Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

COMPARACIÓN PILOTO DEL RENDIMIENTO ENTRE SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN, ACUAPONÍA E HIDROPONÍA PARA EL CULTIVO INTENSIVO DE TILAPIA (*Oreochromis* sp.) Y TOMATE (*Solanum lycopersicum*).

Por:

José Francisco Pinedo García

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN DE ACUICULTURA Y MANEJO AMBIENTAL

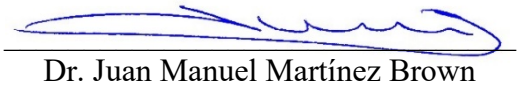
Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

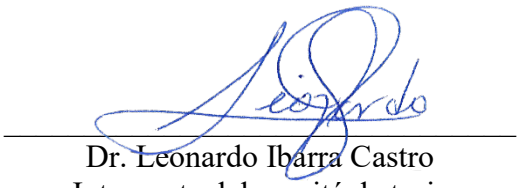
Mazatlán, Sinaloa Octubre 2020

APROBACIÓN Y FIRMAS

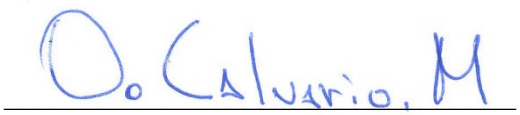
Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de José Francisco Pinedo García, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias



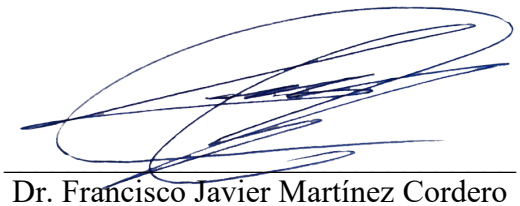
Dr. Juan Manuel Martínez Brown
Director de Tesis



Dr. Leonardo Ibarra Castro
Integrante del comité de tesis



Dr. Omar Calvario Martínez
Integrante del comité de tesis



Dr. Francisco Javier Martínez Cordero
Integrante del comité de tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis "Comparación Piloto del Rendimiento entre Sistemas de Recirculación, Acuaponía e Hidroponía para el Cultivo Intensivo de Yilapia (*Oreochromis* sp.) y Tomate (*Solanum lycopersicum*)" es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor José Francisco Pinedo García, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director(a) de tesis.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.
Coordinación de Programas Académicos

CIAD

Dr. Pablo Wong González
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca crédito brindada durante el transcurso del posgrado.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán por permitirme ingresar a la Maestría en Ciencias en Acuicultura.

A mi director de tesis, el Dr. Juan Manuel Martínez Brown quien con sus conocimientos y apoyo me guio durante la realización de este trabajo.

A mi comité de revisión: Dr. Leonardo Ibarra Castro, Dr. Omar Calvario Martínez, y Dr. Francisco Javier Martínez Cordero por sus observaciones y comentarios los cuales ayudaron a enriquecer el presente trabajo.

Al M.C. Juan Luis Sánchez Téllez por todo el apoyo recibido, orientación y participación para el montaje del experimento.

Al personal de la Planta Piloto de Producción de Peces Marinos quienes me ayudaron en diferentes aspectos y su apoyo fue esencial en la realización de este trabajo: Luis Alexis, Jaime, Edgardo, Alejandro, Héctor y Aarón.

A la Biol. Virginia Patricia Domínguez Jiménez e Ing. Paulina Monserrat Reyes Velarde por su disponibilidad, asesoría y ayuda en el procesamiento de las muestras.

A la M.C. Luz Estela Rodríguez Ibarra y M.C. María Isabel Abdo de la Parra por el apoyo recibido durante el desarrollo del experimento.

A la Ing. Yetzi Itzel Valtierra Medina por todo el apoyo y compañía recibido durante mi Maestría.

A mi familia por su apoyo que ha sido parte substancial e indispensable para mi crecimiento personal.

CONTENIDO

APROBACIÓN 2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL 3
AGRADECIMIENTOS 4
CONTENIDO 5
LISTA DE FIGURAS 8
LISTA DE CUADROS 10
RESUMEN 12
ABSTRACT 14
1. INTRODUCCIÓN 15
2. ANTECEDENTES 17
2.1. Tipos de Sistema de Cultivo 17
2.2. Sistemas de Recirculación Acuícola (RS) 19
2.2.1. Generalidades 19
2.2.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas de Recirculación Acuícola 21
2.3. Hidroponía 23
2.3.1. Generalidades 23
2.3.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas Hidropónicos 25
2.4. Acuaponía 26
2.4.1. Generalidades 26
2.4.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas Acuapónicos 29
2.5. Especies Modelo para Cultivo 30
2.5.1. Tilapia 30
2.5.1.1. Taxonomía. 31
2.5.1.2. Reseña histórica. 31
2.5.1.3. Producción de tilapia en México. 31
2.5.1.4. Biología y requerimientos para el cultivo. 32
2.5.2. Tomate 33
2.5.2.1. Taxonomía. 34
2.5.2.2. Condiciones ambientales. 34
2.5.2.3. Nutrición de la planta de tomate. 36
2.6. Análisis Financiero de los Sistemas de Producción 36
2.6.1. Evaluación de la rentabilidad. 36
2.6.2. Comparación financiera de los sistemas de producción. 37
2.7. Preguntas de Investigación 39
3. HIPÓTESIS 41
4. OBJETIVOS 42

CONTENIDO (continuación)

