Desarrollo, Proyecto CHI/01/G36 “Conservación de la biodiversidad y manejo sustentable del Salar del Huasco,” 72p.

- Wang X., He X., Chen B., Xie C. 2011. Rice field for the treatment of pond aquaculture effluents. *African Journal of Biotechnology* 10 (34): 6456-6465.
- Watanabe W.O., Losordo T.M., Fitzsimmons K., Hanley F. 2002. Tilapia Production Systems in the Americas: Technological Advances, Trends, and Challenges. *Reviews in Fisheries Science*, 10 (3 & 4): 465-498.
- Wegner G., Pascual U. 2011. Cost-benefit analysis in the context of ecosystem services for human well-being: A multidisciplinary critique. *Global Environmental Change* 21: 492–504.
- Wilson G. 2005. Greenhouse aquaponics proves superior to inorganic hydroponics. *Aquaponics Journal*, 4th Quarter (39): 14-17.
- Wood R., Lenzen M., Dey C., Lundie S., 2006. A comparative study of some environmental impacts of conventional and organic farming in Australia. *Agricultural Systems* 89: 324-348.
- Xepapadeas A. 2009. Ecological economics: principles of economic policy design for ecosystem management. Editorial S. Levin. En: *The Princeton Guide to Ecology*. Princeton University Press, 8p.
- Yeo S.E., Binkowski F.P., Morris J.E. 2004. Aquaculture effluents and waste by-products. Characteristics, potential recovery, and beneficial reuse. North Central Regional Aquaculture Center (NCRAC), EUA, 47p.

CAPÍTULO IV: RENDIMIENTOS PRODUCTIVOS DE DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA POR UNIDAD DE ÁREA, VOLUMEN DE AGUA, Y COSTOS DE PRODUCCIÓN

Resumen

El realizar un análisis de los rendimientos productivos por unidad de área, volumen de agua utilizado y costos de producción, permite dar a conocer el potencial productivo de cada sistema y en qué condiciones son más factibles de implementarse, dependiendo de la disponibilidad de agua y espacio, así como la capacidad de inversión de los productores. De igual manera, es importante que la producción primaria se lleve a cabo de forma sustentable, con métodos de producción amigables con el ambiente, donde exista una mayor eficiencia productiva por superficie y volumen de agua utilizado debido al impacto que ha tenido este sector sobre el medio ambiente. Realizar estos análisis permite conocer la eficiencia e impacto de los sistemas de producción. En el presente trabajo se evaluaron los rendimientos productivos de dos Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI): un sistema acuapónico de raíz flotante (SA) y un sistema acuícola donde los recambios de agua se utilizan para la irrigación (SBR). En ambos sistemas se cultivó carpa koi a la misma densidad de confinamiento y bajo las mismas prácticas de alimentación. El periodo experimental fue de 18 semanas, se iniciaron los cultivos con cien peces con un peso promedio de 4.46 ± 0.787 g. en el SBR y de 4.86 ± 0.94 en el SA. Durante el periodo experimental se monitorearon diario los parámetros de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, y semanalmente las concentraciones de amonio y nitritos, así como la acumulación de macronutrientes (nitrato, fosfato, potasio, sulfato, calcio, magnesio). Con base en la acumulación de nutrientes obtenida en cada SAAI, y los resultados de una muestra de suelo con uso agrícola de la región y del humus generado con el composteo de desechos acuícolas, se calculó la capacidad productiva de lechugas por sistema. Con los resultados obtenidos se realizaron prospecciones de los rendimientos productivos que puede generar cada SAAI considerando su capacidad productiva media y máxima. Los resultados muestran que a densidades de confinamiento bajas, el SBR presenta mayores rendimientos productivos por unidad de área, volumen de agua, así como mayor un Índice de Valor del Agua (INVA) y menores costos de producción. Sin embargo, considerando la capacidad productiva media y máxima de cada sistema, el Sistema Acuapónico genera mayores rendimientos productivos.

Abstract

The analysis of yields per unit area, volume of water consumed and production costs, allows to know the productive potential of each system and under which conditions are most feasible to be implemented, depending on the availability of water and space, as well as the investment capacity of the producers. Likewise, it is important that primary production develops in a sustainable way, with environmentally friendly production methods, where there is a greater

productive efficiency by surface and water volume due to the impact that this sector has on the environment. Performing these analysis allows to know the efficiency and impact of the production systems. In the present work, the productive yields of two Integrated Agro-Aquaculture Systems (SAAI) were evaluated: a raft aquaponics system (SA) and an aquaculture system where water exchanges are used for irrigation (SBR). In both systems, koi carp were grown at the same confinement density and under the same feeding practices. The experimental period lasted 18 weeks, cultures were started with fish with an average weight of 4.46 ± 0.787 g. in the SBR and of 4.86 ± 0.94 in the SA. Temperature, pH, dissolved oxygen and electrical conductivity were monitored daily, whereas ammonium, nitrite and macronutrients such as nitrate, phosphate, potassium, sulphate, calcium and magnesium were monitored weekly. Based on the accumulation of nutrients obtained in each SAAI, and the results obtained from a soil sample of an agricultural plot in the region, and from the humus generated of a vermicompost produced with aquaculture waste, the productive capacity of lettuces per system was calculated. With the results obtained, calculations were made of the productive yields that each SAAI can generate considering its average and maximum productive capacity. The results show that at low confinement densities, the SBR presents higher productive yields per unit area, water volume, as well as higher Water Value Index (INVA) and lower production costs. However, considering the average and maximum productive capacity of each system, the Acuaponic System generates higher productive yields.

Introducción

Actualmente la agricultura y la acuicultura son indispensables en el abastecimiento de alimentos para la población mundial. En los últimos 50 años, la producción agrícola incrementó entre 2.5 y 3 veces, mientras que la población mundial creció 2.6 veces (FAO 2011). La acuicultura es el sector de producción de alimentos con mayor crecimiento (Dediu *et al.* 2012), y desde 1970 ha presentado una tasa promedio anual de 8.9%, mientras que para el mismo periodo de tiempo, la pesca y ganadería han presentado una tasa de crecimiento promedio de 1.2% y 2.8% respectivamente (FAO 2004). Este crecimiento contrasta con el estado actual de las pesquerías, donde el 53% de los stocks comerciales se estimaron totalmente explotados, 28% sobre explotados, 3% devastados y 1% en recuperación (FAO 2010). En el 2012, el sector acuícola participó con el 42.2% del total del abastecimiento de peces a nivel mundial (FAO 2014).

El sector primario en general, también es importante en la economía y subsistencia de aproximadamente 2.5 billones de personas que dependen directamente de estas actividades, y que viven principalmente en zonas rurales (FAO 2012). Ejemplo de ello es que en los países en desarrollo y zonas rurales, la acuicultura se ha fomentado con fines de subsistencia, para incrementar el consumo de proteína animal y mejorar así los niveles nutricionales de la población (FAO 2006).

Sin embargo, la agricultura y acuicultura, bajo las actuales prácticas dominantes, han generado una serie de problemáticas ambientales, entre las que sobresale el uso desmedido y contaminación del agua, degradación y contaminación del suelo, pérdida de biodiversidad y deterioro de los ecosistemas (Pimentel 2002; De Silva 2009; Bayoumi-Hamuda y Paktó, 2010).

En la escala mundial, aproximadamente 70% del gasto de agua dulce es realizada por el sector primario, y en México dicha extracción corresponde al 77% (AQUASTAT 2012).

En materia del agua, el impacto del sector acuícola está relacionado con los volúmenes utilizados y su descarga sin tratamiento, lo cual deteriora la calidad del agua de los cuerpos hídricos receptores, pudiendo generar problemas de eutrofización (De Schryver *et al.* 2008). Los volúmenes empleados en la acuicultura varían dependiendo de los sistemas de producción, estrategias productivas utilizadas para mantener la calidad del agua de los cultivos y la intensidad productiva que dichos sistemas de cultivo pueden sostener, pudiendo ser menores a 0.5 m³ por kilogramo de producto cosechado, o mayores a los 50 m³ (Verdegem *et al.* 2006; Wilson 2005; Timmons *et al.* 2009).

En el caso de la agricultura, se ha observado un incremento en los rendimientos productivos con la agricultura de riego en comparación de los cultivos de temporal. En México, se ha reportado que este incremento, en toneladas por hectáreas, es entre 2.2 a 3.6 veces mayor (CONAGUA 2011). Debido a ello, la agricultura de riego se ha expandido en las últimas décadas, sin embargo, el problema recae en el uso de sistemas de irrigación de baja eficiencia y alto consumo hídrico, así como en la contaminación del agua por agroquímicos (Killebrew y Wolff 2010).

En México, la optimización del agua por parte de estos sectores es indispensable ya que el país presenta un alto estrés hídrico, lo cual significa que se realizan extracciones entre el 40-80% del agua renovable existente (Gassert *et al.* 2013); esto es evidente sobretodo en el norte y centro de la república, donde importantes cuencas hidrográficas se encuentran muy o extremadamente explotadas (UNESCO 2012). Ejemplo de ello es que en la Ciudad de México existe una gran competencia por el agua, lo cual ha destinado que la agricultura de riego se lleve a cabo

principalmente con agua tratada de menor calidad, afectando directamente a los productores (González-Pozo 2010). Ejemplo de ello es que a nivel nacional el 86.8% de las Unidades de Producción Agrícola (UPA) de riego utilizan agua blanca proveniente de ríos, presas y pozos profundos, mientras que en la Ciudad el 87.7% utilizan agua tratada (INEGI 2009; INEGI 2012).

En cuanto al suelo, a nivel mundial actualmente más de 1.5 billones de hectáreas (12% de la superficie continental) están destinadas al cultivo agrícola, y existen pocas posibilidades de expansión debido a que los suelos con potencial agrícola, se encuentra en zonas boscosas, áreas de conservación, o áreas de asentamientos humanos. Por esto mismo, se ha planteado la necesidad de que el crecimiento en la producción agrícola provenga de una mayor eficiencia productiva de los sistemas de cultivo (FAO 2012) y de sistemas de producción que no requieren de los nutrientes del suelo como son sistemas de agro-acuicultura integrada como la acuaponía (De Dezcery 2010), los huertos flotantes (Pantarella 2008); así como la hidroponía.

En la Ciudad de México existe también competencia por el uso del suelo, y el sector primario se desarrolla en condiciones limitantes de extensión de tierra en comparación de la media nacional. La extensión promedio de las UPA a escala nacional es de 8.05 hectáreas, mientras que en la Ciudad la superficie media es de 1.65 hectáreas (INEGI 2009; INEGI 2012).

Por todo ello, a la par del impacto ambiental existente (tanto de los recursos como de los servicios ecosistémicos), es trascendental que la agricultura y acuicultura se desarrollen de manera sustentable, aumentando los rendimientos y eficiencia productiva por unidad de superficie, volumen de agua, y minimizando el impacto ambiental derivado de sus prácticas productivas (Neori *et al.* 2004; Crab *et al.* 2007; FAO 2013).

Una alternativa para aumentar la eficiencia productiva, es a través de los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI). En estos sistemas converge la producción agrícola y acuícola a través del aprovechamiento de recursos que se pueden emplear en común, como por ejemplo el agua y los lodos provenientes de la acuicultura, los cuales son ricos en nutrientes y se pueden emplear como fertilizantes agrícolas. Esta integración permite optimizar el uso del agua, diversificar la producción, disminuir la dependencia en fertilizantes inorgánicos y los costos de producción derivados de estos insumos, minimizar el impacto ambiental ya que se aprovechan estos productos de desecho, así como generar cultivos orgánicos los cuales tienen un mayor valor en el mercado, y generar beneficios socioeconómicos (FAO 2004; Dey *et al.* 2006; Bakhsh 2008; Pantanella 2008; Endut *et al.* 2009; CARDI 2010; Wang *et al.* 2011; Gurung 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013).

