

Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio en Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agropecuarias
(Facultad de Ciencias del Mar)



TESIS:

*“Producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas”*

**Que para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

PRESENTA:

Juan Francisco Fierro Sañudo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gustavo Alejandro Rodríguez Montes de Oca

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Federico Páez Osuna

Culiacán, Sinaloa, México; a 17 de enero de 2019

Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio en Ciencias Agropecuarias
Doctorado en Ciencias Agropecuarias
(Facultad de Ciencias del Mar)



TESIS:

*“Producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas”*

**Que para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

PRESENTA:

Juan Francisco Fierro Sañudo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gustavo Alejandro Rodríguez Montes de Oca

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Federico Páez Osuna

ASESORES:

Dr. Tomás Díaz Valdés

Dr. Francisco Javier Martínez Cordero

Dr. José Cristóbal Román Reyes

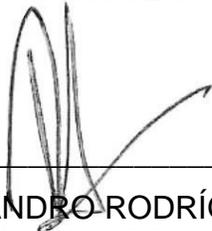
Culiacán, Sinaloa, México; a 17 de enero de 2019

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **JUAN FRANCISCO FIERRO SAÑUDO**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, Y FUE APROBADA POR EL MISMO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR



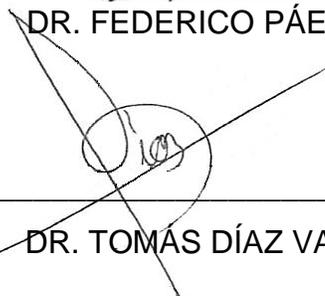
DR. GUSTAVO ALEJANDRO RODRÍGUEZ MONTES DE OCA

CO-DIRECTOR



DR. FEDERICO PÁEZ OSUNA

ASESOR



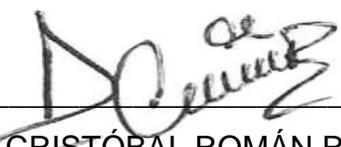
DR. TOMÁS DÍAZ VALDÉS

ASESOR



DR. FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ CORDERO

ASESOR



DR. JOSÉ CRISTÓBAL ROMÁN REYES

CULIACÁN, SINALOA, ENERO DE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA CULIACÁN
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL FUERTE
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL CARRIZO

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 20 de enero del año 2020, el que suscribe Juan Francisco Fierro Sañudo, alumno del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, con número de cuenta 0616015-8, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias del Mar, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la UAS, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Gustavo Alejandro Rodríguez Montes de Oca y del Dr. Federico Páez Osuna y cede los derechos del trabajo titulado “Producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas”, a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

Juan Fco. Fierro S.

Juan Francisco Fierro Sañudo



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

Mazatlán, Sinaloa a 17 de enero de 2019

Instituto Nacional del Derecho de Autor

P R E S E N T E:

Bajo protesta de decir la verdad, declaro que soy autor de la tesis titulada: **“Producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas”** y otorgo licencia no exclusiva y sin límite de temporalidad para que la obra citada aparezca publicada en el **Repositorio de Tesis de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa**. Así mismo, manifiesto que la FACIMAR, queda liberada de cualquier conflicto surgido a raíz de la publicación. Esta licencia se hace extensiva a los formatos impresos y a los medios electrónicos. De igual manera, es de mi conocimiento que la publicación de la tesis no es finalidad lucrativa, si no académica, por lo que otorgo la autorización correspondiente para que la difusión pueda efectuarse a través de medios electrónicos, tanto en red local como vía internet, libre y gratuitamente, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

Juan Francisco Fierro Sañudo

CORREO ELECTRONICO: jf.fierro26@gmail.com

CURP: FISJ880102HSLRXN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre el Sr. Jaime Servando Fierro Vega, a mi madre la Sra. María Flora Sañudo Loredo y a mi hermano Jaime Adán Fierro Sañudo por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mi segunda familia, la Sra. Silvia Díaz del Guante (mamá Silvia), Teresa Valdés Díaz del Guante, Isabel Valdés Días del Guante, Dulce Valdés Días del Guante y a la nueva integrante de la familia, Jimenita (la niña más hermosa del mundo).

¡Mil gracias, les estaré eternamente agradecido!

Juan Francisco Fierro Sañudo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al posgrado de Ciencias Agropecuarias, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa por haberme dado la oportunidad de estudiar este posgrado y por facilitarme las herramientas necesarias para la realización de mi doctorado.

Agradezco a CONACYT por el apoyo recibido de su parte mediante la beca recibida a lo largo de mi estudio de posgrado que me permitió dedicarme de lleno a mis estudios.

A mis miembros de comité evaluador: Dr. Francisco Javier Martínez Cordero, Dr. Tomás Díaz Valdés y Dr. José Cristóbal Román Reyes por sus valiosas aportaciones que enriquecieron el presente trabajo de tesis.

Un especial agradecimiento para mis directores de tesis, Dr. Federico Páez Osuna y Dr. Gustavo Alejandro Rodríguez Montes de Oca por su paciencia, dedicación y enseñanzas, y guiarme en todo momento para que esta tesis se realizara satisfactoriamente.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Manuel Martín Mariscal Lagarda por todos los conocimientos impartidos desde el diseño, construcción y operación del módulo experimental Yum Kaax, así como sus observaciones y recomendaciones para el presente trabajo de tesis.

Un especial agradecimiento a la Dra. Rosario Martínez Yáñez y al Dr. Pedro Albertos por aceptar recibirme en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato, División Ciencias de la Vida como parte de una estancia de investigación, su asesoría y enseñanza fue invaluable.

A los laboratorios de producción de postlarvas —Provedora de Larvas S.A. de C.V. (FITMAR) y AQUAPACIFIC S.A. de C.V. por donarnos la larva utilizada en los experimentos.

Al Ing. Ramón Lizárraga por su asesoría en el cultivo de tomate y Agrícola El Chaparral por la donación de las plántulas utilizadas en el experimento.

A mis compañeros de proyecto: Suammy Gabriela Alarcón Silvas, Jesús Armando León Cañedo y Humberto Ramos Sotelo que juntos logramos salir delante de los problemas que se nos presentaron y logramos concluir satisfactoriamente el sistema acuapónico camarón-hortalizas.

Al Quím. Humberto Bojórquez Leyva por sus consejos y ayuda en los análisis químicos de las aguas empleadas para el experimento.

A Gabriela Juárez C. encargada del Posgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia por su disponibilidad, asesoría y ayuda en los trámites a lo largo del posgrado.

Al Mat. Germán Ramírez y al Lic. Carlos Suárez del centro de cómputo del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por su valiosa ayuda en todo lo relacionado al centro de cómputo y preparación de las videoconferencias.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.1.2. Hipótesis	2
1.1.3. Objetivo general	3
1.2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.3. LITERATURA CITADA	6
CAPÍTULO 2 . PRODUCCIÓN Y MANEJO DE UN CO-CULTIVO PARCIAL DE CAMARÓN (<i>Penaeus vannamei</i>) CON ALBAHACA (<i>Ocimum basilicum</i>) UTILIZANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD	9
2.1. RESUMEN.....	9
2.2. ABSTRACT.....	9
2.3. INTRODUCCIÓN.....	10
2.4. MATERIAL Y MÉTODOS	12
2.4.1. Sistema experimental.....	12
2.4.2. Análisis de los componentes mayoritarios, pH y conductividad eléctrica para cada fuente de agua	14
2.4.3. Cultivo de camarón	14
2.4.4. Cultivo de albahaca.....	15
2.4.5. Evaluación del sistema de producción y consumo de alimento	16
2.4.6. Análisis estadístico.....	16
2.5. RESULTADOS	17
2.5.1. Caracterización de las fuentes de agua	17

2.5.2. Consumo de alimento, producción de camarón y albahaca.....	17
2.6. DISCUSIÓN.....	19
2.7. CONCLUSIONES	24
2.8. LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO 3 . USO DEL EFLUENTE DE CULTIVO DE CAMARÓN (<i>Penaeus vannamei</i>) EN AGUA DE BAJA SALINIDAD PARA LA PRODUCCIÓN Y MANEJO DE LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i>) ACUAPÓNICA	31
3.1. RESUMEN.....	31
3.2. ABSTRACT.....	31
3.3. INTRODUCCIÓN	32
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
3.4.1. Sistema experimental.....	33
3.4.2. Análisis químico del agua.....	35
3.4.3. Cultivo de camarón	36
3.4.4. Cultivo de lechuga.....	36
3.4.5. Análisis estadístico.....	37
3.5. RESULTADOS	37
3.6. DISCUSIÓN.....	43
3.7. CONCLUSIONES	47
3.8. LITERATURA CITADA	48
CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS FINANCIERO DE UN CULTIVO ACUAPÓNICO DE CAMARÓN BLANCO (<i>Penaeus vannamei</i>) Y HORTALIZAS USANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD	53
4.1. RESUMEN.....	53
4.2. ABSTRACT.....	54
4.3. INTRODUCCIÓN	54
4.4. MATERIAL Y MÉTODOS	56
4.4.1. Escenario modelo.....	56
4.4.2. Esquema de producción.....	57
4.4.3. Análisis de factibilidad financiera	57

4.4.4. Análisis de sensibilidad	59
4.5. RESULTADOS	59
4.5.1. Inversión y costos de operación.....	59
4.5.2. Ingresos por ventas y análisis de viabilidad financiera.....	60
4.5.3. Análisis de sensibilidad	64
4.6. DISCUSIÓN.....	68
4.7. CONCLUSIONES	71
4.8. LITERATURA CITADA	72
CAPÍTULO 5 . EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO CAMARÓN-HORTALIZAS USANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: UNA PROPUESTA	74
5.1. RESUMEN.....	74
5.2. ABSTRACT.....	74
5.3. INTRODUCCIÓN.....	75
5.4. MATERIAL Y MÉTODOS	77
5.4.1. Descripción del sistema acuapónico	77
5.4.2. Metodología para el ACV	78
5.4.3. Objetivo, definición del alcance y unidad funcional	79
5.4.4. Límites del sistema y asignación de los coproductos.....	79
5.4.5. Inventario del ciclo de vida (ICV).....	81
5.4.6. Evaluación del impacto del ciclo de vida	85
5.4.7. Análisis de sensibilidad	85
5.5. DISCUSIÓN.....	87
5.6. CONCLUSIONES	89
5.7. LITERATURA CITADA	90
CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES GENERALES	94

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
Cuadro 2.1.	Potencial de hidrógeno (pH) y componentes mayoritarios del agua subterránea y agua de mar diluida utilizada para llenar los tanques de cultivo en el sistema acuapónico camarón-albahaca.	17
Cuadro 2.2.	Datos de producción obtenidos del cultivo de camarón utilizando dos fuentes de agua de baja salinidad en un cultivo acuapónico camarón-albahaca.....	19
Cuadro 2.3.	Datos de producción del cultivo de albahaca obtenido durante el cultivo acuapónico con camarón-albahaca usando agua dos fuentes de agua de baja salinidad.	19
Cuadro 2.4.	Datos de producción y rendimiento de diferentes monocultivos (M) y cultivos integrados con <i>P. vannamei</i>	22
Cuadro 3.1.	Potencial de hidrógeno (pH) y componentes mayoritarios de las fuentes de agua utilizadas para la producción de lechuga mediante el uso de los efluentes del cultivo de camarón.	34
Cuadro 3.2.	Datos de producción de lechuga (PI y TM1) utilizando el efluente del cultivo de camarón.	40
Cuadro 3.3.	Comparación de la producción entre ciclos de cultivo.	41
Cuadro 3.4.	Concentración promedio de los nutrientes en los dos ciclos de producción de lechuga utilizando el efluente del cultivo de camarón.	42
Cuadro 3.5.	Rendimientos y peso individual promedio de diferentes tipos de lechuga <i>L. sativa</i> cultivada en acuaponia.	44
Cuadro 4.1.	Parámetros de producción del sistema acuapónico camarón-hortalizas con dos fuentes de agua de baja salinidad.	58
Cuadro 4.2.	Costos de inversión del sistema acuapónico camarón-hortalizas.....	60
Cuadro 4.3.	Costos de operación del sistema acuapónico modelo camarón-hortalizas.	61
Cuadro 4.4.	Desglose de los costos de operación y precio de equilibrio por cultivo del sistema acuapónico camarón-hortalizas, escenario AS.	62

Cuadro 4.5. Desglose de los costos de operación y precio de equilibrio por cultivo del sistema acuapónico camarón-hortalizas, escenario AMD.....	63
Cuadro 4.6. Ingresos por ventas, costos de producción y beneficio neto por cultivo, para cada escenario.....	64
Cuadro 4.7. Indicadores de rentabilidad para el sistema acuapónico camarón hortalizas, en ambos escenarios.....	64
Cuadro 5.1. Esquema de producción del sistema acuapónico camarón-hortalizas con dos fuentes de agua de baja salinidad.....	78
Cuadro 5.2. Tratamiento de agua y sólidos recuperados calculados con el modelo presupuesto de nutrientes en un cultivo acuapónico pequeño-comercial de camarón y hortalizas.....	83
Cuadro 5.3. Información de dimensionamiento y energía requerida por el biofiltro para convertir las emisiones de amonio a nitratos.....	84
Cuadro 5.4. Componentes principales de un alimento típico para camarón de 35% de proteína.....	85
Cuadro 5.5. Frecuencia de aplicación de diferentes categorías de impacto ambiental en estudios sobre 12 ACV aplicados a cultivos acuícolas de acuerdo con Henriksson <i>et al.</i> (2012).....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
Figura 2.1.	Diseño experimental utilizado en el cultivo acuapónico camarón-albahaca. Cada tratamiento se realizó por triplicado.	13
Figura 2.2.	Crecimiento del camarón blanco <i>P. vannamei</i> durante el cultivo acuapónico con albahaca.	18
Figura 3.1.	Sistema experimental propuesto para el uso del efluente del camarón en la producción de dos variedades de lechuga.	35
Figura 3.2.	Variación de la temperatura (A), pH (B) y oxígeno disuelto (C) medidos en los tanques de cultivo de camarón durante los dos ciclos de lechuga. Líneas punteadas horizontales se refieren a los valores óptimos en acuaponia (Nelson, 2008).	39
Figura 4.1.	Efecto del cambio en la producción sobre la TIR calculada para el cultivo de acuaponia de camarones-hortalizas; A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.	65
Figura 4.2.	Efecto del cambio en el precio de venta sobre la TIR calculada para el cultivo de acuaponia de camarón-hortalizas; A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.	66
Figura 4.3.	Efecto del cambio en el porcentaje de los salarios, combustibles y lubricantes y renta del terreno en la TIR calculada para el cultivo de acuaponia de camarones-hortalizas. A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.	67
Figura 5.1.	Fases del ACV de acuerdo a ISO (2006).	79
Figura 5.2.	Esquema de propuesta para evaluación del impacto ambiental de un sistema acuapónico de camarón-hortalizas. ACV, Análisis de ciclo de vida; FCA, factor de conversión alimenticia.	88

RESUMEN

Producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas

Juan Francisco Fierro Sañudo

La acuaponía es un sistema de producción sustentable de organismos acuáticos y plantas, donde los desechos de una actividad son aprovechados por la contraparte. Estos sistemas fueron desarrollados principalmente para integrar peces y plantas; sin embargo, la reciente expansión del cultivo de camarón en agua dulce y baja salinidad, ha permitido el desarrollo integral de la producción sustentable de camarón y hortalizas a través de sistemas integrados y acuapónicos. En este estudio se evaluó la producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un sistema acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*) con hortalizas (albahaca *Ocimum basilicum* y lechuga *Lactuca sativa*) usando dos fuentes de agua de baja salinidad (agua subterránea, AS y agua de mar diluida, AMD). Se construyeron seis sistemas acuapónicos individuales: tres sistemas acuapónicos para AP, tres para AMD, y un control (TC, por triplicado) para el cultivo de albahaca y lechuga solamente con solución hidropónica. Las variables de producción fueron evaluadas al final de cada ciclo de cultivo. Con base en los datos económicos y de producción recopilados durante el ciclo del cultivo acuapónico, se proyectaron dos escenarios (0,17 ha por escenario, para AP y AMD) y se evaluaron financieramente. El análisis financiero se proyectó con una inversión de 10 años y una tasa de descuento del 10%. Adicionalmente, se presenta una propuesta de evaluación cuantitativa al impacto ambiental través del análisis del ciclo de vida del sistema de acuerdo a las variantes de cada tratamiento. Los criterios utilizados, métodos de evaluación seleccionados y categorías de impacto se detallan en el presente trabajo. De manera general, la fuente de agua AP mostró el mejor desarrollo en términos de rendimiento de camarón y hortalizas (a excepción del primer ciclo de cultivo de lechuga). Los rendimientos estimados fueron comparables con aquellos calculados en monocultivos de camarón, albahaca y lechuga, y en cultivos integrados de camarón con tomate y tomate-lechuga en trabajos anteriores. Los resultados obtenidos del análisis financiero sugieren que ambos escenarios acuapónicos de camarón y hortalizas son rentables; sin embargo, AP mostró mejores indicadores financieros que AMD. Las hortalizas contribuyen con la mayor parte de la rentabilidad, debido a que los camarones solo generan el 1.1-1.2% del ingreso total por ventas. Los escenarios modelo mostraron una mayor sensibilidad al precio de venta de las hortalizas. Se concluye que el cultivo acuapónico camarón-hortalizas usando dos fuentes de agua de baja salinidad es factible y podría ser económicamente viable a una escala pequeña-comercial. Además, el análisis cuantitativo del impacto ambiental de los sistemas acuapónicos es de suma importancia, ya que con ello será posible encontrar aquellos “puntos rojos” donde será necesario trabajar para volver a la acuaponía una técnica de producción aún más sustentable.

Palabras clave: Acuaponía; *Penaeus vannamei*; *Ocimum basilicum*; *Lactuca sativa*; baja salinidad.

ABSTRACT

Production, economic feasibility and environmental valuation of an aquaponic system of shrimp (*Penaeus vannamei*) and vegetables

Juan Francisco Fierro Sañudo

Aquaponics is a sustainable system of production of aquatic organisms and plants where the waste of an activity is used in the production of its counterpart. These systems were developed for coupling with fish cultures mainly; however, the recent expansion of shrimp farming in fresh and low salinity-water, it has allowed the integral development of shrimp and vegetable production through sustainable management in integrated and aquaponic systems. In the present study, the production, economic feasibility and environmental assessment of an aquaponic system of shrimp (*Penaeus vannamei*) with vegetables (basil *Ocimum basilicum* and lettuce *Lactuca sativa*) was evaluated using two sources of low-salinity water (groundwater, GW and diluted seawater, DSW). Six individual aquaponic systems were built: three aquaponic systems for GW, three for DSW, and one control. At the end of each crop, growth and yield were evaluated. Based on the economic and production data collected during the aquaponics crop on an experimental scale, two scenarios were projected (0.17 ha per scenario, for GW and DSW) and evaluated financially. The financial analysis was projected with an investment of 10 years and a discount rate of 10%. In addition, a quantitative assessment proposal is presented on the environmental impact of a shrimp aquaponics crop and vegetables using two different sources of low-salinity water through life cycle analysis. The criteria used, selected evaluation methods and impact categories are detailed in the present work. In general, the GW water source showed the best development in terms of shrimp and vegetable yield (except for the first lettuce crop cycle). The estimated yields were comparable with those calculated in monocultures of shrimp, basil and lettuce, and in integrated shrimp cultures with tomato and tomato-lettuce crops. The results obtained from the financial analysis suggest that both aquaponic shrimp and vegetable scenarios are profitable; however, GW showed better financial indicators than DSW. Vegetables contribute most of the profitability, because shrimp only generate 1.1-1.2% of total sales revenue. The model scenarios showed greater sensitivity to the sale price of the vegetables. It is concluded that aquaponic system shrimp-vegetable using two sources of low-salinity water is technically feasible and could be economically viable on a small-scale. In addition, it is concluded that the quantitative analysis of the environmental impact of aquaponic systems is of utmost importance, since it will be possible to find those "red spots" where it will be necessary to work to return to aquaponics an even more sustainable production technique.

Keywords: Acuaponics; *Penaeus vannamei*; *Ocimum basilicum*; *Lactuca sativa*; low-salinity water.

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la sociedad se enfrenta a múltiples retos relacionados entre sí, que van desde efectos en la crisis financiera-económica a una mayor vulnerabilidad al cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos, aunado a estos problemas, se deben de atender las necesidades relacionadas con la alimentación y nutrición de una población con recursos finitos y que año con año su crecimiento va en aumento (Mariscal-Lagarda, 2014). De acuerdo con la FAO (2018) la población mundial sobrepasará las 9,000 millones de personas para el año 2050, por lo cual deben de implementarse nuevas técnicas de producción donde se obtenga una mayor cantidad de alimentos en un menor espacio, pero sin dejar de lado el cuidado ambiental. Como una alternativa ante esta problemática, los sistemas integrados acuapónicos permiten optimizar el uso del suelo o espacio físico, agua y recursos económicos.

Los cultivos acuapónicos son sistemas de producción de organismos acuáticos y plantas, donde los desechos de una actividad son utilizados como fuente de nutrientes para la nutrición de las plantas. Esos sistemas han sido desarrollados con éxito en peces y se han encontrado grandes ventajas, entre ellas, la disminución del uso del agua para ambas actividades, por lo que este tipo de sistemas pueden implementarse en lugares donde el recurso agua es un factor limitante (Ingram *et al.*, 2000), en estos sistemas el retorno económico por metro cubico de agua es mayor al tener dos o más productos finales a la vez (McIntosh y Fitzsimmons, 2003), se minimiza el uso de fertilizantes en la agricultura gracias a los aportes de nutrientes de los efluentes acuícolas (Fernando y Halwart, 2000), pueden implementarse en zonas de alta marginación para subsistencia o negocios familiares y el impacto ambiental que se genera es mínimo gracias a la utilización de los efluentes. Estos sistemas han sido desarrollados y llevados a cabo con éxito con cultivos de peces (tilapia principalmente), pero cuando se trata de camarón los trabajos realizados al momento son escasos y poco claros. Con la reciente expansión del cultivo de camarón blanco del pacífico en aguas dulces y baja salinidad, los efluentes procedentes de estas granjas pueden ser

aprovechados para la producción de biomasa vegetal; de esta manera sería posible producir una mayor cantidad de alimento, elevando la productividad y eficiencia económica del agua utilizada, además de aumentar la rentabilidad al obtener ingresos por medio de la venta tanto del camarón como de las plantas.

Bajo este contexto, el presente trabajo pretende evaluar la producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un cultivo integral de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) con albahaca (*Ocimum basilicum* L) y lechuga orejona (*Lactuca sativa*) usando agua subterránea de baja salinidad y agua de mar diluida con cero recambio como una opción viable de producción.

1.1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad se presentan diversos problemas en la utilización de los suelos y aguas en la producción de alimentos acuícolas y agrícolas, tales como disponibilidad, cambio de uso de suelo, contaminación, etcétera. Una alternativa adoptada en algunos países para el mejor aprovechamiento de los recursos naturales y hacer más rentable la acuicultura y agricultura, es el acoplamiento acuícola-agrícola. Esta tecnología de cultivo ha sido desarrollada exitosamente, principalmente con peces; sin embargo, cuando nos referimos a cultivos integrados con camarón la información existente es escasa y poco clara.

Es de suma importancia el desarrollo de tecnologías donde se alcance una mejor producción utilizando una menor cantidad de agua y un menor costo ambiental. Con la reciente expansión del cultivo de camarón en agua dulce y baja salinidad, los efluentes ricos en nutrientes pueden ser aprovechados para la producción de biomasa vegetal, de esta manera se obtendrían dos o más productos finales a la vez utilizando una mínima cantidad de agua y obteniendo mejores dividendos financieros a un menor costo ambiental.

1.1.2. Hipótesis

El cultivo acuapónico de camarón, albahaca y lechuga usando agua de baja salinidad es técnicamente factible y económicamente viable, además de presentar un beneficio

ambiental por el uso de los efluentes del cultivo de camarón para la producción de hortalizas.

1.1.3. Objetivo general

Evaluar la producción, factibilidad económica y valuación ambiental de un cultivo acuapónico de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) con albahaca (*Ocimum basilicum* L.) y lechuga (*Lactuca sativa*) usando dos fuentes de agua de baja salinidad y cero recambio.

1.2. REVISIÓN DE LITERATURA

Los cultivos integrados acuícolas-agrícolas en agua dulce con peces han sido bien estudiados por diversos autores. Los primeros estudios encontrados en la literatura científica se remontan a la década de los 70's, donde por primera vez Naegel (1977) evaluó la producción de lechuga escaracha (*Mesembryanthemum crystallinum* L.), tomates (*Solanum lycopersicum* L.) y la reducción de nitratos de un sistema de recirculación con tilapia (*Oreochromis mossambica*) y carpas (*Cyprinus carpio*) combinado con un sistema de lodos activados para la purificación de agua, registrando una disminución en la concentración de nitratos después de pasar por el sistema hidropónico (desde 480 a 100 mg L⁻¹, aproximadamente) y un buen crecimiento en peces y plantas. Un año más tarde, Lewis *et al.* (1978) acoplaron un cultivo de bagre de canal (*Ictalurus punctatus*), un sistema hidropónico con tres variedades de tomate (*S. lycopersicum* L.) y una unidad de biofiltración, se evaluaron los rendimientos de cada cultivo y la calidad del agua; los rendimientos obtenidos en el cultivo de tomate fueron dos veces mayores a los registrados en campo a cielo abierto (0.48 g planta⁻¹) en las tres variedades utilizadas, mientras que la calidad del agua se mantuvo dentro de los niveles óptimos para la especie acuícola en cultivo.

Sin embargo, no fue sino hasta la década de los 90's que los conocimientos adquiridos comenzaron a aplicarse a producciones comerciales. Rakocy *et al.* (1992) incorporan los detalles técnicos y de manejo necesarios para la integración de peces y plantas en un sistema de recirculación, a lo que hoy se conoce como "acuaponía moderna". McMurtry *et al.* (1997) evaluaron la eficiencia del uso de agua de un cultivo acuapónico con tilapia híbrida (*O. mosambicus* X *O. niloticus* L.) y dos variedades de

tomate bola (*S. lycopersicum* L.) en cuatro diferentes relaciones de biofiltro:tanques de cultivo (0.67:1, 1.00:1, 1.50:1 y 2.25:1); no se encontraron diferencias significativas en la eficiencia del uso de agua entre las diferentes relaciones.

Actualmente la acuaponía se realiza a nivel mundial de manera comercial a pequeña escala, se utiliza como herramienta de enseñanza en todos los niveles educativos, se emplea como medio de subsistencia en zonas de alta marginación y en la última década se han implementado diversos avances en materia de diseño y operación (Danaher *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016; Khandaker *et al.*, 2018), uso de probióticos para mejorar la dinámica de los nutrientes (da Silva-Cerozi y Fitzsimmons, 2016), manejo de plagas en sistemas acuapónicos (Pilinszky *et al.*, 2014), monitoreo de la calidad del agua en tiempo real (Manjum *et al.*, 2018), entre otros.

No obstante, cuando nos referimos a los cultivos integrados con camarón en aguas de baja salinidad, los estudios realizados son escasos y en ocasiones poco claros, a continuación se describen los principales estudios en la literatura científica. Un grupo de investigadores de la Universidad de Clemson dirigidos por el Dr. Dufault, realizaron varios estudios con el objetivo de aprovechar la materia orgánica generada en los cultivos intensivos para la fertilización en suelo de diferentes hortalizas. Los estudios demostraron que los biosólidos (nombre asignado a este material) por sí solos no mejoran el rendimiento y desarrollo de las hortalizas, pero en una combinación con fertilizantes sintéticos, maximizan el rendimiento del pimiento morrón (Dufault *et al.*, 1998; Dufault y Korkmaz, 2000), brócoli (Dufault *et al.*, 1996; Dufault y Korkmaz, 2000), hierba de verano de Sudán (Dufault y Korkmaz, 2000) y lechuga (Dufault *et al.*, 2001). También en Estados Unidos, McIntosh y Fitzsimmons (2003) estudiaron el impacto del efluente proveniente de una granja camaronícola en la cual se utilizó agua de pozo a 1.4 g L^{-1} en árboles de olivos; no se encontraron diferencias significativas entre el crecimiento (altura) ni en la salinización del suelo de los diferentes tratamientos, pero si se encontró un efecto negativo en el diámetro del tallo, siendo menor en los arboles irrigados con el efluente del cultivo de camarón.