4.1. Objetivo General 42
4.2. Objetivos Específicos 42

5. MATERIALES Y MÉTODOS 43
5.1. Instalación Experimental 43
5.1.1. Preparación del Área Experimental y Tanques de Cultivo 44
5.2. Cálculos para el Diseño de los Sistemas 45
5.3. Sistemas Experimentales 47
5.3.1. Descripción y Operación del Sistema de Recirculación Acuícola 47
5.3.2. Diseño del Sistema Hidropónico 49
5.3.3. Descripción del Sistema Hidropónico (HS) 50
5.3.4. Diseño del Sistema Acuapónicos. 51
5.3.5. Descripción del Sistema Acuapónico (AS) 52
5.3.6. Problemas Durante la Operación de los Sistemas de Producción 53
5.4. Cultivo de Tilapia 53
5.4.1. Adquisición y Transporte de Juveniles 53
5.4.2. Aclimatación y Siembra de Juveniles 54
5.4.3. Monitoreo de la Calidad del Agua 55
5.4.4. Alimentación 55
5.4.5. Determinación de los Parámetros Zootécnicos. 56
5.4.6. Análisis de Propiedades Organolépticas 57
5.5. Cultivo de Tomate 58
5.5.1. Producción de Plántulas 58
5.5.2. Trasplante de las Plántulas 58
5.5.3. Entutorado de las Plantas 59
5.5.4. Determinación de Parámetros Fitotécnicos. 59
5.6. Evaluación Financiera de los Sistemas de Producción 60
5.6.1. Indicadores Financieros 61
5.6.1.1. Punto de Equilibrio (PE). 61
5.6.1.2. Relación Beneficio/Costo (R B/C). 61
5.6.1.3. Periodo de Recuperación (PR). 62
5.6.1.4. Valor Presente Neto (VPN) 62
5.6.1.5. Tasa Interna de Retorno (TIR). 63
5.6.1.6. Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones (EBITDA). 63
5.6.1.7. Margen EBITDA 63
5.7. Análisis Estadístico de los Datos 64

6. RESULTADOS 65
6.1. Parámetros de Calidad de Agua 66
6.1.1. Parámetros Físicos 66
6.1.2. Parámetros Químicos 70
6.1.3. Sólidos 75

CONTENIDO (continuación)

6.2. Parámetros Zootécnicos....78
6.3. Cultivo de Tomate....80
6.4. Análisis Sensorial....81
6.5. Análisis Financiero....81
6.5.1. Evaluación Financiera del Primer Escenario.....81
6.5.2. Evaluación Financiera del Segundo Escenario.....83

7. DISCUSIÓN....85
7.1. Parámetros Físicos....85
7.2. Parámetros Químicos....88
7.3. Parámetros Zootécnicos....91
7.4. Cultivo de Tomate....93
7.5. Análisis Financiero de los Sistemas de Producción....93

8. CONCLUSIONES....95

9. RECOMENDACIONES....96

10. REFERENCIAS....97

11. ANEXOS....106
11.1. Características Evaluadas en el Análisis Sensorial....106
11.2. Tabla de Alimentación Proporcionada por el UNCIBNOR....107
11.3. Desglose Costos de Inversión....109
11.4. Desglose Costos Operación....114

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

1 Clasificación de los sistemas de cultivo con base en la relación entre el uso de agua y el nivel de alimento, tecnología, inversión, manejo y producción. 17

2 Diagrama de flujo de las operaciones unitarias utilizados en un sistema de recirculación (Tidwell, 2013).. 21

3 Sector experimental. 43

4 Disposición de los sistemas experimentales dentro del área designada para el estudio. 44

5 Configuración del sistema de recirculación acuícola empleado para el estudio. 48

6 Producción acumulada de nitrógeno con respecto a la biomasa total y la producción diaria por las tilapias y la absorción de nitrógeno por parte de las plantas en el periodo considerado de 110 días. 49

7 Configuración del sistema hidropónico empleado para el estudio. 50

8 Configuración del sistema acuapónico empleado para el estudio. 52

9 Temperatura ambiental máxima (diurna) y mínima (nocturna) registradas dentro del sector experimental. 65

10 Variación promedio la temperatura del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 67

11 Variación promedio del pH del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experiment .. 68

12 Variación promedio de la concentración de oxígeno en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento.. 69

13 Variación promedio de la conductividad eléctrica del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 70

14 Variación promedio de amonio (NH_4^+) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 72

15 Variación promedio de nitritos (NO_2^-) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 73

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura **Página**

16 Variación promedio de nitratos (NO_3^-) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. [1] 74

17 Variación promedio de ortofosfatos (PO_4^{3-}) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 75

18 Variación promedio de sólidos totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento 76

19 Variación promedio de sólidos volátiles totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento.. 77

20 Variación promedio de sólidos suspendidos totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. 78

21 Gráfica del peso promedio obtenido en los sistemas de recirculación y acuaponía contra el peso estimado calculado a partir de la tabla proporcionada por el UNCIBNOR 80

LISTA DE CUADROS

Cuadro **Página**

1 Clasificación y tipos de técnicas para el suministro de nutrientes en hidroponía (Goddek et al., 2019). 24

2 Parámetros promedios de calidad de agua recomendados para el crecimiento de Tilapia..... 32

3 Rangos de temperatura críticos para el desarrollo del tomate (Allende et al., 2017 .. 35

4 Nivel y proporciones óptimos de nutrientes requerido para el crecimiento del tomate (López-Marín, 2017; Molina, 2016)..... 36

5 Balance de masas, cálculos para requerimientos de flujo y dimensionamiento del biofiltro (basado en Losordo & Hobbs, 2000). 45