En el presente trabajo se evaluaron los rendimientos productivos de dos SAAI: un sistema acuapónico de raíz flotante, y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación. Se realizó el análisis de la producción obtenida por unidad de superficie, volumen de agua utilizado y costos de producción de cada sistema.

Este análisis permite dar a conocer el potencial productivo de cada SAAI, y en condiciones es más factible de implementarse, dependiendo de la disponibilidad de agua y espacio, así como la capacidad de inversión de los productores.

Antecedentes

Existen múltiples trabajos que reportan un aumento en los rendimientos productivos en sistemas de agro-acuicultura integrada en comparación de sistemas de producción similares pero que carecen de la integración de estos componentes (Moya *et al.* 1986; Panigrahi *et al.* 2001; Panigrahi y Panda 2003; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Dey *et al.* 2006; Rasowo *et al.* 2008; Gurung 2012), y entre SAAI y cultivos con fertilización inorgánica (Pantanella 2010; Abdul-Rahman *et al.* 2011). Se ha reportado que el riego con el efluente acuícola puede emplearse en vez de la aplicación de fertilizantes inorgánicos (Abdul-Rahman *et al.* 2009), así como favorecer el crecimiento de los cultivos agrícolas al combinar la fertirrigación proveniente del efluente acuícola con la aplicación complementaria de fertilizantes inorgánicos (Wang *et al.* 2011). Específicamente para los sistemas acuapónicos, se ha demostrado que pueden sostener producciones similares e inclusive mayores a cultivos hidropónicos una vez que los sistemas acuapónicos cuentan con una biomasa de peces suficiente para mantener una concentración de nutrientes adecuada para las hortalizas, así como de bacterias nitrificantes para oxidar el amonio a nitratos (Wilson 2005; Licamele 2009; Pantanella 2010).

También existen trabajos que reportan un incremento en las ganancias económicas y rentabilidad de los sistemas de producción al integrar el componente acuícola con el agrícola (Adler *et al.* 2000; Gooley y Gavine 2003; FAO 2004^b; Srivastava *et al.* 2004; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Dey *et al.* 2006; Licamele 2009; Noble 2009; Abdul-Rahman *et al.* 2011; Dediu *et al.* 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013; Tran *et al.* 2013; Samuel y Mathew 2014).

A su vez existen estudios donde se ha reportado que los SAAI mejoran la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) y el Índice de Valor del Agua (INVA; Hussein y Al-Jaloud 1995; Ghate y Burtle 1993; Dey 2006; Dey 2010; Abdul-Rahman *et al.* 2011).

En estos trabajos, los rendimientos productivos, por unidad de área, volumen de agua utilizado y costos de producción varían dependiendo del grado de intensificación, manejo técnico, condiciones climáticas, especies cultivadas, entre otros factores, y han sido comparados con cultivos que aplican fertilización inorgánica así como aquellos de bajos insumos externos que realizan fertilización orgánica (sin integrar la agricultura con la acuicultura). Sin embargo, ninguno de estos estudios evalúa los rendimientos productivos entre dos SAAI diferentes, por lo cual, en el presente trabajo se evaluaron los rendimientos productivos de un sistema acuapónico de raíz flotante, y un sistema acuícola con menor grado de tecnificación, cuyos recambios de agua se aprovechan para la fertirrigación.

Objetivo

Determinar los rendimientos productivos de dos sistemas de agro-acuicultura integrada por unidad de área, volumen de agua utilizado y costos de producción por unidad vegetal y piscícola obtenida.

Material y Método

Para el análisis de los rendimientos productivos por unidad de área, volumen de agua utilizado y costos de producción, se consideraron los resultados obtenidos durante el primer periodo experimental efectuado durante este trabajo.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en condiciones de invernadero en el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC) de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Los SAAI fueron dirigidos al cultivo de carpa koi y lechuga.

El Sistema Acuapónico (SA) es un sistema de tipo raíz flotante producido por Nelson y Pade, Inc. (modelo F5). Dicho sistema cuenta con un tanque para el cultivo de peces de 110 galones (416.4 litros), un sistema de filtros (sedimentador, mineralizador y desgasificador), y dos camas para la producción de hortalizas de 3 x 5 pies (91.4 x 152.4 cm), con una capacidad de 90 plantas. Tanto el sedimentador como el mineralizador cuentan con una compuerta en la parte inferior para poder extraer la materia orgánica proveniente del estanque de cultivo. El agua es recirculada continuamente, con un flujo que permite que el volumen total del estanque pase por los filtros cada hora. Cuenta con sistemas de aireación en el estanque de cultivo, desgasificador y en las camas de cultivo. Su volumen total es 871 litros y tiene una capacidad máxima de cultivo de peces de 20.4 kg. El consumo eléctrico total entre la recirculación y aireación del agua es 288 watts·hr⁻¹. El promedio del total de agua abastecida por evaporación y recambios fue de 2 %/día.

El Sistema de cultivo basado en Recambios (SBR) está compuesto por un estanque circular de plástico (bebedero circular Rotoplas con capacidad de 1000 L.), que se llenó con el mismo volumen del SA. Los sedimentos se extrajeron con un sifón manual. Los recambios de agua se hicieron de manera semanal principalmente para remover sólidos sedimentados. El promedio del total de agua reabastecida por evaporación y recambios fue 2.6%/día. Para la aireación del sistema, durante el primer periodo experimental se utilizó un soplador regenerativo de 1/16 Hp, con un consumo de 46.6 watts·hr⁻¹. Sin embargo se observó que su potencia excedía la requerida

en el SBR, por lo cual durante el segundo experimento se utilizaron de manera exitosa tres bombas de aire de doble salida, que generaron un consumo total de 9 watts·hr⁻¹. Se considerará este método de aireación para los análisis económicos.

En ambos sistemas se cultivó carpa koi con la misma densidad de confinamiento y bajo las mismas prácticas de alimentación. El periodo de cultivo fue de 18 semanas, del 16 de noviembre del 2015 al 17 de marzo del 2016. Se iniciaron los cultivos con cien peces con un peso promedio de 4.46 ± 0.787 g. en el SBR y de 4.86 ± 0.94 en el SA; es decir, con una biomasa inicial de 446.1 y 486.1 g. respectivamente. Se otorgó alimento peletizado de 3.5 mm. de la marca Silver Cup de El Pedregal que cuenta con un mínimo de 32% proteína, 5% grasa, 5% de fibra, 5% ceniza y 12% humedad. El alimento se trituró y se proporcionó *ad libitum*, haciendo registro de la cantidad de alimento dado por día.

Durante este periodo experimental se utilizaron termostatos sumergibles con capacidad de mil litros (y consumo de 1,000 watts hr⁻¹) para mantener el agua a una temperatura promedio de 22°C. Sin embargo se observó experimentalmente (durante el segundo periodo experimental) que durante primavera, verano y otoño se puede mantener esta temperatura sin necesidad de los termostatos, por lo cual no se considerará este costo.

Biometrías de las carpas

Se realizaron las siguientes mediciones: longitud total, longitud patrón y peso del 25% de los organismos, así como se registró la mortalidad de estos. Las carpas se midieron y pesaron al principio y al final del experimento. Con el peso de los organismos obtenido al final del

experimento se calculó la biomasa final, y con la longitud total obtenida se investigó el precio de venta en el mercado de las carpas koi.

Medición de parámetros de calidad del agua

Se realizaron mediciones diarias de pH, temperatura y conductividad eléctrica utilizando un equipo portátil HANNA modelo HI991300. Así mismo se monitoreó el oxígeno disuelto con un sensor portátil de la marca HACH modelo Sension 6. Las mediciones se realizaron aproximadamente a las 18:00 horas.

Se midieron los niveles de nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, dos veces por semana durante el primer mes. Posteriormente se midieron los parámetros de manera semanal. Adicionalmente se monitorearon de manera semanal, otros nutrientes de importancia agrícola como potasio, calcio, magnesio, y sulfato. El monitoreo de estos seis macronutrientes se consideran dentro de las mediciones de calidad del agua, por su importancia para el cultivo de las plantas superiores. Las mediciones se realizaron utilizando el equipo HI 83225 Nutrient Analyses de HANNA.

Evaluaciones para el cultivo de lechugas

Debido a que no se realizó el cultivo directo de lechuga, se evaluó la acumulación de nutrientes obtenida y calidad del agua de ambos sistemas para valorar y comparar cómo sería el desempeño de estos cultivos.

Para el Sistema Acuapónico se tomó como referencia la relación peces-lechugas obtenida por Licamele (2009), en donde por cada kilogramo de peces cultivados, se pudieron cosechar 6.4

lechugas con un peso final promedio de 176.75 ± 31.03 gramos. Debido a que la biomasa final de peces obtenida en el sistema acuapónico fue de 1.44 kilogramos, se considera que se pudieron haber cosechado nueve lechugas.

Para el cálculo del total de lechugas que se pueden cosechar en el Sistema Basado en Recambios, se tomó en cuenta la cantidad de nutrientes acumulados por el sistema (que servirán para fertirrigar), así como los parámetros fisicoquímicos de una muestra de suelo obtenida de una parcela en Milpa Alta, Ciudad de México, y de una lombricomposta realizada con productos de desecho de estanques dedicados al cultivo del ajolote *Ambystoma mexicanum* (aprovechando lodos acuícolas y plantas acuáticas presentes en los estanques).

Debido a que la cantidad de nutrientes presente en estas tres fuentes en conjunto (al cultivar lechugas directamente en el suelo, aplicar el humus generado como fertilizante y fertirrigar con el agua del estanque) no es un factor limitante para el cultivo de lechuga, para hacer el cálculo del total de lechugas que se pueden cosechar en este sistema se consideró el total de recambios de agua efectuado por día durante el experimento. Recirculating Farms Coalition (2011) reporta que en cultivos convencionales en suelo, para cultivar un kilo de lechugas se requieren 132.7 litros de agua. Considerando los pesos finales de las lechugas obtenidos por Licamele (2009), esto equivale a 5.66 lechugas por el volumen de agua reportado.

Durante el periodo experimental se abasteció diario 2.6% del volumen del sistema. Aproximadamente 1% fue por evaporación del agua, mientras que 1.6% provienen de los recambios realizados. El volumen extraído, además de contener agua que puede emplearse para fertirrigar, también contiene sólidos sedimentados provenientes de las heces fecales de los peces, alimento no aprovechado y decaimientos algales, etc. (lodos acuícolas). Debido a que no

se pretende aplicar los lodos acuícolas directamente en los cultivos (ya que no han pasado por un proceso de composteo aún y su DBO es alta; Yeo *et al.* 2004), y con base a observaciones experimentales, se considera que un $\frac{1}{4}$ del volumen extraído no será aprovechado para fertirrigar debido a que representan el agua-lodo sedimentada (se puede aprovechar mediante su composteo y posterior aplicación como fertilizante). El agua disponible para riego es 1.2% del volumen del estanque por día, lo cual equivale 1,361 litros durante el periodo experimental y a 58 lechugas.

Costos de producción

Para poder determinar los rendimientos productivos en relación con los costos de producción, se mantuvo el registro de todos los costos involucrados durante el cultivo de cada SAAI, como son mano de obra, gasto de agua, de luz, alimento para los peces, costo de los peces, y de las semillas.

Los peces se abastecieron en el Mercado de Peces de Morelos (Ciudad de México), ya que es una fuente de distribución y abasto importante de la Ciudad, y se pretendía simular las condiciones a las cuales se pueden enfrentar pequeños productores. Las carpas son ofrecidas a un precio económico (2 pesos cada una, precio de mayoreo, Tabla 1) pero no son de buena calidad, ni en las mejores condiciones, lo cual tiene influencia directa en los rendimientos productivos.