Miranda *et al.* (2008) en Brasil, compararon la producción de melón (*Cucumis melo* L.) irrigado con el efluente de una granja camaronícola de baja salinidad contra los irrigados con agua de río, no encontrándose diferencias significativas en el rendimiento

obtenido entre ambos tratamientos. Por su parte, Mariscal-Lagarda *et al.* (2012; 2013) y Mariscal-Lagarda y Páez-Osuna (2014) realizaron un cultivo integral de camarón blanco (*P. vannamei*) y tomate bola (*S. lycopersicum* L.) con agua subterránea (salinidad de 0.9 g L^{-1}) añadiéndole sales ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ y KCl) en el estado de Sonora, obteniendo un peso final de 13.9 g, una supervivencia del 56.3%, un factor de conversión alimenticia (FCA) de 1.6 y un rendimiento de 3.9 t ha^{-1} , con una densidad de siembra de 50 PL m^{-2} y un periodo de cultivo de 120 días. Mientras que en el cultivo de tomate se obtuvo un rendimiento de 36.9 t ha^{-1} , con un peso individual del fruto de 110.6 g, demostrando así la factibilidad técnica de este tipo de cultivos. Por su parte, Fierro-Sañudo *et al.* (2015) llevaron a cabo un cultivo acuapónico de camarón (*P. vannamei*) con dos tipos de tomate (bola y uva) y dos tipos de lechuga (orejona y romana) usando agua de mar diluida a dos diferentes salinidades (1.2 y 1.9 g L^{-1}) obteniendo resultados promisorios.

Como se puede observar en los estudios publicados sobre el tema, a excepción de los trabajos de Mariscal-Lagarda *et al.* (2012; 2014) y Mariscal-Lagarda y Páez-Osuna (2014) ninguno de los demás registra la producción obtenida de camarón, ya que fueron pruebas donde el efluente del cultivo de camarón se trasladaba hacia los cultivos agrícolas, es decir, los cultivos no se llevaron a cabo en el mismo lugar. Otra observación es que al ser cultivos en tierra, el efluente de camarón no podría recuperarse por lo que el consumo de agua para el cultivo de camarón no se redujo. Por ellos, es necesario enfocar los esfuerzos en desarrollar técnicas de cultivo donde sea posible producir más alimentos con una menor cantidad de recursos, como es el caso del agua, y producir la menor cantidad de desechos. Con la presente investigación se pretende sentar las bases para el desarrollo de un sistema de producción sustentable, involucrando al camarón blanco del Pacífico *P. vannamei*, albahaca *O. basilicum* y lechuga *L. sativa*.

1.3. LITERATURA CITADA

- Danaher, J. J., R. Charlie-Shultz, J. E. Rakocy, and D. S. Bailey. 2013. Alternative solids removal for warm water recirculating raft aquaponic systems. *J. World Aquacult. Soc.* 44(3): 374-383.
- Da Silva-Cerozi, B. and K. Fitzsimmons. 2016. Use of *Bacillus* spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. *Sci. Hortic.* 211: 277-282.
- Dufault, R. J., J. S. Hopkins, and P. Sandifer. 1996. Utility of shrimp sludge from organic aquiculture lagoons as a soil amendment for broccoli Production. *HortScience* 31 (4): 611-611.
- Dufault, R. J., A. Korkmaz, J. S. Hopkins, and P. A. Sandifer. 1998. Shrimp biosolids from aquaculture are a valuable fertilizer amendment for bell pepper production. *Proceedings of the National Pepper Conference, Citrus and Vegetable Magazine* 46-47.
- Dufault, R. J. and A. Korkmaz. 2000. Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer for bell pepper production. *Compost Sci. Util.* 8 (4): 310-319.
- Dufault, R. J., A. Korkmaz, and B. Ward. 2001. Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer for broccoli production. *Compost Sci. Util.* 9 (2): 107-114.
- FAO. 2018. *The state of the world fisheries and aquaculture 2018 - meeting the sustainable development goals.* Rome, Italy. 227 pp.
- Fernando, C. H. and M. Halwart. 2000. Possibilities for integration of fish farming into irrigation systems. *Fisheries. Manag. Ecol.* 7: 45-54.
- Ingram, B. A., G. J. Gooley, L. J. McKinnon, and S. S. De Silva. 2000. Aquaculture-agriculture systems integration: an Australian prospective. *Fisheries. Manag. Ecol.* 7: 33-43.
- Khandaker, M. and B. Kotzen. 2018. The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. *Aquacult. Res.* 49(4): 1454-1468.
- Manjum, M., V. Karthik, S. Hariharan, and B. Sreekar. 2018. Real time monitoring of the environmental parameters of an aquaponic system based on internet of things.

En: Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM), 2017 Third International Conference on Science and Technology Engineering and Management. 943-948.

- Mariscal-Lagarda, M. M. 2014. Cultivo simultáneo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y cultivo de tomate bola hidropónico (*Lycopersicon esculentum* Mill) utilizando agua de pozo de baja salinidad y tasa de recambio cero: desarrollo, manejo y evaluación. Tesis de Doctorado. U de O. Sinaloa, México.
- Mariscal-Lagarda, M. M. and F. Páez-Osuna. 2014. Mass balances of nitrogen and phosphorus an integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity water: short communication. *Aquacult. Eng.* 58: 107-112.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. L. Esquer-Méndez, I. Guerrero-Monroy, A. Romo del Vivar, K. Y. Brito-Solano, D. N. López-Pérez, and R. Alonso-Rodríguez. 2014. Water quality in an integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)-tomato (*Lycopersicon esculentum*) using low salinity groundwater in Sonora, Mexico. *Exper. Agric.* 50(2): 306-319.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. L. Esquer-Mendez, I. Guerrero-Monroy, A. Romo del vivar, and R. Felix-Gastelum. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture* 336-367: 76-84.
- McIntosh, R. P. and K. Fitzsimmons. 2003. Characterization of effluent from an inland, low salinity shrimp farm: what contribution could this water make if use for irrigation. *Aquacult. Eng.* 27: 147-156.
- McMurtry, M. R., D. C. Sanders, J. D. Cure, R. G. Hodson, B. C. Haning, B.C., and P. C. St. Amand. 1997. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *J. World Aquacult. Soc.* 28(4): 420-428.
- Miranda, F. R., R. N. Lima, L. A. Crisóstomo, and M. G. S. Santana. 2008. Reuse of inland low-salinity shrimp farm effluent for melon irrigation. *Aquacult. Eng.* 39: 1-5.
- Naegel, L. C. A. 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture* 1: 17-24.

- Pilinszky, K., G. Gyulai, and T. Komives. 2015. Plant protection in aquaponic systems - Comment on Karthikeyan and Gopalakrishnan's (2014) "A novel report of phytopathogenic fungi *Gilbertella persicaria* infection on *Penaeus monodon*". *Aquaculture* 435: 275-276.
- Rakocy, J. E., T. M. Losordo, and M. P. Masser. 1992. Recirculating aquaculture tank production systems. Integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center 454: 1-8.
- Wang, C. Y., C. Y. Chang, Y. H. Chien, and H. T. Lai. 2016. The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *Int. Biodeter. Biodegr.* 107: 21-30.

CAPÍTULO 2 . PRODUCCIÓN Y MANEJO DE UN CO-CULTIVO PARCIAL DE CAMARÓN (*Penaeus vannamei*) CON ALBAHACA (*Ocimum basilicum*) UTILIZANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD

2.1. RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la producción de un cultivo acuapónico de camarón blanco (*Penaeus vannamei*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) utilizando dos fuentes de agua de baja salinidad ($1,7 \text{ g L}^{-1}$): agua de mar diluida (AMD) y agua subterránea (AS) con cero recambio de agua en una proporción de siembra de 4.9 camarones por planta de albahaca. Se construyeron seis sistemas acuapónicos individuales: tres sistemas acuapónicos para AS, tres para AMD, y un control (TC, por triplicado) de albahaca solamente con solución hidropónica. Las densidades de siembra utilizadas fueron 75 m PL^{-2} para el camarón y $16 \text{ plantas m}^{-2}$ para la albahaca. Con la excepción de los rendimientos en el cultivo de camarón (kg m^{-2} o t ha^{-1}), no hubo diferencias significativas ($P > 0.05$) para el peso individual, la supervivencia, la tasa de crecimiento y la tasa de conversión alimenticia entre AS y AMD; mientras que para la albahaca, se encontraron rendimientos más bajos en el tratamiento utilizando AMD ($0.42 \pm 0.02 \text{ kg planta}^{-1}$ y $6.73 \pm 0.02 \text{ kg m}^{-1}$). No se encontraron diferencias significativas en la producción de albahaca entre el control y el tratamiento AS. El consumo de alimento por kg de albahaca cosechada total fue significativamente menor ($P < 0.05$). El cultivo acuapónico de camarones y albahaca usando dos fuentes de agua de baja salinidad mostraron resultados prometedores. Las estimaciones de rendimiento de las cosechas fueron comparables con los registrados en la literatura y en cultivos de campo comerciales desde el noroeste de México.

2.2. ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the production of an aquaponic culture of white shrimp (*P. vannamei*) and basil (*O. basilicum*) using two sources of low-salinity water

(1.7 g L⁻¹): groundwater (GW) and diluted seawater (DSW) with zero water exchange at a stocking ratio of 4.9 shrimp per basil plant. Six aquaponic treatment systems were constructed: three individual aquaponic systems for GW, three for DSW, and a control (CT, per triplicate) of basil only with hydroponic solution. Stock densities for shrimp were 75 PL m⁻² and 16 plants m⁻² for basil. With the exception of the yield in the shrimp culture (kg m⁻² or t ha⁻¹), no significant differences ($P>0.05$) were found for the final individual weight, survival, growth rate and feed conversion ratio between DSW and GW, whereas for basil, lower yields were found in the treatment using DSW (0.42±0.02 kg plant⁻¹ and 6.73±0.02 kg m⁻¹). No significant differences in the basil production between the control and the treatment GW were found. Feed consumption per kg of total harvested basil were significantly lower ($P<0.05$). The aquaponic culture of shrimp and basil using these two types of low-salinity water sources showed promising results. The estimates of both crop yields were comparable with those recorded in the literature and for commercial field crops from northwest Mexico.

2.3. INTRODUCCIÓN

Los cultivos acuapónicos son sistemas integrados de animales acuáticos y plantas donde el desecho de las unidades acuícolas es utilizado en la producción de biomasa vegetal. Este sistema de producción de alimentos se ha desarrollado con éxito con cultivo de peces (principalmente tilapia), y se han encontrado grandes ventajas, incluyendo la reducción del uso de agua para ambos cultivos (Ingram *et al.*, 2000), el rendimiento económico por metro cúbico de agua es mayor, ya que es posible producir dos o más productos a la vez (McIntosh y Fitzsimmons 2003) y el uso de fertilizantes es menor debido a los aportes de nutrientes de los efluentes de la acuicultura (Fernando y Halwart 2000). Los sistemas acuapónicos pueden implementarse en áreas marginadas para subsistencia o negocio familiar, y el impacto ambiental de la acuicultura se reduce significativamente debido a la utilización de los efluentes como fuente de nutrientes para las plantas.

Con la expansión del cultivo de camarón blanco del Pacífico (*P. vannamei*) en agua dulce y de baja salinidad, los efluentes de las granjas de este tipo pueden ser utilizados para la producción de biomasa vegetal, lo que reduciría el impacto ambiental al mismo

tiempo de producir más alimentos con una menor cantidad de agua. Para un buen crecimiento y supervivencia en el cultivo del camarón utilizando agua de baja salinidad, las concentraciones y proporciones de los iones en el agua deben ser similares a las concentraciones y relaciones presentes en el agua de mar diluida a la misma salinidad (Roy *et al.*, 2010; Mariscal-Lagarda, 2011), esto puede alcanzarse de dos maneras; diluyendo agua de mar (o soluciones de salmuera) con agua dulce (Samocho *et al.*, 1998; Limsuwan *et al.*, 2002) o usando agua subterránea y suplementando aquellas sales que presenten deficiencia (Boyd *et al.*, 2002; Saoud *et al.*, 2003; McNevin *et al.*, 2004); en ambos casos cuando se trabaja con aguas de baja salinidad ($<2 \text{ g L}^{-1}$ aproximadamente) es posible irrigar plantas.

En este contexto, existen pocos estudios en la integración de camarón (*P. vannamei*) con plantas, entre los disponibles se encuentra la integración con plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), en el cual se evaluó la producción y manejo (Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012), calidad del agua (Mariscal-Lagarda *et al.*, 2014) y balance de masas de nitrógeno y fósforo (Mariscal-Lagarda y Páez-Osuna, 2014), y la producción y manejo del cultivo integrado de camarón con dos tipos de plantas de tomate (*S. lycopersicum* L.) y dos tipos de plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) (Fierro-Sañudo *et al.*, 2015).

La albahaca (*O. basilicum*) fue identificada como la planta más cultivada en sistemas acuapónicos a partir de una encuesta realizada a practicantes de acuaponía alrededor del mundo (Love *et al.*, 2015). Esta planta pertenece a la familia Lamiaceae, es nativa de la india y ampliamente usada en la comida vietnamita, tailandesa e italiana debido a su sabor y aroma único. A pesar de ser utilizada recurrentemente en la acuaponía, hay pocos estudios científicos que describan los rendimientos obtenidos, entre los cuales destacan aquellos integrados con tilapia (Rakocy *et al.*, 2004; Hanson *et al.*, 2008), langostino (Ronzón-Ortega *et al.*, 2012) y carpa (Roosta, 2014).

Las principales características que hacen de la albahaca un buen candidato para la integración con el cultivo de camarón en aguas de baja salinidad son: (i) es tolerante a concentraciones relativamente altas de sales disueltas en el agua de riego ya que muestra un buen desarrollo y crecimiento con aguas de hasta 4.0 dS m^{-1} (2.5 g L^{-1}) de conductividad eléctrica sin mostrar deficiencias en su producción (Ramírez *et al.*, 2001;

Reyes-Pérez *et al.*, 2013); (ii) las condiciones climáticas del área de estudio (sur de Sinaloa, México) son compatibles con los requerimientos de la planta (temperatura de 23-30 °C durante el día y 16-20 °C durante la noche, altitud de 0 a 1,000 m.s.n.m. y humedad relativa de 60-70%) (Briseño-Ruiz *et al.*, 2013), y (iii) posee una excelente aceptación en el mercado debido a su contribución de aceites esenciales en la preparación de alimentos, perfumería e industria médica.

Basado en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la producción de un cultivo acuapónico con camarón *P. vannamei* y albahaca *O. basilicum* usando dos fuentes de agua de baja salinidad, agua subterránea y agua de mar diluida con una conductividad eléctrica aproximada de 2.7 dS m⁻¹ (1.7 g L⁻¹) con cero recambio de agua a una relación de siembra de 4.9 camarones por planta.

2.4. MATERIAL Y MÉTODOS

2.4.1. Sistema experimental

El presente estudio se llevó a cabo en el módulo experimental YK localizado en Mazatlán, Sinaloa, México (23° 12' 11.9" N y 106° 25' 41.29" O). El sistema experimental consistió en seis tanques para el cultivo de camarón (2.0 m de diámetro x 1.2 m de altura, 3.14 m³ por tanque), de los cuales tres tanques fueron llenados con AS con una conductividad eléctrica de 2.7 dS m⁻¹ de una granja de camarón ubicada en el sur de Sinaloa y los tres restantes se llenaron con AMD a la misma conductividad eléctrica preparada con agua de mar (34 g L⁻¹) y agua dulce proveniente de la red pública (0.2 g L⁻¹). Cada tanque fue conectado a un tanque sedimentador de 180 L, un biofiltro relleno con plástico HDPE y grava como sustrato para la fijación de bacterias nitrificantes y un sistema de técnica de flujo profundo (DFT por sus siglas en inglés "Deep Flow Technique") para el cultivo de albahaca. El sistema DFT consistió de camas construidas con bloques de cemento y cubiertas con plástico (3.0 m longitud x 1.0 m de ancho x 0.2 m de alto) con una pendiente del 1% (Figura 2.1).

Las plántulas de albahaca (10-15 cm de altura) se pusieron a flotar en sus sistemas DFT correspondientes encima de placas de poliestireno (1.0 m longitud x 1.0 m de ancho 1.0" de grosor). El agua se transfirió por gravedad desde los tanques de cultivo de camarón al resto del sistema acuapónico usando una manguera de ½" de diámetro

de plástico HPDE. Al final del sistema DFT, el agua se colectó en un tanque de polipropileno de 50 L y se bombeó el agua de retorno a los tanques de cultivo de camarón con la ayuda de una bomba periférica de ½" HP.

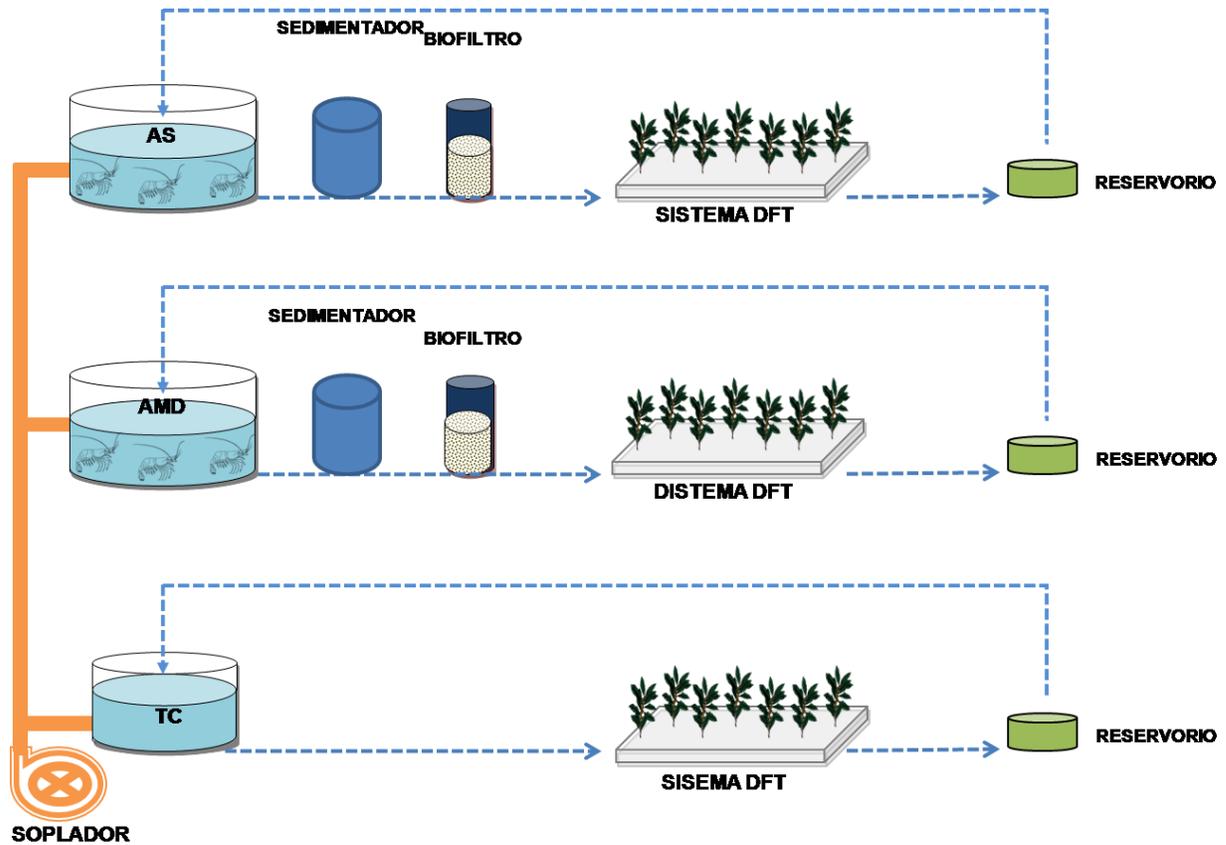


Figura 2.1. Diseño experimental utilizado en el cultivo acuapónico camarón-albahaca. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Tres sistemas DFT adicionales se construyeron para el cultivo de albahaca usando solución hidropónica nutritiva comercial (Marulanda, 1999; Samperio-Ruiz, 2000) como TC. La aireación fue suministrada por un soplador de aire de 2 HP y un tramo de manguera aireadora en cada tanque de cultivo de camarón, sistemas DFT y biofiltros.

La recirculación del agua a través del sistema acuapónico fue de 2 L min^{-1} constantemente. La pérdida de agua mediante la evaporación, evapotranspiración de las plantas y el drenado de los tanques sedimentadores fue repuesta desde un tanque de 450 L conectado a los reservorios de las bombas donde el agua fue repuesta

después de alcanzar un nivel predeterminado. Durante el ciclo de cultivo el recambio de agua fue cero.

2.4.2. Análisis de los componentes mayoritarios, pH y conductividad eléctrica para cada fuente de agua

Al momento de llenar los tanques de cultivo de camarón, se recolectaron muestras de agua directamente de los tanques (25 centímetros por debajo de la superficie de agua) las cuales fueron rápidamente filtradas usando filtros Whatman GF/F. las muestras de agua filtradas fueron almacenadas en botellas plásticas limpias (120 ml) y transportadas al laboratorio a 4 °C. Las dos fuentes de agua utilizadas en esta prueba fueron analizadas en duplicado para Cl^- , Mg^{+2} , K^+ , Ca^{+2} , and Na^+ , así como alcalinidad total usando técnicas estandarizadas (APHA, 2012). La precisión para cada componente mayoritario varió desde 3.5 a 7.8%. Los valores de oxígeno disuelto y temperatura fueron determinados con un oxímetro (YSI, modelo 58, USA), mientras que el pH y la conductividad eléctrica (CE) se midieron con un potenciómetro combo (HANNA instrument modelo HI 98129). La salinidad fue estimada a partir de las lecturas de CE (en $\mu\text{S cm}^{-1}$) a 25 °C x 0.00063) (Boyd 2002). La precisión, estimada como coeficiente de variación, fue de 5.5%, 2.2% y 4.1% para el oxígeno disuelto, pH y CE, respectivamente. La calibración de los instrumentos fue realizada usando buffers de pH 4.01 (Orion 910104, Thermo Scientific) y 7.01 (Orion 910104, Thermo Scientific) y una solución calibradora de conductividad de 1.413 dS m^{-1} a 25 °C.

2.4.3. Cultivo de camarón

Las postlarvas (PL-53) usadas en el experimento fueron provistas por Fitmar Proveedora de Larvas S.A. de C.V. Los organismos fueron transportados al módulo experimental dentro de hieleras a 23 °C y 10 g L^{-1} de salinidad. Una vez en el módulo, las postlarvas fueron colocadas en tanques de 450 L para completar el proceso de aclimatación de acuerdo a lo propuesto Van Wyk (1999) y McGraw y Scarpa (2004) hasta el nivel de CE deseado (2.7 dS m^{-1}). Durante el proceso de aclimatación, las postlarvas fueron alimentadas con FLAKE (52% proteína; 9% lípidos; 3% cenizas; 10% humedad; Brine Shrimp Co., Providence, Utah, USA) cinco veces al día (7:00, 10:00,

13:00, 16:00 y 19:00 h). Al terminar la aclimatación, los tanques de cultivo de camarón fueron sembrados a una densidad de 75 PL-58 m⁻² con un peso individual promedio de 0.69±0.19 g.

Durante las primeras dos semanas las postlarvas fueron alimentadas manualmente *ad-libitum* por los bordos de los tanques de cultivo con CAMARONINA (35% proteína; 3.5% lípidos; 5% fibra; 11% ceniza; 12% humedad; Nestlé Purina, St. Louis Missouri, USA) tres veces al día (8:00, 13:00 y 16:00 h). Para el resto del cultivo los organismos se alimentaron mediante la técnica de comederos usando el mismo alimento, y la ración fue ajustada de acuerdo a la biomasa y remanente observado en los comederos (Cook y Clifford, 1997). El cultivo de camarón tuvo una duración de 50 días; después el camarón fue cosechado, pero el agua se mantuvo en el sistema acuapónico para continuar con el cultivo de albahaca (81 días más). El estudio tuvo una duración total de 131 días desde que el cultivo de camarón inicio (19 de agosto, 2015) hasta que el cultivo de albahaca finalizó (27 de diciembre, 2015).

2.4.4. Cultivo de albahaca

Las semillas de albahaca fueron sembradas en semilleros de poliestireno de 200 cavidades con peat moss como sustrato y fueron irrigadas tres veces al día (8:00, 13:00 y 16:00 h) (Samperio-Ruíz, 2000). Las plántulas se trasplantaron en los sistemas acuapónicos 30 días después de haber sembrado la semilla y 15 días después de haber iniciado el cultivo de camarón. En este periodo de tiempo, se espera que los tanques de cultivo de camarón generen los nutrientes suficientes para nutrir las plantas (Mariscal-Lagarda *et al.*, 2014). La densidad empleada fue de 16 plantas m⁻²; cada tanque de cultivo de camarón contenía 235 organismos y a cada tanque se le acoplaron 48 plantas (4.9 camarones por planta). El TC fue sembrado en igualdad de condiciones que los sistemas acuapónicos.

Una vez que las plantas alcanzaron una altura de 35 cm, se realizó el primer corte; el cual se hizo a una altura de 15 cm desde la base del tallo hacia arriba para preservar las yemas basales de los tallos y así promover el rebrote de las plantas (Briseño-Ruíz *et al.*, 2013). La duración del cultivo de albahaca fue de 115 días cuando el último corte se realizó.

2.4.5. Evaluación del sistema de producción y consumo de alimento

Al final del cultivo de camarón, se estimó el peso individual promedio obteniendo el peso individual de una muestra de 100 camarones de cada tanque. La supervivencia fue calculada mediante la siguiente ecuación (Esparza-Leal *et al.*, 2010): Supervivencia (%) = (número de camarones cosechados/número de camarones sembrados)*100. El crecimiento en gramos por semana fue estimado de acuerdo a lo propuesto por Araneda *et al.* (2008): Crecimiento (g semana⁻¹) = (Wf–Wi)/t, donde Wf es el peso promedio final de los camarones al tiempo de la cosecha, Wi es el peso inicial promedio, y t es la duración del cultivo expresado en semanas. La tasa de crecimiento específico (TCE) fue calculada de la siguiente manera (Moreira *et al.*, 2011): TCE (% día⁻¹) = (ln(Wf)–ln(Wi))*100/t, donde t es la duración del cultivo expresado en días. El rendimiento en kilogramos por metro cuadrado (kg m⁻²) de camarón cosechado fue calculado y después extrapolado a toneladas por hectárea (t ha⁻¹). Para el cultivo de albahaca, el peso fresco fue determinado usando una balanza analítica Shimadzu TX223L (Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, USA), además de estimar el rendimiento en kilogramos por metro cuadrado (kg m⁻²) para cada tratamiento. El consumo de alimento fue calculado de acuerdo a Love *et al.* (2015). Se registró la cantidad de alimento suministrada a los tanques a lo largo del ciclo de cultivo y se sumó para estimar el consumo de alimento por kilogramo de cada uno de los cultivos cosechados.

2.4.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante una prueba de normalidad y homogeneidad de varianza para determinar si los datos de producción se ajustaban a una distribución normal. Para los datos de consumo de alimento y producción de camarón se utilizó una prueba de t de Student, mientras que para los datos de producción de albahaca se analizaron mediante un ANOVA de una vía y una prueba posteriori de Tukey. El software utilizado para el análisis fue STATISTICA 7 (Statsoft Inc., Tulsa, USA). Todas las pruebas se realizaron con un intervalo de confianza del 95% (Zar, 2010).