6 Programa de alimentación empleado para el experimento basado en la tabla del Anexo 2. 56

7 Valores promedio y desviación estándar de los parámetros físicos registrados en los tres sistemas. 66

8 Concentración promedio (desviación estándar) de nutrientes inorgánicos y sólidos en el efluente de los sistemas experimentales. 70

9 Promedios ± desviación estándar del rendimiento obtenido en el crecimiento de la tilapia Oreochromis niloticus var. Chitralada en los sistemas de recirculación y acuaponía. 79

10 Datos de producción de biomasa promedio y desviación estándar en los sistemas acuapónico e hidropónico..... 81

11 Resultados del análisis sensorial de los filetes (cocinados) producidos en el sistema AS y RS. 81

12 Resumen de los costos operativos y ventas brutas de los sistemas experimentales... 82

13 Resumen financiero de los tres sistemas experimentales. 83

14 Parámetros físicos de diversos sistemas de producción acuapónicos y recirculación 87

15 Parámetros químicos de diversos sistemas de producción acuapónicos y recirculación 90

16 Datos promedio de producción de sistemas acuapónicos y recirculación 92

17 Tabla de Alimentación en la cual se basó el criterio de alimentación, proporcionada por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S C. Unidad Nayarit y cotejada con (Nicovita, 2013)..... 107

18 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema RS. 109

LISTA DE CUADROS (continuación)

Figura **Página**

19 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema AS 111
20 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema HS 113
21 Costos operativos de tres unidades de un sistema de recirculación 114
22 Costos operativos de tres unidades de un sistema acuapónico 116
23 Costos operativos de tres unidades de un sistema hidropónico 117

RESUMEN

En la actualidad se han propuesto nuevas tecnologías agroalimentarias como respuesta a la creciente demanda de alimentos a nivel mundial. Entre estas destacan los sistemas hidropónicos (HS), los de recirculación acuícola (RS) y los acuapónicos (AS). En años recientes ha crecido la idea de que los AS son la solución más sostenible y rentable en comparación a otras tecnologías productivas. Sin embargo, no existe información suficiente para evaluar objetivamente la factibilidad técnico-económica de los AS. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue comparar, a escala piloto, el rendimiento (zootécnico y vegetal), la variación en la calidad de agua y la viabilidad financiera de los AS, HS y RS. Como especies de cultivo modelo se usaron a la tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) y al tomate (*Solanum lycopersicum* var. Saladette). Los AS y RS se diseñaron para una capacidad de carga máxima de 25 kg m^{-3} de tilapia. Con base en el análisis de balance de masas se seleccionó, como variable crítica de diseño, la tasa de remoción (en los AS) u oxidación (en los RS) del nitrógeno amoniacal total. Los HS fueron dimensionados con base en los AS. Para cada tipo de sistema se usaron tres réplicas; cada réplica fue una unidad de cultivo independiente. El experimento duró 76 días. Los resultados no mostraron diferencias significativas en el rendimiento zootécnico (ganancia de biomasa, FCR, SGR y supervivencia) entre los AS y RS. Tampoco se encontraron diferencias significativas en la concentración de nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+), ortofosfatos (PO_4^{-3}) y nitritos (NO_2^-). Por otra parte, debido a una insuficiente filtración mecánica en AS, se acumuló materia orgánica particulada en el componente hidropónico de este sistema, lo que causó la reducción en la absorción de nutrientes por las plantas a la octava semana. Por otra parte, tanto en los sistemas acuapónicos como en los hidropónicos no se obtuvieron tomates. Esto se debió a la presencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y a una posible infección viral adquirida a través de la misma. Por lo tanto, el rendimiento en la producción de frutos no pudo ser evaluado. Por lo cual se optó por evaluar la producción de biomasa vegetal, misma que no mostró diferencias significativas entre sistemas. Adicionalmente, el sabor de la carne del pescado producido en AS se vio afectado por el sustrato empleado en el componente hidropónico. Finalmente, usando una proyección basada en el crecimiento hasta talla comercial y una producción de frutos estimada, el análisis financiero mostró el siguiente orden descendente de la rentabilidad entre sistemas: $R_{AS}>R_{HS}>R_{RS}$.

Palabras claves: Agricultura sostenible, Acuicultura sostenible, cultivo sin suelo, nutrientes, peces, plantas.

ABSTRACT

At present, new agri-food technologies have been proposed in response to the growing demand for food worldwide. These include hydroponic systems (HS), recirculating aquaculture systems (RS) and aquaponics (AS). In recent years the idea has grown that AS are the most sustainable and cost-effective solution compared to other production technologies. However, there is not enough information to objectively evaluate the technical-economic feasibility of SAs. Therefore, the objective of the present work was to compare, on a pilot scale, the performance (zootechnical and plant), the variation in water quality and the financial viability of the AS, HS and RS. Tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) and tomato (*Solanum lycopersicum* var. Saladette) were used as model culture species. The AS and RS were designed for a maximum load capacity of 25 kg m^{-3} of tilapia. Based on the mass balance analysis, the removal rate (in the AS) or oxidation (in the RS) of total ammonia nitrogen was selected as a critical design variable. The HS were sized based on the AS. For each type of system were used in three replicas; each replica was an independent culture unit. The experiment lasted 76 days. The results do not show significant differences in the zootechnical performance (biomass gain, FCR, SGR and survival) between the AS and RS. Nor were significant differences found in the concentration of nitrates (NO_3^-), ammonia (NH_4^+), orthophosphates (PO_4^{-3}) and nitrites (NO_2^-). On the other hand, due to insufficient mechanical filtration in SA, particulate organic matter accumulated in the hydroponic component of this system, which caused a reduction in the absorption of nutrients by the plants at the eighth week. On the other hand, tomatoes were not obtained in both aquaponic and hydroponic systems. This was due to the presence of silverleaf whitefly (*Bemisia tabaci*) and a possible viral infection acquired through it. Therefore, the yield in fruit production could not be evaluated. Therefore, it was decided to evaluate the production of plant biomass, which did not show significant differences between systems. In addition, the flavor of the meat of the fish produced in AS was affected by the substrate used in the hydroponic component. Finally, using a projection based on growth to commercial size and estimated fruit production, financial analysis showed the following descending order of profitability between systems: $R_{AS}>R_{HS}>R_{RS}$.