El alimento se compró directamente con distribuidores de El Pedregal, y el costo de un costal de 20 kilos fue \$254. El costo de la mano de obra se obtuvo del Diario Oficial de la Federación del 19 de diciembre de 2016, el cual entró en vigor a partir del enero del 2017, y donde se

establece que el salario mínimo es \$80.04 pesos por jornada de trabajo. La tarifa de la luz se obtuvo directamente de la página oficial de la CFE (CFE 2017), y se consideró la tarifa “1” o de “Servicio Doméstico” debido a que los SAAI se pueden efectuar en traspatio. En esta tarifa el cobro bimestral por los primeros 75 Kwh es de 0.793 pesos, los siguientes 65 Kwh cuestan \$0.956, y el consumo excedente se cobra a \$2.802 pesos/Kwh. También existe una tarifa agrícola de estímulo para la operación de equipos de bombeo y rebombeo de agua para el riego, pero que sólo aplica a los productores inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios de la SAGARPA. El cargo de estímulo es de \$0.58 pesos/Kwh.

El costo del agua se obtuvo directamente de la página oficial de la CONAGUA (<http://www.conagua.gob.mx/tarifas/>), y también se consideró el cargo a usuarios “Domésticos” en la Ciudad de México, debido a que la base de datos no desglosa los costos para usuarios agrícolas o acuícolas, y adicionalmente este cargo aplica cuando se efectúan cultivos de traspatio. El cargo de agua potable establecido para la Ciudad es de \$21.40 pesos/m³.

Las semillas de lechuga se compraron directamente en el Rancho Los Molinos. Un paquete con 3 gramos de semillas costó \$10, y rinde para 2,400 plantas. Para calcular el costo por semilla se consideró un porcentaje de germinación del 80%.

Tabla 1: Precios de venta (al mayoreo y menudeo) de carpas koi en el Mercado de Peces de Morelos.

Talla (cm)	Precio mayoreo (pesos)	Precio menudeo (pesos)
<5	2-3	5
10	15	30
25	130	180

Rendimientos productivos

Por unidad de volumen

Se calculó el total de carpas y lechugas producidas con el volumen de agua utilizado en cada SAAI considerando los gastos totales por evaporación y por recambios durante el periodo experimental. Para tener resultados comparables, posteriormente se calcularon los rendimientos productivos por m³ de agua utilizado. Finalmente obtuvo el Índice de Valor del Agua (INVA) como lo proponen Abdul-Rahman *et al.* (2011), considerando los rendimientos productivos y precios de venta tanto de las carpas koi como de las lechugas:

$$INVA (\$/m^3) = \text{rendimientos productivos (kg/m}^3) \times \text{precio de venta (\$/kg)}$$

Se consideró el precio de venta de mayoreo de las carpas koi (Tabla 1). El precio de venta de lechugas orgánicas en la Ciudad de México es aproximadamente de \$20 por pieza (precio de menudeo). Se estableció el precio de \$10 por pieza como precio de mayoreo, el cual es el costo actual de las lechugas que no son orgánicas.

Por unidad de área

El área total del sistema acuapónico Nelson and Pade es aproximadamente de 5 m², de los cuales aproximadamente 3 m² corresponden a las dos camas hidropónicas, 0.5 m² al estanque y aproximadamente 1.5 m² al área de filtros.

El estanque del SBR tiene un área total de 2.2 m², y el cultivo de hortalizas se realiza de manera independiente, directamente en el suelo, por lo cual el área ocupada va a depender de las lechugas plantadas. Se considerará la proporción de 25 lechugas/m² (Jeavons *et al.* 2006).

Rendimientos productivos: capacidad media y máxima de cada sistema

Debido a que no se llegó a la capacidad productiva máxima de los SAAI utilizados, también se realizó un análisis prospectivo considerando las biomásas máximas que ambos sistemas pueden sostener. Para realizar dicha prospección, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica de los rendimientos productivos reportados para los SAAI utilizados. El Sistema Acuapónico utilizado puede sostener una biomasa máxima de 20.4 kg de peces (Nelson y Pade Inc.2012). Para el SBR se consideró lo reportado por Watanabe *et al.* (2002), donde granjas que utilizan recambios de agua y aireación para mantener mayores densidades de confinamiento llegan a producir 4.5 kg/m².

Para los cálculos se consideraron dos escenarios, uno de alta productividad, es decir la capacidad máxima de cada sistema, y otro de productividad media.

Resultados

Durante el periodo experimental, la producción total por unidad de área y volumen de agua fue menor en el Sistema Acuapónico que en Sistema Basado en Recambios. En el SBR se obtuvo una producción total de 1.48 kg de carpas, 58 lechugas, lo cual equivale a una eficiencia productiva total de 3 kg/m³, y 3.5 kg/m², mientras que en el Sistema Acuapónico se logró una producción de 1.44 kg, 9 lechugas, 1 kg/m³ y 0.6 kg/m² respectivamente. El Índice de Valor del Agua también fue mayor, generando ganancias brutas de \$487 pesos/m³, mientras que en SA, el INVA fue de \$440. En cuanto a los costos de producción, estos son menores en el SBR, y el

mayor costo en este sistema deriva del gasto en mano de obra, mientras que en el SA, el mayor costo proviene del consumo eléctrico (Tabla 2).

Al evaluar la capacidad productiva media de cada sistema, en el SA se obtienen mayores rendimientos por m³ de agua tanto de carpas (3.3 y 0.34 kg/m³ en el SA y SBR respectivamente) como lechugas (3.7 y 3.6 kg/m³). El INVA es aproximadamente seis veces mayor en el SA, con ganancias de \$3 117 pesos/m³ y de \$501 en el SBR. Los rendimientos productivos de carpas por unidad de área también son mayores en el SA (5.1 y 1 kg/m² respectivamente), pero menores en el cultivo de lechugas, ya que el SBR genera un total de 8.8 kg/m², mientras que en el sistema acuapónico se logran producir 3.8 kg/m² (Tabla 2).

Cultivando a la capacidad productiva máxima de cada SAAI, se observa nuevamente en el SA una mayor producción de carpas y de lechugas por volumen de agua empleado, produciendo 6.65 y 7.5 kg/m³, mientras que en el SBR se obtuvieron biomásas finales de 0.37 y 4.5 kg/m³. El INVA es aproximadamente 11 veces mayor en el SA (\$6 233.5 y \$577.5 pesos/m³ respectivamente). La producción total por unidad de área también es mayor en el SA (8.7 y 7.1 kg/m²), sin embargo, el SBR genera una mayor proporción de lechugas/m² con la biomasa final calculada (7.7 kg/m² en el SA y 8.8 kg/m² en el SBR). En cuanto a las carpas, a esta densidad de confinamiento, la diferencia de producción entre sistemas es aproximadamente cinco veces mayor en SA (10.2 y 2 kg/m² respectivamente; Tabla 2).

Los costos de producción siempre fueron mayores en el Sistema Acuapónico; sin embargo, el INVA y las utilidades netas también lo son.

A pesar de que en todas las evaluaciones en el SBR se produjo una mayor biomasa de lechugas que en el SA (10.3, 23.5 y 55.5 kg en el SBR durante el experimento, y considerando la

capacidad media y máxima del sistema respectivamente, y 1.6, 11.5 y 23 kg en el Sistema Acuapónico), al evaluar los rendimientos productivos de lechugas por volumen de agua, estos fueron menores en el SBR durante la capacidad productiva media y máxima de los SAAI.

En el SBR, los rendimientos productivos de carpa por volumen de agua, no varían substancialmente entre los resultados obtenidos durante el experimento y la capacidad productiva media y máxima de este sistema debido a que en estos sistemas a mayor densidad de confinamiento los recambios de agua también tienden a aumentar. Se consideró que para llegar a la capacidad media de producción del sistema, se tendrían que aumentar los recambios de agua realizados durante el periodo experimental a aproximadamente el doble (5%/día), y para llegar a la capacidad máxima, los recambios de agua nuevamente se tendrían que incrementar (10%/día).

Tabla 2: Rendimientos productivos de dos SAAI por unidad de volumen (m³) y área (m²), Índice de Valor del Agua y costos de producción derivados de los cultivos.

Rendimientos productivos	Sistema Acuapónico			Sistema Basado en Recambios		
	Experimento	Capacidad media	Capacidad máxima	Experimento	Capacidad media	Capacidad máxima
Producción por sistema						
Carpas (kg)	1.44	10.2	20.4	1.48	2.25	4.5
Lechugas (piezas)	9	65	130	58	133	314
Lechugas (kg)	1.6	11.5	23.0	10.3	23.5	55.5
Rendimientos productivos por unidad de volumen						
Gasto total de agua (m ³)	3.1	3.1	3.1	3.8	6.6	12.2
Carpas (kg/m ³)	0.47	3.33	6.65	0.38	0.34	0.37
Lechugas (kg/m ³)	0.5	3.7	7.5	2.7	3.6	4.5
Producción total (kg/m ³)	1.0	7.1	14.1	3.0	3.9	4.9
Índice de Valor del Agua (\$/m ³)	440.3	3,116.7	6,233.5	486.5	501.4	577.5
Rendimientos productivos por unidad de área						
Área total (m ²)	5.0	5.0	5.0	3.4	4.9	8.5
Carpas (kg/m ²)	0.72	5.1	10.2	0.7	1.0	2.0
Lechugas (kg/m ²)	0.5	3.8	7.7	8.8	8.8	8.8
Producción total (kg/m ²)	0.6	4.3	8.7	3.5	5.3	7.1
Costos de producción (\$)						
Total	2,743	4,193	5,874	2,217	2,396	4,772

Discusión y Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que los SAAI aumentan la eficiencia productiva por unidad de área y volumen de agua utilizado; el Índice de Valor de Agua también aumenta con esta integración, lo cual refleja que existe una optimización de este insumo, y que hay un incremento en la rentabilidad de los cultivos.

Específicamente en el SBR, si no existiera la integración entre la acuicultura y la agricultura, el cultivo de carpas koi efectuado durante el periodo experimental derivaría en un volumen total

de 1 814 litros que serían vertidos sin aprovechamiento alguno y podrían causar problemas de contaminación en los cuerpos hídricos receptores. Si se considera la capacidad media de este sistema, el volumen vertido sería de 4.5 m³, y durante la capacidad máxima serían aproximadamente 10.2 m³. Es importante considerar que este volumen deriva de un cultivo de carpas en un estanque cuyo volumen es aproximadamente de 900 litros, y un periodo de cultivo de cuatro meses, y el porcentaje de recambios (sin contar el agua perdida por evaporación fue bajo, 1.6%, 4% y 9% dependiendo de la intensidad productiva). Sin embargo, los cultivos comerciales son mucho mayores, por ejemplo Watanabe *et al.* (2002) reportan que en Jamaica los cultivos predominantes son semi-intensivos en estanquería rústica con extensiones aproximadas de 0.4 ha, y recambios de agua del 10% por día. En Colima, México, se realizó un diagnóstico acuícola, al encuestar y visitar de manera presencial el 81% de las granjas existentes. Se observó que la mayoría de las granjas de tilapia (más del 30%) realizaban recambios diarios aproximadamente del 12%, siendo estos los recambios más bajos, ya que el resto de las granjas encuestadas reportaron volúmenes mayores de 20% por día. La superficie total de espejo de agua de las granjas de tilapia encuestadas (la sumatoria del área de estanquería de estas granjas) es aproximadamente de 46 hectáreas, por lo cual el volumen total de agua de recambios vertida por día, es muy alto (Fracchia-Durán 2013).