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Caracterización de las fuentes de agua

La composición iónica de los dos tipos de agua utilizada en el presente estudio se resume en el Cuadro 2.1. AS mostró las concentraciones más altas de Mg^{+2} y Ca^{+2} que AMD, contrario a los resultados encontrados para Cl^- , K^+ y Na^+ . Los valores de pH fueron similares en ambas fuentes de agua (8.4 ± 0.1 y 8.6 ± 0.2 para AS y AMD, respectivamente), la relación Mg/Ca fue 2.9 and 3.4 para AS y AMD, respectivamente.

Cuadro 2.1. Potencial de hidrógeno (pH) y componentes mayoritarios del agua subterránea y agua de mar diluida utilizada para llenar los tanques de cultivo en el sistema acuapónico camarón-albahaca.

Variable	AS	AMD	Unidades
pH	8.4±0.1	8.6±0.2	
Cl ⁻	706±128	986 ^a	mg L ⁻¹
Mg ⁺²	179±22	70 ^a	mg L ⁻¹
K ⁺	16.7±1.4	19.1 ^a	mg L ⁻¹
Ca ⁺²	61.4±13.1	20.8 ^a	mg L ⁻¹
Na ⁺	252±18	545 ^a	mg L ⁻¹
Alcalinidad como CaCO ₃	171±13	-	mg L ⁻¹
EC	2.6±0.2	2.7±0.2	dS m ⁻¹
Relaciones iónicas			
Na/K	15.1	28.5	
Ca/K	3.7	1.1	
Mg/Ca	2.9	3.4	

^aCalculado a partir de los factores de Roy *et al.* (2010).

2.5.2. Consumo de alimento, producción de camarón y albahaca

El cultivo de camarón transcurrió desde el 19 de agosto hasta el 7 de octubre del 2015 (50 días). Los datos de producción obtenidos se resumen en el Cuadro 2.2. Con excepción del rendimiento del cultivo de camarón, siendo más alto para AS, no se encontraron diferencias en las demás variables evaluadas para la producción. Los dos

tipos de agua, AS y AMD, no difirieron estadísticamente ($P>0.05$) en términos de la mayoría de las variables examinadas. De igual manera, las curvas de crecimiento muestran un patrón similar (Figura 2.2). Los datos de producción registrados para el cultivo de albahaca se presentan en la Cuadro 2.3. No se encontraron diferencias significativas ($P>0.05$) en la producción por planta y rendimiento entre AS y el TC, sin embargo, la producción de albahaca en AMD fue significativamente menor ($P>0.05$) en ambas variables. No se encontraron diferencias significativas ($P>0.05$) en el consumo de alimento por kilogramo de camarón cosechado, por otro lado el consumo de alimento en el cultivo de albahaca fueron diferentes significativamente ($P<0.05$) (0.11 ± 0.01 y 0.12 ± 0.01 kg de alimento por kilogramo de albahaca cosechada para AS y AMD, respectivamente).

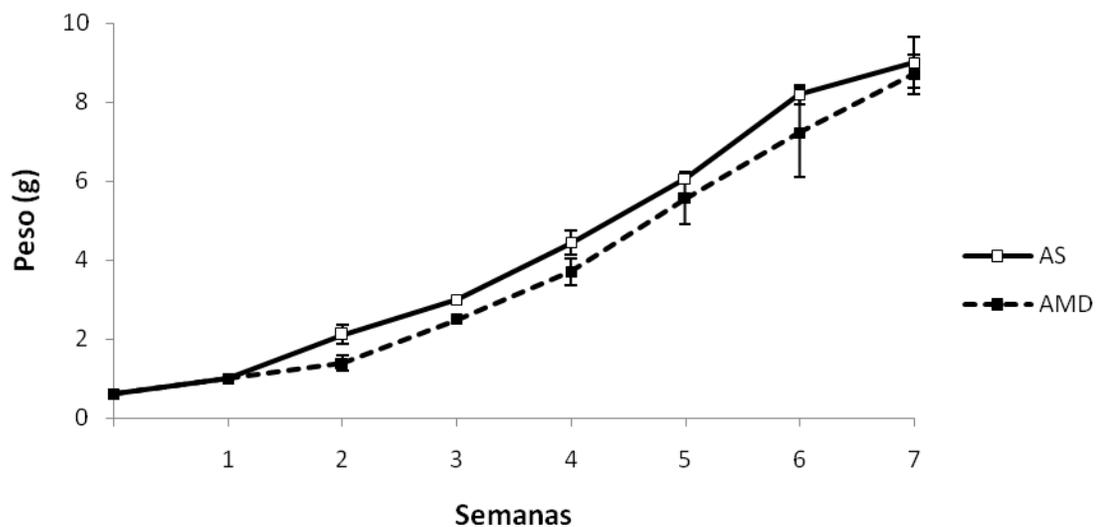


Figura 2.2. Crecimiento del camarón blanco *P. vannamei* durante el cultivo acuapónico con albahaca.

Cuadro 2.2. Datos de producción obtenidos del cultivo de camarón utilizando dos fuentes de agua de baja salinidad en un cultivo acuapónico camarón-albahaca.

	AS	AMD
Peso inicial (g)	0.69	0.69
Peso final (g)	9.05±1.71 ^a	8.69±1.51 ^a
Supervivencia (%)	89.53±1.90 ^a	85.20±3.60 ^a
Crecimiento (g semana ⁻¹)	1.17±0.06 ^a	1.13±0.06 ^a
TCE (% día ⁻¹)	5.02±0.15 ^a	4.97±0.11 ^a
FCA	1.41±0.01 ^a	1.49±0.06 ^a
Rendimiento (kg m ⁻²)	0.63±0.01 ^a	0.53±0.02 ^b
Rendimiento (t ha ⁻¹)	6.24±0.29 ^a	5.29±0.26 ^b

Medias con letras diferentes presentan diferencias significativas (P<0.05) entre fuentes de agua.

Cuadro 2.3. Datos de producción del cultivo de albahaca obtenido durante el cultivo acuapónico con camarón-albahaca usando agua dos fuentes de agua de baja salinidad.

	AS	AMD	TC
Producción por planta (kg planta ⁻¹)	0.53±0.04 ^a	0.42±0.02 ^b	0.58±0.02 ^a
Rendimiento (kg m ⁻²)	8.49±0.61 ^a	6.73±0.28 ^b	9.22±0.42 ^a

Medias con letras diferentes presentan diferencias significativas (P<0.05) entre fuentes de agua.

2.6. DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos en nuestro estudio son promisorios y demuestran la factibilidad de la integración de los cultivos camarón-albahaca usando agua de baja salinidad de 1.7 g L⁻¹ (2.7 dS m⁻¹ de CE). El cultivo de albahaca puede ser considerado como un valor agregado a la producción de camarón en el cual su efluente es reutilizado y de esta manera se consiguen dos ventajas: (i) los nutrientes en el efluente

del cultivo de camarón son capturados/absorbidos y convertidos en biomasa vegetal, y (ii) la descarga del efluente del cultivo de camarón a los ecosistemas naturales receptores se minimiza, previniendo así los impactos nocivos asociados con la adición de nutrientes, los cuales son los responsables del deterioro de la calidad del agua y la eutrofización. Adicionalmente, este cultivo secundario podría ayudar a mejorar la factibilidad financiera debido a los ingresos extras proveniente de las ventas de la albahaca. Las plantas de albahaca son económicamente importantes a nivel local, nacional e internacional (Reyes-Pérez *et al.*, 2013), es atractiva gracias a sus aceites esenciales, los cuales son utilizados en la perfumería y la industria médica, además de ser ampliamente utilizada en la comida italiana, vietnamita y tailandesa, y poseer diversas propiedades antioxidantes (Lee *et al.*, 2005).

La CE de AS utilizada en la presente prueba fue de 2.7 dS m^{-1} , mientras que la dilución del agua de mar con el agua de la red pública permitió alcanzar los mismos niveles de CE en los tratamientos AMD. Estos niveles de CE fueron seleccionados debido a que son equivalentes a una salinidad de 1.7 g L^{-1} , lo cual es razonable y cae dentro del rango aceptable para el cultivo de camarón *P. vannamei* de 0.5 a 40 g L^{-1} (Van Wyk, 1999). Por otro lado, estos niveles de CE se encuentran por debajo de los niveles máximos tolerables por la albahaca (4.0 dS m^{-1}) (Reyes-Pérez *et al.*, 2013). La alcalinidad (como CaCO_3) medida en AS excede la concentración mínima recomendada (75 mg L^{-1}) para el buen desarrollo de *P. vannamei* en aguas de baja salinidad (Roy *et al.*, 2010). La alta concentración de Ca^{+2} y la baja concentración de Cl^- son características de la mayoría de las aguas subterráneas alrededor del mundo (Boyd y Thunjai, 2003; Roy *et al.*, 2010; Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012). El tratamiento AMD mostró las proporciones iónicas típicas del agua de mar; en contraste con AS que tuvo proporciones iónicas diferentes al agua de mar, particularmente para Ca/K y Na/K; Cl^- and Na^+ fueron deficientes y Mg^{+2} y Ca^{+2} se encontraron en exceso (Cuadro 2.1). La temperatura (30.5 ± 1.9 ; 27.0 - $33.2 \text{ }^\circ\text{C}$) y oxígeno disuelto (6.1 ± 1.7 ; 4.2 - 8.1 mg L^{-1}) registrado en el agua durante el cultivo, se encuentran dentro de los rangos aceptables para el monocultivo típico de camarón (Van Wyk, 1999) y los recomendados para el cultivo de albahaca (Briseño-Ruíz *et al.*, 2013).

Los rendimientos del cultivo de camarón obtenidos en ambos tratamientos (6.24 t ha⁻¹ para AS y 5.29 t ha⁻¹ para AMD) son comparables con aquellos registrados en monocultivos de camarón utilizando agua dulce y de baja salinidad. Samocha *et al.* (1998) estimaron un rendimiento de 5.2 t ha⁻¹ con un peso promedio de 19 g y una supervivencia de 98% durante un cultivo de 77 días usando agua de mar diluida a 2 g L⁻¹. Mariscal-Lagarda *et al.* (2010) calcularon un rendimiento de 1.3 t ha⁻¹ con un peso promedio de 15.6 g y una supervivencia de 61.5% empleando agua subterránea a 1.7 g L⁻¹ de las costas de Hermosillo, Sonora, México; mientras que Araneda *et al.* (2008) obtuvieron un rendimiento de 7.8 t ha⁻¹ con organismos de 11.4 g de peso promedio y una supervivencia de 76.1% usando agua de un cenote a 0.6 g L⁻¹ en Yucatán, México. El Cuadro 2.4 muestra los datos de producción de diferentes monocultivos y cultivos integrados de camarón para fines comparativos.

Cuadro 2.4. Datos de producción y rendimiento de diferentes monocultivos (M) y cultivos integrados con *P. vannamei*.

	Salinidad g L ⁻¹	Densidad (PL m ⁻²)	Rendi- miento (t ha ⁻¹)	Super- vivencia (%)	FCR	Días de cultivo	Peso final (g)	Crecimiento (g semana ⁻¹)	Referencia
Agua de baja salinidad									
M	0.5-7.0	60	2.9	68.4	1.4	91	11.2	0.37	Wudtisin and Boyd (2011)
M	0.5-7.0	65	2.3	56.9	1.9	72	8.7	0.29	Wudtisin and Boyd (2011)
M	2.2	91	11.1	66.9	2.8	100	18.5	1.36	Samocha <i>et al.</i> (2004)
M	2.0	27	5.2	98.8	-	77	19.0	1.67	Samocha <i>et al.</i> (1998)
	1.8	13	1.3	61.5	-	77	15.6	1.41	Mariscal –Lagarda <i>et al.</i> (2007,2010)
Agua dulce									
M	0.6	90	7.8	76.1	-	203	11.4	0.38	Araneda <i>et al.</i> (2008)
M	0.5	100		77.0	1.6	180	14.1	0.55	Van Wyk <i>et al.</i> (1999)
M	< 1	50	3.3	82.5	-	84	8.1	0.70	Esparza-Leal <i>et al.</i> (2010)
M	0.7	39	3.5	47.0	3.0	112	19.3	1.30	Green (2008)
M	0.7	23	0.98	82.3	1.9	55	5.5	0.90	Green (2008)
M	0.7	28	2.4	99.2	1.2	65	9.0	1.30	Green (2008)
Cultivos integrados									
Camarón-tomate	0.9	50	3.9	56.3	1.6	120	14.0	0.73	Mariscal-Lagarda <i>et al.</i> (2012)
Camarón-tomate- lechuga	1.2	75	3.8	46.8	2.3	120	11.1	0.65	Fierro-Sañudo <i>et al.</i> (2015)
Camarón-tomate- lechuga	1.9	75	6.2	90.0	1.6	120	9.1	0.54	Fierro-Sañudo <i>et al.</i> (2015)
Camarón-albahaca ^a	1.7	75	6.2	89.5	1.4	50	9.0	1.2	Presente estudio
Camarón-albahaca ^b	1.7	75	5.3	85.2	1.5	50	8.7	1.1	Presente studio

^aAgua subterránea. ^bAgua de mar diluida.

Los efluentes del cultivo de camarón han sido probados en el riego de algunas plantas, tal es el caso de arroz en Tailandia (Flaherty *et al.*, 2000), árboles de olivo en Estados Unidos (McIntosh y Fitzsimmons, 2003) y melón y forraje en Brasil (Miranda *et al.*, 2008); así, el potencial del efluente de cultivo de camarón para uso en la irrigación agrícola ha sido demostrado. En estos tres casos, los cultivos agrícolas fueron sembrados directamente en el suelo, lo cual no permitió tener un mejor manejo del agua, además de no presentar datos de producción de camarón. En contraste, Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) registraron un rendimiento de 3.9 t ha⁻¹ con una densidad de siembra de 50 PL m⁻² usando agua subterránea (0.9 g L⁻¹) en un cultivo integrado de camarón (*P. vannamei*) y tomate (*S. lycopersicum* L.) en un sistema de recirculación intermitente; dicho rendimiento es menor al estimado en este estudio, posiblemente debido a la menor densidad empleada y a la baja supervivencia obtenida (56.3%). Fierro-Sañudo *et al.* (2015) calcularon rendimientos de 3.8 y 6.2 t ha⁻¹ probando agua de mar diluida a 1.2 y 1.9 g L⁻¹, respectivamente, con la misma densidad de siembra utilizada en el presente trabajo (75 PL m⁻²) en un cultivo integrado de camarón (*P. vannamei*) con dos tipos de tomate (*S. lycopersicum* L.) y dos tipos de lechuga (*L. sativa*). Cabe resaltar que los resultados comparados en este estudio son también comparables con los rendimientos (0.8-4.5 t ha⁻¹) y tasas de conversión alimenticia (0.7-2.0) regularmente obtenidas en monocultivos comerciales de camarón en el Noroeste de México usando aguas salinas (incluyendo hipersalinas y salobres) (Ruiz-Fernández y Páez-Osuna, 2004; Lyle-Fritch *et al.*, 2006; Miranda-Baeza *et al.*, 2007; Casillas-Hernández *et al.*, 2007).

Adicionalmente, de acuerdo a Briseño-Ruíz *et al.* (2013), los rendimientos registrados en monocultivos de albahaca varían entre 1.8 y 2.0 kg m⁻², los cuales son menores a los encontrados en este estudio. Ramírez *et al.* (2008) indican que durante un ciclo de cultivo de albahaca en acuaponía, es posible obtener más de cuatro cortes alrededor de cinco semanas, de cantidades y calidades diferentes. Rakocy *et al.* (2004) calcularon un rendimiento de 8 kg m⁻² de albahaca fresca en un cultivo acuapónico con tilapia (*O. niloticus*), el cual es ligeramente menor al registrado en el tratamiento AS de nuestro estudio, sin embargo el rendimiento registrado por Rakocy *et al.* (2004) se alcanzó en un lapso menor de tiempo (28 días). Por otro lado, Roosta (2014) estimó

rendimientos de 1.4, 4.9 y 5.9 kg m⁻² de albahaca fresca en un sistema de acuaponia con tres variedades de carpa en un periodo de cultivo de 42 días.

El alimento necesario para producir un kilogramo de camarón y albahaca cosechado puede ser considerado como un indicador de eficiencia del sistema en sí. El alimento requerido para producir un kilogramo de camarón en el presente trabajo fue de 1.41±0.01 y 1.49±0.06 kg de alimento kg⁻¹ de camarón en AS y AMD, respectivamente. Green (2008) estimó consumos de alimento de 1.2, 1.9 y 3.0 kg de alimento kg⁻¹ de camarón cosechado en un monocultivo de *P. vannamei* usando agua dulce de 0.7 g L⁻¹ de salinidad en 65, 55 y 112 días de cultivo. Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) calcularon un consumo de alimento de 1.6 kg de alimento kg⁻¹ de camarón cosechado en un cultivo integrado de *P. vannamei* con tomate (*S. lycopersicum* L.); mientras que Fierro-Sañudo *et al.* (2015) obtuvo un consumo de alimento de 1.6 y 2.3 kg de alimento kg⁻¹ de camarón cosechado en un cultivo integrado de *P. vannamei* con dos tipos de tomate (*S. lycopersicum* L.) y lechuga (*L. sativa*) usando agua de mar diluida a 1.9 y 1.2 g L⁻¹, respectivamente.

El alimento consumido calculado en este estudio para producir un kilogramo de albahaca fresca (0.11±0.01 y 0.12±0.01 kg alimento kg⁻¹ de albahaca cosechada en AS y AMD, respectivamente) es más baja que el consumo estimado por Love *et al.* (2015) de 0.4 y 0.5 kg de alimento kg⁻¹ de diferentes cultivos. Los autores no detallan que tipo de cultivos cosecharon, los cuales probablemente sean hortalizas que producen fruto (tomate, pepino, chile, etc.) los cuales requieren una mayor cantidad de nutrientes para su desarrollo que las plantas pequeñas que solo se aprovecha la hoja (lechuga, albahaca, menta, etc.) (Samperio-Ruiz, 2000), como en el presente estudio donde solo se produjo albahaca.

2.7. CONCLUSIONES

A partir de este estudio se puede observar, que es evidente que el cultivo acuapónico camarón-albahaca usando agua de baja salinidad (AS y AMD) es técnicamente factible. De manera general, el tratamiento AS mostró el mejor desarrollo en términos de rendimiento de camarón y albahaca obtenidos como también el consumo de alimento. Los rendimientos estimados, así como los consumos de alimento

de ambos cultivos fueron comparables con aquellos calculados en monocultivos de camarón y albahaca y en cultivos integrados de camarón con tomate y tomate-lechuga, al igual que a los que corresponden a los cultivos de albahaca en suelo a cielo abierto. Estos resultados demuestran la eficiencia del sistema acuapónico propuesto para camarón-albahaca en agua de baja salinidad de 2.7 dS m^{-1} .

Para futuras investigaciones, la cuestión principal en el cultivo acuapónico camarón-albahaca debe de enfocarse en encontrar un mejor balance en el número de camarones y plantas a crecer, así la mayoría de los nutrientes producidos por el cultivo de camarón y la descarga de ellos serían minimizados. Otro reto, es extrapolar estos descubrimientos a una escala comercial y demostrar la viabilidad técnica y financiera de este proyecto.

2.8. LITERATURA CITADA

- APHA (American Public Health Association), 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd edition. Port City Press, Baltimore.
- Araneda, M., E. Pérez, and E. Gasca-Leyva. 2008. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in fresh water at three densities: condition state based on length and weight. *Aquaculture* 283: 13–18.
- Boyd, C. E. 2002. Standardize terminology for low-salinity shrimp culture. *Global Aquacult. Advoc.* 7(1): 58-59.
- Boyd, C. E. and T. Thunjai. 2003. Concentrations of major ions in waters of inland shrimp farms in China, Ecuador, Thailand, and the United States. *J. World. Aquacult. Soc.* 34: 524–532.
- Boyd, C. E., T. Thunjai, and M. Boonyaratpalin. 2002. Dissolved salts in waters for inland, low-salinity shrimp culture. *Global Aquacult. Advoc.* 5: 40–45.
- Briseño-Ruiz, S. E., M. Aguilar-García, y J. A. Villegas-Espinoza. 2013. El cultivo de la albahaca. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México.
- Casillas-Hernández, R., H. Nolasco-Soria, T. García-Galano, O. Carrillo-Farnes, and F. Páez-Osuna. 2007. Water quality, chemical fluxes and production in semi-

- intensive Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds utilizing two different feeding strategies. *Aquacult. Eng.* 36: 105-114.
- Cook, H. L. and H. C. Clifford. 1997. Feed management for semi-intensive shrimp culture: part 1. *Aquacult. Mag.* 23: 36-43.
- Esparza-Leal, H. M., J. T. Ponce-Palafox, W. Valenzuela-Quiñonez, J. L. Arredondo-Figueroa, and M. Garcia-Ulloa. 2010. Effects of density on growth and survival of juvenile pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, reared in low salinity well water. *J. World. Aquacult. Soc.* 41(4): 648-654.
- Fernando, C. H. and M. Halwart. 2000. Possibilities for integration of fish farming into irrigation systems. *Fisheries Manag. Ecol.* 7: 45-54.
- Fierro-Sañudo, J. F., S. G. Alarcón-Silvas, J. A. León-Cañedo, J. G. Gutierrez-Valenzuela, J. Ramírez-Rochín, M. M. Mariscal-Lagarda, M. A. Franco-Nava, R. Lizárraga-Jiménez, J. I. Osuna-López, and F. Páez-Osuna. 2015. Integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) using diluted seawater: management, production and water consumption. *G. Adv. Res. J. Agric. Sci.* 4(7): 315-324.
- Flaherty, M., B. W. Szuster, and P. Miller. 2000. Low salinity shrimp farming in Thailand. *Ambio* 29: 174–179.
- Green, B. W. 2008. Stocking strategies for production of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in amended fresh water in inland ponds. *Aquac. Res.* 39: 10–17.
- Hanson, A., J Yabes Jr, and L. P. Primavera. 2008. Cultivation of Lemon Basil, *Ocimum americanum*, in two different hydroponic configurations supplemented with various concentrations of tilapia aquaculture green water. *Bios* 79(3): 92-102.
- Ingram, B. A., G. J. Gooley, L. J. McKinnon, and S. S. De Silva. 2000. Aquaculture-agriculture systems integration: an Australian prospective. *Fisheries. Manag. Ecol.* 7: 33-43.
- Lee, S. J., K. Umano, T. Shibamoto, and K. G. Lee. 2005. Identification of volatile components in basil (*Ocimum basilicum* L.) and thyme leaves (*Thymus vulgaris* L.) and their antioxidant properties. *Food Chem.* 91: 131-137.
- Limsuwan, C., T. Somsiri, and S. Silarudee. 2002. The appropriate salinity level of brine water for raising black tiger prawn under low-salinity conditions. Department of

- Fisheries, Bangkok, Thailand. Aquatic Animal Health Research Institute Newsletter 11 (1): 2–4.
- Love, D. C., M. S. Uhl, and L. Genello. 2015. Energy and water use of a small-scale raft aquaponic system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacult. Eng.* 68: 19-27.
- Lyle-Fritch, M.L., E. Romero-Beltrán, and F. Páez-Osuna. 2006. A survey on use of chemical and biological products in shrimp farming from Sinaloa (NW Mexico). *Aquacult. Eng.* 35: 135–146.
- Mariscal-Lagarda, M. M. 2014. Cultivo simultáneo de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y cultivo de tomate bola hidropónico (*Lycopersicon esculentum* Mill) utilizando agua de pozo de baja salinidad y tasa de recambio cero: desarrollo, manejo y evaluación. Tesis de Doctorado. U de O. Sinaloa, México.
- Mariscal-Lagarda, M. M., J. L. Esquer-Méndez, and F. Páez-Osuna. 2010. Shrimp study uses low-salinity groundwater in Sonora, Mexico. *Global Aquacult. Advoc.* 13(E3): 42–43.
- Mariscal-Lagarda, M. M. and F. Páez-Osuna. 2014. Mass balances of nitrogen and phosphorus an integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity water: short communication. *Aquacult. Eng.* 58: 107-112.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. L. Esquer-Méndez, I. Guerrero-Monroy, A. Romo del Vivar, K. Y. Brito-Solano, D. N. López-Pérez, and R. Alonso-Rodriguez. 2014. Water quality in an integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)-tomato (*Lycopersicon esculentum*) using low salinity groundwater in Sonora, Mexico. *Exper. Agric.* 50(2): 306-319.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. L. Esquer-Méndez, I. Guerrero-Monroy, A. Romo del Vivar, and R. Félix-Gastelum. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture* 336-367: 76-84.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. C. Zárata-Váldez, R. Llamas-Hoyos, J. L. Esquer-Méndez, y R. Padilla-Meléndez. 2007. Cultivo de camarón blanco utilizando agua de pozo con baja salinidad y tasa de recambio cero en la costa

- de Hermosillo, Sonora: un sistema viable y promisorio. *Global Aquacult. Advoc.* 4(1): 8-9.
- Marulanda-Tabares, C. H. 1999. Cultivos sin tierra: Hidroponía Familiar. Guía técnica. Proyecto Nacional de Hidroponía, MAG–PNUD. San Salvador, El Salvador.
- McGraw, W. J. and J. Scarpa. 2004. Mortality of fresh water acclimated *Litopenaeus vannamei* associated with acclimation rate, habituation period, and ionic challenge. *Aquaculture* 236: 285-296.
- McIntosh, R. P. and K. Fitzsimmons. 2003. Characterization of effluent from an inland, low salinity shrimp farm: what contribution could this water make if use for irrigation. *Aquacult. Eng.* 27: 147-156.
- McNevin, A. A., C. E. Boyd, O. Silapajarn, and K. Silapajarn. 2004. Ionic supplementation of pond waters for inland culture of marine shrimp. *J. World. Aquacult. Soc.* 35: 460–467.
- Miranda-Baeza, A., D. Voltolina, M. A. Brambilla-Gámez, M. G. Frías-Espericueta, J. Simental. 2007. Effluent characteristics and nutrient loading of a semi intensive shrimp farm in NW Mexico. *Vie. Milieu.* 57(1–2): 21–27.
- Miranda, F. R., R. N. Lima, L. A. Crisóstomo, and M. G. S. Santana. 2008. Reuse of inland low-salinity shrimp farm effluent for melon irrigation. *Aquacult. Eng.* 39: 1-5.
- Moreira de Souza, D., S. Medeiros-Suita, F. P. Leivas-Leite, L. A. Romano, W. Wasielesky, and L. E. Cupertino-Ballester. 2012. The use of probiotics during the nursery rearing of the pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817) in a zero exchange system. *Aquac. Res.* 43: 1828-1837.
- Rakocy, J. E., D. S. Bailey, R. C. Shultz, and E. S. Thoman. 2004. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In *New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Held September, 12-16 pp.*
- Ramírez, C. J., B. Moreno, y E. Murillo. 2001. Evaluación agronómica industrial de siete variedades de albahaca en la zona cafetalera colombiana. *Cenicafé* 52: 117-126.
- Ramírez, D., D. Sabogal, P. Jiménez, y H. G. Hurtado. 2008. La acuaponia: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Rev. Fac. Cienc. Bás.* 4: 32-51.