Keywords: Sustainable agriculture, Sustainable aquaculture, soilless cultivation, nutrients, fish, plants.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, el rápido crecimiento de la población mundial ha generado una creciente demanda de alimentos, entre los cuales se encuentra el pescado (FAO, 2018a). Actualmente, la demanda de pescado en el mundo es satisfecha principalmente por la acuicultura. En México aún es cubierta principalmente por la pesca (CONAPESCA, 2017a), a pesar de que la mayor parte de las pesquerías se encuentran sobreexplotadas (FAO, 2018a). A nivel mundial, la acuicultura ha tenido una tasa de crecimiento mayor que otros sistemas de producción pecuaria (FAO, 2018a), pero ha sido criticada por ser una actividad poco sostenible debido al impacto ambiental que ocasiona (Velasco-Amaro et al., 2012) por lo cual la acuicultura se presenta como un sector estancado (Holland, 2019). En un contexto de producción agropecuaria, para solucionar el problema del impacto ambiental por uso de suelo, de agua y contaminación por vertido de nutrientes y agroquímicos, se ha optado por emplear tecnologías que permitan aumentar la producción de forma híper-intensiva, optimizando el uso de agua y suelo y reduciendo las descargas contaminantes (Rakocy et al., 1992). Entre estas tecnologías destacan los sistemas de recirculación acuícola, los acuapónicos y los hidropónicos (Goddek et al., 2019; Lewandowski et al., 2018).

Los sistemas de recirculación acuícola son una tecnología en la que se recicla el agua del cultivo hasta en un 95%. Esto es posible gracias a una serie de procesos de tratamiento del agua que permiten mantener los principales parámetros de calidad de agua bajo control (Goddek et al., 2019; Timmons & Ebeling, 2010). Los sistemas hidropónicos se basan en el cultivo de plantas sin suelo agrícola, a través de la irrigación directa de las raíces con una solución nutritiva disuelta en agua (Goddek et al., 2019; Lewis et al., 1978). Este sistema permite tener bajo control los requerimientos nutricionales que afectan el crecimiento de las plantas. Los sistemas acuapónicos combinan la tecnología de recirculación con la hidroponía, permitiendo, en teoría, producir peces y plantas de forma híper-intensiva y más eficiente; incluso, en lugares con escasez de agua o impactados (Goddek et al., 2019; Rakocy et al., 2006). Es por esto último que la acuaponía ha sido denominada como altamente sostenible. Sin embargo, los estudios realizados hasta la fecha sobre los sistemas acuapónicos ofrecen resultados contradictorios. Además, la mayoría de estos estudios se han realizado usando unidades de cultivo experimentales de pequeños volúmenes de agua (30 a 1000

L), con énfasis en el cultivo de plantas y usando generalmente a los peces como un cultivo secundario a bajas densidades (p. ej., Effendi et al., 2018; Magallón-Barajas et al., 2015; Oladimeji et al., 2018; Selek et al., 2016; Stathopoulou et al., 2019), lo cual no es extrapolable a una producción de nivel comercial. Por lo tanto, es necesario realizar una comparación a escala piloto del rendimiento tanto productivo como financiero para conocer objetivamente la sostenibilidad de esta tecnología y hacer proyecciones más realistas de su aplicación a escala comercial.

Establecer la viabilidad técnico-económica de los cultivos intensivos simultáneos en los sistemas acuapónicos en el contexto de la sostenibilidad, permitiría tener criterios para justificar su aplicación comercial. Con este propósito, en el presente trabajo se evaluó el comportamiento de distintos parámetros de rendimiento zootécnico, fitotécnico, de calidad de agua y financiero de los sistemas acuapónicos, recirculación e hidropónicos. Los tres tipos de sistemas experimentales fueron diseñados con una capacidad de carga específica para operar como cultivos intensivos a una escala piloto, usando como especies de cultivo a la tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) y el tomate (*Solanum lycopersicum*).

2. ANTECEDENTES

2.1. Tipos de Sistema de Cultivo

De acuerdo con la relación entre el nivel de uso de agua y el grado de tecnificación (nivel de suministro de alimento, control de calidad del agua, inversión, manejo y biomasa producida), los sistemas de cultivo se clasifican en: sistemas extensivos, semi-intensivos, intensivos e hiper-intensivos (El-Sayed, 2006; Lewandowski et al., 2018; **Figura 1**).