Si no existiera la integración entre la acuicultura y la agricultura en el SBR, además del uso ineficiente del agua y el impacto ambiental que esto genera, la producción total disminuiría notoriamente. Durante el periodo experimental, con el volumen de recambios realizados se podrían cultivar 10.3 kg de lechugas mientras solo 1.5 kg de carpas; y considerando la capacidad máxima de este sistema se podrían cultivar 55.5 kg de lechugas y solo 4.5 kg de carpas. Es decir, la integración de estos componentes permite optimizar el uso del agua, diversificar la

producción, disminuir la dependencia en fertilizantes inorgánicos y los costos de producción derivados de estos insumos, minimizar el impacto ambiental ya que se aprovechan estos productos de desecho, así como generar cultivos orgánicos los cuales tienen un mayor valor en el mercado, aumentar la rentabilidad de la producción y generar beneficios socioeconómicos con esto, como lo han reportado muchos autores (FAO 2004; Dey *et al.* 2006; Bakhsh 2008; Pantanella 2008; Endut *et al.* 2009; CARDI 2010; Wang *et al.* 2011; Gurung 2012; Murshed-E-Jahan *et al.* 2013).

Estos resultados también reflejan que específicamente en el SBR, debido a que la capacidad de producción de peces en el SBR es más baja que en el SA, el componente agrícola es un factor importante para aumentar la productividad y rentabilidad de los cultivos.

Sin embargo esto únicamente es viable cuando hay disponibilidad de agua para poder realizar recambios de agua y agricultura de riego. Por ejemplo, cuando los productores ya implementan agricultura de riego sea gracias a la existencia de reservas, pozas de captación de agua, u otro suministro, se puede integrar el cultivo de peces que generaría una fuente adicional de nutrientes para el cultivo agrícola, y un ingreso adicional para los productores, así como proteína de calidad para el autoconsumo (Srivastava *et al.* 2004; Narayan-Sethi *et al.* 2005; Samuel y Mathew 2014), sin representar un consumo de agua adicional, ya que el agua perdida por evaporación en los estanques o aquella que es incorporada en los tejidos de los peces es mínimo en comparación del agua que se requiere para el riego de hortalizas (Abdul-Rahman *et al.* 2011). También, los sistemas acuícolas existentes que realizan recambios parciales de agua para mantener la calidad de ésta en los cultivos, podrían implementar cultivos agrícolas de manera complementaria.

Cuando se busca realizar cultivos comerciales en vez de cultivos para el autoconsumo o la subsistencia, los resultados obtenidos muestran la importancia de elegir especies de mayor valor en el mercado, ya que por ejemplo en el SBR la producción de carpas por volumen de agua y por área de cultivo es baja en comparación del SA. Sin embargo, debido a que la carpa koi se vende por pieza y no por kilo, esto aumenta la rentabilidad del sistema.

En el SA se observa que la producción total de carpas y lechugas es similar; durante el periodo experimental se cosecharon 1.44 kilogramos de carpas, lo cual equivale a 1.6 kg de lechugas, y cultivando a la capacidad máxima del sistema se pueden cosechar 20.4 kg de carpas y 23 kg de lechugas. La productividad es similar debido a que se tomó como referencia lo reportado por Licamele (2009), que un kilogramo de peces permite producir 6.4 lechugas (con un peso total de 1.13 kg).

A pesar de que la biomasa producida entre el componente agrícola y acuícola del Sistema Acuapónico, son similares, las mayores ganancias provienen del cultivo acuícola, debido a que se producen 58.2 carpas de 17.18 ± 6.30 g de peso y 10.54 ± 0.97 cm de longitud, por kilogramo, con un precio en el mercado de \$15 al mayoreo y \$30 al menudeo, mientras que sólo se producen 5.7 lechugas con un peso de $176.75 \text{ g} \pm 31.03 \text{ g}$ por kilogramo cosechado.

Sin embargo, integrar el componente agrícola aumenta la eficiencia productiva, se optimizan los insumos, y se incrementa también la rentabilidad y el Índice de Valor del Agua, en comparación de Sistemas de Recirculación del Agua (RAS) en donde sólo se producen peces (Adler *et al.* 2000).

Durante este trabajo se observó que el SBR presentó mayor potencial de producción de hortalizas debido a que el SA depende mayoritariamente de los nutrientes provenientes de los

peces, y la biomasa máxima del SA Nelson y Pade es de 20.4 kg, mientras que los sistemas acuapónicos comerciales pueden producir 60 kg/m³ con aireación y 120 kg/m³ o más con oxígeno puro y sistemas de filtración muy eficientes (Timmons *et al.* 2009). A pesar de esto, se puede observar que los rendimientos productivos de lechuga por volumen de agua utilizado son mayores en el SA que en el SBR (al evaluar la capacidad productiva media y máxima de los sistemas), y se observa que los rendimientos productivos de lechuga por m³ aumentan a medida que se intensifica la producción de peces debido a que hay una mayor disponibilidad de nutrientes para las hortalizas.

El Sistema Acuapónico presentó una mayor producción total por volumen de agua y área de cultivo, así como un mayor INVA que el SBR cuando se evaluaron los rendimientos productivos en la capacidad media y máxima de cada sistema; sin embargo los rendimientos del SA fueron menores durante el periodo experimental, cuando la densidad de confinamiento de peces fue baja. Por otro lado, durante el periodo experimental, los mayores costos de producción en el SA provinieron del consumo eléctrico (\$1,816; 66% de los costos). Este gasto se mantiene igual independientemente de que se cultive a bajas o altas densidades de confinamiento. Por lo cual es recomendable llevar este sistema a su capacidad máxima de producción y así incrementar la rentabilidad. Esto concuerda con lo reportado por Rakocy *et al.* (2006), quienes sugieren que debido a los altos costos de inversión y producción, estos sistemas productivos deben operarse cerca de su capacidad máxima, y debe dirigirse al cultivo de especies con alto valor en el mercado.

Bibliografía

- Abdul-Rahman S., Saoud P., Owaied M.K., Holail H., Farajalla N., Haidar M., Ghanawi J. 2011. Improving water use efficiency in semi-arid regions through integrated aquaculture/agriculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 23: 212-230.
- Adler P.R., Harper J.K., Wade E.M., Takeda F., Summerfelt S.T. 2000. Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International Journal of Recirculating Aquaculture* 1:15–34.
- AQUASTAT. 2012. Water withdrawal by sector, around 2006. FAO, AQUASTAT database.
- Bakhsh K. 2008. *Integrated Culture, Hydroponics and Aquaponic System*. University Malaysia Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia, 75p.
- Bayoumi-Hamuda H., Paktó I. 2010. Relationship between environmental impacts and modern agriculture. *Óbuda University e-Bulletin* 1(1), 12p.
- CARDI 2010. *A manual on integrated farming systems (IFS)*. Prepared by Caribbean Agricultural Research and Development Institute (CARDI), for Agriculture Enterprise Development for Rural Belize (AED), 58p.
- CFE. 2017. Tarifa 1 2017. Disponible en: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&anio=2017. Visitado: 3 de abril, 2017.
- CONAGUA. 2011. *Estadísticas del agua en México*, edición 2011. México, D.F., 185p.
- Crab R., Avnimelech Y., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W. 2007. Review article: Nitrogen removal techniques in aquaculture for sustainable production. *Aquaculture* 270: 1-14.
- De Dezsery A.S. 2010. *Commercial integrated farming of aquaculture and horticulture*. International Specialised Skills Institute Inc (ISSI), Australia, 62p.
- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., Verstraete, W., 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value of aquaculture. *Aquaculture* 277: 125-137.
- De Silva, S.S., Nguyen, T.T., Turchini, G.M., Amarasinghe, U.S., Abery, N.W., 2009. Alien species in aquaculture and Biodiversity: a paradox in food production. *Ambio* 38(1): 5p.
- Dediu L., Cristea V., Xiaoshuan Z. 2012. Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology* 11(9): 2349-2358.
- Dey M., Kambewa P., Prein M., Jamu D., Paraguas F., Pems D., Briones R. 2006. Impact of development and dissemination of integrated aquaculture-agriculture (IAA) technologies in Malawi. *NAGA, World Fish Center Quarterly* 29 (1 & 2): 28- 35.
- Dey M.M., Paraguas F.J., Kambewa P., Pems D. E. 2010. The impact of integrated aquaculture–agriculture on small-scale farms in Southern Malawi. *Agric. Econ.* 41(1): 67–79.

- Endut A., Jusoh A., Ali N., Wan-Nik W.N.S., Hassan A. 2009. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Desalination and Water Treatment*, 5 (1-3): 19-28
- FAO. 2004^a. State of World Fisheries and Aquaculture. FAO, Rome.
- FAO. 2004^b. Agro-acuicultura integrada. Manual básico. FAO documento técnico de pesca 407. Roma, Italia, 163p.
- FAO. 2006. The State of World Aquaculture 2006. 134p.
- FAO. 2011. The state of world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. FAO Fiat Panis y Earthscan, Rome Italy, 308p.
- FAO. 2012. FAO Statistical Yearbook 2012. World Food and Agriculture. Roma, Italia, 366p.
- FAO. 2013. FAO Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture. Roma, Italia, 307p.
- FAO. 2014. El estado mundial de la pesca y acuicultura. Oportunidades y desafíos. Roma, Italia, 274p.
- Fracchia-Durán A.G. 2013. Caracterización y diversificación de la acuicultura en el estado de Colima. Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Marianas, 267p.
- Gassert F., Landis M., Luck M., Reig P., Shiao T. 2013. Aquaduct metadata document. Aqueduct global maps 2.0. World Resources Institute Working Paper. Washington D.C., EUA, 20p.
- Ghate S.R., Burtle G.J. 1993. Water quality in channel catfish ponds intermittently drained for irrigation. En: Techniques for modern aquaculture, Wang J.K (eds), 177–186. Joseph, MI: ASAE.
- González-Pozo A. 2010. Las chinampas de Xochimilco al despuntar el siglo XXI: inicio de su catalogación. UAM-Xochimilco, 1^a edición, México, D.F., 279p
- Gooley G.J., Gavine F.M. 2003. Integrated agri-aquaculture systems. A resource handbook for Australian industry development. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC), 189p.
- Gurung T.B. 2012. Integrated aquaculture within agriculture irrigation for food security and adaptation to climate change. *Hydro Nepal*, Special Issue, 73-77 pp.
- Hussain G., Al-Jaloud A.A. 1995. Effect of irrigation and nitrogen on water use efficiency of wheat in Saudi Arabia. *Agric. Water Manage.* 27:143–153.
- INEGI. 2009. Estados Unidos Mexicanos. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Ags., 193p.
- INEGI. 2012. El recurso tierra en las unidades de producción. Censo Agropecuario 2007. Aguascalientes, Ags., 55p.
- Jeavons J., Torres-Barrones M., Martínez-Valdez J.M. 2006. Método de mini-cultivo biointensivo sustentable. Manual de capacitación. Ecology Action, E.U.A., 32p.
- Killebrew K., Wolff H. 2010. Environmental impacts of agricultural technologies. Evans School Policy Analysis and Research (EPAR) Brief No. 65, 1-18.