- Reyes-Pérez, J. J., B. Murillo-Amador, A. Nieto-Garibay, E. Troyo-Diéguez, M. Reynaldo-Escobar, E. O. Rueda-Puente, y J. L. García-Hernández. 2013. Tolerancia a la salinidad en variedades de albahaca (*Ocimum basilicum*) en las etapas de germinación, emergencia y crecimiento inicial. Univ. Cienc. Trópico Húm. 29; 101-112.
- Ronzón-Ortega, M., M. P. Hernández-Vergara, y I. Pérez-Rostro. 2012. Producción hidropónica y acuapónica de albahaca (*Ocimum basilicum*) y langostino malayo (*Macrobrachium rosenbergii*). Trop. Subtrop. Agroeco 15: S63-S71.
- Roosta, H. R. 2014. Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic:aquaponic solution. J. Plant. Nutr. 37 (11): 1782-1803.
- Roy , L. A., D. A. Davis, I. P. Saoud, C. A. Boyd, H. J. Pine, and C. E. Boyd. 2010. Shrimp culture in inland low salinity waters. Rev. Aquacult. 2: 191-208.
- Ruiz-Fernandez, A. C. and F. Páez-Osuna. 2004. Comparative survey of the influent and effluent water quality of shrimp ponds on Mexican farms. Water. Environ. Res. 76: 5–14.
- Samocha, T. M., A. L. Lawrence, C. A. Collins, F. L. Castille, W. A. Bray, C. J. Davies, P. G. Lee, and G. F. Wood. 2004. Production of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in high density greenhouse enclosed raceways using low salinity groundwater. J. Appl. Aquacult. 15: 1-19.
- Samocha, T. M., A. L. Lawrence, and D. Pooser. 1998. Growth and survival of juvenile *Penaeus vannamei* in low salinity water in a semi-closed recirculating system. Isr. J. Aquacult. 50: 55-59.
- Samperio-Ruiz, G. 2000. Hidroponia Comercial. Ed. DIANA, México, D.F.
- Saoud, I.P., D. A. Davis, and D. B. Rouse. 2003. Suitability studies of inland well waters for *Litopenaeus vannamei* culture. Aquaculture 217: 373–383.
- Van Wyk, P. M. 1999. Principles of recirculating system design. En: Florida Department of Agriculture and Consumer Services (Ed.) Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems. USA.

- Wudtisin, I. and C. E. Boyd. 2011. Possible potassium and magnesium limitations for shrimp survival and production in low-salinity ponds water in Thailand. *J. World. Aquacult. Soc.* 42: 766–777.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall, New York, USA.

CAPÍTULO 3 . USO DEL EFLUENTE DE CULTIVO DE CAMARÓN (*Penaeus vannamei*) EN AGUA DE BAJA SALINIDAD PARA LA PRODUCCIÓN Y MANEJO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*) ACUAPÓNICA

3.1. RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso del efluente del cultivo de camarón en la producción de dos variedades de lechuga (*Lactuca sativa*, var. *Parris Island* (PI); y var. *Tropicana M1* (TM1)) usando dos fuentes de agua de baja salinidad (1.7 g L^{-1} o 2.7 dS m^{-1}) en un sistema acuapónico a escala experimental. Se construyeron seis camas hidropónicas (sistemas DFT, por sus siglas en inglés “Deep Flow System”) para la producción de lechuga, cada sistema DFT se conectó a un tanque para el cultivo de camarón (3.14 m^3), un sedimentador (180 L) y un filtro biológico (120 L). Se probaron dos tratamientos: agua subterránea (AS) y agua de mar diluida (AMD). Se construyeron tres camas adicionales para la producción de lechuga usando solución hidropónica nutritiva como tratamiento control (TC). Se realizaron dos ciclos de cultivo de 30 días cada uno. Durante el primer ciclo, altura, peso y rendimiento de PI y TM1 fue significativamente ($P < 0.05$) mayor en AMD con respecto a AS; Sin embargo, el peso y rendimiento en AMD no presentó diferencias significativas ($P > 0.05$) con TC. Durante el segundo ciclo de cultivo, ambas variedades de lechuga cosechadas en TC mostraron crecimientos y rendimientos significativamente ($P < 0.05$) mayor que los tratamientos de prueba. Se concluye que el uso del efluente del cultivo de camarón en aguas de baja salinidad (1.7 g L^{-1}) es factible. Ventajas y necesidades de investigación sobre el uso del efluente de cultivo de camarón para la producción de lechuga son discutidas.

3.2. ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the use of shrimp tank effluent on the production of two varieties of lettuce (*Lactuca sativa*, var. *Parris Island* (PI); and var. *Tropicana M1* (TM1)) using two sources of low-salinity water (1.7 g L^{-1} or 2.7 dS m^{-1}) in an experimental scale aquaponics system. Six hydroponic grow beds (deep flow technique

systems, DFT) for lettuce production were constructed, each hydroponic bed was connected to one tank for shrimp production (3.14 m³), a settlement tank (180 L) and one biological filter (120 L). Two treatments were tested in triplicate: groundwater (GW) and diluted seawater (DSW). Three additional hydroponics systems were constructed to grow lettuce using a nutritive hydroponic solution as the control treatment (CT). Two cycles of 30 days each were carried out. During the first crop cycle, height, weight and yield of PI and TM1 lettuce were significantly ($P < 0.05$) higher in the DSW treatment than GW treatment, but weight and yield of DSW module not exhibited differences ($P > 0.05$) with the control. During the second crop cycle, both varieties of lettuce (PI and TM1) harvested from the control showed significant ($P < 0.05$) higher production variables than those from the treatments. We conclude that it is feasible use the shrimp culture low-salinity (1.7 g L⁻¹) effluent for lettuce production. Advantages and research needs of the use of shrimp farm effluent for the lettuce production are discussed.

3.3. INTRODUCCIÓN

El cultivo de camarón tradicional ha sido criticado debido a las importantes tasas de recambio para mantener la calidad del agua aceptable para el crecimiento del camarón y por la descarga de efluentes enriquecidos con nutrientes y materia orgánica, los cuales pueden contribuir a la contaminación de los ecosistemas acuáticos receptores (Páez-Osuna, 2001; Cardoso-Mohedano *et al.*, 2018). Una manera de reducir estos impactos ambientales es mediante la integración del cultivo de camarón con la agricultura a través de la irrigación de plantas en suelo o en acuaponia; usando plantas halófitas en el caso de cultivos de camarón en agua marina y salobre (Johnston *et al.*, 2000; Moroyoqui-Rojo *et al.*, 2012; Doncato and Costa, 2017; Pinheiro *et al.*, 2017), o con hortalizas cuando se emplea aguas dulces y de baja salinidad (McIntosh *et al.*, 2003, Miranda *et al.*, 2008; Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012; Fierro-Sañudo *et al.*, 2015; 2018). De acuerdo con la FAO (2018), actualmente el 15.2% de la producción mundial de camarón de cultivo se logra en condiciones de agua dulce y baja salinidad, brindando opciones para acoplar el cultivo de camarón con una diversidad de plantas, al mismo tiempo de maximizar el uso del agua y minimizar el impacto ambiental.

Es de suma importancia generar información sobre plantas potenciales que puedan adecuarse para la integración con el cultivo de camarón. La lechuga es una de las plantas mayormente producidas en acuaponia (Love *et al.*, 2015). Esta planta ha sido acoplada anteriormente con diferentes cultivos de peces, tales como la anguila europea *Anguilla anguilla* (Chaves *et al.*, 2000), bacalao Murray, *Maccullochella peelii peelii* (Lennard y Leonard, 2004; 2006), Esturión bester (Dediu *et al.*, 2012), tilapia nilótica, *Oreochromis niloticus* (Pantanella *et al.*, 2012; Pinho *et al.*, 2017b), trucha arco iris, *Oncorhynchus mykiss* (Buzby *et al.*, 2017) y gourami, *Osphronemus goramy* (Purwandari *et al.*, 2017). Recientemente, algunas plantas han sido acopladas con el cultivo de camarón, incluyendo el tomate usando agua subterránea (Mariscal-Lagarda *et al.* 2012; 2014) y albahaca usando agua de mar diluida y agua subterránea (Fierro-Sañudo *et al.* 2018). En un estudio preliminar, Fierro-Sañudo *et al.* (2015) mostraron el potencial de la integración del cultivo de camarón con lechuga, obteniendo resultados promisorios. Basado en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de dos diferentes efluentes (agua subterránea, AS y agua de mar diluida, AMD) de cultivo de camarón en la producción de dos variedades de lechuga (PI y MT1) en acuaponia a escala experimental ambas a una salinidad de 1.7 g L⁻¹.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el módulo experimental YK localizado (23° 12' 11.9" N, 106° 25' 41.29" O) en Mazatlán, Sinaloa, México. El experimento se realizó bajo casa sombra (50 m², 3-5 m altura), con cubierta de malla a una reducción de luminosidad del 20%.

3.4.1. Sistema experimental

El sistema experimental consistió de seis tanques para el cultivo de camarón (2 m diámetro x 1.2 m altura, con un volumen de trabajo de 3.14 m³ cada uno), tres tanques fueron llenados con AS a una salinidad de 1.7 g L⁻¹ (conductividad eléctrica, EC 2.7 dS m⁻¹) extraída de una granja de camarón localizada al sur de Sinaloa, y los otros tres fueron llenados con agua de mar diluida a la misma salinidad preparada con agua de mar (34 g L⁻¹) y agua de la red pública (0.2 g L⁻¹). El perfil iónico de ambas fuentes de

agua se muestra en el Cuadro 3.1. Cada tanque se conectó a un sedimentador de 180 L, un filtro biológico de 120 L y un sistema DFT para el cultivo de lechuga. El sistema DFT consistió en una cama hidropónica construida con bloques de cemento y cubierta plástica (3.0 m largo x 1.0 m ancho x 0.2 m altura, 3 m²) con pendiente del 1% (Figura 3.1). Tres sistemas DFT adicionales fueron construidos para el cultivo de lechuga usando solución hidropónica nutritiva propuesta por Marulanda-Tabares (1999) como tratamiento control. La aireación fue provista por un soplador de 1 HP y manguera porosa, el flujo utilizado en el sistema acuapónico fue de 2 L min⁻¹.

Cuadro 3.1. Potencial de hidrógeno (pH) y componentes mayoritarios de las fuentes de agua utilizadas para la producción de lechuga mediante el uso de los efluentes del cultivo de camarón.

Variable	AS	AMD	Unidades
pH	8.4±0.1	8.6±0.2	-
Cl ⁻	706±128	986 ^a	mg L ⁻¹
Mg ⁺²	179±22	70 ^a	mg L ⁻¹
K ⁺	16.7±1.4	19.1 ^a	mg L ⁻¹
Ca ⁺²	61.4±13.1	20.8 ^a	mg L ⁻¹
Na ⁺	252±18	545 ^a	mg L ⁻¹
Alcalinidad como CaCO ₃	171±13	-	
EC	2.6±0.2	2.7±0.2	dS m ⁻¹
Ratios			
Na/K	15.1	28.5	
Ca/K	3.7	1.1	
Mg/Ca	2.9	3.4	

^aCalculado a partir de los factores propuestos por Roy *et al.* (2010).

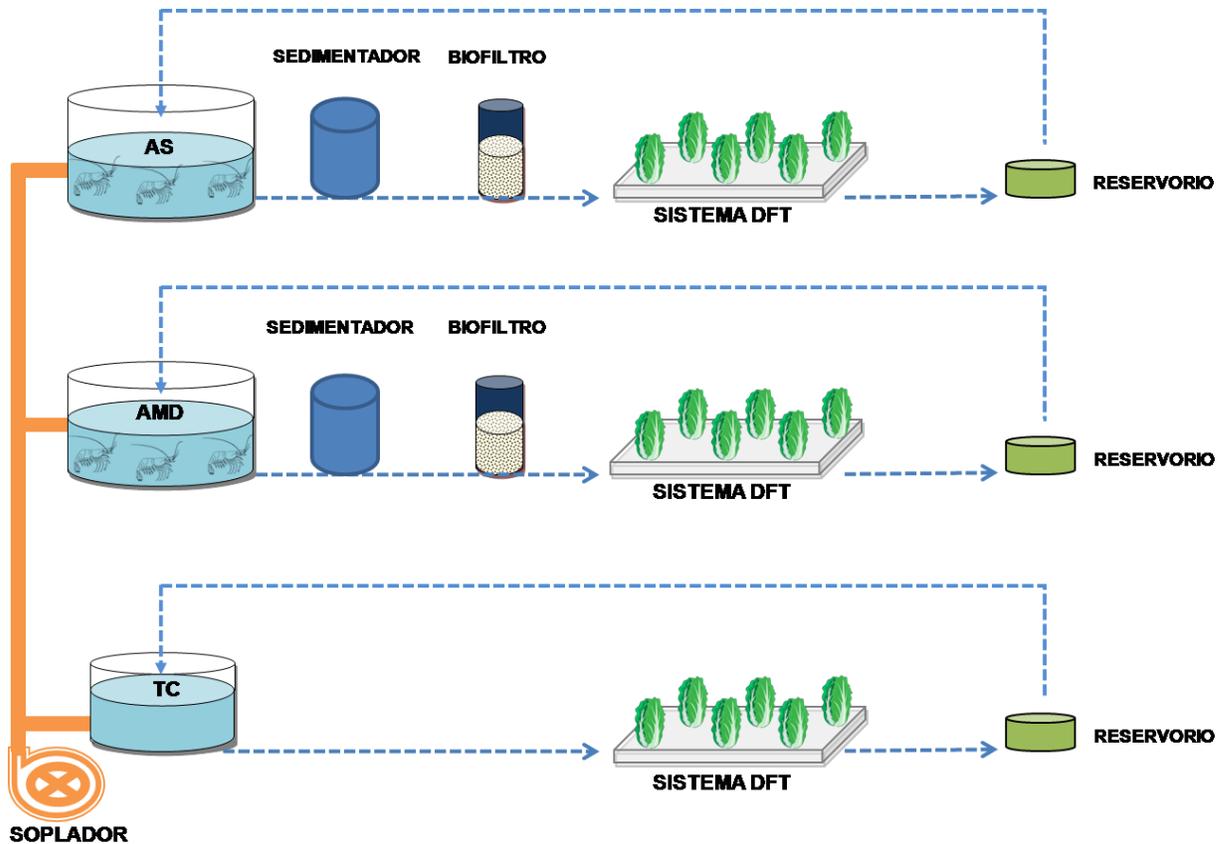


Figura 3.1. Sistema experimental propuesto para el uso del efluente del camarón en la producción de dos variedades de lechuga.

3.4.2. Análisis químico del agua

Se tomaron muestra de agua al momento del llenado de los sistemas acuapónicos para su posterior análisis en el laboratorio. Inicialmente, las muestras fueron filtradas usando filtros Whatman GF/F, el agua filtrada se colocó en botellas plásticas (120 mL) y fueron transportadas al laboratorio a 4 °C. Las muestras se analizaron por duplicado para Cl^- , Mg^{+2} , K^+ , Ca^{+2} , Na^+ y alcalinidad total usando técnicas estandarizadas (APHA, 2012). El pH y EC fueron determinados con un potenciómetro HANNA Instruments modelo HI 98129. La salinidad fue calculada multiplicando los valores de EC (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25 °C) por el factor propuesto por Boyd (2002) de 0.00063. El oxígeno disuelto (DO) y la temperatura fueron medidos con un oxímetro YSI modelo 58. El pH, temperatura, DO y CE fueron analizados diariamente, dos veces al día (6:00 y 18:00). La precisión de cada ión mayoritario varió de 3.5 a 7.8%, mientras la precisión del pH,

EC y DO fue 2.2, 4.1 y 5.5 %, respectivamente. La calibración del potenciómetro se realizó usando buffers de pH 4.01 (Orion 910104, Thermo Scientific) y 7.01 (Orion 910110, Thermo Scientific), y una solución calibradora para EC de $1413 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 25 °C (HANNA Instrument).

3.4.3. Cultivo de camarón

Las postlarvas previamente aclimatadas a los niveles de EC deseadas (Van Wyk, 1999) se sembraron a una densidad de 75 PL m^{-2} . Se realizaron dos cultivos, el primero (PL-58, peso promedio 0.69 g) tuvo una duración de 50 días, el camarón se cosechó pero se mantuvo el agua en el sistema acuapónico y después de 15 días se comenzó con el segundo ciclo (PL-39, peso promedio 0.30g) el cual tuvo una duración de 90 días. Las primeras dos semanas de cada ciclo de cultivo, la alimentación se realizó desde las orillas de los tanques con alimento balanceado Camaronina (35% proteína, 3.5% lípidos, 5% fibra, 11% cenizas, 12% humedad; Nestlé Purina, St. Louis Missouri, USA) tres veces al día. El resto del ciclo de cultivo, los camarones fueron alimentados usando comederos (dos comederos por tanque) empleando el mismo alimento balanceado, tres veces al día. La ración de alimento se ajustó considerando el remanente observado en los comederos y la biomasa (desde el 10 hasta 2% de la biomasa total) (Cook y Clifford, 1997). Previamente, el cultivo de camarón estuvo acoplado con albahaca durante 115 días, cuando la temperatura ambiental disminuyó, las plantas de albahaca se cosecharon y las plántulas de lechuga se trasplantaron a sus respectivos sistemas DFT.

3.4.4. Cultivo de lechuga

Se evaluaron dos variedades de lechuga en el presente trabajo, PI y TM1. Las plántulas de lechuga (10-15 cm de altura) se pusieron a flotar sobre hojas de poliestireno (1.0 m largo X 1.0 m ancho X 2.5 cm de grosor) a una densidad de 16 plantas m^{-2} . CT fue sembrado a la misma densidad de siembra de los tratamientos acuapónicos. Se realizaron dos cultivos de 30 días cada uno. Al final de cada ciclo, las plantas fueron pesadas y medidas individualmente, el total de hojas fue contabilizado y se estimó el rendimiento (kg m^{-2}) obtenido.

3.4.5. Análisis estadístico

Los datos de producción y concentración de nutrientes fueron sujetos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza para comprobar si los datos presentaban una distribución normal. Los datos de producción fueron analizados mediante una ANOVA de dos vías, seguido de una prueba *posteriori* de Tukey. La comparación de las variables de producción entre los dos ciclos de cultivo y las concentraciones de nutrientes se llevo a cabo mediante la prueba U de Mann-Whitney. Los análisis se realizaron con el software Statistica 7 (Statsoft Inc., Tulsa, USA) con un intervalo de confianza del 95% (Zar, 2010).

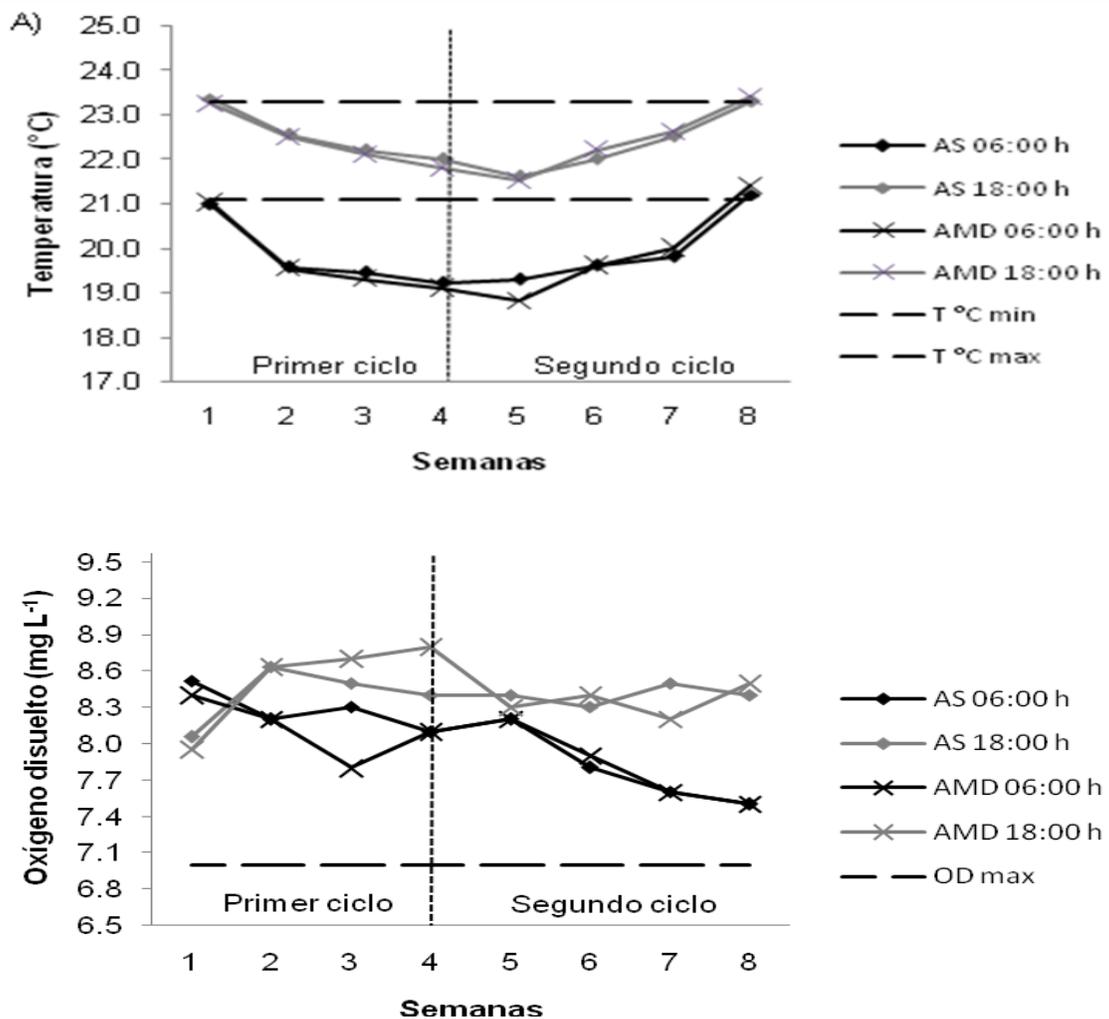
3.5. RESULTADOS

El pH y los iones mayoritarios de las dos fuentes de agua usadas en el presente trabajo se resumen en el Cuadro 3.1. Los valores de pH registrados en ambas fuentes de agua fueron 8.4 ± 0.1 para AS y 8.6 ± 0.2 para AMD. AS mostró mayores concentraciones de Mg^{+2} y Ca^{+2} y menores concentraciones de Cl^{-} , K^{+} y Na^{+} con respecto a AMD. Las relaciones iónicas Na/K y Mg/Ca en AS fueron menores que en AMD, el resultado opuesto para la relación iónica Ca/K. las variaciones de pH, DO y temperatura a lo largo de los ciclos de cultivo se muestran en la Figura 3.2, los valores registrados fueron comparables entre tratamientos. Los valores más altos se registraron a las 18:00 h (con excepción del DO en la semana 1).

El crecimiento y rendimiento del camarón cultivado en ambas fuentes de agua fueron comparables, para AS el peso individual promedio y rendimiento fueron 8.7 y 9.1 g, 0.5 y 0.6 $kg\ m^{-2}$ (5 y 6 $t\ ha^{-1}$) para el primer y segundo ciclo, respectivamente. Información adicional sobre el desarrollo del cultivo de camarón está descrita en Fierro-Sañudo et al. (2018).

Los datos de producción de ambos ciclos de cultivo de lechuga se presentan en el Cuadro 3.2. Durante el primer ciclo de cultivo, cuando las concentraciones de nutrientes en AMD son más elevadas que en AS (Cuadro 3.4), las variables de producción en PI fueron significativamente ($P < 0.05$) mayores en AMD con respecto a AS y TC; mientras que en la variedad TM1, no se encontraron diferencias significativas en las variables de producción entre AMD y TC. Durante el segundo ciclo de cultivo,

cuando los nutrientes (Cuadro 3.4) tanto en AMD como AS son más altos que en el primer ciclo, ambas variedades de lechuga cosechadas en TC presentaron crecimientos y rendimientos significativamente ($P < 0.05$) más altos que los tratamientos de prueba. Ambas variedades en AS y AMD no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre ellas. Aparentemente las diferentes fuentes de agua con respecto a los iones mayoritarios encontrados (Cuadro 3.1) no tuvieron efecto en el crecimiento y rendimiento de ambas variedades de lechuga en el segundo ciclo de cultivo.



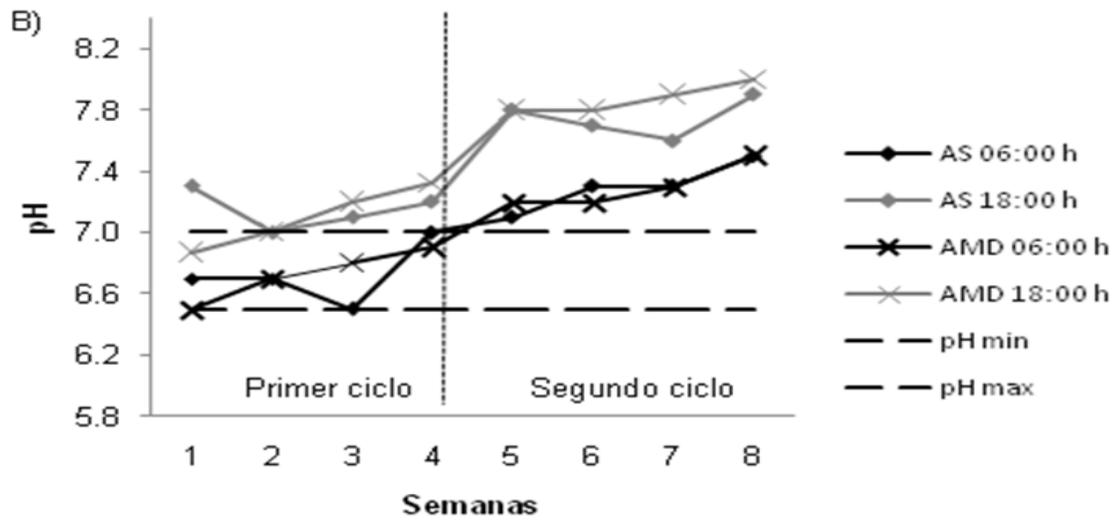


Figura 3.2. Variación de la temperatura (A), pH (B) y oxígeno disuelto (C) medidos en los tanques de cultivo de camarón durante los dos ciclos de lechuga. Líneas punteadas horizontales se refieren a los valores óptimos en acuaponía (Nelson, 2008).

Cuadro 3.2. Datos de producción de lechuga (PI y TM1) utilizando el efluente del cultivo de camarón.

	PI			TM1		
	AS	AMD	TC	AS	AMD	TC
Primer ciclo de cultivo						
Altura (cm)	25.3±3.2 ^{b,1}	28.5±3.9 ^{a,1}	23.8±2.3 ^{b,1}	21.5±2.9 ^{a,2}	24.7±2.0 ^{a,2}	23.7±1.9 ^{a,1}
Peso (g)	148.0±27.0 ^{b,1}	220.3±55.0 ^{a,1}	170.5±22.9 ^{b,1}	112.5±27.8 ^{b,2}	169.7±25.9 ^{a,2}	148.1±21.5 ^{a,1}
Número de hojas	20.0±2.9 ^{b,1}	21.8±3.3 ^{b,1}	25.1±1.7 ^{a,1}	15.3±1.9 ^{b,2}	18.3±3.0 ^{ab,2}	19.8±2.2 ^{a,2}
Rendimiento (kg m ⁻²)	2.4±0.4 ^{b,1}	3.4±0.9 ^{a,1}	2.8±0.4 ^{b,1}	1.8±0.4 ^{b,2}	2.7±0.4 ^{a,2}	2.4±0.3 ^{ab,1}
Segundo ciclo de cultivo						
Altura (cm)	27.8±1.8 ^{b,1}	22.2±3.5 ^{b,1}	31.4±1.7 ^{a,1}	20.6±1.9 ^{b,2}	18.5±1.0 ^{b,2}	25.5±2.6 ^{a,2}
Peso (g)	145.0±21.1 ^{b,1}	108.3±56.3 ^{b,1}	241.9±40.9 ^{a,1}	135.8±26.6 ^{b,1}	103.7±40.7 ^{b,1}	201.4±47.0 ^{a,1}
Número de hojas	15.0±1.5 ^{b,1}	18.1±2.6 ^{ab,1}	20.9±3.4 ^{a,1}	13.8±2.0 ^{b,1}	15.1±2.1 ^{b,1}	21.6±2.4 ^{a,1}
Rendimiento (kg m ⁻²)	2.3±0.3 ^{b,1}	1.7±0.9 ^{b,1}	3.8±0.6 ^{a,1}	2.2±0.4 ^{b,1}	1.7±0.6 ^{b,1}	3.2±0.7 ^{a,1}

Medias con letras diferentes (^{a,b}) entre tratamientos son estadísticamente significativas (P<0.05) para cada variable de una misma variedad de lechuga; similarmente, para cada variable y misma fuente de agua, medias con letras diferentes (^{1,2}) son significativamente diferentes (P<0.05) entre las variedades PI y TM1.