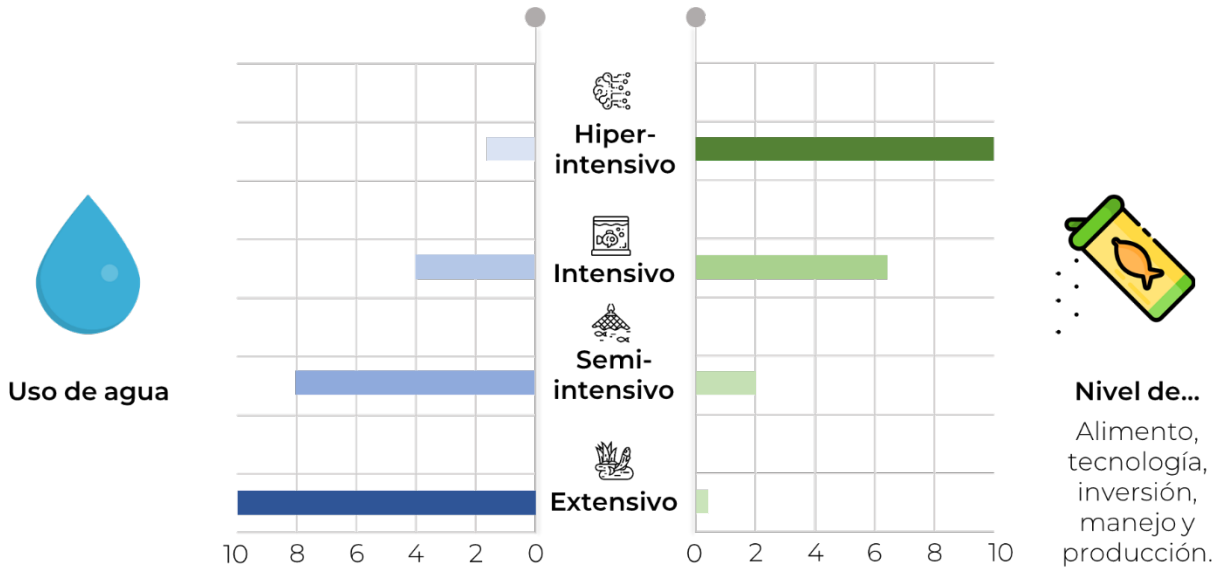


Figura 1 Clasificación de los sistemas de cultivo con base en la relación entre el uso de agua y el nivel de alimento, tecnología, inversión, manejo y producción.

El conjunto de las cuatro categorías denota una relación inversa entre el uso de agua y el nivel de tecnificación para el control de la calidad de agua y la alimentación. Lewandowski et al. (2018) proporcionan los siguientes conceptos sobre los sistemas de producción:

En los sistemas extensivos la producción se sustenta con base en la capacidad de carga natural del cuerpo de agua usado para el cultivo. Típicamente en estos sistemas se usan extensos cuerpos de

agua y se sustentan únicamente con recursos alimenticios naturales (p. ej., bacterias, fitoplancton, zooplancton, zoobentos, detritos, peces) sin aportes sustanciales de alimento externo o fertilizante. En los sistemas de acuicultura semi-intensiva, los organismos acuáticos se cultivan en estanques naturales o construidos. Empleando una combinación de alimentación externa y recursos alimenticios naturales respaldados por aportes de fertilizantes. Los sistemas de producción intensiva están generalmente diseñados para ajustar y estabilizar las condiciones de cultivo a las necesidades y requerimientos de las especies cultivadas. El cultivo se puede llevar cabo en jaulas de red (es semi-intensivo, pero intensivo dentro de la jaula.), en sistemas tierra dentro con flujo abierto o en sistemas cerrados con recirculación. Estos sistemas emplean equipamiento tecnológico (p. ej., aireadores, filtros, bombas o controles de temperatura) los cuales permite mayores densidades de cultivo. Por último, los sistemas hiper-intensivos son similares a los sistemas intensivos aumentando la densidad de cultivo y el control de la calidad del agua.

Una de las principales críticas a la acuicultura se centra en los impactos que causan sus efluentes sobre los cuerpos de agua adyacentes que reciben sus descargas (Barón-Sevilla et al., 2004; INEGI, 1996; Marinho-Soriano et al., 2009; Martínez-Córdova et al., 2009; Sommer, 2009; Velasco-Amaro et al., 2012). Los efectos van desde un aumento en la demanda biológica de oxígeno hasta una alteración en los ciclos de los nutrientes, causando impacto negativo sobre la calidad del agua y sedimento del ecosistema (Barraza-Guardado et al., 2014; Buschmann, 2001). Se estima que una o varias unidades de producción acuícola que acumulen una producción de 10 t $año^{-1}$ o mayor tendrá un impacto negativo en los cuerpos de agua receptores (Velasco-Amaro et al., 2012). De los efluentes vertidos en cuerpos de agua, el nitrógeno es el compuesto que causa el mayor impacto en los ecosistemas (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012). Se estima que al año se vierten 17 t de nitrógeno en cuerpos de agua adyacentes a unidades de producción acuícola en México (Velasco-Amaro et al., 2012). A parte de los efluentes otro problema en la acuicultura son los residuos sólidos sedimentables (lodos). Por ejemplo, han sido reportada una producción de 1.3 kg de lodos (12-40% de materia seca) por 1 kg de alimento suministrado en cultivos tilapia roja (*Oreochromis* sp.) (Rafiee & Saad, 2005). Estos lodos de no ser correctamente manejados pueden representar un aporte excesivo de nutrientes y metales al ambiente (Cerozi & Fitzsimmons, 2017). Debido a la necesidad de mitigar el impacto de los efluentes y a que la acuicultura compite con otras actividades económicas por el uso de agua y suelo (FAO, 2011), se han desarrollado tecnologías para aumentar la producción optimizando el uso de agua. Entre estas se encuentran los sistemas de recirculación acuícola.