- Licamele J.D. 2009. Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. The University of Arizona, 173p.
- Moya T. B., De la Vina W.C., Bhuiyan S.I. 1986. The potential of farm reservoir use in increasing productivity in rainfed rice areas. *Philipp. J. Crop Sci.* 11: 125-132.
- Murshed-E-Jahan K., Crissman C., Antle J. 2013. Economic and social impacts of integrated aquaculture-agriculture technologies in Bangladesh. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems. Penang, Malaysia. Working Paper: AAS-2013-02, 15p.
- Narayan-Sethi L., Panda S.N., Pholane L.P. 2005. Economic viability of rice-fish integration with the on-farm reservoir of rainfed ecosystem in eastern India. *Journal: Food, Agriculture and Environment (JFAE)* 3 (3&4): 194-199.
- Nelson yPade Inc. 2012. Fantastically Fun Fresh Food Factory- F5. System specifications. Nelson &Pade, Inc.
- Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A., Kraemer G., Halling C., Shpigel M., Yarish C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231: 361-391.
- Noble A. 2009. Potential role of integrated farming systems (IFS) for poverty alleviation in the Mekong Basin: An assessment of farmer-based networks in promoting IFS. International Water Management Institute (IWMI), 22p.
- Panigrahi B., Panda S. N. 2003. Optimal sizing of on-farm reservoirs for supplemental irrigation. *J. Irrig. & Drain. Engg. (ASCE)*, 129 (2): 117-128.
- Panigrahi B., Panda S.N. 2001. Simulation of ponding and soil moisture status through water balance model for rainfed upland rice. *Agric. Engg. J., Asian Assoc. of Agric. Engineers*, 10: 39-56.
- Pantanella E. 2008. Pond aquaponics: new pathways to sustainable integrated aquaculture and agriculture. *Aquaculture News* 34: 10-11.
- Pantanella E. 2010. New aquaponics research in Italy. *Aquaponics Journal* 56: 25-27.
- Pimentel D. 2002. Biological invasions. Economic, environmental costs of alien plant, animal and microbe species. CRC Press, Boca Raton, 336p.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M. 2006. Recirculation aquaculture tank production systems: aquaponics — integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454, 16p.
- Rasowo J., Auma E., Ssanyu G., Ndunguru M. 2008. Does African catfish (*Clarias gariepinus*) affect rice in integrated rice-fish culture in Lake Victoria Basin, Kenya? *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2(10): 336- 241.
- Recirculating Farms Coalition 2011. Water usage in recirculating farms. Recirculating Farms Coalition Fact sheet, 2p.
- Samuel M.P., Mathew A.C. 2014. Improving water use efficiency by integrating fish culture and irrigation in coconut based farming system: A case study in Kasaragod District of

- Kerala (India). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(2): 36-44.
- Srivastava R.C., Singhandhupe R.B., Mohanty R.K. 2004. Integrated farming approach for runoff recycling systems in humid plateau areas of eastern India. *Agricultural Water Management* 64: 197–212.
- Timmons M.B., Ebeling J.M., Piedrahita R.H. 2009. *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Editorial Cayuga Aqua Ventures, primera edición, 959p.
- Tran N., Crissman C., Chijere A., Chee H.M., Jiau T.S., Valdivia R.O. 2013. Ex-ante assessment of integrated aquaculture-agriculture adoption and impact in Southern Malawi. CGIAR Research Program on Aquatic Agricultural Systems, Working Paper: AAS-2013-03, 20p.
- UNESCO. 2012. *Managing water under uncertainty and risk*. The United Nations World Water Development Report 4, volume 1. France, 407p.
- Verdegem M.C.J., Bosma R.H., Verreth J.A.J. 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. *Water Resources Development* 22 (1): 101-113.
- Wang X., He X., Chen B., Xie C. 2011. Rice field for the treatment of pond aquaculture effluents. *African Journal of Biotechnology* 10 (34): 6456-6465.
- Watanabe W.O., Losordo T.M., Fitzsimmons K., Hanley F. 2002. *Tilapia Production Systems in the Americas: Technological Advances, Trends, and Challenges*. *Reviews in Fisheries Science*, 10 (3 & 4): 465-498.
- Wilson J. 2005. Submission on water use in aquaponics. *Aquaponics Network Australia*, 3p.
- Yeo S.E., Binkowski F.P., Morris J.E. 2004. *Aquaculture effluents and waste by-products. Characteristics, potential recovery, and beneficial reuse*. North Central Regional Aquaculture Center (NCRAC), EUA, 47p.

CAPÍTULO V: SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA COMO HERRAMIENTAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL

Resumen

Los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) son sistemas de cultivo donde converge la producción agrícola y acuícola a través del aprovechamiento de recursos que se pueden emplear en común, como por ejemplo el agua y los lodos provenientes de la acuicultura, los cuales son ricos en nutrientes y se pueden emplear como fertilizantes agrícolas. Esta integración permite optimizar el uso del agua, diversificar la producción, disminuir la dependencia en fertilizantes inorgánicos y los costos de producción derivados de estos insumos, y entre otros el minimizar el impacto ambiental ya que se aprovechan estos productos de desecho, así como generar cultivos orgánicos los cuales tienen un mayor valor en el mercado. Todo a su vez deriva en beneficios socioeconómicos. En el presente trabajo se utilizaron dos SAAI, un sistema acuapónico (SA), y un sistema de cultivo basado en los recambios de agua para la irrigación (SBR), como herramientas de educación ambiental proponiendo su uso como alternativa productiva a agricultores y acuicultores de la Ciudad de México. Para ello se realizaron una serie de pláticas y reuniones con productores, en donde ellos compartieron sus problemáticas y necesidades; también se expuso acerca de las características y ventajas productivas, socioeconómicas y ambientales de los SAAI. Se observó que estos sistemas son una alternativa de producción que tiene aceptación y potencial en la Ciudad, por el interés de los productores, la experiencia de los productores acuícolas con sistemas de recirculación, y de los productores agrícolas con el cultivo en chinampas (que es otro tipo de SAAI), como también porque son sistemas de producción que son pertinentes de implementarse en condiciones limitantes de agua, el cual es uno de los mayores problemas existentes para el sector primario de la Ciudad de México.

Abstract

The Integrated Agro-Aquaculture Systems (SAAI) are culture systems where agricultural and aquaculture production converges through the use of resources that can be used in common, such as water and sludge from aquaculture, which are rich in nutrients and can be used as agricultural fertilizers. This integration allows to optimize water use, diversify production, reduce dependence on inorganic fertilizers and production costs derived from these inputs, minimize environmental impact because these waste products are used, as well as to generate organic crops which have a greater value in the market. These characteristics leads to socio-economic benefits. In the present study, two SAAI, an aquaponic system (SA), and a culture system based on water for irrigation (SBR) were used as environmental education tools and their use as a productive alternative was proposed to agriculture farmers and aquaculturists from Mexico City. For this, a series of talks and meetings were held with producers, where they shared their problems and needs, and the characteristics and productive, socioeconomic and environmental advantages of SAAI were discussed. It was observed that the implementation of

SAAI has potential in the City, because of the interest the producers showed towards these systems, as well as the experience that many aquaculture producers have with recirculation systems, and many agricultural producers with chinampas (which is another type of SAAI), as well as because these are production systems that are suitable to be implemented under water-limiting conditions, which is one of the biggest problems for the primary sector in Mexico City.

Introducción

La educación ambiental empezó a cobrar importancia en la agenda internacional a mediados del siglo XX, para hacer frente a las problemáticas ambientales que se generaron a partir de la Revolución Industrial. El término “educación ambiental” fue utilizado por primera vez en 1948 en la Reunión de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, que tuvo lugar en París. Posteriormente, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, realizada en Estocolmo en 1972, se concretaron compromisos entorno al desarrollo sustentable y se recomendó fomentar la educación ambiental como estrategia para abordar las problemáticas ambientales existentes. En 1977, en la Conferencia Intergubernamental sobre Educación Ambiental que se llevó a cabo en Tbilisi, se acordaron y especificaron las metas, objetivos y principios de la educación ambiental, las cuales siguen vigentes hoy en día. En 1992, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, conocida como Cumbre para la Tierra, o Cumbre de Río, se acordó el Programa 21 (Agenda 21), el cual es un plan de acción encaminado al desarrollo sostenible. La Agenda 21 fue suscrita por 172 países miembro de las Naciones Unidas, y dentro de los compromisos acordados se plantea reorientar la educación hacia el desarrollo sustentable, otorgando la capacitación necesaria para lograrlo (Fuks 2004; McCrea 2006).

En estas reuniones se sentaron las bases sobre la educación ambiental, la cual se puede definir como “un proceso formativo continuo, interdisciplinario mediante el cual se busca que el

individuo y la colectividad conozcan y comprendan las formas de interacción entre la sociedad y la naturaleza, sus causas y consecuencias, a fin de que actúen de manera consciente, responsable a favor de una forma de vida sustentable.” A través de la educación ambiental se busca que cada uno tenga conciencia de su conducta personal, hábitos y acciones; y de cómo impactan a la naturaleza y a la sociedad. Se busca se desarrollen valores, actitudes y aptitudes, a favor de una forma de vida sustentable. Para ello es importante cada uno asuma sus responsabilidades con el medio ambiente, y participe, actúe, en la gestión ambiental del espacio geográfico que ocupa y de los recursos que utiliza (Environment Australia 2000; Tréllez-Solís 2004; Huerta Sagüillo 2014). El desarrollo sustentable es aquel donde se busca cubrir las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias; por lo cual, las actividades productivas se deben realizar preservando los sistemas naturales (Paniagua y Moyano 1998).

La educación ambiental se puede transmitir de diversas formas y se ha categorizado según el medio de transferencia, en educación ambiental formal, no formal e informal. La educación ambiental formal es aquella que se lleva a cabo a través de procesos educativos formales, es decir que conducen a certificaciones o grados, desde preescolar hasta los postgrados. La educación ambiental se puede incorporar de manera transversal en el currículo, abarcándola desde diferentes materias, o con materias específicas, y a través de proyectos escolares. La educación no formal se puede transmitir a través de talleres, seminarios, cursos y otras actividades formativas, y puede estar abierta a todos los sectores de la sociedad o dirigirse a un grupo en específico. La educación informal es aquella que se orienta al público en general a través de diversos medios y mecanismos de comunicación como son la televisión, radio, periódico, redes sociales, y el arte, como la música, el teatro, y la pintura (Tréllez-Solís 2004).

En el presente trabajo se utilizaron dos Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada (SAAI) como herramientas de educación ambiental, a través de la educación no formal, enfocada a productores agrícolas y acuícolas de la Ciudad de México. Se realizaron pláticas con intención de conocer sus problemáticas principales como productores, y transmitirles conocimiento y herramientas para optimizar los insumos, mejorar los rendimientos productivos y la rentabilidad, a través de prácticas amigables con el ambiente como son los SAAI.

Antecedentes

El eslogan o lema de la Agenda 21 es “Piensa global, actúa local.” Esta frase engloba fundamentos del desarrollo sustentable y de la educación ambiental, como son la conexión e integridad del ambiente, es decir, cómo las interacciones de la sociedad con la naturaleza en un lugar específico, tienen un impacto mucho más amplio; e implica desarrollar una mayor conciencia ambiental y social. Así mismo, no basta con únicamente desarrollar conocimientos y conciencia ambiental; se deben poner en práctica para obtener resultados benéficos (Fuks 2004).

Dentro de la educación ambiental es indispensable identificar los problemas y/o necesidades prioritarias del contexto local para posteriormente encontrar y poner en práctica soluciones. Cuando se pretende implementar un proceso de educación ambiental para el desarrollo comunitario, la identificación de los principales problemas ambientales debe provenir de la propia comunidad. La investigación y gestión ambiental participativa son parte del mismo proceso de educación ambiental. Sin embargo, la investigación científica y bibliográfica también es una fuente importante de provisión de información durante todo el proceso de

educación ambiental (Tréllez-Solís 2004; Rodríguez-Pérez *et al.* 2011). Por ello se realizó una revisión bibliográfica de los principales problemas existentes en la agricultura y acuicultura de la Ciudad de México, y se contrastó con la media nacional.

Se identificó que en la Ciudad de México existe una gran competencia por recursos como la tierra y el agua, lo cual ha condicionado que la agricultura de riego se realice con agua tratada de menor calidad, afectando directamente a los productores (González-Pozo, 2010). Ejemplo de ello es que a nivel nacional existe un mayor porcentaje de superficie de riego (18.4%), mientras que en la Ciudad la superficie de riego sólo es del 6.1% (Tabla 1). Dentro de las Unidades de Producción Agrícola (UPA) de riego, en la escala nacional el 86.8% de utilizan agua blanca proveniente de ríos, presas y pozos profundos, mientras que en la Ciudad el 87.7% utilizan agua tratada.