Cuadro 3.3. Comparación de la producción entre ciclos de cultivo.

	PI			TM1		
	AS	AMD	TC	AS	AMD	TC
Primer ciclo de cultivo						
Altura (cm)	25.3±3.2 ^b	28.5±3.9 ^a	23.8±2.3 ^b	21.5±2.9 ^a	24.7±2.0 ^a	23.7±1.9 ^b
Peso (g)	148.0±27.0 ^a	220.3±55.0 ^a	170.5±22.9 ^b	112.5±27.8 ^b	169.7±25.9 ^a	148.1±21.5 ^b
Número de hojas	20.0±2.9 ^a	21.8±3.3 ^b	25.1±1.7 ^a	15.3±1.9 ^a	18.3±3.0 ^a	19.8±2.2 ^b
Rendimiento (kg m ⁻²)	2.4±0.4 ^a	3.4±0.9 ^a	2.8±0.4 ^b	1.8±0.4 ^a	2.7±0.4 ^a	2.4±0.3 ^b
Segundo ciclo de cultivo						
Altura (cm)	27.8±1.8 ^a	22.2±3.5 ^b	31.4±1.7 ^a	20.6±1.9 ^a	18.5±1.0 ^b	25.5±2.6 ^a
Peso (g)	145.0±21.1 ^a	108.3±56.3 ^b	241.9±40.9 ^a	135.8±26.6 ^a	103.7±40.7 ^b	201.4±47.0 ^a
Número de hojas	15.0±1.5 ^b	18.1±2.6 ^b	20.9±3.4 ^b	13.8±2.0 ^a	15.1±1.1 ^b	21.6±2.4 ^a
Rendimiento (kg m ⁻²)	2.3±0.3 ^a	1.7±0.9 ^b	3.8±0.6 ^a	2.2±0.4 ^a	1.7±0.6 ^b	3.2±0.7 ^a

Medias con letras diferentes (^{a,b}) entre la misma variedad de lechuga y fuente de agua son estadísticamente significativas (P<0.05).

Cuadro 3.4. Concentración promedio de los nutrientes en los dos ciclos de producción de lechuga utilizando el efluente del cultivo de camarón.

Variable	Primer ciclo de cultivo	
	AS	AMD
NAT-N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	13.8±6.8 ^{a,m}	27.8±11.6 ^{a,m}
NO ₂ -N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	2.8±1.1 ^{b,n}	18.8±16.7 ^{a,m}
NO ₃ -N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	488.9±155.7 ^{a,m}	640.4±139.4 ^{a,m}
PO ₄ -P ($\mu\text{g L}^{-1}$)	82.0±76.3 ^{a,n}	133.4±61.9 ^{a,m}
	Segundo ciclo de cultivo	
	AS	AMD
NAT-N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	31.1±20.8 ^{a,m}	37.8±22.1 ^{a,m}
NO ₂ -N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	32.4±5.5 ^{a,m}	19.9±3.5 ^{b,m}
NO ₃ -N ($\mu\text{g L}^{-1}$)	668.4±241.8 ^{a,m}	587.0±168.5 ^{a,m}
PO ₄ -P ($\mu\text{g L}^{-1}$)	261.84±29.8 ^{a,m}	210.7±103.0 ^{a,m}

Medias con letras diferentes (^{a,b}) entre columnas son significativamente diferentes ($P<0.05$); similarmente, dentro de cada fuente de agua, medias con letras diferentes (^{m,n}) son significativamente diferentes ($P<0.05$) entre el primer y segundo ciclo de cultivo.

3.6. DISCUSIÓN

Los estudios obtenidos en este estudio son promisorios y demuestran la factibilidad de la producción de lechuga acoplado al cultivo de camarón usando agua de baja salinidad. Los rendimientos obtenidos son comparables con aquellos encontrados en la literatura científica donde otros organismos acuáticos fueron integrados (Cuadro 3.5) con cultivos de lechuga. El peso individual promedio y el rendimiento de PI en AS no difiere estadísticamente ($P > 0.05$) entre el primer y segundo ciclo de cultivo (Cuadro 3.3); en AMD, el peso individual promedio y el rendimiento fueron significativamente ($P < 0.05$) mayor en el primer ciclo de cultivo comparado con el segundo ciclo, caso contrario para TC. Este patrón es replicado en la variedad TM1. Los valores de temperatura, pH y DO registrados en los tanques de cultivo de camarón fueron comparables entre tratamientos (Figura 3.2).

Aunque estas variables no se midieron directamente en los sistemas DFT, estas pudieron haber influenciado las diferencias observadas en los patrones de la producción de lechuga en los tratamientos de prueba. Asumiendo que el pH medido en los tanques de cultivo de camarón fuera similar en los sistemas DFT, es evidente que el pH (6:00 y 18:00 h) durante el segundo ciclo de cultivo se encontraron valores fuera del rango óptimo propuesto para acuaponía (Nelson, 2008) en AS y AMD, siendo más evidente en el tratamiento AMD. Por lo tanto, tales fluctuaciones del pH en el efluente podrían ser la causa de la reducción significativa del rendimiento y otras variables relacionadas con la lechuga producida en el tratamiento con AMD. El pH óptimo propuesto por Nelson (2008) (6.5 a 7.0) corresponde a los rangos óptimos para los tres principales componentes bióticos del sistema acuapónico; plantas, bacterias y animales acuáticos.

La concentración de nutrientes (NO_3^- -N) encontrada en el presente estudio (0.49-0.69 mg L^{-1}) son comparables con aquellos encontrados en cultivos acuapónicos con lechuga. Pinho *et al.* (2017b) registró concentraciones de NO_3^- -N de 0.1 mg L^{-1} en un sistema híbrido de acuaponía y tecnología biofloc con tilapia *O. niloticus* y tres variedades de lechuga *L. sativa* (lechuga roja, lechuga mantecosa y lechuga crispada).

Cuadro 3.5. Rendimientos y peso individual promedio de diferentes tipos de lechuga *L. sativa* cultivada en acuaponia.

Tipo de lechuga	Animal acuático	EC (dS m ⁻¹)	Días de cultivo	Peso final (g)	Rendimiento (kg m ⁻²)	Referencia
-	Anguila (<i>A. anguilla</i>)	(-)	35	155.2	(-)	Chaves <i>et al.</i> (2000)
-	Anguila (<i>A. anguilla</i>)	(-)	35	156.0	(-)	Chaves <i>et al.</i> (2001)
Green Oak	Bacalao (<i>M. peellii peellii</i>)	0.24–0.38	21	113.4	4.3	Lennard y Leonard (2004)
Green Oak	Bacalao (<i>M. peellii peellii</i>)	0.20–0.27	21	129.9	4.9	Lennard y Leonard (2004)
Green Oak	Bacalao (<i>M. peellii peellii</i>)	0.19–0.36	21	131.9	5.1	Lennard y Leonard (2006)
Green Oak	Bacalao (<i>M. peellii peellii</i>)	0.17–0.42	21	116.9	4.5	Lennard y Leonard (2006)
Green Oak	Bacalao (<i>M. peellii peellii</i>)	0.16–0.38	21	107.9	4.1	Lennard y Leonard (2006)
-	Esturión (-)	0.57	21	84.5–84.9	3.8	Dediu <i>et al.</i> (2012)
-	Esturión (-)	0.57	21	74.3–77.7	3.3–3.5	Dediu <i>et al.</i> (2012)
Lechuga romana 'Integral'	Tilapia (<i>O. niloticus</i>)	0.40–0.50	21	118.6–283.3	2.3–5.7	Pantanella <i>et al.</i> (2012)
Lechuga romana 'Integral'	Tilapia (<i>O. niloticus</i>)	0.60–1.00	21	135.3–285.2	2.7–5.7	Pantanella <i>et al.</i> (2012)
PI	Camarón (<i>P. vannamei</i>)	3.1	48	280.2	1.7	Fierro-Sañudo <i>et al.</i> (2015)
'Red Sails'	Trucha arcorirs (<i>O. mykiss</i>)	0.16	84	(-)	4.5	Buzby <i>et al.</i> (2017)

'Grosse Blonde Paresseuse'	Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	0.72–1.24	(-)	175.1	2.4	Delaide <i>et al.</i> (2017)
-	Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	(-)	21	20.1–80.3	0.6–1.9	Pinho <i>et al.</i> (2017)
-	Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	(-)	21	9.2–63.0	0.3–1.0	Pinho <i>et al.</i> (2017)
<i>var. longifolia</i>	Gourami (<i>O. goramy</i>)	(-)	35	85.0–89.4	(-)	Purwandari <i>et al.</i> (2017)
PI	Camarón (<i>P. vannamei</i>)	2.70	30	145.0–148.0	2.3–2.4	Presente estudio-AS
PI	Camarón (<i>P. vannamei</i>)	2.70	30	151.7–220.3	2.3–3.3	Presente estudio-AMD
TM1	Camarón (<i>P. vannamei</i>)	2.70	30	135.8–112.5	1.9–2.2	Presente estudio-AS
TM1	Camarón (<i>P. vannamei</i>)	2.70	30	139.2–169.7	2.2–2.6	Presente estudio-AMD

(-) Información no especificada.

Fierro-Saludo *et al.* (2015) estimaron concentraciones de NO_3^- -N de 0.71 mg L^{-1} en un sistema acuapónico con camarón *P. vannamei*, tomate *Solanum lycopersicum* L. y lechuga *L. sativa*. Porwandari *et al.* (2017) encontraron concentraciones de NO_3^- -N de $0.36\text{-}0.42 \text{ mg L}^{-1}$ en un cultivo acuapónico con gourami *Osphronemus goramy* y lechuga *L. sativa* var. *longifolia*. Es importante resaltar, que a pesar de los bajos niveles de biomasa utilizados en el presente trabajo, la lechuga registró tasas de crecimiento aceptables, esto da pauta para en el futuro cercano realizar estudios con mayores densidades de siembra de camarón.

El Cuadro 3.5 muestra datos de producción de lechuga acoplada con diferentes animales acuáticos para propósitos comparativos. Lennard y Leonard (2004) estimaron rendimientos de 4.3 y 4.9 kg m^{-2} de lechuga 'hoja de roble verde' en 21 días de cultivo integrado al bacalao Murray. Buzby *et al.* (2017) encontraron un rendimiento de 4.5 kg m^{-2} de lechuga 'red sails' en un sistema acuapónico con trucha arcoíris, y Delaide *et al.* (2017) obtuvieron un rendimiento de 2.4 kg m^{-2} de lechuga var. *Capitata* cv. en un sistema acuapónico con tilapia nilótica. Pinho *et al.* (2017b) evaluaron el efecto del efluente derivado de un cultivo de tilapia con biofloc en la producción de tres variedades de lechuga *L. sativa*: lechuga roja, lechuga mantecosa y lechuga crispada, encontrando rendimientos de 0.56 , 1.94 y 1.36 kg m^{-2} , respectivamente. En un estudio preliminar, Fierro-Sañudo *et al.* (2015) estimaron la producción de lechuga *L. sativa* var. *Parris Island* en un cultivo integrado de camarón *P. vannamei* usando agua de mar diluida a 1.9 g L^{-1} de salinidad (3.1 dS m^{-1} de EC); después de cosechar el camarón, el agua se mantuvo en los tanques de cultivo y las plantas de lechuga se pusieron a flotar dentro de los tanques durante 48 días, el rendimiento alcanzado fue de 1.7 kg m^{-2} .

Es importante resaltar que los niveles de EC empleados en el presente estudio (2.7 dS m^{-1}) son más altos comparados con la mayoría de los estudios compilados en el Cuadro 3.5, no obstante los rendimientos de lechuga registrados son comparables y aceptables. Resh (1995) indica que el rendimiento promedio de lechuga en hidroponía es 2.3 kg m^{-2} .

La salinidad del agua es un factor muy importante para el éxito de ambos cultivos. *P. vannamei* puede crecer y sobrevivir en aguas con salinidades desde 0.5 hasta 40 g L^{-1} (Van Wyk, 1999), pero diferentes autores concuerdan que en aguas con salinidad por

debajo de 2 g L^{-1} el cultivo podría presentar riesgos y consecuentemente disminuir la supervivencia del camarón (Lester y Pante, 1992; Laramore *et al.*, 2001; Boyd *et al.*, 2010); por otro lado, de acuerdo con Bernstein *et al.* (1974) el máximo valor permisible de EC para el cultivo de lechuga es 1.3 dS m^{-1} (0.82 g L^{-1} de salinidad) y el rendimiento decrece un 13% por cada 1 dS m^{-1} en incremento de la EC, entonces es importante establecer un valor de conductividad eléctrica (salinidad) donde ambas especies involucradas logren niveles aceptables de producción. A partir de estos resultados, se puede recomendar realizar el co-cultivo camarón-lechuga en un rango de salinidad de 1.7 a 2.0 g L^{-1} .

En México, el cultivo de camarón en agua dulce y baja salinidad se ha llevado a cabo desde el año 2000 a la fecha en el estado de Colima, y actualmente esta actividad también se desarrolla en otros estados, tales como Baja California, Jalisco, Hidalgo y Sinaloa, empleando aguas con salinidades tan bajas como 0.5 g L^{-1} y alcanzando rendimientos de hasta 10 t ha^{-1} (Angulo *et al.*, 2005; Godínez-Siordia *et al.*, 2011). Con base a lo anterior, es posible argumentar que los efluentes de estas granjas se pueden usar para la producción de lechuga con el fin de obtener solo un segundo producto. Alternativamente, el efluente del cultivo de camarón podría ser depurado con un sistema de recirculación hidropónico y minimizar los niveles de los compuestos del nitrógeno y fósforo y reducir las descargas a los ecosistemas aledaños. En conclusión, para ambos escenarios, la lechuga puede representar un ingreso extra mejorando las ganancias de los acuicultores.

3.7. CONCLUSIONES

A partir de este estudio, se concluye que es factible el uso del efluente de cultivo de camarón en agua de baja salinidad de 1.7 g L^{-1} (2.7 dS m^{-1}); AS y AMD para la producción de lechuga (variedades PI y TM1). El cultivo de camarón es considerado como el cultivo principal y la lechuga como un cultivo secundario, el cual constituye un plus al camarón cosechado. Con la integración del cultivo de lechuga, se pueden destacar tres ventajas: (i) los nutrientes contenidos en el efluente del cultivo de camarón son asimilados por las lechugas y convertidos en biomasa vegetal, (ii) se reduce la descarga de los efluentes del cultivo de camarón hacia los ecosistemas

acuáticos receptores, evitando los problemas causados por la adición de nutrientes, sales y materia orgánica, tal como la eutrofización y deterioro de la calidad del agua, y (iii) en un cultivo a escala comercial; los ingresos derivados de la venta de la lechuga pueden mejorar la rentabilidad del sistema de cultivo. Además, es de suma importancia evaluar el efecto del efluente del cultivo de camarón usando agua dulce y de baja salinidad en la producción y rendimiento en otras plantas de interés comercial, y evaluar si el cultivo integrado camarón-plantas puede ser rentable en una escala comercial.

3.8. LITERATURA CITADA

- Angulo, J. A., A. Mejía, y R. Engel. 2005. Cultivo experimental de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* en el valle del Mezquital, Hidalgo, México. Pan. Acuic. 10: 10-15.
- APHA (American Public Health Association). 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd edición. Port City Press, Baltimore, EUA.
- Bernstein, L., L. E. Francois, and R. A. Clark. 1974. Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables. Agron. J. 66: 412-421.
- Boyd, C. E. 2002. Standardize terminology for low-salinity shrimp culture. Global Aquacult. Advoc. 7(1): 58-59.
- Boyd, C. E., C. A. Boyd, and S. Chainark. 2010. Shrimp pond soil and water quality management. En: Alday-Sanz, V. (Ed). The shrimp book. Nottingham University Press, Nottingham, U.K. 281-304 pp.
- Buzby, K. M., T. P. West, N. L. Waterland, and L. S. Lin. 2017. Remediation of flow-through trout raceways effluent via aquaponics. N. Am. J. Aquac. 79(1): 53-60.
- Cardoso-Mohedano, J. G., J. Lima-Rego, J. A. Sánchez-Cabeza, A. C. Ruíz-Fernández, J. Canales-Delgadillo, E. I. Sánchez-Flores, and F. Páez-Osuna. 2018. Sub-tropical coastal lagoon salinization associated to shrimp ponds effluents. Estuar. Coast. Shelf Sci. 203: 72-79.

- Chaves, P. A., J. Beltrao, L. M. Laird, and R. Sutherland. 2001. Lettuce (*Lactuca sativa* sp.) response to fish culture effluent. En III International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 537, 705-708 pp.
- Chaves, P.A., L. M. Laird, R. Sutherland, and J. Beltrao. 2000. Assesment of fish culture water improvement through the integration of hydroponically grown lettuce. Water Sci. Technol. 42(1-2): 43-47.
- Cook, H. L. and H. C. Clifford. 1997. Feed management for semi-intensive shrimp culture: part 1. Aquacult. Mag. 23: 36-43.
- Dediu, L., V. Cristea, and Z. Xiaoshuan. 2012. Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. Afr. J. of Biotechnol. 11(9): 2349-2358.
- Delaide, B., G. Delhaye, M. Dermience, J. Gott, H. Soyeurt, and M. H. Jikakli. 2017. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. Aquacult. Eng. 78: 130-139.
- Doncato, K. B. and C. S. B. Costa. 2017. Growth and mineral composition of two lineages of the sea asparagus *Sarcocornia ambigua* irrigated with shrimp farm saline effluent. Exp. Agric. 54 (3): 399-416.
- Endut, A., A. Jusoh, N. Ali, W. B. Wan Nik, and A. Hassan. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. Bioresour. Technol. 101: 1511-1517.
- FAO. 2018. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/query/en>. (accesado en febrero, 2018).
- Fierro-Sañudo, J. F., S. G. Alarcón-Silvas, J. A. León-Cañedo, J. G. Gutierrez-Valenzuela, J. Ramírez-Rochín, M. M. Mariscal-Lagarda, M. A. Franco-Nava, R. Lizárraga-Jiménez, J. I. Osuna-López, and F. Páez-Osuna. 2015. Integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) using diluted seawater: management, production and water consumption. G. Adv. Res. J. Agric. Sci. 4(7): 315-324.
- Fierro-Sañudo, J. F., G. A. Rodríguez-Montes de Oca, J. A. León-Cañedo, S. G. Alarcón-Silvas, M. M. Mariscal-Lagarda, T. Díaz-Valdés, and F. Páez-Osuna.

2018. Production and management of shrimp (*Penaeus vannamei*) in co-culture with basil (*Ocimum basilicum*) using two sources of low-salinity water. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 46 (1): 1-9.
- Godínez-Siordia, D. E., M. C. Chávez-Medina, y S. Gómez-Jiménez. 2011. Acuicultura epicontinental del camarón blanco del Pacífico, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Trop. Subtrop. Agroeco.* 14(1): 55-62.
- Johnston, D., N. Van Trong, D. Van Tien, and T. T. Xuan. 2000. Shrimp yields and harvest characteristics of mixed shrimp-mangrove forestry farms in southern Vietnam: factors affecting production. *Aquaculture* 188: 263-284.
- Laramore, S., C. R. Laramore, and J. Scarpa. 2001. Effect of low salinity on growth and survival of postlarvae and juvenile *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquacult. Soc.* 32(4): 385-392.
- Lennard, W. A. and B. V. Leonard. 2004. A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. *Aquac. Int.* 12: 539-2004.
- Lennard, W. A. and B. V. Leonard. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquac. Int.* 14: 539-550.
- Lester, L. J. and M. J. R. Pante. 1992. Penaid temperature and salinity response. En: Fast, A.W. y J. L. Lester (Eds). *Marine shrimp culture: principles and practices.* Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 515-534 pp.
- Love, D. C., J. P. Fry, X. Li, E. S. Hill, L. Genello, K. Semmens, and R. E. Thompson. 2015. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435: 67-74.
- Mariscal-Lagarda, M. M. and F. Páez-Osuna. 2014. Mass balances of nitrogen and phosphorus an integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity water: A short communication. *Aquacult. Eng.* 58: 107-112.
- Mariscal-Lagarda, M. M., F. Páez-Osuna, J. L. Esquer-Mendez, I. Guerrero-Monroy, A. Romo Del Vivar, and R. Felix-Gastelum. 2012. Integrated culture of white shrimp

- (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum Mill*) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture* 336-367: 76-84.
- Marulanda-Tabares, C. H. 1999. Cultivos sin tierra: Hidroponía Familiar. Guía técnica. Proyecto Nacional de Hidroponía, MAG–PNUD. San Salvador, El Salvador.
- McIntosh, D., K. Fitzsimmons, J. Aguilar, and C. Collins. 2003. Toward integrating olive production with inland shrimp farming. *World Aquacult.* 34(1): 16-20.
- Miranda, F. R., R. N. Lima, L. A. Crisóstomo, y M. G. S. Santana. 2008. Reuse of inland low-salinity shrimp farm effluent for melon irrigation. *Aquac. Eng.* 39(1): 1-5.
- Moroyoqui-Rojo, L., F. Flores-Verdugo, G. Hernández-Carmona, M. Casas-Valdez, R. Cervantes-Duarte, and E. V. Nava-Sánchez. 2012. Nutrient removal using two species of mangroves (*Rhizophora mangle* and *Laguncularia racemosa*) in experimental shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds. *Cienc. Mar.* 38(2): 333-346.
- Nelson, R. L. 2008. Aquaponic food production, raising fish and plants for food and profit. Nelson and Pade, Inc, Montello, Wisconsin, USA.
- Páez-Osuna, F. 2001. The environmental impact of shrimp aquaculture: causes, effects, and mitigating alternatives. *Environ. Manag.* 28(1): 131-140.
- Pantarella, E., M. Cardarelli, G. Colla, E. Rea, and A. Marcucci. 2010. Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. En XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 927. 887-893 pp.
- Pinheiro, I., R. Arantes, C. M. do Espírito Santo, F. do Nascimento Vieira, K. R. Lapa, L. V. Gonzaga, and K. W. Seiffert. 2017. Production of the halophyte *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. *Ecol. Eng.* 100: 261-267.
- Pinho, S. M., G. L. de Mello, K. M. Fitzsimmons, and M. G. C. Emerenciano. 2017a. Integrated production of fish (pacu *Piaractus mesopotamicus* and red tilapia *Oreochromis* sp.) with two varieties of garnish (scallion and parsley) in aquaponic system. *Aquacult. Int.* 26(1): 99-112.

- Pinho, S. M., D. Molinari, G. L. de Mello, K. M. Fitzsimmons, and M. G. C. Emerenciano. 2017b. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecol. Eng.* 103: 146-153.
- Purwandari, Y., H. Effendi, and Y. Wardiatno. 2017. The use of gouramy (*Osphronemus goramy*) rearing wastewater for growing romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Longifolia*) in aquaponic system. *Asian J. Microbiol. Biotechnol. Environ. Sci.* 19(2): 121-128.
- Resh, H. M. 1995. *Hydroponic Food Production*. Woodbridge Press, San Ramón, California.
- Roy, L. A., D.A. Davis, P.I. Saoud, C.A. Boyd., H.J. Pine, and C. E. Boyd. 2010. Shrimp culture in inland low salinity waters. *Rev. Aquacult.* 2(4): 191-208.
- SIAP. 2018. http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/. (accesada en febrero. 2018).
- Van Wyk, P. M. 1999. Principles of recirculating system design. En: Florida Department of Agriculture and Consumer Services (Ed), *Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems*, Harbor Branch Oceanographic Institution, Florida, USA. 59-98 pp.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall, New York, USA.

CAPITULO 4. ANÁLISIS FINANCIERO DE UN CULTIVO ACUAPÓNICO DE CAMARÓN BLANCO (*Penaeus vannamei*) Y HORTALIZAS USANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD

4.1. RESUMEN

La acuaponía es un sistema integrado de animales acuáticos y hortalizas donde los desechos de las unidades acuícolas se usan en la producción de los vegetales. En este estudio se realizó un análisis financiero de dos escenarios acuapónicos a pequeña escala comercial con diferentes fuentes de agua de baja salinidad: agua subterránea (AS) y agua de mar diluida (AMD). Con base en los datos económicos y de producción recopilados durante el cultivo acuapónico de camarón (*Penaeus vannamei*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y lechuga (*Lactuca sativa*) a escala experimental, se proyectaron dos escenarios (0,17 ha por escenario) y se evaluaron financieramente. El costo de inversión para cada escenario asciende a US \$26,580, mientras que los costos operativos estimados son US \$20,074 y US \$19,339 para el escenario de AS y AMD, respectivamente. El análisis financiero se proyectó con una inversión de 10 años y una tasa de descuento del 10%. Los resultados obtenidos sugieren que ambos escenarios acuapónicos de camarones y hortalizas son rentables; sin embargo, AS mostró mejores indicadores financieros que AMD. Las hortalizas contribuyen con la mayor parte de la rentabilidad, debido a que los camarones solo generan el 1.1-1.2% del ingreso total por ventas. Los escenarios modelo mostraron una mayor sensibilidad al precio de venta de las hortalizas. Una prima en los precios de venta de los vegetales podría mejorar la rentabilidad de los escenarios del modelo. Los resultados obtenidos de este estudio indican que la integración del cultivo de camarones de baja salinidad con la producción de vegetales hidropónicos podría ser una opción factible para la producción, evitando el impacto ambiental de los efluentes de las granjas de camarón de baja salinidad y una menor cantidad de agua.

4.2. ABSTRACT

Aquaponics is an integrative system of aquatic animals and plants production where the waste of the aquaculture units is used in the vegetable production. This study analyzed the financial analysis of two small-commercial scale aquaponics scenarios with a different source of low-salinity water: groundwater (GW) and diluted seawater (DSW). Based on economic and production data collected from aquaponic cultures of shrimp (*Penaeus vannamei*), basil (*Ocimum basilicum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) at experimental scale, two scenarios were projected (0.17 ha per scenario) and evaluated financially. The investment cost for each scenario amounts \$26,580 USD, while operational costs estimated are \$20,074 and \$19,339 USD for GW and DSW scenario, respectively. The financial analysis was conducted a 10-year investment with a 10% discount rate. The results obtained suggest that both aquaponics scenarios of shrimp and vegetables are profitable; however, GW showed better financial indicators than DSW. Vegetables contribute with most of the profitability, due to shrimp only generate the 1.1-1.2% of total sales income. Model scenarios showed a higher sensitivity to the sales price of vegetables. A premium on the sales prices of vegetables could improve the profitability of the model scenarios. Results obtained from this study indicate that the integration of low-salinity shrimp culture with hydroponic vegetable production could be a feasible option for production while avoiding the environmental impact of effluents from low-salinity shrimp farms and a smaller amount of water is used.

4.3. INTRODUCCIÓN

La acuaponia es un sistema integrado de animales acuáticos y hortalizas, donde los desechos de las unidades acuícolas se usan en la producción de vegetales. Los efluentes enriquecidos con nutrientes provenientes de la acuicultura son utilizados para el crecimiento de plantas, al mismo tiempo que las plantas depuran el agua permitiendo así ser reutilizada en las unidades acuícolas. Por lo anterior, el impacto ambiental se ve minimizado debido al bajo consumo de agua en la producción de alimentos y en la reducción de las descargas de los efluentes acuícolas a los ecosistemas acuáticos receptores.

La acuaponía puede implementarse una alternativa, en traspatio para el autoconsumo, en escuelas como una herramienta de enseñanza, o a escala comercial. De acuerdo con resultados obtenidos mediante una encuesta internacional realizada por Love *et al.* (2015) y el censo de acuicultura en los Estados Unidos (USDA, 2014), la acuaponía a nivel comercial se desarrolla comercialmente a escalas pequeñas. A continuación, se detallan los estudios encontrados en la literatura científica sobre la viabilidad financiera de los sistemas acuapónicos.