2.2. Sistemas de Recirculación Acuícola (RS)

2.2.1. Generalidades

Un sistema de recirculación acuícola (RS) es un sistema intensivo de producción que utiliza una serie de pasos de tratamiento de agua para reacondicionar el agua de cultivo y facilitar su reutilización (Timmons & Ebeling, 2010). Se considera un sistema de recirculación cuando el porcentaje de recambio es menor al 10% del volumen total (Verdugo-Mora, 2009). Los RS prometen afrontar los dos principales desafíos de la acuicultura: la disponibilidad limitada de agua y la acumulación de amoníaco tóxico excretado por los organismos cultivados (p. ej., peces o crustáceos) (Goddek et al., 2019). Entre las especies cultivadas exitosamente en sistemas de recirculación acuícola, se encuentran: tilapia (*Oreochromis* sp.), lubina rayada (*Morone saxatilis*), cobia (*Rachycentron canadum*), pámpano (*Trachinotus* sp.), barramundi (*Lates calcarifer*) y camarón marino (*Penaeus* sp.) (Tidwell, 2013). Entre los organismos principalmente cultivados se encuentran *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis mossambicus* (Badiola et al., 2012).

La tecnología RS requiere una gran inversión, pero se compensa con una alta producción en volúmenes y espacios relativamente pequeños. Sin embargo, los sistemas de recirculación cerrada suelen fracasar por algunas de estas razones (Badiola et al., 2012):

- Un costo elevado de inversión.
- Poca información de los productores sobre los principios básicos en los que se basa el funcionamiento de los sistemas.
- Falla en la capacitación del personal en la determinación del estado operativo de los componentes del sistema.
- Un uso inadecuado del sistema, o en algunos casos operación con componentes inadecuados para los objetivos.
- Un diseño incorrecto (dimensionamiento o ausencia de componentes importantes).
- Cultivo de especies con bajo valor en el mercado, lo cual no remunera el costo de inversión y operación.
- Falta de conocimiento en las buenas prácticas de manejo y bienestar animal.

En los sistemas RS el manejo de sólidos y la operación y manejo de biofiltros son las tareas más difíciles (Badiola et al., 2012). Un sistema de recirculación cerrado requiere principalmente de cuatro operaciones unitarias (**Figura 2**): filtración mecánica (eliminación de material sólido), filtración biológica (oxidación de amonio a nitrato), intercambio de gases (eliminación de dióxido de carbono y suministro de oxígeno) y desinfección (inactivación de patógenos p. ej., *Trichodina* sp.).

Las operaciones unitarias pueden estar vinculadas o separadas, y cada una puede ser colocada en diferentes secuencias. Sin embargo, unas configuraciones son más rentables y eficientes dependiendo de la escala del proyecto. La elección de los componentes dependerá de un análisis sobre la especie, presupuesto, área disponible y la región, todo en términos de rentabilidad productiva y económica. Todo esto debe estar subordinado a un análisis matemático sobre el diseño del sistema y su capacidad de carga basados en balances de masas, tasa de carga hidráulica y biología de la especie de interés.