Adicionalmente, la agricultura en la Cd. de México se desarrolla en condiciones limitantes de extensión de tierra en comparación de la media nacional. La extensión promedio de las UPA a escala nacional es de 8.05 hectáreas, mientras que en la Ciudad, la agricultura se lleva a cabo predominantemente en minifundios de temporal (88.4% de las UPA), con una superficie media de 1.65 hectáreas (0.84 ha. por UPA de riego y 1.71 ha. por UPA de temporal). Otra limitante en la producción agrícola es que tanto a escala local como nacional, menos del 50% de las UPA reportan utilizar tecnologías como fertilizantes, insecticidas o pesticidas (sean orgánicos o inorgánicos). Sin embargo, en la Ciudad las tecnologías que más se utilizan son los abonos orgánicos y en menor medida los fertilizantes químicos, mientras que en la nivel nacional se recae en mayor medida en el uso de agroquímicos sintéticos (Tabla 2).

Además de las condiciones limitantes de disponibilidad de agua, extensión de tierra, infraestructura y tecnología empleada, en las que se desarrolla la agricultura en la Cd. De México existen otras limitaciones para el desarrollo agrícola, como son la baja escolaridad, capacitación y asistencia técnica que han recibido los productores, así como problemas para acceder a créditos o seguros agrícolas (Tabla 3). La mayoría de los productores (tanto en la Ciudad como a nivel nacional) sólo cuentan con educación primaria (42.5 y 54.9% respectivamente), secundaria (27.2 y 11.1%), o no cuentan con estudios (6.9 y 27.2%). Menos del 5% han recibido capacitación o asistencia técnica, así como acceso a créditos o seguros. Esto afecta directamente el desempeño y eficiencia productiva, pero también limita el desarrollo de otros aspectos del proceso productivo, como son: organización, administración, innovación tecnológica, formación de unidades integrales de producción, realización de presentaciones de valor agregado como son el procesado y transformación del producto, su comercialización, entre otras

Tabla 1: Uso del agua en la agricultura a escala local y nacional.

<i>El agua en la agricultura</i>	Nacional (%)	Cd. de México (%)
Agricultura de riego y temporal		
UPA de temporal	89.3	88.4
Superficie agrícola de temporal	81.6	93.9
UPA de riego	16.8	11.6
Superficie agrícola de riego	18.4	6.1
Calidad del agua en las UPA		
Negra	11.6	4.6
Tratada	1.1	87.7
Agua blanca	86.8	6.0
No sabe	1.5	2.7
Fuente de agua en las UPA		
Pozo profundo	28.0	4.9
Río	25.8	3.1
Presa	31.9	4.8
Otro	18.2	86.7
Sistema de riego en las UPA		
Canales recubiertos	25.4	1.2
Canales de tierra	64.4	43.8
Aspersión	7.7	5.1
Microaspersión	1.3	*
Goteo	3.3	3.0
Otro	10.2	48.5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2009.

* Información suprimida por principios de confidencialidad que indica la Ley de Información Estadística.

Nota: La sumatoria de los porcentajes de algunos parámetros no es exactamente 100%, debido a que así provienen los datos del VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2009).

Tabla 2: Infraestructura y tecnología empleada en la Ciudad de México y a escala nacional.

Infraestructura y tecnología empleada	Nacional		Ciudad de México	
	UPA (%)	Superficie (%)	UPA (%)	Superficie (%)
Viveros¹				
Presencia de viveros y superficie abarcada	0.7	0.1	3.1	0.4
Invernaderos¹				
Presencia de invernaderos y superficie abarcada	0.5	0.04	4.5	0.5
Tipo de tecnología aplicada²				
Total	44.1	-	46.4	-
Fertilizantes químicos	37.2	26.5	16.9	27.2
Semilla mejorada	10.9	13.9	3.4	4.3
Abonos naturales	8.3	4.5	33.9	28.6
Herbicidas total	19.6	18.6	5.2	11.1
Herbicidas químicos	19.0	17.3	4.7	10.0
Herbicidas orgánicos	1.3	1.3	0.6	1.1
Insecticidas total	12.1	12.5	2.3	3.9
Insecticidas químicos	11.9	12.0	2.0	3.5
Insecticidas orgánicos	0.3	0.4	0.3	0.5
Quema controlada	2.5	1.7	1.2	1.6
Otro tipo de tecnología	0.1	0.1	0.1	0.1

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2009.

¹ El porcentaje de viveros e invernaderos presentes en la escala local y nacional, se calculó con base al total de UPA y superficie agrícola en ambas escalas.

² El cálculo de porcentajes se realizó con base al total de UPA de la escala nacional y local.

Tabla 3: Algunas condiciones socioeconómicas limitantes para el desarrollo agrícola a escala local y nacional.

<i>Condiciones socioeconómicas limitantes</i>	Nacional (%)	Cd. de México (%)
Grado de estudios aprobado por el productor		
Ninguno	0.8	0.8
Primaria	54.9	42.5
Secundaria	11.1	27.2
Preparatoria	2.9	10.9
Otro	3.2	11.7
Sin escolaridad	27.2	6.9
Capacitación y asistencia técnica		
Sí han recibido	3.2	4.8
Obtención de crédito o contratación de seguro		
Con crédito o seguro	4.2	1.4
Sólo crédito	3.6	1.3
Sólo seguro	0.3	0.1
Crédito y seguro	0.3	0
Sin crédito ni seguro	95.8	98.6

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2009.

En cuanto a la acuicultura, no existe mucha información oficial disponible del desarrollo de esta actividad en la Ciudad de México ni de las problemáticas existentes. En la Carta Nacional Pesquera del 2006 se reporta la presencia de cultivos de trucha arcoíris en la entidad, sin embargo, no hay datos disponibles del número de granjas existentes, o de las hectáreas totales de cultivo; pero sí se especifica que en la ciudad no existen centros acuícolas para la reproducción de esta especie (SAGARPA, 2006). Tanto en la Carta Nacional Acuícola del 2011 como la del 2012, se reporta que en la Ciudad de México se lleva a cabo el cultivo de peces de ornato, sin embargo no hay información disponible del número de granjas, o condiciones del cultivo (SAGARPA, 2011^a; SAGARPA, 2012). En el Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca del 2008, se reporta que en la ciudad existen 16 granjas comerciales, que equivalen a 13

hectáreas de cultivo, aunque posteriormente mencionan que únicamente existen ocho granjas acuícolas registradas. También se especifica que en ese año, 72 personas se dedicaban a la producción acuícola mediante sistemas controlados, aunque en años anteriores este número era mayor, por ejemplo en el 2006 habían 104 personas trabajando en este sector (CONAPESCA, 2010). En el Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca del 2011, sólo se reporta la existencia de una granja acuícola registrada (SAGARPA, 2011^b). Por otro lado en el Censo Económico del 2009, de Pesca y Acuicultura, del INEGI, se reporta que en la Ciudad de México no existe actividad económica derivada del sector acuícola (INEGI, 2011).

Ramos-José (2011) reporta que en el 2010 existían 28 unidades de producción acuícolas en funcionamiento (Tabla 6), de un total de 35 unidades registradas por la Subdelegación de Pesca de la SAGARPA en la Ciudad de México. A pesar que se cuenta con el registro de la existencia de estas granjas, no se cuenta con información del manejo acuícola.

A pesar que no se cuenta con información oficial clara del desarrollo de la acuicultura en la Ciudad, posiblemente se presentan problemáticas similares a las del sector agrícola, como son condiciones limitantes de tierra y agua.

Objetivo

Utilizar los sistemas de agro-acuicultura integrada como herramientas de educación ambiental y proponer su uso como alternativa productiva entre los ejidatarios de Xochimilco.

Metodología

Primeramente se realizó una investigación bibliográfica sobre las principales problemáticas que existen en el sector agrícola y acuícola de la Ciudad de México para identificar si los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada podrían beneficiar a los productores de la Ciudad y resolver problemáticas presentes. La investigación se presenta en el apartado de Antecedentes.

Posteriormente se realizó un encuentro con productores acuícolas de la Ciudad, y con el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México, el Ing. Ángel Fernando de la O García, el cual está a cargo del área acuícola, así como con Prestadores de Servicios Profesionales (PSP) e investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (UAM-X), entre ellos el Dr. Luis Ayala Pérez y la M. en C. Aída Malpica Sánchez. La reunión se llevó a cabo en las instalaciones de la UAM-X, y fue organizada por la M. en C. Aída Malpica Sánchez, del Laboratorio de Uso y Calidad del Agua. Se contó con la presencia de productores de Xochimilco, Iztapalapa, Iztacalco, Atzacapotzalco, Cuajimalpa, y Tlahuac.

El objetivo de la reunión fue que los productores expusieran acerca de sus sistemas de producción, las problemáticas que presentan, y sus necesidades, es decir en qué áreas les gustaría recibir capacitación. Este primer encuentro sentaría las bases para futuras reuniones y pláticas con base a las problemáticas y necesidades externadas por los productores.

También se realizó otra reunión únicamente con el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México y la M. en C. Aída Malpica Sánchez, para tratar sobre el estado de la acuicultura en la Ciudad, problemáticas y perspectivas para su desarrollo.

Las problemáticas y necesidades expuestas por los productores sirvieron como guía para elaborar las pláticas en torno a los SAAI, y utilizarlos como herramientas de educación ambiental y proponer su uso como alternativa productiva para optimizar los insumos, mejorar los rendimientos productivos y la rentabilidad, a través de prácticas amigables con el ambiente.

Las pláticas se efectuaron utilizando material visual de apoyo (presentaciones de Power Point), y en la estructura de las pláticas se incluyeron temas como:

- Diagnóstico del impacto ambiental efectuado: Hacer conciencia del impacto ambiental que se ejerce sobre el medio ambiente en la vida diaria como individuos y en las actividades productivas (agricultura, acuicultura) y cómo esto afecta también a todos los seres vivos.
- Principales problemáticas en la agricultura y acuicultura de la Ciudad de México.
- Soluciones: optimización de insumos, incremento de la eficiencia productiva y rentabilidad de los sistemas de producción, diversificación producción, cultivos orgánicos; los SAAI como alternativa productiva en la Ciudad.
- Desarrollo sustentable: beneficios sociales y económicos del cuidado ambiental.

En las pláticas efectuadas se trataron estos temas, ya que en la educación ambiental la identificación del impacto ambiental que generamos, así como las principales problemáticas y soluciones entorno a nuestra actividad productiva, son pasos indispensables para lograr una gestión o manejo sustentable de los recursos naturales. Es importante también enfatizar que en la producción primaria, el cuidar los recursos naturales genera beneficios socioeconómicos de manera directa para los productores. Los beneficios económicos pueden motivar a que los

productores realicen cambios en el manejo de sus cultivos (Environment Australia 2000; Tréllez-Solís 2004). Se mostraron también evidencias fotográficas de SA y SBR implementados a escala comercial y traspatio, y con diversos materiales y sistemas de riego.

En todas las pláticas y conferencias impartidas se contó con la presencia de productores agrícolas y/o acuícolas de la Ciudad de México, sin embargo no fueron exclusivamente de la delegación de Xochimilco como se planteó inicialmente en el objetivo del presente trabajo.