Bailey *et al.* (1997) analizaron la factibilidad financiera de un sistema acuapónico tilapia-lechuga a tres diferentes escalas de producción (6, 12 y 24 unidades de producción), encontrando un efecto de escala; la escala de mayor superficie donde se producen semanalmente 20,160 piezas de lechuga y 1,428 kg de tilapia obtuvo la mayor tasa interna de retorno (TIR) (21,7%). Baker (2010) calculó el precio de equilibrio de la tilapia y lechuga producida en un sistema acuapónico hipotético, los precios de equilibrio fueron US \$3.30 y US \$11.01 para una pieza de lechuga y un kilogramo de tilapia, respectivamente. Regalado-Arreola (2013) evaluó la factibilidad financiera de un sistema acuapónico para la producción de tilapia y albahaca a una escala experimental usando diferentes sustratos en el filtro biológico, de acuerdo a la evaluación financiera, la combinación de sustratos que arrojaron los mejores indicadores financieros fue piedra de río y trozos de poliducto, con una relación beneficio-costos (RBC) de 1.3 y una TIR de 22.3%.

Por su parte, Tokunaga *et al.* (2015) calcularon un análisis financiero de un sistema acuapónico tilapia-lechuga a escala pequeño comercial en Hawaii, estimando una tasa interna de retorno modificada (TIRM) de 7.4%. Quagraine *et al.* (2018) examinaron la rentabilidad de la acuaponía en los Estados Unidos a escala experimental en tres escenarios modelos (pequeño, mediano y grande); de acuerdo con sus resultados la acuaponía se vuelve rentable cuando los precios de venta de la albahaca sobrepasan los US \$10.00 por kilogramo. Mariscal-Lagarda (2014) enfocó un estudio para evaluar la factibilidad financiera de un cultivo integral de camarón (*P. vannamei*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo diferentes escenarios de producción. El estudio mostró que los escenarios donde el cultivo de camarón se integró con cultivos de tomate

hidropónico presentaron mejores resultados financieros en comparación con los monocultivos tradicionales de camarón.

Con el desarrollo del cultivo de camarón en agua dulce y de baja salinidad, los efluentes de dichas granjas podrían ser utilizados en la producción de hortalizas de importancia comercial, mejorando los ingresos de los productores de camarón. Es fundamental generar información científica para ayudar a determinar la factibilidad financiera de los escenarios de acuaponía, especialmente cuando el organismo acuático involucrado en el sistema acuapónico es el camarón. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la viabilidad financiera de un sistema acuapónico de camarón blanco, con albahaca y lechuga utilizando dos fuentes de agua de baja salinidad en el noroeste de México.

4.4. MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos técnicos y financieros se obtuvieron del trabajo de campo realizado en el módulo experimental "YK", ubicado en Mazatlán, Sinaloa, México (23° 12'11.9" N, 106° 25' 41.29" W). El diseño experimental consistió en seis sistemas acuapónicos individuales. Se utilizaron seis tanques (3.14 m³ cada uno) para el cultivo de camarón, cada tanque se conectó a un tanque sedimentador de 180 L, un filtro biológico de 120 L con HDPE (polietileno de alta densidad) y grava como sustrato para la fijación bacterias nitrificantes y un sistema de técnica de flujo profundo (DFT) para la cosecha de albahaca y lechuga. El sistema DFT consistió en camas construidas con bloques de cemento cubiertos con plástico (3.0 m de largo x 1.0 m de ancho x 0.2 m de alto) con una pendiente del 1%. Información más detallada sobre el trabajo de campo se describe en Fierro-Sañudo *et al.* (2018), y en los capítulos 2 y 3.

4.4.1. Escenario modelo

El escenario modelo está equipado con 4 tanques circulares de 6 m de diámetro para el cultivo de camarones y 12 camas de medios cultivados para cultivo de albahaca y lechuga. El sistema de aireación consiste en un soplador de 2 HP y manguera difusora. El efluente del cultivo de camarón fluye por gravedad al sistema de filtración y sistemas DFT. Las dimensiones de los sistemas DFT son 2 m de ancho, 30 m de largo

y 0.2 m de altura, construidas con blocks de cemento y cubiertas con plástico. Al final de los sistemas DFT, tres tanques de 450 L recuperarán el agua excedente para luego bombear a los tanques de cultivo de camarones con una bomba sumergible de ¼ HP. El cultivo de albahaca y lechuga se realizó bajo casa sombra con un área de producción de 576 m² (1506 m² incluyendo corredores entre sistemas DFT) mientras que el área para cultivo de camarón fue de 87 m² (272 m² incluyendo corredores entre tanques); en total se requiere una superficie de 0.17 ha para el proyecto, esto es similar al escenario modelado por Tokunaga *et al.* (2015) de 0.12 ha de superficie de cultivo.

4.4.2. Esquema de producción

Se propone que el sistema produzca camarón, albahaca y lechuga durante un ciclo de cultivo que se describe a continuación: El cultivo de camarón comienza en agosto con el almacenamiento de postlarvas (PL) en los tanques de cultivo y termina con la cosecha de un período de 120 días con camarón cosechado de aproximadamente 9.1 g de peso promedio. Un mes después de sembrar las postlarvas, las plántulas de albahaca se integran en el sistema y las actividades relacionadas con el cultivo comienzan (poda, deshierbe y cosechas parciales). Las plántulas de lechuga se integrarán en el sistema en diciembre hasta que se cosechen los camarones y las plantas de albahaca se retiren del sistema, esto debido al decremento de la temperatura ambiental. El tiempo necesario para cosechar las plantas de lechuga es de 30 días, después de cada cosecha, nuevas plántulas se integrarán en el sistema. El ciclo de cultivo terminó en marzo con la última cosecha de lechuga. Los parámetros de producción de los escenarios modelados se resumen en el Cuadro 4.1.

4.4.3. Análisis de factibilidad financiera

Se determinaron y calcularon los costos operativos y de inversión para los escenarios modelo. En los costos de inversión se consideraron obra civil, equipo de servicio, equipo auxiliar y activos diferidos. Los costos operativos se dividieron en dos grupos: costos variables y costos fijos. La materia prima (PL), semillas, plántulas, alimentos, etc.), combustibles y lubricantes, mantenimiento de vehículos y motores, y mano de obra se incluyeron en los costos variables.

Cuadro 3.6. Parámetros de producción del sistema acuapónico camarón-hortalizas con dos fuentes de agua de baja salinidad.

Parámetros de producción	Escenario AS	Escenario AMD
Camarón		
Densidad de siembra (PL m ⁻²)	75	75
Peso final (g)	9.1-8.9	8.7-8.5
Supervivencia (%)	89.5-73.6	85.0-73.6
FCA	1.6-1.7	1.6-1.7
Rendimiento (kg m ⁻²)	0.6-0.5	0.5-0.4
Albahaca		
Densidad de siembra (plantas m ⁻²)	16	16
Producción anual (kg)	3570.0	2,847.5
Rendimiento (kg m ⁻²)	8.4	6.7
Lechuga		
Densidad de siembra (plantas m ⁻²)	16	16
Plantas por año	20,400	20,400

FCA= factor de conversión alimenticia.

La mano de obra se compone de dos empleados de tiempo completo y el propietario como el administrador del proyecto. El salario del propietario se tuvo en cuenta como un salario inferior fijo más un porcentaje de las ganancias (20%). Los gastos administrativos, la renta del terreno y la depreciación se consideraron como costos fijos. El precio de cada insumo y materiales necesarios para construir los escenarios modelo fueron los precios de mercado en el momento del estudio. Considerando el costo operacional para cada cultivo y su producción respectiva, los precios de equilibrio se estimaron individualmente.

La factibilidad financiera de ambos escenarios modelo se llevó a cabo a través de los siguientes indicadores: punto de equilibrio de producción (PEP), valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), relación beneficio-costos (RBC) y período de

recuperación (PR), estos indicadores se calcularon de acuerdo con Shang (1990) como se describe a continuación: $PEP (\%) = (\text{costos de operación}/\text{ingresos por venta}) * 100$. $VPN (\$) = \sum \text{flujo de efectivo}/(1 + \text{tasa de descuento})^n$; donde 'n' se refiere al número de años en operación, la tasa de descuento utilizada para el análisis fue del 10% y se asumió un periodo de vida del proyecto de 10 años. $TIR (\%) = \sum [Bi - Ci / (1 + k)^i] = 0$; donde Bi se refiere al beneficio total (o ingreso) del año i, Ci se refiere a los costos totales del año i (inversión y costos operativos) y k es la tasa interna de retorno. $RBC = \text{flujo de efectivo}/\text{costo de la inversión}$. $PR = \text{costo de inversión}/\text{ganancia neta}$. El precio de venta utilizado en este estudio fue el que se encontró en el mercado en el momento del presente estudio y se expresaron en dólares estadounidenses (US \$3.54 por kilogramo de camarón, US \$4.90 por kilogramo de albahaca y US \$0.59 por pieza de lechuga). De igual manera, todos los montos monetarios se expresaron en dólares estadounidenses para efectos de comparación con otros trabajos encontrados en la literatura científica.

4.4.4. Análisis de sensibilidad

Se realizaron análisis de sensibilidad para encontrar puntos clave en los que se podría mejorar la viabilidad del sistema propuesto. Las variables que se evaluaron fueron cambios en el porcentaje de producción, precio de venta, combustibles y lubricantes, mano de obra y renta del terreno. El indicador utilizado en los análisis de sensibilidad fue la TIR.

4.5. RESULTADOS

4.5.1. Inversión y costos de operación

Los costos de inversión ascienden a US \$26,580 por cada escenario. Los cultivos de hortalizas representan el 74.4% de los costos totales de inversión, mientras que el cultivo de camarón representa el restante 25.6%. La obra civil es el activo más alto, con 62.3 y 74.8% de los costos totales de inversión del cultivo de camarón y hortalizas, respectivamente. Por otro lado, el equipo auxiliar es el activo más bajo con 6.0 y 3.0% para cultivo de camarón y hortalizas, respectivamente (Cuadro 4.2).

Cuadro 3.7. Costos de inversión del sistema acuapónico camarón-hortalizas.

	Camarón (US \$)	Porcentaje del total (%)	Hortalizas (US \$)	Porcentaje del total (%)
Obra civil	5,326	58	7,404	79
Equipo de servicio	797	9	531	5
Equipo auxiliar	556	6	324	3
Equipo de transporte	1,225	13	817	7
Activos diferidos	1,225	13	817	7
Total	9,130	100	17,450	100

Los costos de operación estimados son de US \$20,074 y US \$19,339 para los escenarios AS y AMD, respectivamente. En el Cuadro 4.3, se detallan los costos operativos para cada escenario. Los costos variables representan 88.0 y 87.6% de los costos operacionales para el escenario de AS y AMD, respectivamente. Los salarios son el costo de operación más alto (78.8 y 78.1% para el escenario AS y AMD respectivamente) mientras que las plántulas/semillas son el costo de operación más bajo (0.1% en ambos escenarios). Los precios de equilibrio calculados para cada cultivo fueron US \$127.8, US \$1.9 y US \$0.3 para el camarón, albahaca y lechuga en el escenario AS (Cuadro 4.4.), US \$134.9, US \$2.3 y US \$0.3 en el mismo orden en el escenario AMD (Cuadro 4.5).

4.5.2. Ingresos por ventas y análisis de viabilidad financiera

Los ingresos por ventas de los productos cosechados se resumen en Cuadro 4.6. En el escenario AS, las ventas anuales totales alcanzan a US \$30,061, el 58.2% corresponden a ventas por albahaca, el 40.7% a ventas de lechuga y solo el 1.1% corresponde a ventas por la cosecha de camarón.

Cuadro 3.8. Costos de operación del sistema acuapónico modelo camarón-hortalizas.

	Categoría	Escenario AS		Escenario AMD	
		\$*	Porcentaje del total (%)	\$*	Porcentaje del total (%)
Postlarva	Camarón	46	0.2	46	0.2
Alimento/fertilizante	Camarón	97	0.5	96	0.5
Plántula/semilla	Hortalizas	14	0.1	14	0.1
Sustrato para sembrar semilla	Hortalizas	79	0.4	79	0.4
Combustibles y lubricantes	Compartido	1,022	5.1	1,022	5.3
Mantenimiento vehicular	Compartido	82	0.4	82	0.4
Salarios	Compartido	15,816	78.8	15,102	78.1
Imprevistos	Compartido	515	2.6	495	2.6
Gastos administrativos	Compartido	1,307	6.5	1,307	6.8
Renta del terreno	Compartido	817	4.1	817	4.2
Depreciación	Compartido	279	1.4	279	1.4
Total		20,074	100	19,339	100

*Los costos están expresados en dólares americanos.

Cuadro 3.9. Desglose de los costos de operación y precio de equilibrio por cultivo del sistema acuapónico camarón-hortalizas, escenario AS.

	Camarón			Albahaca			Lechuga		
	\$*	\$* kg ⁻¹	%	\$*	\$* kg ⁻¹	%	\$*	\$* pieza ⁻¹	%
Postlarva/plántula/semilla	46	0.87	0.7	7	0.0	0.1	7	0.00	0.1
Semilla/fertilizante	97	1.84	1.4						
Sustrato para sembrar semilla				39	0.01	0.6	39	0.00	0.6
Combustible del equipo de transporte	198	3.74	2.9	198	0.06	3.0	198	0.01	3.0
Energía eléctrica consumida por aireador	11	0.20	0.2	11	0.00	0.2	11	0.00	0.2
Energía eléctrica consumida por bomba	4	0.07	0.1	4	0.00	0.1	4	0.00	0.1
Energía eléctrica consumida por bomba sumergible	129	2.44	1.9	129	0.04	1.9	129	0.01	1.9
Servicio a equipo de transporte	27	0.52	0.4	27	0.01	0.4	27	0.00	0.4
Salarios	5,272	99.72	78.0	5,272	1.48	79.2	5,272	0.26	79.2
Imprevistos	172	3.25	2.5	172	0.05	2.6	172	0.01	2.6
Gastos administrativos	436	8.24	6.4	436	0.12	6.5	436	0.02	6.5
Renta del terreno	272	5.15	4.0	272	0.08	4.1	272	0.01	4.1
Depreciación	93	1.76	1.4	93	0.03	1.4	93	0.00	1.4
Total	6,756	127.79	100	6,659	1.87	100.0	6,659	0.33	100.00

*Los costos y precios de equilibrio están expresados en dólares estadounidenses.

Cuadro 3.10. Desglose de los costos de operación y precio de equilibrio por cultivo del sistema acuapónico camarón-hortalizas, escenario AMD.

	Camarón			Albahaca			Lechuga		
	\$*	\$* kg ⁻¹	%	\$*	\$* kg ⁻¹	%	\$*	\$* pieza ⁻¹	%
Postlarva/plántula/semilla	46	0.96	0.7	7	0.0	0.1	7	0.00	0.1
Semilla/fertilizante	96	1.99	1.5						
Sustrato para sembrar semilla				39	0.01	0.6	39	0.00	0.6
Combustible del equipo de transporte	198	4.09	3.0	198	0.07	3.1	198	0.01	3.1
Energía eléctrica consumida por aireador	11	0.22	0.2	11	0.00	0.2	11	0.00	0.2
Energía eléctrica consumida por bomba	4	0.08	0.1	4	0.00	0.1	4	0.00	0.1
Energía eléctrica consumida por bomba sumergible	129	2.67	2.0	129	0.05	2.0	129	0.01	2.0
Servicio a equipo de transporte	27	0.56	0.4	27	0.01	0.4	27	0.00	0.4
Salarios	5,034	104.32	77.3	5,034	1.77	78.5	5,034	0.25	78.5
Imprevistos	165	3.42	2.5	165	0.06	2.6	165	0.01	2.6
Gastos administrativos	436	9.03	6.7	436	0.15	6.8	436	0.02	6.8
Renta del terreno	272	5.64	4.2	272	0.10	4.2	272	0.01	4.2
Depreciación	93	1.93	1.4	93	0.03	1.5	93	0.00	1.5
Total	6,510	134.92	100.0	6,414	2.25	100.0	6,414	0.31	100.00

*Los costos y precios de equilibrio están expresados en dólares estadounidenses.

Cuadro 3.11. Ingresos por ventas, costos de producción y beneficio neto por cultivo, para cada escenario.

	Escenario AS			Escenario AMD		
	Camarón (\$*)	Albahaca (\$*)	Lechuga (\$*)	Camarón (\$*)	Albahaca (\$*)	Lechuga (\$*)
Ingresos	338	17,500	12,222	308	13,958	12,222
Costos	6,756	6,659	6,659	6,510	6,414	6,414
Beneficio neto	-6,418	10,841	5,563	-6,202	7,544	5,808

*Los valores monetarios están expresados en dólares estadounidenses.

En el escenario DSW, las ventas anuales totales ascienden a US \$24,489, el 52,7% representan las ventas de albahaca, el 46,1% representan las ventas de lechuga y el 1,2% representan las ventas de camarón. El escenario AS mostró mejores indicadores de rentabilidad, con una menor PEP (40.9%) y PP (2.5 años), y un mayor NVP (US\$ 23.913), TIR (31.4%) y RBC (3.4) que el escenario AMD (Cuadro 4.7).

Cuadro 3.12. Indicadores de rentabilidad para el sistema acuapónico camarón hortalizas, en ambos escenarios.

Indicadores de rentabilidad	Escenario AS	Escenario AMD
PEP (%)	40.9	49.7
VPN (\$)	23,913	8,994
TIR (%)	31.4	19.8
RBC	3.4	2.4
PR (años)	2.5	4.0

El valor presente neto está expresado en dólares estadounidenses.

4.5.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se enfocó en los cultivos de hortalizas debido a que los resultados encontrados en el presente estudio demostraron que el cultivo de camarón representa una baja participación en la viabilidad financiera. En lo que se refiere al cambio en el porcentaje de producción, los escenarios resultaron ser más sensibles a

un aumento o disminución de la producción de albahaca sobre la producción de lechuga (Figura 4.1). De todas las variables analizadas, ambos escenarios mostraron una mayor sensibilidad al cambio en el precio de venta. En el escenario de AS, la TIR fluctúa del 49.2 al 11.3% cuando el precio de venta aumenta/disminuye un 25%, mientras que en el escenario AMD, el sistema comienza a no ser rentable cuando el precio de venta disminuye un 15% (Figura 4.2). De los costos operativos generales, ambos escenarios son más sensibles a los cambios en los salarios (Figura 4.3).

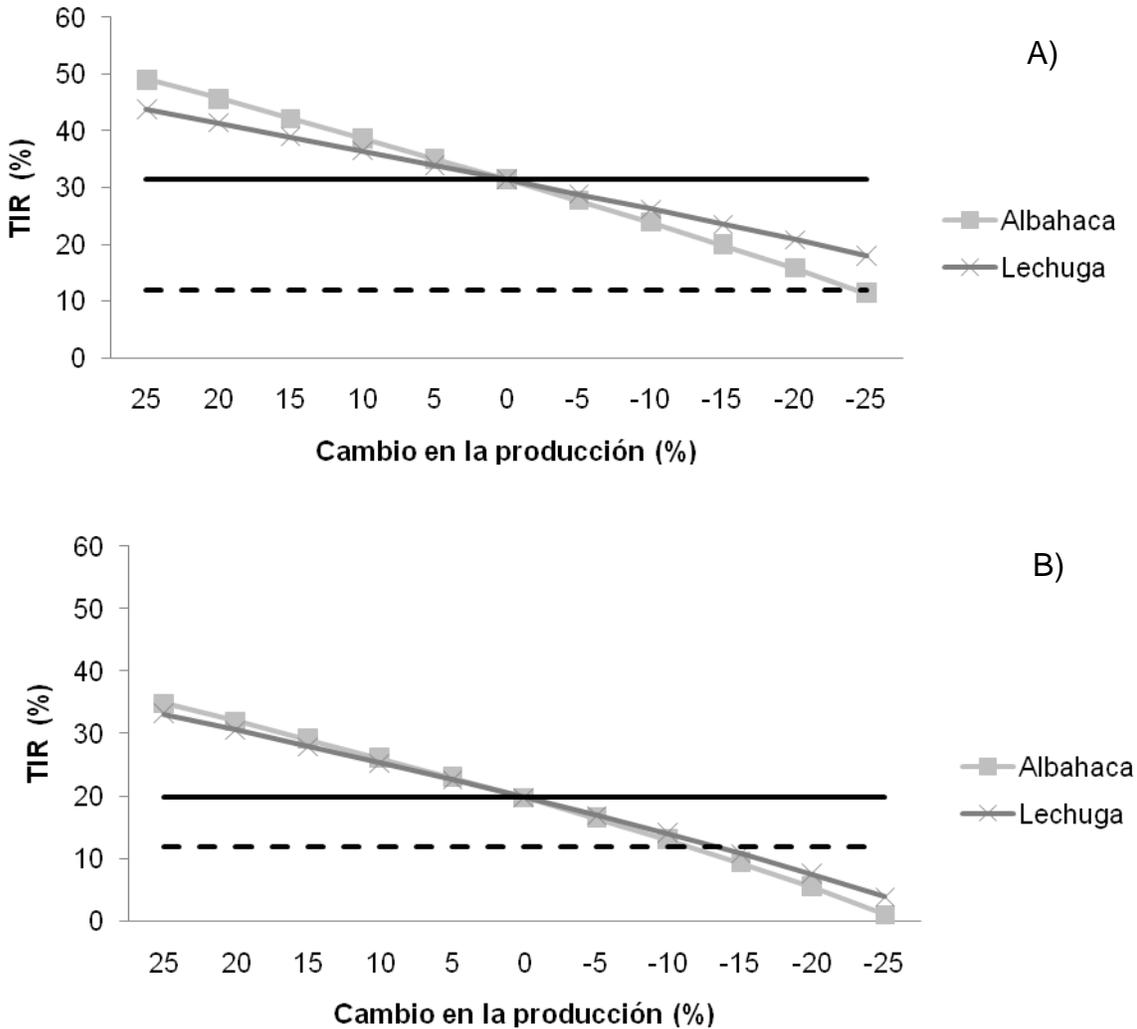


Figura 3.3. Efecto del cambio en la producción sobre la TIR calculada para el cultivo de acuaponía de camarones-hortalizas; A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.

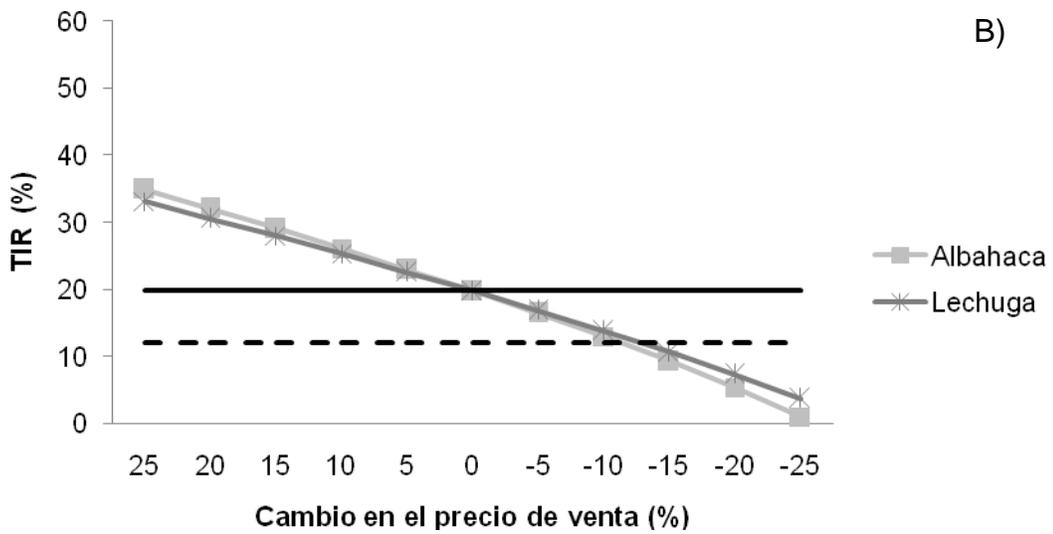
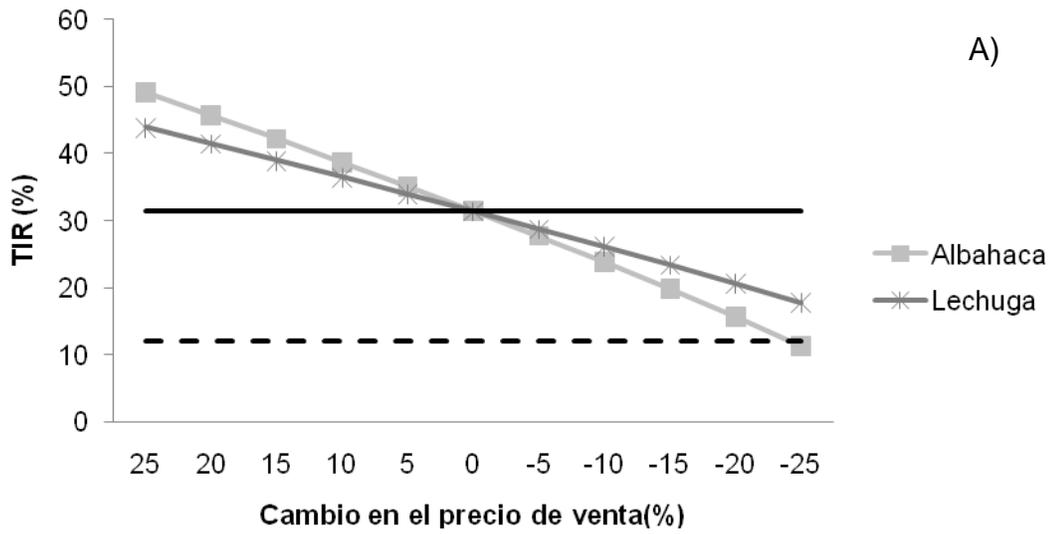


Figura 3.4. Efecto del cambio en el precio de venta sobre la TIR calculada para el cultivo de acuaponia de camarón-hortalizas; A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.

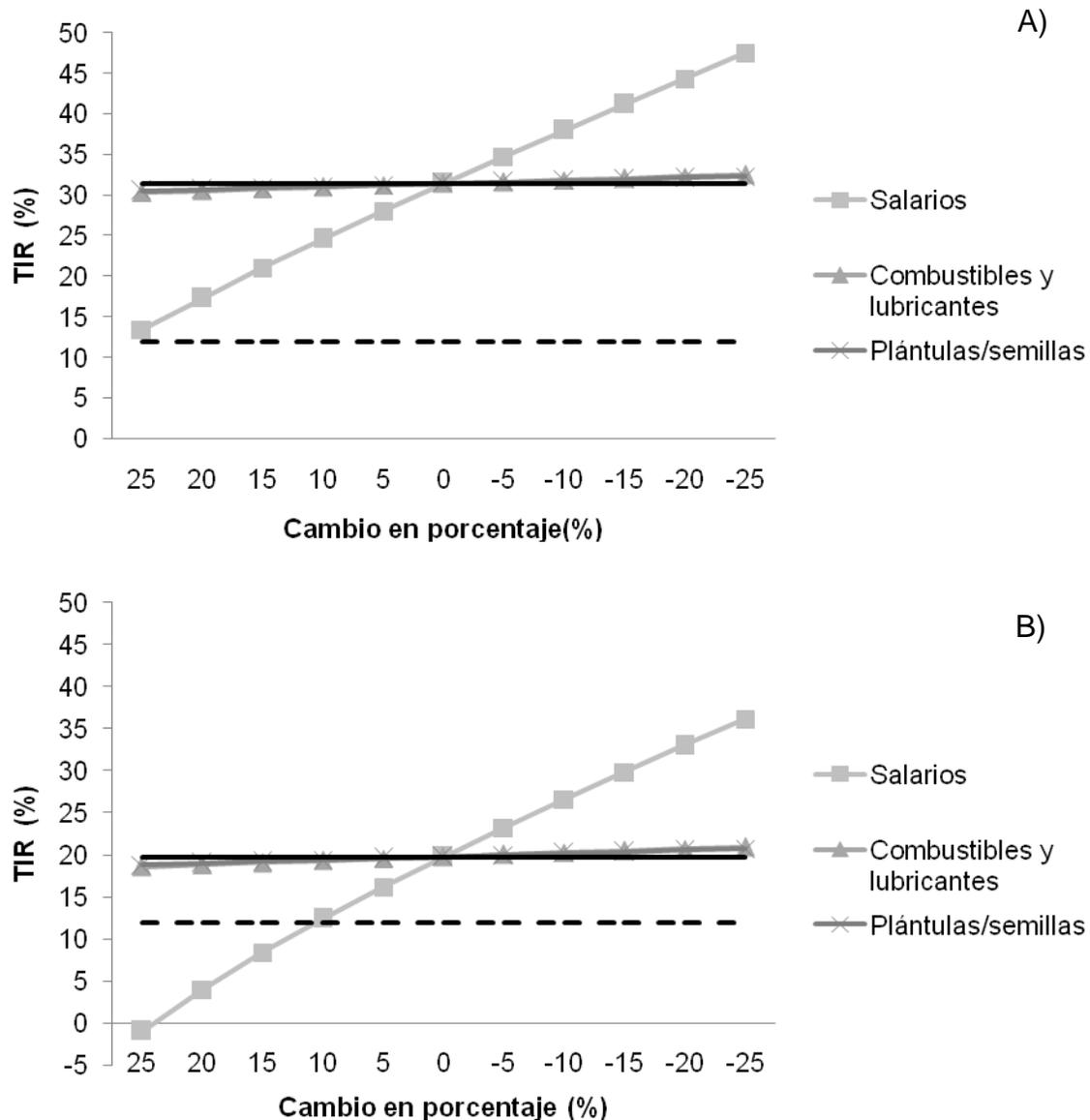


Figura 3.5. Efecto del cambio en el porcentaje de los salarios, combustibles y lubricantes y renta del terreno en la TIR calculada para el cultivo de acuaponia de camarones-hortalizas. A, escenario AS, B, escenario AMD. La línea continua se refiere a la TIR del proyecto y la línea discontinua se refiere a la tasa de descuento empleada en el análisis financiero.