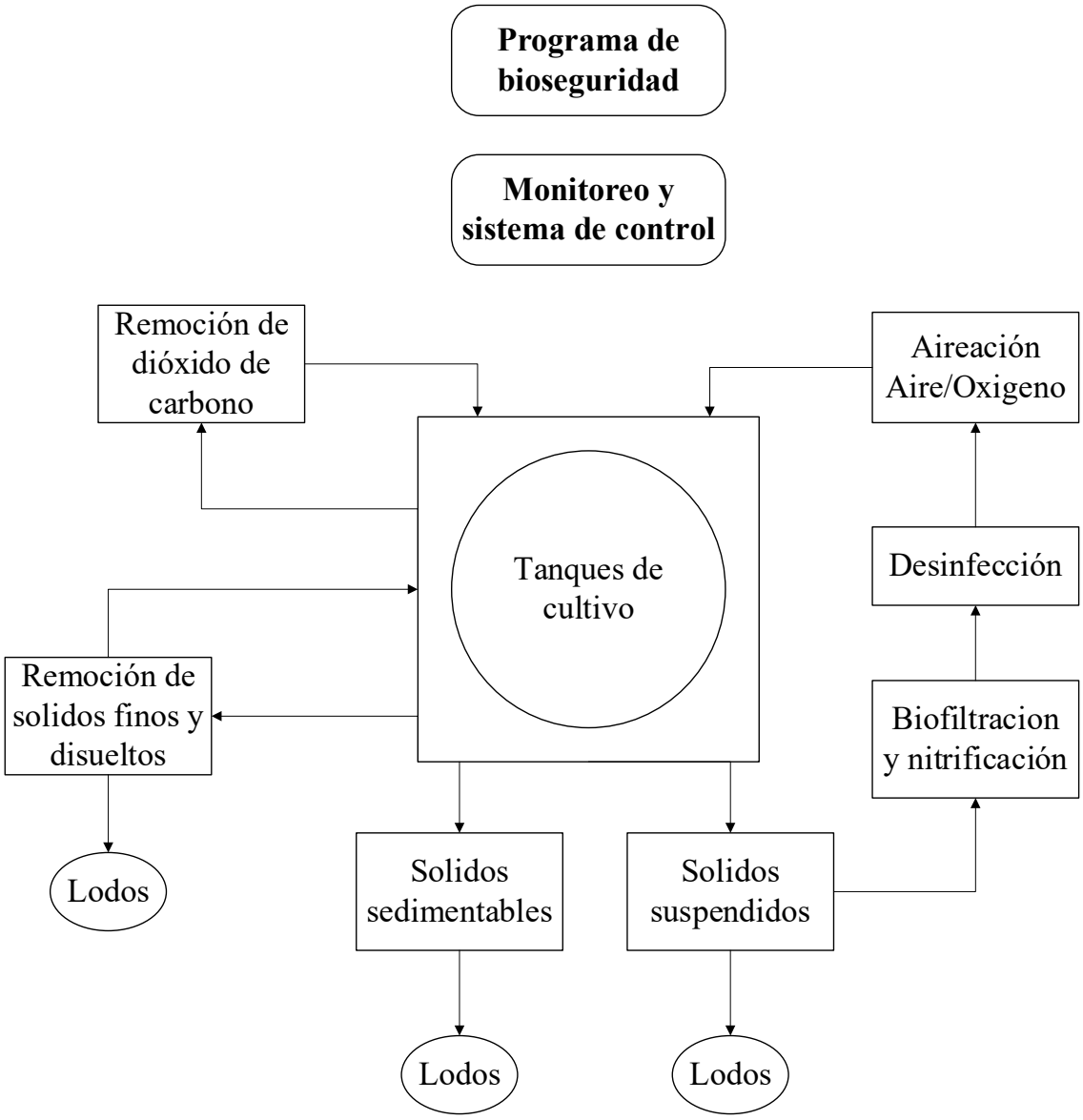


Figura 2 Diagrama de flujo de las operaciones unitarias utilizados en un sistema de recirculación (Tidwell, 2013). El agua se mueve desde el tanque central de cultivo y fluye a través de sistemas que eliminan los sólidos (sedimentables y suspendidos), posteriormente se eliminan los sólidos finos y disueltos, se oxida el amonio a nitrato, se elimina el dióxido de carbono y agrega oxígeno (generalmente por intercambio gaseoso con el oxígeno atmosférico), y finalmente, cuando es necesario, se desinfectan el agua antes de devolverlo al tanque de cultivo.

2.2.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas de Recirculación Acuícola

Actualmente el desarrollo tecnológico e investigación de los sistemas RS está dirigido a mejorar el

proceso de filtración biológica (Goddek et al., 2019; Lu et al., 2020; Pedersen et al., 2020), al establecimiento de sistemas "todo en uno" que hacen más asequible la recirculación en tierra (Kramer, 2019) y al manejo del subproducto de la filtración mecánica (lodos) (Aalto et al., 2020; Heiderscheidt et al., 2020; Rafiee & Saad, 2005).

Recientemente y como consecuencia de la fuerte oposición de movimientos ambientalistas aunado a la intensa competencia por el acceso al agua, los sistemas de recirculación acuícola han comenzado a estar más presentes en el mundo (Holland, 2019). Debido a la preocupación de algunos países por la seguridad alimentaria, se está apostando por los sistemas de recirculación acuícola (Waycott, 2020). Por ejemplo, la compañía Blue Ridge Aquaculture en Martinsville, Virginia. produce anualmente 2,131.88 t de tilapia, en un sistema de recirculación acuícola bajo techo con 43 tanques en un sector de 9,290.30 m² (Kramer, 2020). La compañía Ideal Fish en Waterbury, Connecticut, produce 5,896 toneladas anuales de Lubina (*Dicentrarchus labrax*), empleando un sistema de recirculación acuícola con 28 tanques en un sector de 5,852.89 m² (Kramer, 2020). Asimismo, la compañía Fish Farm estableció en Jebel Ali (Emiratos Árabes) un sistema de recirculación acuícola con una producción de 2000 t de salmón (*Salmo salar*) en 2017. Este sistema de recirculación emplea cuatro tanques para la cría de salmones, cada tanque con 16 metros de diámetro y 4.5 metros de profundidad (Waycott, 2020).

Este tipo de sistemas son prometedores, ofrecen hacer frente a problemas ambientales y obtener alimento seguro y de calidad. Sin embargo, requieren elevado equipamiento tecnológico y equipo técnico calificado para mantener las condiciones adecuadas para el cultivo. Por el alto consumo eléctrico del equipamiento de este tipo de sistemas y la elevada inversión inicial (más de $3,000, 000 USD), resulta complicado establecerlos en países en desarrollo.

En México los sistemas de recirculación acuícola aún no se han establecido de manera significativa debido a que son más rentables los sistemas de flujo abierto como menciona Verdugo-Mora (2009). Este autor realizó un análisis bioeconómico del cultivo intensivo de tilapia en sistemas de recirculación y concluye que los sistemas de recirculación acuícola a escala comercial son rentables solo bajo ciertos escenarios, por ejemplo: que los organismos tengan un factor de conversión alimenticia de al menos 1.1 a 1.3, se proporcionen subsidios del 70% en la energía eléctrica, se establezcan 30 tanques de engorda de 29.71 m³ y una reducción de costos en el biofiltro. Además, se precisa un incremento en el precio de venta del producto, lo cual resulta poco probable.