Resultados

Reunión con productores acuícolas

En la reunión efectuada con productores acuícolas, asistieron siete productores tanto de peces de ornato como de tilapia, con y sin sistemas de recirculación, en cultivos al aire libre y en pecera, y dos PSP. Dentro de las problemáticas generales, se mencionó como la acuicultura, siendo una actividad productiva, durante décadas no fue fomentada por el gobierno en la Ciudad de México, y se favoreció en mayor medida el desarrollo de la agricultura y la ganadería. Esta exclusión ha conllevado a que la acuicultura se desarrollara como una actividad informal, sin reglamentación. Sin embargo, actualmente ya se promueve esta actividad en varias delegaciones como Xochimilco, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras, y se van a abrir convocatorias con apoyos en todas las delegaciones. Esto implica también que los productores necesitarán cumplir con los requisitos de manejo y calidad que estipulan SEMARNAT y CONAGUA, y que habrán visitas e inspecciones de las unidades productivas.

Las mayores problemáticas y necesidades expuestas por los productores fueron en torno al agua. Dentro de las problemáticas se expresó la falta de disponibilidad de este recurso en la cantidad

y calidad requerida. Por problemas de la mala calidad del agua de la red de distribución doméstica, han presentado problemas de mortalidad de peces, y varios productores mencionaron la necesidad de captar agua de lluvia, o comprar agua a través de pipas e inclusive garrafones (cuando el cultivo es menor escala). También se mencionó como para algunos de ellos, el problema de la calidad del agua es una limitante para cultivar peces para consumo humano. De este problema principal deriva otro: el incremento de los costos de producción por el gasto de agua.

Dentro de las necesidades, se expresó el interés por captar agua de lluvia, implementar sistemas de filtración dentro de los cultivos, recibir capacitación para saber analizar y mantener la calidad del agua y aminorar así el consumo de este recurso y los costos de producción. En la reunión también asistieron productores que tenían un mayor manejo técnico de los cultivos y ya implementaban sistemas de recirculación. Sus necesidades principales eran otras: recibir capacitación entorno a la reproducción y mejora genética de peces de ornato. Dentro de los asistentes, dos productores expresaron su interés por implementar sistemas acuapónicos.

Los productores y el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México enfatizaron la importancia de que exista un vínculo con la universidad para ayudar a resolver estas problemáticas y necesidades.

Reunión con el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México

En la reunión con el Ing. Ángel Fernando de la O García, Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México, se habló de cómo la acuicultura en la Ciudad de México está muy desarrollada especialmente en el cultivo y distribución de peces de ornato, teniendo una participación

importante en la producción a nivel nacional. Sin embargo, la mayoría de los productores no están registrados, y cultivan sin los permisos de CONAGUA y SEMARNAT.

El Subdelegado mencionó cómo en la Ciudad de México muchos de los productores ya implementan sistemas de recirculación, por lo cual su impacto ambiental es mucho menor que los sistemas de producción semi-intensivos que se practican extensamente en otros estados de la república.

Su visión para el desarrollo acuícola en la Cd. de México es fomentar la acuaponía, ya que es común el cultivo en sistemas de recirculación, y con la acuaponía se mejorarían los rendimientos productivos al incluir el componente agrícola, contribuyendo también a la seguridad alimentaria, y aprovechando en mayor medida el agua y espacio, lo cual se necesita en la Ciudad. Su visión es que la Ciudad de México podría ser líder a nivel nacional, en la implementación de estos sistemas de cultivo.

Experiencia directa con un productor interesado en implementar acuaponía

En la primera reunión que se tuvo con los productores, uno de ellos, Alejandro Narvárez Hernández, de Tlahuac, pidió asesoría en cómo proseguir con su infraestructura, ya que quería adecuarla para el cultivo acuapónico. La infraestructura, recién construida, estaba dirigida inicialmente para el cultivo de biofloc.

El día que se visitó la granja, en compañía del M. en C. Juan Alfredo Corbalá Bermejo, fue el día que recibían por primera vez alevines de tilapias para incorporar a los estanques e iniciar los cultivos.

Se observó de manera presencial, que a pesar que se invirtió dinero en infraestructura (se contaban con varios estanques de 4 y 6 m. de diámetro, recubiertos con geomembrana), los productores necesitaban capacitación tanto en el diseño general de los sistemas de producción, como en el manejo técnico de los cultivos.

Al recibir los alevines, fue el primer día que activaron los aireadores de los estanques, y el agua aún contenía concentraciones de cloro mayores a lo recomendado, no habían comprado alimento para los alevines, el sistema de aireación no estaba correctamente instalado, y aún no se tenía claridad en el de diseño del sistema de cultivo. Finalmente, todos los alevines murieron en los días subsecuentes.

La primera necesidad de la granja era adecuar la infraestructura existente para cultivos acuapónicos, por lo que se les contactó con especialistas en la construcción de sistemas acuapónicos comerciales, como lo son las empresas Altagri y Aquacultivos.

Pláticas impartidas

Durante el periodo de la maestría se impartieron pláticas en talleres y diplomados en las cuales se habló de los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada y se propuso su uso como alternativa productiva en la Ciudad. Algunas de las pláticas fueron totalmente enfocadas a los SAAI, y en otras se profundizó en estos sistemas únicamente a modo de ejemplo de sistemas de producción sustentable.

Se transmitió a los asistentes la importancia del cuidado ambiental a través de la optimización del agua y otros insumos, del aprovechamiento de los desechos acuícolas, y de mejorar la eficiencia productiva del sector primario; así como los beneficios socioeconómicos de

implementar los SAAI. Se habló de las características, beneficios productivos, económicos y ambientales de dos SAAI en específico: un sistema acuapónico de raíz flotante (SA) y un sistema acuícola donde los recambios de agua se utilizan para la irrigación (SBR).

En todas las pláticas y conferencias impartidas se contó con la presencia de productores agrícolas y/o acuícolas de la Ciudad de México. Sin embargo, en la plática titulada “Acuaponia,” los treinta asistentes fueron agricultores.

A continuación se enlistan las pláticas que se impartieron:

- 2015- “Taller de sistema casero hidropónico.” Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Plan Ambiental y Coordinación de Educación Continua y a Distancia (CECAD).
- 2016- “Sistemas de agro-acuicultura integrada como área de oportunidad en México.” En: Taller “Manejo Integral del Agua en Proyectos Acuícolas: El Caso de los Sistemas de Recirculación.” Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento el Hombre y su Ambiente y Departamento de Producción Agrícola y Animal.
- 2016- “Acuaponia.” Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Coordinación de Educación Continua y a Distancia (CECAD). Dirigido a personal de la Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades (SEDEREC).
- 2017- “Problemas hídricos: extracción, potabilización, distribución y calidad del agua.” En: Diplomado “Derechos humanos, medio ambiente y movilidad en la Ciudad de

México.” Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal (CDHDF), UAM-Xochimilco, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT).

- 2017- “Educación y formación ambiental: mitos, retos y realidades.” En: Diplomado “Derechos humanos, medio ambiente y movilidad en la Ciudad de México.” Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal (CDHDF), UAM-Xochimilco, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (PAOT).

En varias de estas pláticas, se observó el interés de los productores por los SAAI y expresaron su aspiración por implementar estos sistemas de cultivo. Los productores agrícolas que asistieron a la plática de acuaponía, mencionaron que iban a pedir directamente en SEDEREC se les impartiera un taller de estos sistemas de producción a través de la Coordinación de Educación Continua y a Distancia de la UAM-X. En esta plática, algunos productores agrícolas también compartieron que una de sus mayores problemáticas es la escasez de agua, y que estos sistemas son una opción interesante para ellos, debido a que ahorran agua y aumentan la producción.

Durante el periodo de la maestría también se presentaron una serie de trabajos en congresos nacionales englobando aspectos del marco teórico, marco de referencia y resultados preliminares del estudio “Evaluación de los rendimientos productivos y económicos de dos sistemas de agro-acuicultura integrada.”

A continuación se enlistan los carteles realizados:

- 2014- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L., Corbalá-Bermejo J.A. “Evaluación de los rendimientos productivos y económicos de dos sistemas de agro-acuicultura integrada.” En: Primera Reunión Académica en Ecología Aplicada:

Celebrando el Día Internacional de la Diversidad Biológica. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, Departamento de El Hombre y su Ambiente.

- 2014- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L., González-Ibarra M. “La agricultura en el Distrito Federal: Caso de estudio.” En: XI Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, León, Gto.
- 2015- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L. “Aprovechamiento de desechos del sector acuícola como área de oportunidad en México.” En: XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, León, Gto.
- 2015- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L., González-Ibarra M. “Optimización del agua por parte del sector acuícola de México: Perspectivas y retos.” En: XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, León, Gto.
- 2016- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L. “Revisión de la capacidad productiva de sistemas acuícolas dirigidos al cultivo de tilapia y carpa.” En: XIII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, León, Gto.
- 2016- Fracchia-Durán A., Malpica-Sánchez A., Ayala-Pérez L. “Calidad del agua de dos sistemas de agro-acuicultura integrada y sus implicaciones productivas.” En: XIII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, León, Gto.

Discusión y Conclusiones

Se identificó tanto a nivel bibliográfico, como a través de la comunicación personal con productores agrícolas y acuícolas, que la falta de disponibilidad de agua, en la cantidad y calidad

necesaria para sus actividades productivas, es un problema principal para la agricultura y acuicultura de la Ciudad de México. Sin embargo, el problema es aún mayor a lo que la bibliografía expresa, ya que incluso se presentan condiciones de escasez y de mala calidad del agua en la red de abastecimiento de agua potable para los usuarios domésticos. Esta problemática afecta directamente a muchos productores agrícolas ya que en la Ciudad de México abundan los cultivos de traspatio (Gastelum-Lage 2011), y 92% de los productores agrícolas cuentan con este servicio en sus viviendas (lo cual es mayor de la media nacional; INEGI 2009); y también mucha de la producción acuícola se realiza en interiores, utilizando agua potable (Ing. Ángel Fernando de la O García, comunicación personal).

En las pláticas y reuniones con los productores y con el Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México, se observó que los SAAI son una alternativa de producción que tiene aceptación y potencial en la Ciudad, tanto por el interés de los productores, como la experiencia de muchos productores acuícolas con sistemas de recirculación, la experiencia de muchos productores agrícolas con el cultivo en chinampas (que es otro tipo de SAAI), como también porque son sistemas de producción que son pertinentes de implementarse en condiciones limitantes de agua y espacio. Con los SAAI se pueden optimizar los insumos (como el agua), aprovechar los productos de desecho, aumentar los rendimientos productivos, diversificar la producción, generar productos orgánicos y aumentar la rentabilidad de los cultivos. Estas características generan beneficios socioeconómicos y resuelven problemáticas locales.

Sin embargo, los sistemas acuapónicos en específico, necesitan de un gran dominio técnico, ya que errores o incidentes en el manejo técnico del sistema pueden derivar en el colapso del cultivo (Love *et al.* 2015). También están asociados a altos costos de producción e inversión, y deben

ser operados a su capacidad máxima para ser rentables (Rakocy *et al.* 2006). Por lo cual se necesita mayor capacitación, asesoría y seguimiento entorno a la implementación de SAAI. Esto se pudo observar también de manera presencial cuando se visitó la granja de un productor de Tlahuac que quería implementar sistemas acuapónicos a escala comercial.

Una alternativa sería empezar con la difusión e implementación de SA a escala traspatio antes de invertir en sistemas acuapónicos a escala comercial. Los SBR también podrían representar un primer eslabón en la intensificación de los cultivos, en el reuso de productos de desecho e incremento de la eficiencia productiva por unidad de superficie y volúmenes de agua empleados. Esto da oportunidad a que con el tiempo sea más viable la implementación de técnicas más intensivas y que requieren mayor dominio técnico, como es la acuaponia.