4.6. DISCUSIÓN

Se estudió la viabilidad financiera de dos escenarios modelos de sistemas acuapónicos comerciales a pequeña escala operados con dos fuentes diferentes de agua de baja salinidad. Los resultados obtenidos sugieren que los dos escenarios de acuaponía de camarones y hortalizas son rentables bajo las condiciones previamente planteadas. Los escenarios evaluados son viables para abastecer las hortalizas evaluadas y camarón al mercado local.

El costo de inversión inicial asciende a US \$26,580 por cada escenario modelo con una superficie para el cultivo de camarón de 272 m² y una superficie para el cultivo hidropónico de 1506 m². Junge *et al.* (2017) mencionan que la producción comercial de acuaponía puede variar en escala de 150 a 3000 m², mientras que Love *et al.* (2015) informan que el tamaño de la producción comercial promedio de las granjas acuícolas en los Estados Unidos es de 100 m². Se proyecta que el 71.6% del costo de inversión se destine a la construcción de tanques de cultivo de camarón, sistemas hidropónicos y casas de sombra. Tokunaga *et al.* (2015) calcularon un costo de inversión de US \$217,078 para un sistema acuapónico modelo en Hawai similar a los escenarios modelos proyectados para el presente estudio, con un área de cultivo de lechuga de 1,142 m² y 75,7 m³ para el área de cultivo de tilapia. Esta cantidad es siete veces mayor que la calculada para el presente estudio; esto probablemente se deba a los altos costos de los materiales para la construcción, la instalación, el costo del alquiler de la maquinaria y su operación. Por otro lado, Bailey *et al.* (1997) estimaron los costos de inversión de US \$138,582, US \$271,704 y US \$543,408 para la construcción de un sistema acuapónico de tilapia y lechuga en tres escalas comerciales diferentes (6, 12 y 24 unidades de producción). Los escenarios modelo propuestos por los autores son de mayor escala que el escenario modelo del presente estudio.

Los costos de operación alcanzan US \$20,074 y US \$19,339 para el escenario AS y AMD, respectivamente. Estos costos operativos son aproximadamente 3.3 veces menores que el costo operativo calculado por Tokunaga *et al.* (2015) (\$ 66,183). Los salarios representan el 78.8-78.1% de los costos de operación, seguidos por los gastos administrativos de 6.5-6.8% y la renta del terreno de 4.1-4.2% (para el escenario de AS y AMD, respectivamente). Mariscal-Lagarda (2014) describe que los salarios son el

costo operacional más alto (38.5 a 39.5%) de un cultivo integrado de camarón (*P. vannamei*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) usando agua subterránea de baja salinidad. Similarmente, Tokunaga *et al.* (2015) estimaron que los salarios representan aproximadamente el 48.0% de los costos de operación totales y Quagraine *et al.* (2018) calcularon que los salarios en un sistema acuapónico a escala experimental contribuyen con el 49.0% de los costos operativos totales, mientras que en tres escenarios modelo, pequeño, a mediano y gran escala, los salarios representan 66.6, 62.4 y 66.1% de los costos totales de operación.

Los ingresos por ventas de camarón (US \$338 y US \$308, para AS y AMD, respectivamente) no cubren los costos de producción incurridos en el cultivo (US \$6,756 y US \$6,510, para AS y AMD, respectivamente); mientras que la albahaca y la lechuga recuperan sus costos de producción y obtienen saldos positivos. Bailey *et al.* (1997) calcularon rendimientos negativos para el cultivo de tilapia en sistemas acuapónicos con lechuga en tres escalas comerciales diferentes, 6, 12 y 25 unidades de producción (US \$-52,255, US \$-62,010 y US \$-109,019, respectivamente). Caso contrario, Tokunaga *et al.* (2015) estimaron los rendimientos positivos en ambos cultivos en un sistema acuapónico de tilapia-lechuga, US \$7,223 y US \$24,606, respectivamente. La baja participación del cultivo del camarón en los ingresos por ventas con respecto a las hortalizas de ambos escenarios (1.1-1.2%) es consistente con otros estudios. Bailey *et al.* (1997) calcularon que el cultivo de tilapia contribuye con el 31.9% de los ingresos por ventas de un escenario modelo acuaponico de tilapia-lechuga. Tokunaga *et al.* (2015) mencionan que los ingresos por ventas de tilapia representan el 22.7% de los ingresos por ventas totales de un escenario modelo acuaponico de tilapia-lechuga; mientras que Quagraine *et al.* (2018) informan que las ventas de tilapia generan el 1,4% de los ingresos por ventas totales de un sistema de acuaponia a escala experimental con albahaca, lechuga y tomate cherry.

Los precios de equilibrio calculados para albahaca (US \$1.87 y US \$2.25) y lechuga (US \$0.33 y US \$0.31) en escenarios de modelo AS y AMD, respectivamente (Cuadro 4.4 y 4.5), son más bajos que los precios de venta en el mercado en el tiempo que se desarrolló el presente estudio; por otro lado, el precio de equilibrio estimado para

camarón en los escenarios AS (US \$127.79) y AMD (US \$134,92) es superior a su precio de venta.

La mayoría de la literatura consultada indica que los cultivos de acuaponía pueden ser rentables a escalas comerciales, a excepción de Lapere (2010) que evaluó la viabilidad financiera de cuatro granjas acuapónicas en Sudáfrica; el estudio encontró que tres granjas funcionan bajo esquemas de no rentabilidad. De acuerdo con los indicadores financieros obtenidos en el presente estudio, el escenario AS muestra una mayor rentabilidad que AMD, debido al buen desarrollo del camarón y las hortalizas en esta fuente de agua.

Actualmente, cerca del 15% de la producción acuícola total de camarón proviene de granjas de camarón de baja salinidad y agua dulce (FAO, 2018). Los efluentes generados por estas granjas se pueden utilizar para la producción de biomasa vegetal, a través del riego de tierras de cultivo o en sistemas de recirculación de la acuicultura (acuaponía), como en el presente caso. La producción de un segundo o más cultivos podría mejorar la rentabilidad de los acuicultores. Esto ya se ha logrado en Asia, donde se lleva a cabo el cultivo integrado de camarón con arroz. Diferentes especies de camarón, pero principalmente *Penaeus monodon*, conviven en el mismo estanque con variedades de plantas de arroz tolerantes a la salinidad, cuando se dispone de agua de baja salinidad (2 a 8 g L⁻¹ de salinidad, entre enero y julio). Esta práctica ha aumentado la rentabilidad de los productores que anteriormente solo se dedicaban al monocultivo de arroz o camarón. Faruque *et al.* (2017) y Bunting *et al.* (2017) estimaron mayores ganancias netas promedio (US \$2,377 ha⁻¹) en sistemas integrados de camarón y arroz en comparación con el monocultivo de camarón (US \$911 ha⁻¹) en las zonas costeras de Bangladesh y Bengala Occidental, India.

El análisis de sensibilidad indica que ambos escenarios muestran una mayor sensibilidad al precio de venta, seguidos por los salarios. Los precios de venta utilizados en este estudio son los utilizados para vender hortalizas de monocultivo tradicionales (hortalizas no orgánicas). En la región donde se realizó el estudio (sur de Sinaloa, México), no existe un mercado diferenciado hasta la fecha entre las hortalizas de los cultivos tradicionales y las hortalizas producidas en sistemas sostenibles. El precio de venta de las verduras producidas en los sistemas acuapónicos debe tener

una prima en el precio de venta, como se ha logrado en algunas granjas de acuaponía en los Estados Unidos (Quagraine *et al.*, 2018). La prima en los precios de venta se debe a los altos costos operacionales incurridos en su producción y a la preocupación del productor por producir alimentos con una menor cantidad de desechos. De tal manera que con una prima en el precio de venta de hortalizas, la rentabilidad de los escenarios modelados lograría una mayor rentabilidad y serían proyectos de inversión más atractivos. Quagraine *et al.* (2018) estimaron que el aumento en el precio de venta del 19.7% (en el precio de venta de vegetales no orgánicos) mejoraría la rentabilidad del sistema de acuaponia en escala experimental tilapia-albahaca-lechuga-tomate cherry, debido a que el análisis realizado con los precios de venta no orgánicos, el sistema presenta un margen de ganancia muy bajo.

4.7. CONCLUSIONES

Este estudio presenta un análisis financiero de dos escenarios de acuaponia de pequeña escala comercial con diferentes fuentes de agua de baja salinidad: AS y AMD. Los resultados obtenidos sugieren que los dos escenarios acuapónicos comerciales a pequeña escala de camarón y hortalizas son rentables; sin embargo, AS mostró mejores indicadores financieros que AMD. Las hortalizas contribuyen con la mayor parte de la rentabilidad, debido a que los camarones solo generan el 1.1-1.2% del ingreso total por ventas.

Los escenarios modelo mostraron una mayor sensibilidad al precio de venta de las hortalizas. Una prima en los precios de venta de las hortalizas podría mejorar la rentabilidad de los escenarios modelo. Los precios de equilibrio estimados fueron para albahaca US \$1.87 y US \$2.25, y para lechuga US \$0.33 y US \$0.31, para AS y AMD, respectivamente.

La integración de hortalizas a través de sistemas hidropónicos al cultivo de camarón, podría ser una buena alternativa para mejorar la rentabilidad de los productores de camarón, al mismo tiempo que minimiza el impacto ambiental del cultivo de camarón de baja salinidad mediante el uso de efluentes ricos en nutrientes y menos uso de agua.

4.8. LITERATURA CITADA

- Baker, A. 2010. Preliminary development and evaluation of an aquaponic system for the American Insular Pacific. Master's Thesis. University of Hawaii at Manoa, Hawaii, USA.
- Bailey, D. S., J. E. Rakocy, W. M. Cole, and K. A. Shultz. 1997. Economic analysis of a commercial-scale aquaponic system for the production of tilapia and lettuce. En T. Aquaculture (ed.). Proceedings of the Fourth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, 603–612 pp. Florida, USA.
- Bunting, S. W., N. Kundu, and N. Ahmed. 2017. Evaluating the contribution of diversified shrimp-rice agroecosystems in Bangladesh and West Bengal, India to social-ecological resilience. *Ocean Coast. Manag.* 148: 63-74.
- FAO. 2018. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/query/en> (accesada en junio, 2018).
- Faruque, G., R. Hayat-Sarwer, M. Karim, M. Phillips, W. J. Collis, B. Belton, and L. Kassam. 2017. The evolution of aquatic agricultural systems in Southwest Bangladesh in response to salinity and other drivers of change. *Int. J. Agr. Sustain.* 15 (2): 185-207.
- Fierro-Sañudo, J. F., G. A. Rodríguez-Montes de Oca, J. A. León-Cañedo, S. G. Alarcón-Silvas, M. M. Mariscal-Lagarda, T. Díaz-Valdés, and F. Páez-Osuna. 2018. Production and management of shrimp (*Penaeus vannamei*) in co-culture with basil (*Ocimum basilicum*) using two sources of low-salinity water. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 46 (1): 63-71.
- Junge, R., B. König, M. Villarroel, T. Komives, and M. H. Jijakli. 2017. Strategic points in aquaponics. *Water* 9: 182.
- Lapere, F. 2010. A techno-economic feasibility study into aquaponics in South Africa. Master's Thesis. University of Stellenbosh. Stellenbosch, Sudáfrica.
- Love, D. C., J. P. Fry, X. Li, E. Hill, L. Genello, K. Semmens, and R. E. Thompson. 2015. Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture* 435: 67-74.
- Mariscal-Lagarda, M. M. 2014. Cultivo simultáneo de camarón de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y cultivo hidropónico de tomate bola (*Lycopersicon*

- esculentum* Mill) utilizando agua de pozo de baja salinidad y tasa de recambio cero: desarrollo, manejo y evaluación. Tesis de Doctorado. Universidad de Occidente. Sinaloa, México.
- Quagraine, K. K., R. M. V. Flores, H. J. Kim, and V. McClain. 2018. Economic analysis of aquaponics and hydroponics production in the U.S. Midwest. *J. Appl. Aquaculture* 30 (1): 1-14.
- Regalado-Arreola, J.R. 2013. Diseño y evaluación de un sistema acuapónico para la producción de animales acuáticos y plantas para consumo humano. Tesis de Maestría. Universidad de Guanajuato. Guanajuato, México.
- Tokunga, K., C. Tamaru, H. Ako, and P. Leung. 2015. Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawaii. *J. World Aquacult. Soc.* 46 (1): 20-32.
- USDA. 2014. 2013 census of aquaculture results. https://www.agcensus.usda.gov/Publications/2012/Online_Resources/Aquaculture/ (Accesada en junio, 2018).

CAPÍTULO 5 . EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO CAMARÓN-HORTALIZAS USANDO DOS FUENTES DE AGUA DE BAJA SALINIDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: UNA PROPUESTA

5.1. RESUMEN

Los cultivos acuapónicos son sistemas integrados de animales acuáticos y plantas donde el desecho de las unidades acuícolas es utilizado en la producción de biomasa vegetal. Gracias a la integración de la acuicultura con la hidroponia, el impacto ambiental producido por la descarga de los efluentes a los cuerpos de agua receptores se minimiza, junto con un menor uso de agua en la producción. Estas bondades ya han sido previamente descritas de manera cualitativa en investigaciones con sistemas acuapónicos con peces, pero muy pocos trabajos han sido capaces de cuantificar los impactos ambientales y cargas evitadas al medio ambiente. El objetivo del presente estudio fue presentar una propuesta de evaluación cuantitativa del impacto ambiental de un cultivo acuapónico camarón y hortalizas usando dos diferentes fuentes de agua de baja salinidad a través del análisis del ciclo de vida. Los criterios utilizados, métodos de evaluación seleccionados y categorías de impacto se detallan en el presente trabajo. Además, se propone realizar un análisis de sensibilidad para cuantificar los cambios en el impacto ambiental del sistema propuesto cuando los parámetros de entrada (principales contribuidores al impacto ambiental) son cambiados.

5.2. ABSTRACT

Aquaponics are integrated systems of aquatic animals and plants where the waste of aquaculture units is used in the production of vegetable biomass. Due to the integration of aquaculture with hydroponics, the environmental impact produced by the discharge of the effluents to the receiving water bodies is minimized, together with less use of water in production. These benefits have been previously described qualitatively in investigations of aquaponic systems with fish, but very few works have been able to quantify environmental impacts and environmentally avoided loads. The objective of this

study was to present a proposal for the quantitative evaluation of the environmental impact of an aquaponic shrimp and vegetables system using two different sources of low salinity water through life cycle analysis. The criteria used, selected evaluation methods and impact categories are detailed in the present work. In addition, it is proposed to carry out a sensitivity analysis to quantify the changes in the environmental impact of the proposed system when the input parameters (main contributors to the environmental impact) are changed.

5.3. INTRODUCCIÓN

El acelerado incremento de la población mundial conlleva un gran reto, satisfacer una mayor demanda de alimentos mientras se hace eficiente el uso de los recursos disponibles y se genera la menor cantidad de desechos. Es por ello que muchos esfuerzos se han dirigido a implementar técnicas de producción de alimentos donde sea posible producir más, mientras se aprovechan de mejor manera los recursos naturales disponibles (agua, suelo, nutrientes, capital, etcétera).

Para lograr una producción alimentaria más sostenible es necesario cumplir con algunos de los principios fundamentales, entre ellos (Pantarella, 2008; Blidariu y Grozea, 2011): (i) el aumento en la producción de los alimentos con un menor impacto ambiental, (ii) la integración entre los diferentes sistemas de producción agropecuaria y (iii) la exclusión de productos químicos (como los pesticidas, fertilizantes sintéticos, entre otros). La acuaponia cumple con estos principios y es por ellos que es considerada como una de las actividades con menor impacto en el medio ambiente.

La acuicultura y la hidroponia por sí solas poseen aspectos negativos. De acuerdo con Blidariu y Grozea (2011) la hidroponía requiere de grandes cantidades de fertilizantes costosos para elaborar una solución balanceada nutritiva para las plantas, además de que es necesaria la renovación periódica de esta solución lo que puede llevar a problemas con la eliminación de desechos. Por otro lado, los cultivos acuícolas incluyendo los sistemas de recirculación necesitan remover el exceso de nutrientes generados mediante recambios parciales de agua, lo cual requiere reemplazar periódicamente agua directamente de los estanques enriquecida con nutrientes por agua nueva "limpia". Al combinar ambas actividades en un sistema de recirculación,

estos aspectos negativos se minimizan, ya que los efluentes ricos en nutrientes de los estanques de cultivos acuícolas nutren a las plantas, evitando las descargas a los cuerpos de aguas receptores que a menudo son causantes de problemas de eutrofización, además de reducir el uso del agua para ambas actividades. Estas bondades ya han sido previamente descritas de manera cualitativa en investigaciones con sistemas acuapónicos con peces, pero muy pocos trabajos han sido capaces de cuantificar los impactos ambientales y cargas evitadas al ambiente.

El análisis del ciclo de vida (ACV) es un método de evaluación cuantitativa que estima el impacto ambiental generado por un producto, servicio o proceso (Boxman *et al.*, 2017), con esta herramienta es posible cuantificar los impactos directos e indirectos desde una macro perspectiva (Foteinis y Chatzisyneon, 2016; Forchino *et al.*, 2017). A pesar de que el ACV fue desarrollado para la evaluación de producción y procesos industriales (Henriksson *et al.*, 2012), a partir de la segunda mitad de la década de los 2000's se comenzó a aplicar en sistemas de cultivos acuícolas, y del 2015 a la fecha se ha utilizado para evaluar el impacto ambiental generado por los sistemas acuapónicos e integrados.

Xie y Rosentrater (2015) evaluaron el impacto ambiental provocado por los gases efecto invernadero de un sistema acuapónico tilapia-albahaca en tres diferentes escalas (experimental, piloto y comercial). Jonell y Henriksson (2015) aplicaron un ACV para comparar el impacto ambiental entre cultivos integrados camarón-mangle orgánico y convencional sobre el calentamiento global, potencial de eutrofización y acidificación. Forchino *et al.* (2017) emplearon el ACV para evaluar y comparar el impacto ambiental de dos componentes hidropónicos acoplados en acuaponía: sistemas de flujo profundo y camas hidropónicas con sustrato. Por su parte, Boxman *et al.* (2017) evaluaron el impacto ambiental de un sistema acuapónico comercial tilapia-albahaca mediante el ACV.

Es de suma importancia cuantificar el impacto ambiental de los sistemas acuapónicos, ya que con ello será posible identificar “puntos rojos” para diseñar estrategias o buscar alternativas que minimicen aun más el impacto ambiental generado por estos sistemas. Por ello, el objetivo del presente estudio fue presentar una propuesta de evaluación cuantitativa del impacto ambiental de un cultivo

acuapónico camarón y hortalizas usando dos diferentes fuentes de agua de baja salinidad a través del ACV.

5.4. MATERIAL Y MÉTODOS

5.4.1. Descripción del sistema acuapónico

Dos sistemas a escala pequeño-comercial fueron modelados a partir de datos recolectados en previo trabajo experimental y a partir de la literatura científica. Dos diferentes fuentes de agua fueron utilizadas para los escenarios: Agua subterránea (AS) y agua de mar diluida (AMD). Cada escenario está equipado con 4 tanques circulares de 6 m de diámetro para el cultivo de camarón, un clarificador, un biofiltro y 12 sistemas hidropónicos de flujo profundo (DFT, por sus siglas en inglés, Deep Flow Technique) para el cultivo de albahaca y lechuga. El efluente del cultivo de camarón fluye por gravedad desde los tanques de cultivo hasta los sistemas DFT, pasando por el sistema de filtración. Al final de los sistemas DFT, tres tanques de 450 L recuperan el agua restante para después bombearla de regreso a los tanques de cultivo de camarón con una bomba sumergible de ¼ HP. El cultivo de albahaca y lechuga se llevará a cabo en casa sombra con un área de producción de 425 m² (1506 m² incluyendo corredores y pasillos), mientras que el área de producción para el cultivo de camarón proyectada es 87 m² (272 m² incluyendo corredores y pasillos); en total, 0.17 ha de superficie es requerida para cada escenario. Los sistemas acuapónicos producirán camarón, albahaca y lechuga durante un ciclo de producción que a continuación se describe: el cultivo de camarón comienza en mayo con la siembra de la postlarva (PL), un mes después las plántulas de albahaca se integran al sistema y las respectivas actividades que conlleva el cultivo comienzan (podas, deshierbe y cosechas parciales). Las plántulas de lechuga se integran al sistema hasta el mes de diciembre cuando el camarón y la albahaca son cosechados, y la temperatura ambiental disminuye. El tiempo necesario para la cosecha de lechuga es de 30 días, después de cada cosecha nuevas plántulas de lechuga son integradas al sistema. El ciclo de cultivo termina en marzo con el último ciclo de lechuga. El esquema de producción se resume en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Esquema de producción del sistema acuapónico camarón-hortalizas con dos fuentes de agua de baja salinidad.

Parámetros de producción	Escenario AS	Escenario AMD
Camarón		
Densidad de siembra (PL m ⁻²)	75	75
Peso final (g)	9.1-8.9	8.7-8.5
Supervivencia (%)	89.5-73.6	85.0-73.6
FCA	1.6-1.7	1.6-1.7
Rendimiento (kg m ⁻²)	0.6-0.5	0.5-0.4
Albahaca		
Densidad de siembra (plantas m ⁻²)	16	16
Producción anual (kg)	3570.0	2,847.5
Rendimiento (kg m ⁻²)	8.4	6.7
Lechuga		
Densidad de siembra (plantas m ⁻²)	16	16
Plantas por año	20,400	20,400

FCA= factor de conversión alimenticia.

5.4.2. Metodología para el ACV

Se propone que el ACV se lleve a cabo de acuerdo con el estándar 14040 propuesto por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), el cual consiste de cuatro pasos: (i) definición del objetivo y alcance, (ii) análisis del inventario, (iii) evaluación del impacto e (iv) interpretación de los resultados (Figura 5.1.)

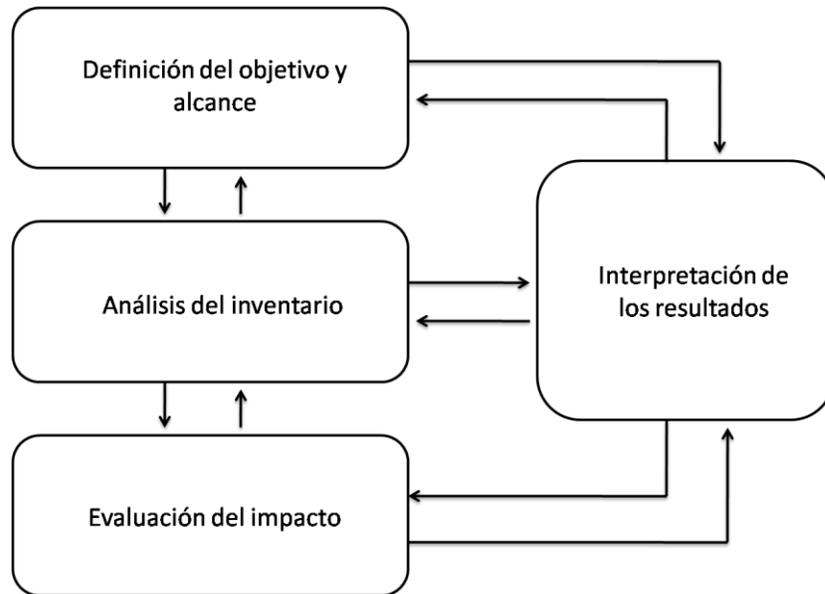


Figura 5.1. Fases del ACV de acuerdo a ISO (2006).

5.4.3. Objetivo, definición del alcance y unidad funcional

Se pretende evaluar el impacto ambiental de un sistema acuapónico pequeño-comercial de camarón, albahaca y lechuga usando dos fuentes de agua de baja salinidad. El presente estudio forma parte de un proyecto donde se evalúa el potencial del efluente del cultivo de camarón usando agua de baja salinidad para la producción de hortalizas mediante acuaponia, el principal objetivo es aprovechar estos efluentes y producir vegetales al mismo tiempo que se reduce el impacto ambiental por parte del cultivo de camarón. Desde esta perspectiva el cultivo de camarón es el cultivo principal, a pesar de que en diferentes estudios de factibilidad financiera en cultivos acuapónicos las hortalizas representan una mayor contribución a la rentabilidad. Basado en lo anterior, la unidad funcional (UF) seleccionada fue 1 kg de camarón producido, mientras que la albahaca y lechuga fueron definidos como co-productos derivados del tratamiento del efluente del cultivo de camarón.

5.4.4. Límites del sistema y asignación de los coproductos

Los límites del sistema se acotan a la producción de camarón, albahaca y lechuga, producción de alimento balanceado, infraestructura y proceso de tratamiento de agua. Se propone un enfoque del ACV “desde la cuna hasta la puerta de la granja”; sin

embargo, la fase de pre-cría puede ser excluida del análisis debido a que de acuerdo con Ayer y Tyedmers (2009) y Pelletier et al. (2009) la fase de producción de crías contribuye con un impacto mínimo en los sistemas intensivos de acuicultura. Además, se propone que el proceso post-cosecha, empaque, transportación a los mercados, y uso final no se incluyan en los límites del sistema, debido a que el tema de interés se basa en el proceso de producción.

Los coproductos asignados propuestos para el ACV son: la recuperación de sólidos y el tratamiento del agua provisto por las plantas de albahaca y lechuga. Se plantea utilizar el método del sistema de expansión para estimar las cargas evitadas debido a estos dos coproductos (Weidema y Schmidt, 2010; Boxman *et al.*, 2017). En el sistema de expansión, el sistema producto con funciones idénticas se sustituye por coproductos, de tal manera que las cargas ambientales atribuidas a los coproductos, pueden tomarse como cargas evitadas al medio ambiente.

En la fase experimental, los sólidos recuperados de los tanques sedimentadores fueron utilizados en los análisis químicos para diferentes propósitos, pero está documentado que los sólidos pueden ser empleados como una sustitución parcial de los fertilizantes sintéticos como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio (Ayer y Tyedmers, 2009; Boxman *et al.*, 2017). Los sólidos recuperados de cultivos intensivos de camarón en mezcla con diferentes fertilizantes sintéticos, han sido probados con éxito en la fertilización de pimiento morrón (Dufault *et al.*, 1998; Dufault y Korkmaz, 2000), brócoli (Dufault *et al.*, 1996; Dufault y Korkmaz, 2000), hierba de verano de Sudán (Dufault y Korkmaz, 2000) y lechuga (Dufault *et al.*, 2001). De tal manera que se propone el reuso de los sólidos recuperados como una sustitución parcial en la fertilización de las hortalizas.

En los sistemas de recirculación acuícola, la biofiltración juega un rol muy importante. Las bacterias nitrificantes convierten el amonio primeramente en nitrito (*Nitrosomonas* sp.) y después en nitrato (*Nitrobacter* sp.). El nitrato es una especie del nitrógeno menos tóxica para los camarones y peces. Cuando el nitrato alcanza niveles de concentración altos, es necesario realizar recambios de agua. En los sistemas acuapónicos los vegetales asimilan los nitratos para su crecimiento, al mismo tiempo que mantienen los niveles de nitratos relativamente bajos, de tal manera que los

recambios de agua normalmente no son requeridos en acuaponía. Se sugiere seleccionar a los biofiltros sumergidos como reemplazo de la función que generan las plantas en los sistemas acuapónicos, debido a que este tipo de biofiltro es ampliamente usado en los sistemas de recirculación incluyendo en aquellos donde se cultiva camarón. El medio para la fijación de la bacteria se mantiene sumergido y el efluente acuícola fluye de lado a lado del biofiltro a través del medio de fijación, además la aireación es inyectada constantemente.

5.4.5. Inventario del ciclo de vida (ICV)

Durante la fase experimental (agosto 2014 a marzo 2015), los datos de insumos para la infraestructura, materias primas, producción y manejo fueron registrados para el modelado de los escenarios. La vida útil de la infraestructura fue estimada de acuerdo a nuestra experiencia y a los datos compilados en la literatura científica en el tema. Se recomienda añadir la vida útil de cada componente al análisis al impacto anual dividiendo la unidad del inventario entre la vida útil de cada componente (Boxman *et al.*, 2017).

Se propone estimar las emisiones de nutrientes del cultivo de camarón mediante el modelo presupuesto de nutrientes basado en un enfoque nutricional (Cho y Kaushik, 1990; Bureau *et al.*, 2002; Aubin *et al.*, 2006). La emisión de nutrientes (particulado y disuelto) se estiman de acuerdo a la diferencia entre la cantidad de nutrientes contenidos en el alimento y la cantidad de nutrientes asimilados por el camarón y convertidos en biomasa (Boxman *et al.*, 2017) (Cuadro 5.2). Como se mencionó anteriormente, las emisiones de nutrientes disueltos pueden ser evitadas debido a la coproducción del tratamiento del agua y las emisiones de nutrientes particulados capturados en el sedimentador pueden ser evitadas debido al reuso en la fertilización de las plantas como un sustituto parcial de los fertilizantes sintéticos. Debido a que no hay información concreta relacionada al porcentaje de retención de un sedimentador, se recomienda asumir que el 100% de los desechos particulados son retenidos, similar al trabajo de Boxman *et al.* (2017), y la producción hidropónica de albahaca y lechuga reemplaza la función del biofiltro sumergido (Cuadro 5.3). En acuaponía se reemplaza aproximadamente el 1% del volumen total diario en compensación a las pérdidas de

agua por evaporación natural, evapotranspiración y limpieza de los sedimentadores, mientras que en los sistemas de recirculación acuícola es necesario realizar recambios parciales de agua si las concentraciones de nitratos se encuentran elevadas para los organismos en cultivo, como se mencionó anteriormente.

El inventario de fondo, como la fabricación de los componentes de la infraestructura, procesamiento del alimento y generación de electricidad, se obtienen de las bases de datos disponibles. Se propone utilizar la base de datos Ecoinvent v3, debido a que es la base de datos más extensa para el ACV constantemente actualizada.

Los componentes principales y proporciones del alimento para camarón (35% de proteína) para efecto del análisis pueden obtenerse a partir de la literatura (Hunter y Chamberlain, 2006) (Cuadro 5.4) debido a que las empresas productoras de alimento no comparten dicha información con el público en general.

Cuadro 5.2. Tratamiento de agua y sólidos recuperados calculados con el modelo presupuesto de nutrientes en un cultivo acuapónico pequeño-comercial de camarón y hortalizas.

Alimento añadido (kg kg ⁻¹ de camarón cosechado)	Tratamiento de agua			Sólidos recuperados		
	N disuelto ^a (kg kg ⁻¹)	P disuelto ^b (kg kg ⁻¹)	Agua (m ³ kg ⁻¹)	Sólidos totales (kg kg ⁻¹)	N ^d particulado (kg kg ⁻¹)	P ^e particulado (kg kg ⁻¹)
AS: 1.49	0.048	0.003	5.0	0.834	0.015	0.002
AMD: 1.62	0.052	0.003	5.6	0.907	0.017	0.002

Nutrientes disueltos y particulados se expresan en kilogramos por kilogramo de camarón cosechado. Tratamiento de agua incluye nutrientes y descarga de agua evitados debido al recambio de agua. Sólidos recuperados muestran la masa de nutrientes remplazados con fertilizante sintético.

^aAmonio fue calculado con la siguiente ecuación: $P_{NAT} = \text{alimento} \times \text{contenido proteico} \times 0.092$ (Timmons *et al.*, 2002), el cual todo se convierte en nitrato por el biofiltro.

^b30% del fósforo contenido en el alimento para camarón (6.5 mg P g⁻¹, Alarcón-Silvas, 2013) fue considerado como ortofosfatos (d'Orbcastel *et al.*, 2008).

^c56% del alimento se consideró como sólidos totales (Piedrahita, 2003).

^d1.04% del alimento fue considerado como nitrógeno particulado (Piedrahita, 2003).

^e20% del fósforo contenido en el alimento para camarón (6.5 mg P g⁻¹, Alarcón-Silvas, 2013) fue considerado como fósforo particulado (d'Orbcastel *et al.*, 2008).

Cuadro 5.3. Información de dimensionamiento y energía requerida por el biofiltro para convertir las emisiones de amonio a nitratos.

	Máxima tasa de alimentación (kg day ⁻¹)	NAT ^a (kg day ⁻¹)	Medio filtrante requerido ^b (m ³)	Aire requerido ^c (lpm)	Electricidad requerida ^d (kWh year ⁻¹)
AS	2.4	0.076	0.426	601.5	1953.6
AMD	2.5	0.079	0.442	524.1	1953.6

^aNAT (nitrógeno amoniacal total)=máxima tasa de alimentación x 3.5% NAT del alimento – nitrificación pasiva – concentración de NAT en el agua; donde nitrificación pasiva =10% x tasa máxima de alimentación y la concentración de NAT en el agua = 0.5 mg L⁻¹ (Losordo y Hobbs, 2000).

^bMedio filtrante requerido= (NAT/tasa de nitrificación)/superficie total de medio filtrante; donde la superficie del medio filtrante es 350 m² m⁻³ y la tasa de nitrificación=0.00051 kg NAT m⁻² dia⁻¹ (Losordo y Hobbs, 2000).

^c1421 lpm de aire es requerido por cada metro cúbico de medio filtrante (Boxman *et al.*, 2017).

^dAire provisto por un blower de 1/2 HP. Se tomaron en cuenta para el cálculo 220 días de operación al año.

Cuadro 5.4. Componentes principales de un alimento típico para camarón de 35% de proteína.

Componente	Porcentaje del alimento (%)
Harina de trigo	35
Harina de soya	20
Harina de pescado	25

La composición del alimento se asumió con base en la literatura científica del tema (Hunter y Chamberlain, 2006).

5.4.6. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Se plantea que el ACV se calcule mediante los métodos de referencia del CML punto medio para las siguientes categorías de impacto: potencial al calentamiento global (CG), potencial de acidificación (PA), potencial de eutrofización (PE), competencia por tierras (CT), uso de agua (UA) y uso de energía (UE); debido a que estos impactos tienen relación directa con los impactos asociados a la acuicultura intensiva. Aunado a esto, estas categorías de impacto se encuentran entre las categorías más utilizadas en los ACV realizados en sistemas de cultivos acuícolas de acuerdo con Henriksson *et al.* (2012) (Cuadro 5.5).

Para realizar los cálculos es necesaria la aplicación de un software. El software más utilizado es SimaPro (PRé Sustainability, Amersfoort, Holanda), el cual ya incluye la base de datos Ecoinvent v3 y para utilizar este software es necesario adquirir una licencia de uso. Por otro lado, el software OpenLCA (GreenDelta, Berlin, Alemania) es de uso libre, pero sí se requiere utilizar bases de datos como Ecoinvent v3, es necesario pagar por el uso de ellas. Además es posible utilizar este programa con base de datos gratuitos, como la base de datos Agribalyse, agrifootprint o USDA, pero con la desventaja de ser bases de datos menos extensas en cuanto a datos de fondo disponibles.

5.4.7. Análisis de sensibilidad

Se plantea realizar un análisis de sensibilidad, bajo escenarios alternativos para determinar la respuesta en el impacto ambiental cuando ciertos parámetros de entrada

al sistema son cambiados. Una vez que los parámetros de entrada son modificados, se calculan nuevamente los modelos para evaluar el incremento o disminución del impacto ambiental del modelo con base a los cambios realizados.

Cuadro 5.5. Frecuencia de aplicación de diferentes categorías de impacto ambiental en estudios sobre 12 ACV aplicados a cultivos acuícolas de acuerdo con Henriksson *et al.* (2012).

Categoría de impacto	Frecuencia de uso
Potencial al calentamiento global	12
Potencial de acidificación	12
Potencial de eutrofización	12
Uso de energía	8
Uso de recursos bióticos	6
Ecotoxicidad acuática marina	4
Potencial de agotamiento abiótico	3
Potencial de agotamiento del ozono	3
Toxicidad humana	3
Dependencia del agua	2
Formación de oxidantes fotoquímicos	2
Ecotoxicidad acuática de agua dulce	2
Ecotoxicidad terrestre	2
Uso de la tierra	2

Los escenarios propuestos para evaluar son: (i) cuando el factor de conversión alimenticia aumenta o disminuye, (ii) cuando el suministro de energía eléctrica cambia de energía provista por la red pública (termoeléctrica) se cambia por energía solar u otro tipo de energía disponible y (iii) cuando las plantas son eliminadas del sistema y se vuelve necesario el recambio para mantener los niveles de nutrientes óptimos para el cultivo de camarón.

5.5. DISCUSIÓN

En la Figura 5.2 se esquematiza de manera resumida la metodología propuesta para la evaluación del impacto ambiental de un cultivo acuapónico de camarón-hortalizas mediante el ACV.

El ACV permite identificar, cuantificar y describir los diferentes impactos ambientales potenciales en las diferentes etapas del ciclo de producción de un sistema acuapónico. Gracias a ello, es posible replantearse el diseño y operación con el fin de reducir dicho impacto ambiental. Dentro de los posibles “focos rojos” que se pueden encontrar en este sistema, se destacan el consumo de energía eléctrica y el uso del alimento balanceado.

En los sistemas de recirculación acuícola, el consumo de energía eléctrica se eleva debido a la constante aireación de los estanques y biofiltros y al constante bombeo del agua a través del sistema, además que en lugares donde las condiciones climáticas son extremas es necesario mantener un control de temperatura para no afectar la supervivencia y crecimiento de los organismos en cultivo. En sistemas acuapónicos, este problema se agrava debido a que la aireación también debe de permanecer constante en las camas hidropónicas y en los tanques de degasificación (si son requeridos).

La reducción del uso de energía eléctrica representa uno de los principales retos en la acuaponia (Raocy, 2007; Forchino *et al.*, 2017). Boxman *et al.* (2017) estimaron que del total del consumo de energía eléctrica de un sistema acuapónico, el 94% corresponde a la aireación del sistema (51% a la aireación de las camas hidropónicas y el 43% a la aireación de los tanques de cultivo y tanques degasificadores) y el resto corresponde al sistema de bombeo. Existen dos alternativas para la disminución del consumo de energía eléctrica: (i) cambio en la fuente de energía eléctrica por otra fuente menos impactante o (ii) cambio en el diseño del sistema hidropónico y bombeo por un sistema menos demandante de corriente eléctrica.

El uso del alimento balanceado ha sido uno de los principales limitantes para convertir a la acuacultura en una actividad sustentable. El problema recae en elevado porcentaje de harina y aceite de pescado necesarios para poder elaborar el alimento.

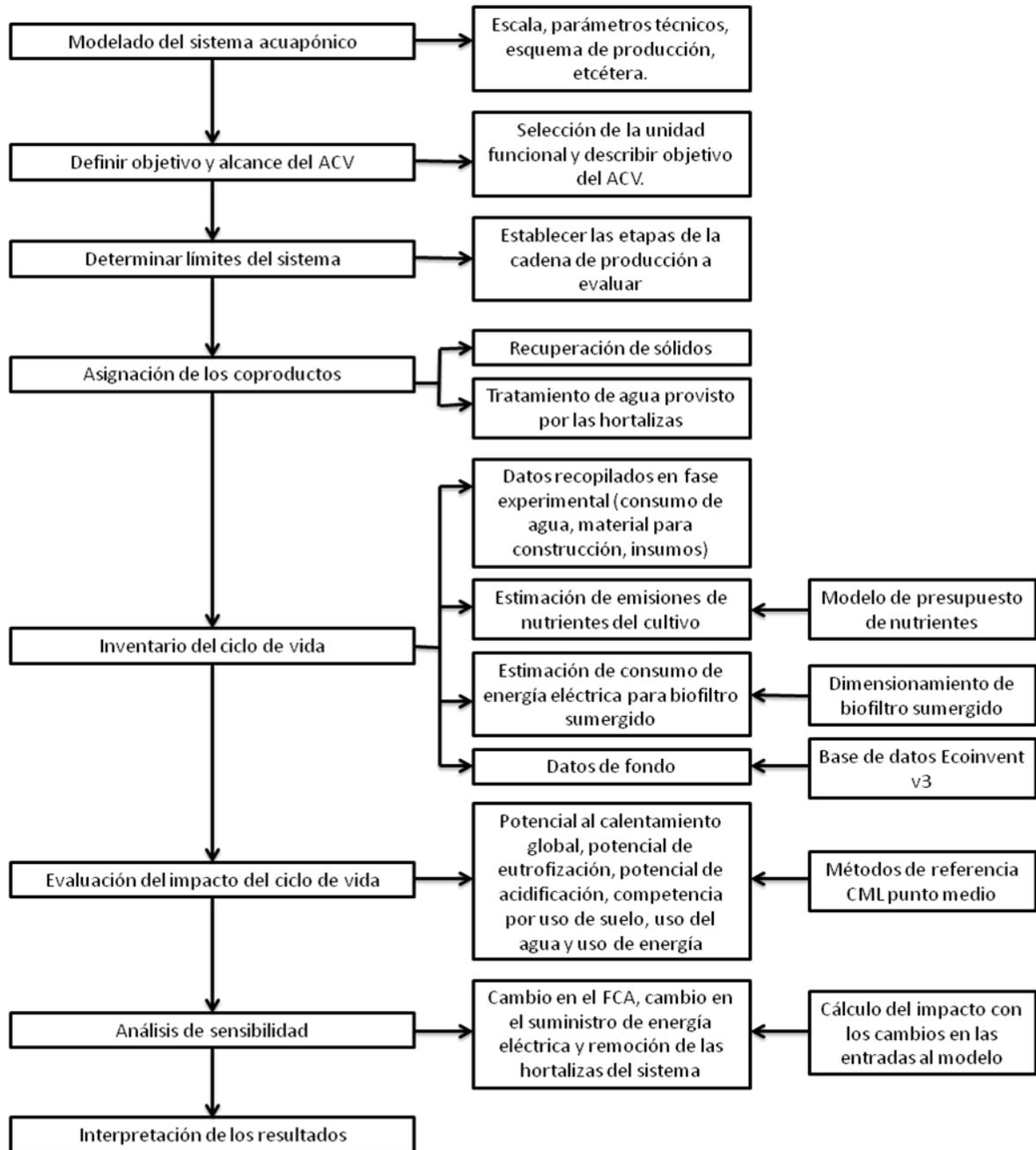


Figura 5.2. Esquema de propuesta para evaluación del impacto ambiental de un sistema acuapónico de camarón-hortalizas. ACV, Análisis de ciclo de vida; FCA, factor de conversión alimenticia.

El reto que presenta disminuir el impacto ambiental por medio del uso del alimento balanceado es complicado. Naylor *et al.* (2000) mencionan que debido a los altos

costos de la harina y aceite de pescado se han desarrollado alimentos basados en harinas vegetales. Esto probablemente contribuya a reducir el costo económico de la producción del alimento, pero el crecimiento de los organismos en cultivo se podría ver comprometido, además del impacto ambiental generado por el cambio de uso de suelo para la producción de los vegetales requeridos para la formulación del alimento.

Por otro lado, las plantas en el sistema contribuyen con la reducción del impacto ambiental. Al absorber y asimilar los nutrientes contenidos en el efluente, se evita el acumulamiento en el sistema y la necesidad de realizar recambios parciales de agua, al mismo tiempo que se reduce el consumo de agua. Fierro-Sañudo *et al.* (2015) estimaron un consumo de agua de 3.0 m³ por kilogramo de camarón producido en un sistema acuapónico de camarón con tomate y lechuga, y este consumo se reduce aun más cuando se incorporan la producción de las hortalizas (0.68 m³ por kilogramo de biomasa producida).

Como se mencionó anteriormente, los sólidos orgánicos particulados pueden ser utilizados en la fertilización de hortalizas. Rakocy (2007) menciona que los sólidos orgánicos particulados pueden ser utilizados en la suplementación de nutrientes a las plantas en los sistemas acuapónicos mediante aplicaciones foliares. Otra manera de aprovecharlos y evitar el impacto ambiental por su desecho, es en la sustitución parcial de los fertilizantes inorgánicos en cultivos de hortalizas en suelo. Dufault *et al.* (1998) encontraron un mayor rendimiento de pimiento morrón cuando se combinaron los sólidos orgánicos particulados con fertilizante inorgánico sobre aquellos tratamientos donde se aplicó solamente fertilizantes inorgánicos. Dufault *et al.* (1996) encontraron que los mejores rendimientos en un cultivo de brocolí fueron alcanzados con una mezcla de 20% de sólidos orgánicos particulados provenientes de un cultivo intensivo de camarón y 80% de fertilizantes orgánicos.

5.6. CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo del impacto ambiental de los sistemas acuapónicos es de suma importancia, ya que con ello será posible encontrar aquellos “puntos rojos” donde será necesario trabajar para volver a la acuaponía una técnica de producción aun más sustentable. Los resultados obtenidos de este tipo de análisis, serán claves para el

replanteamiento de diseños de sistemas acuapónicos futuros, como cambios en el manejo de la alimentación, suministros de energía, técnicas de producción hidropónica, entre otros aspectos, que ayuden a la disminución del impacto ambiental.

Por otro lado, el ACV permite cuantificar aquellas cargas que son evitadas al medio ambiente por medio del reuso de los sólidos orgánicos particulados y la producción hidropónica de hortalizas para la reducción/eliminación de los nutrientes disueltos en el efluente del cultivo de camarón. Esta es una de las cualidades que se han descrito como principales ventajas de la acuaponía moderna, pero hasta el momento solo se ha atribuido de manera cualitativa.

5.7. LITERATURA CITADA

- Alarcón-Silvas, S. G. 2013. Calidad del agua y balance de nutrientes (N y P) en el cultivo integrado de blanco (*Litopenaeus vannamei*), tomate (*Lycopersicon esculentum*) y lechuga (*Lactuca sativa*) utilizando agua de baja salinidad y cero recambio. Tesis de Maestría. ICMYL-UNAM. Distrito Federal, México.
- Aubin, J., E. Papatryphon, H. M. G. Van der Werf, J. Petit, and Y. M. Morvan. 2006. Characterisation of the environmental impact of a turbot (*Scophthalmus maximus*) re-circulating production system using life cycle assessment. *Aquaculture* 261: 1259-1268.
- Ayer, N. M. and P. H. Tyedmers. 2009. Assessing alternative aquaculture technologies: life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *J. Cleaner Prod.* 17: 362-373.
- Blidariu, F. and A. Grozea. 2011. Increasing the economical efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics – review. *Scientif. Papers Anim. Sci. Biotechnol.* 44 (2): 1-8.
- Boxman, S. E., Q. Zhang, D. Bailey, and M. A. Trotz. 2017. Life cycle assessment of a commercial-scale freshwater aquaponic system. *Environ. Eng. Sci.* 34 (5): 299-311.
- Bureau, D. P., S. Gunther, and C. Y. Cho. 2002. Chemical composition and preliminary theoretical estimates of waste outputs of rainbow trout reared in a commercial cage culture operations in Ontario. *N. Am. J. Aquac.* 65: 33-38.

- Cho, C. Y. and S. J. Kaushik. 1990. Nutritional energetic in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Rev. Nutr. Diet.* 61: 132-172.
- d'Orbcastel, E. R., J. P. Blancheton, T. Boujard, J. Aubin, Y. Moutounet, C. Przybyla, and A. Belaud. 2008. Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. *Aquaculture* 274: 72-79.
- Dufault, R. J., J. S. Hopkins, and P. Sandifer. 1996. Utility of shrimp sludge from organic aquiculture lagoons as a soil amendment for broccoli Production. *HortScience* 31 (4): 611-611.
- Dufault, R. J., A. Korkmaz, J. S. Hopkins, and P. A. Sandifer. 1998. Shrimp biosolids from aquaculture are a valuable fertilizer amendment for bell pepper production. *Proceedings of the National Pepper Conference, Citrus and Vegetable Magazine* 46-47.
- Dufault, R. J. and A. Korkmaz. 2000. Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer for bell pepper production. *Compost Sci. Util.* 8 (4): 310-319.
- Dufault, R. J., A. Korkmaz, and B. Ward. 2001. Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer for broccoli production. *Compost Sci. Util.* 9 (2): 107-114.
- Fierro-Sañudo, J. F., S. G. Alarcón-Silvas, J. A. León-Cañedo, J. G. Gutierrez-Valenzuela, J. Ramírez-Rochín, M. M. Mariscal-Lagarda, M. A. Franco-Nava, R. Lizárraga-Jiménez, J. I. Osuna-López, and F. Páez-Osuna. 2015. Integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) using diluted seawater: management, production and water consumption. *G. Adv. Res. J. Agric. Sci.* 4(7): 315-324.
- Forchino, A. A., H. Lourguioui, D. Brigolin, and R. Pastres. 2017. Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the life cycle assessment (LCA). *Aquacult. Eng.* 77: 80-88.
- Foteinis, S. and E. Chatzisyneon. 2016. Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case of study of lettuce cultivation in Greece. *J. Clean. Prod.* 112: 2462-2472.

- Henriksson, P. J. G., J. B. Guinée, R. Kleijn, and G. R. de Snoo. 2012. Life cycle assessment of aquaculture systems – a review of methodologies. *Int. J Life Cycle Assess.* 17: 304-313.
- Hunter, B. and G. W. Chamberlain. 2006. Feed additives. En: Boyd, C.E., D.E. Jory, and G.W. Chamberlain (Eds). *Operating procedures for shrimp farming*. Global Aquaculture Alliance. St Louis, Missouri, USA. 129–135 pp.
- Jonell, M. and P. J. G. Henriksson. 2015. Mangrove-shrimp farms in Vietnam – comparing organic and conventional systems using life cycle assessment. *Aquaculture* 447: 66-75.
- Losordo, T. M. and A. O. Hobbs. 2000. Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacult. Eng.* 23: 95-102.
- Maucieri, C., A. A. Forchino, C. Nicoletto, R. Junge, R. Pastres, P. Sambo, and M. Borin. 2018. Life cycle assessment of a micro aquaponic systems for educational purposes built using recovered material. *J. Clean Prod.* 172: 3119-3127.
- Naylor, R. L., R. J. Goldberg, J. H. Primavera, N. Kaustky, M. C. M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney and M. Troell. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017.
- Pantanella, E. 2008. Pond aquaponics: new pathways to sustainable integrated aquaculture and agriculture. *Aquacult. News*.
- Petellier, N., P. Tyedmers, U. Sonesson, A. Scholz, F. Zeigler, A. Flysjo, S. Kruze, B. Cancino, and H. Silverman. 2009. Not all salmon are created equal: Life cycle assessment (LCA) of a global salmon farming systems. *Environ. Sci. Technol.* 43, 8730.
- Piedrahita, R. H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226: 35-44.
- Rakocy, J. E. 2007. Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J.* 1: 14-17.
- Timmons, M. B., J. M. Ebeling, F. W. Wheaton, S. T. Summerfelt, and B. J. Vinci. 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd. ed. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY.
- Weidema, B. P. and Schmidt, J. H. 2010. Avoiding allocation in life cycle assessment revisited. *J. Ind. Ecol.* 14 (2): 192-195.

Xie, K. and K. A. Rosentrater. 2015. Life cycle assessment (LCA) and techno-economic analysis (TEA) of tilapia-basil aquaponics. En: 2015 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1 pp.

CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES GENERALES

A partir del presente estudio se puede concluir que el cultivo acuapónico de camarón-hortalizas usando dos fuentes de agua de baja salinidad (AS y AMD) es técnicamente factible. De manera general, la fuente de agua AS mostró el mejor desarrollo en términos de rendimiento de camarón y hortalizas (a excepción del primer ciclo de cultivo de lechuga). Los rendimientos estimados fueron comparables con aquellos calculados en monocultivos de camarón, albahaca y lechuga, y en cultivos integrados de camarón con tomate y tomate-lechuga. Estos resultados demuestran la eficiencia del sistema acuapónico propuesto para camarón y hortalizas en agua de baja salinidad de 1.7 g L^{-1} (2.7 dS m^{-1}).

Los resultados obtenidos a partir del análisis financiero sugieren que los dos escenarios acuapónicos comerciales a pequeña escala de camarón y hortalizas son rentables; sin embargo, AS mostró mejores indicadores financieros que AMD. Las hortalizas contribuyen con la mayor parte de la rentabilidad, debido a que los camarones solo generan el 1.1-1.2% del ingreso total por ventas. Los escenarios modelo mostraron una mayor sensibilidad al precio de venta de las hortalizas. Una prima en los precios de venta de las hortalizas podría mejorar la rentabilidad de los escenarios modelo. Los precios de equilibrio estimados fueron para albahaca US \$1.87 y US \$2.25, y para lechuga US \$0.33 y US \$0.31, para AS y AMD, respectivamente.

El análisis cuantitativo del impacto ambiental de los sistemas acuapónicos mediante el ACV es de suma importancia, ya que con ello será posible encontrar aquellos “puntos rojos” donde será necesario trabajar para volver a la acuaponia una técnica de producción aun más sustentable, además de poder estimar los impactos ambientales evitados gracias a su manejo integral de desechos (efluente y sólidos orgánicos particulados). Los resultados obtenidos de este tipo de análisis, serán claves para el replanteamiento de diseños de sistemas acuapónicos futuros, como cambios en el manejo de la alimentación, suministros de energía, técnicas de producción hidropónica, entre otros aspectos, que ayuden a la disminución del impacto ambiental.

Para futuras investigaciones, la cuestión principal en el cultivo acuapónico de camarón-hortalizas debe de enfocarse en encontrar un mejor balance en el número de camarones y plantas a crecer, así la mayoría de los nutrientes producidos por el cultivo

de camarón y la descarga de ellos serían minimizados. Sin lugar a dudas, la integración de hortalizas a través de sistemas hidropónicos al cultivo de camarón, podría ser una buena alternativa para mejorar la rentabilidad de los productores de camarón, al mismo tiempo que minimiza el impacto ambiental del cultivo de camarón de baja salinidad mediante el uso de efluentes ricos en nutrientes y menor uso de agua. Es importante el escalamiento a una escala comercial y demostrar la viabilidad técnica y financiera de este proyecto.