En las pláticas y reuniones efectuadas, no se aplicaron cuestionarios como mecanismo para recabar información acerca del interés y apreciación de los productores en torno a los Sistemas de Agro-Acuicultura Integrada. Sin embargo, muchos productores expresaron directamente su interés por los SAAI, por ejemplo: los productores agrícolas a los que se les dio la plática de acuaponia (pero también se habló de los SBR), mencionaron que iban a pedir un taller al respecto en SEDEREC, se visitó la granja de un productor que quería adecuar su infraestructura para implementar estos cultivos, e incluso el mismo Subdelegado de Pesca de la Ciudad de México está fomentando estos sistemas de producción y su visión es que la Ciudad de México podría ser líder a nivel nacional en la implementación de sistemas acuapónicos.

Se planea seguir impartiendo talleres acerca de los sistemas de agro-acuicultura integrada, y realizando transferencias tecnológicas y de conocimientos entorno a estos sistemas de producción. El proyecto “Fortalecimiento de capacidades técnicas para los productores

acuícolas de la Ciudad de México” fue aprobado este año (2017) por la UAM-Xochimilco y es coordinado por la M. en C. Aída del Rosario Malpica Sánchez. En este proyecto se pretende realizar transferencias tecnológicas de los sistemas acuapónicos a productores de la ciudad.

Bibliografía

- CONAPESCA. 2010. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2008. SAGARPA. 207p.
- Environment Australia. 2000. Environmental education for a sustainable future. National Action Plan. Environment Australia, Department of the Environment and Heritage, 16p.
- Fuks V. 2004. Environmental education and nature schools in Denmark. A study of the role of nature schools in environmental education and environmental awareness rising among schoolchildren. International Master Degree Course in Environmental Policy Department of Environment, Technology, and Social Studies Roskilde University, Denmark, 148p.
- Gastelum-Lage J. 2011. Agricultura y desarrollo rural en el Distrito Federal. Revista Bien Común, Año 17, Número 201, Fundación Rafael Preciado Hernández, A. C., p. 73-80.
- González-Pozo A. 2010. Las chinampas de Xochimilco al despuntar el siglo XXI: inicio de su catalogación. UAM-Xochimilco, 1ª edición, México, D.F. 279p
- Huerta Sagüillo L. 2014. Educación ambiental en el desarrollo comunitario. Un proyecto en el municipio de Arijá (Burgos). Universidad de Valladolid, Facultad de Educación de Palencia, 81p.
- INEGI. 2009. Estados Unidos Mexicanos. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Ags., 193p.
- INEGI. 2011. Pesca y acuicultura. Censos Económicos 2009. México, 83p.
- INEGI. 2012. El recurso tierra en las unidades de producción. Censo Agropecuario 2007. Aguascalientes, Ags., 55p.
- Love D.C., Uhl M.S., Genello L. 2015. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering* 68: 19-27.
- McCrea E.J. 2006. Roots of environmental education: How the past supports the future. *Environmental Education and Training Partnership (EETAP)*, 12p.
- Paniagua A., Moyano E. 1998. Medio ambiente, desarrollo sostenible y escalas de sustentabilidad. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas (REIS)* 83: 151-175.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M. 2006. Recirculation aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. *SRAC Publication No. 454*, 16p.
- Ramos-José A. 2011. La acuicultura rural: instrumento para la incorporación de las comunidades rurales del Distrito Federal a los procesos de sustentación económico

- mundial en el marco del desarrollo sustentable. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, UNAM, 78p.
- Rodríguez-Pérez L.A., Borroto-Pérez M., Gutiérrez-Rojas I., Talabera-Díaz Y., Quesada-Bellas M., Núñez-Rodríguez A. 2011. Estrategia para la educación ambiental en comunidades cubanas. *M + A Revista Electrónica de Medio Ambiente*, UCM, 10: 1-12.
- SAGARPA. 2006. Carta Nacional Pesquera. Diario Oficial de la Federación. 149p.
- SAGARPA. 2011^a. Carta Nacional Acuícola. Diario Oficial de la Federación. 48p.
- SAGARPA. 2011^b. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2011. 311p.
- SAGARPA. 2012. Carta Nacional Acuícola. Diario Oficial de la Federación. 80p.
- Tréllez-Solís E. 2004. Manual guía para educadores. Educación ambiental y conservación de la biodiversidad en los procesos educativos. Centro de Estudios para el Desarrollo, Proyecto CHI/01/G36 “Conservación de la biodiversidad y manejo sustentable del Salar del Huasco”. 72p.

ANEXOS



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE EL HOMBRE Y SU AMBIENTE

Otorgan la siguiente

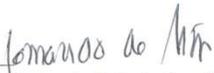
Constancia

A: **Fracchia Durán Ana Guadalupe**, Luis Amado Ayala Pérez,
Aída del Rosario Malpica Sánchez, Juan Alfredo Corbalá
Bermejo

Por su participación en la Primera Reunión Académica en
Ecología Aplicada: Celebrando el Día Internacional de la
Diversidad Biológica 2014, con el cartel:

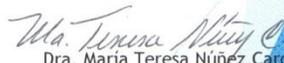
*Evaluación de los rendimientos productivos y económicos de
dos sistemas de agro-acuacultura integrada*

Xochimilco, mayo 22 de 2014


Dr. Fernando de León González
Director de la División de CBS


Dr. Gilberto Vela Correa
Jefe del Departamento El Hombre y su Ambiente


Dr. Luis A. Ayala Pérez
Coordinador de la Maestría en
Ecología Aplicada


Dra. María Teresa Núñez Cardona
Comisión de Eventos Académicos del DEHA





El encuentro
Participación de la
Mujer
en la
Ciencia

14-16 MAYO 2014 León, Guanajuato

CIO
CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:

**Fracchia Durán Ana Guadalupe, Malpica Sánchez Aída, Ayala Pérez Luis y
González Ibarra Minerva**

Por el trabajo:
LA AGRICULTURA EN EL DISTRITO FEDERAL: CASO DE ESTUDIO

Vázquez
Dra. Gloria Verónica Vázquez García
Representante del Comité Organizador

E. D. de la Rosa Cruz
Dr. Elder de la Rosa Cruz
Director General del CIO

Paris Pishmish
ARTISTAS: 1998-2014



XII encuentro
Participación de la
Mujer
en la
Ciencia

19-15 MAYO 2015 León, Guanajuato

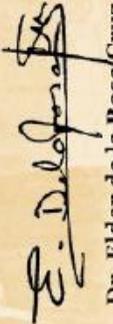


*Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:*

Fracchia Durán Ana Guadalupe, Malpica Sánchez Aída del Rosario y Ayala Pérez Luis Amado

Por el trabajo:
EL APROVECHAMIENTO DE DESECHOS DEL SECTOR ACUÍCOLA COMO ÁREA DE OPORTUNIDAD EN MÉXICO


Dra. Amalia Martínez García
Representante del Comité Organizador


Dr. Elder de la Rosa Cruz
Director General del CIO


Florence Nightingale
Fundadora británica

70 ANIVERSARIO CTO

XII encuentro
Participación de la
Mujer
en la
Ciencia

13-15 MAYO 2015 León, Guanajuato

Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:

Fracchia Durán Ana Guadalupe, Malpica Sánchez Aída del Rosario y Ayala Pérez Luis Amado

Por el trabajo:
**OPTIMIZACIÓN DEL AGUA POR PARTE DEL SECTOR ACUÍCOLA DE MÉXICO
PERSPECTIVAS Y RETOS**

[Signature]
Dra. Amalia Martínez García
Representante del Comité Organizador

[Signature]
Dr. Elder de la Rosa Cruz
Director General del CTO

Florence Nightingale
Enfermera Británica



XIII encuentro
Participación de la
Mujer
en la
Ciencia

17-19 AGOSTO 2016 León, Guanajuato



CIC
CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

*Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:*

**Fracchia Durán Ana, Malpica Sánchez Aída del Rosario y Ayala Pérez Luis
Armando**

Por el trabajo:

**REVISIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE SISTEMAS ACUÍCOLAS DIRIGIDOS AL
CULTIVO DE TILAPIA Y CARPA**



Cristina E. Solano Sosa
Representante del Comité Organizador



Dr. Elder de la Rosa Cruz
Director General del CIC



Ana Guadalupe Fracchia Durán





XIII encuentro
Participación de la
Mujer
en la
Ciencia

17-19 AGOSTO 2016 León, Guanajuato

CTO
CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

*Otorga el presente
Reconocimiento
por su valiosa participación a:*

Fracchia Durán Ana y Malpica Sánchez Aída del Rosario

Por el trabajo:
**CALIDAD DEL AGUA DE DOS SISTEMAS DE AGRO-ACUICULTURA INTEGRADA Y SUS
IMPLICACIONES PRODUCTIVAS**

Cristina E. Solano Sosa
Cristina E. Solano Sosa
Representante del Comité Organizador

E. Dulgor
Dr. Elder de la Rosa Cruz
Director General del CTO

Hebe Brabo
Sociedad Mexicana



Universidad Sustentable, Plan Ambiental

hacia una UAM-X sustentable

OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A:

Biol. Ana G. Fracchia Durán

Por su participación como ponente en el “Taller de Sistema Casero Hidropónico”

México D.F. a 5 de noviembre de 2015


Lic. G. Joaquín Jiménez Mercado
Secretario de Unidad


Lic. J. Francisco Javier Huerta Moreno
Coordinador de Educación Continua y a Distancia


Lic. Ana María Cortés Bolaños

Responsable de la Comisión por una Universidad Sustentable Unidad Xochimilco



PROCURADURÍA AMBIENTAL
Y DEL ORDENAMIENTO
TERRITORIAL DEL D.F.

El comité organizador del Diplomado
“Derechos Humanos, Medio Ambiente y Movilidad en la Ciudad de México”
otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

a la

Lic. Ana Guadalupe Fracchia Durán

Por su participación como ponente con el tema:

“Problemas hídricos: Extracción, Potabilización, Distribución y Calidad del Agua”

25 de enero de 2017



Mtra. Rosío Arroyo Casanova
Directora Ejecutiva de Educación por los Derechos Humanos
CDHDF

El Comité Organizador del Diplomado
"Derechos Humanos, Medio Ambiente y Movilidad en la Ciudad de México"

otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

a la

Lic. Ana Guadalupe Fracchia Durán

Por su participación como ponente con el tema:
"Educación y Formación Ambiental: Mitos, Retos y Realidades"
con una duración de 4 horas.



Mtra. Rosío Arroyo Casanova
Directora Ejecutiva de Educación por los Derechos Humanos

Ciudad de México, 24 de mayo de 2017





LA DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD,
EL DEPARTAMENTO EL HOMBRE Y SU AMBIENTE Y
EL DEPARTAMENTO PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y ANIMAL



**OTORGAN LA PRESENTE
CONSTANCIA**

A **OCEAN. ANA G. FRACCHIA DURÁN**

**POR SU PARTICIPACIÓN COMO PONENTE EN EL TALLER
MANEJO INTEGRAL DEL AGUA EN PROYECTOS ACUÍCOLAS:
El Caso de los Sistemas de Recirculación**

Aida del R. Malpica S.
M.C. Aida del R. Malpica Sánchez
Comité Organizador

Dr. Gilberto Vela Correa
Dr. Gilberto Vela Correa
Jefe del Departamento El Hombre y
su Ambiente

Dr. Rey Gutiérrez Tolentino

Dr. Rey Gutiérrez Tolentino
Jefe del Departamento de Producción
Agrícola y Animal



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Xochimilco

La Coordinación de Educación Continua y a Distancia
Otorga la presente

CONSTANCIA

a

Ocean. Ana Guadalupe Fracchia Durán

Por la impartición de la conferencia:

“ACUAPONÍA”

el cual se llevó a cabo el 29 de noviembre de 2016 con una duración de 01 hr.

Dirigido a personal de la Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades

“Casa abierta al tiempo”

México, D. F., a 29 de noviembre de 2016

LIC. J. FRANCISCO JAVIER HUERTA MORENO
Coordinador de Educación Continua y a Distancia
UAM-XOCHIMILCO