2.3. Hidroponía

2.3.1. Generalidades

La hidroponía es una técnica donde el cultivo de plantas se realiza sin requerir de suelo agrícola, realizando el cultivo en sustratos inertes, directamente sobre el agua o suspendidas en el aire con aspersiones de nutrientes en las raíces (Goddek et al., 2019; Resh, 2013; Rubio-Asensio et al., 2020). Las ventajas principales frente al cultivo tradicional son: mayor densidad de cultivo (no. de plantas m^{-2}), uso de agua 90% más eficiente, los nutrientes se suministran de manera controlada y balanceada directamente a las raíces (a través de una solución nutritiva disuelta en agua) lo que permite cultivar prácticamente cualquier planta (Goddek et al., 2019; Resh, 2013). Sin embargo, la solución nutritiva requiere monitoreo constante de su composición y debe ser balanceada adecuadamente para cada etapa de crecimiento (Sánchez-Del Castillo et al., 2014). Además, esta técnica precisa mayor inversión inicial que la agricultura tradicional, debido a la infraestructura necesaria para el cultivo y operación (p. ej., invernadero, bombas para circular el agua y estructuras para cultivar las plantas) (Rubio-Asensio et al., 2020).

Existen diferentes tipos de sistemas hidropónicos para cultivar plantas y técnicas para suministrar los nutrimentos (**Cuadro 1**). Algunos tipos emplean un sustrato sólido para el desarrollo del sistema radicular (útiles para hortalizas de fruto), otros no cuentan con un sustrato sólido y el desarrollo del sistema radicular ocurre directamente sobre el agua o en el aire (útiles para hortalizas de hoja). Además, este tipo de cultivo puede ser sistema cerrado o abierto (Goddek et al., 2019). En el sistema abierto la solución drenada no se reutiliza, y en un sistema cerrado la solución nutritiva se recupera para reutilizarla, lo que implica previa esterilización y ajuste del pH, conductividad eléctrica y nutrientes (Sánchez-Del Castillo et al., 2014). Los sistemas cerrados permiten ahorrar agua y fertilizantes y el impacto ambiental se reduce al evitar que grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y otros minerales contaminen cuerpos de agua adyacentes. No obstante, la dispersión de enfermedades que atacan a la raíz y el desbalance de nutrientes es mayor en comparación al sistema abierto (Sánchez-Del Castillo et al., 2014).

Cuadro 1 Clasificación y tipos de técnicas para el suministro de nutrientes en hidroponía (Goddek et al., 2019). Dentro de las técnicas de cultivo hidropónico, las técnicas DFT y con sustrato son las utilizadas, la primera debido a su facilidad de instalar, operar y bajo costo de infraestructura, la segunda por brindar el soporte físico a cultivos como las hortalizas.

Característica	Categorías	Ejemplo
Técnica de cultivo hidropónico	Sin sustrato	Técnica de película de nutrientes (NFT)
		Aeroponía
		Técnica de flujo profundo (DFT)
	Con sustrato	Sustratos orgánicos (turba, fibra de coco, corteza, fibra de madera, etc.)
		Sustratos inorgánicos (lana de roca, piedra pómez, arena, perlita, vermiculita, arcilla expandida)
		Sustratos sintéticos (poliuretano, poliestireno)
Sistemas abiertos/cerrados	Sistemas Abiertos o de con flujo de deshecho	Las plantas se alimentan continuamente con solución "fresca" sin recuperar la solución drenada de los módulos de cultivo.
	Sistemas cerrados o de recirculación	La solución nutritiva drenada se recicla y se completa con la falta de nutrientes al nivel de EC correcto
Suministro de agua	Continuos	Técnica de película de nutrientes y técnica de flujo profundo
	Periódico	Riego por goteo, flujo y reflujo, aeroponía

Dentro de los cultivos empleados en hidroponía el tomate es de los más importantes económicamente (Bello et al., 2019; FIRA, 2019; Resh, 2013). La disposición de las plantas de tomate y su densidad de siembra es un factor importante que puede incrementar (o disminuir) el rendimiento de las plantas. Bastida-Cañada (2012) examinó el crecimiento y rendimiento de plantas de tomate en diferentes arreglos para formar doseles en un cultivo hidropónico. Se encontró que la disposición de escalera con 7 plantas por metro y un despunte a 3 racimos permite obtener un rendimiento de 29.7 kg m^{-2}, 189 frutos m^{-2} y un peso promedio de fruto de 156 g. Lo cual resulta en un mayor rendimiento y mayor ganancia que emplear una disposición de escalera con 5 plantas por metro. Asimismo, la disposición de pirámide con despunte a tres racimos resultó estadísticamente mejor con una densidad de 7 plantas por metro frente a la densidad de 5 plantas por metro (23.5 kg m^{-2} contra 20.1 kg m^{-2}). Por lo cual emplear una densidad de 7 plantas por metro

con despunte a 3 racimos implica aumentar la producción sin disminuir el rendimiento y la cantidad de frutos.

Como se mencionó con anterioridad recircular la solución nutritiva es una alternativa para disminuir el impacto ambiental y reducir costos. Sánchez-Del Castillo et al. (2014) compararon la eficiencia y el rendimiento en el cultivo de tomate, entre sistemas hidropónicos abiertos y cerrados. Se encontró que la reutilización de la solución nutritiva, permitió obtener 27.1, 27.6 y 30.4 g de fruto por L de agua usada en cama de sustrato, raíz sumergida y cultivo en bolsas respectivamente. Además, reutilizar la solución nutritiva no afectó el crecimiento de la planta obteniendo un diámetro de tallo de 1.32 cm en hidroponía de cama de sustrato con recirculación frente a 1.21 cm en la misma técnica sin recirculación. La altura de la planta fue de 89 cm en hidroponía de cama de sustrato con recirculación y 89 cm sin recirculación. Por lo tanto, utilizar un manejo del cultivo de tomate basado en ciclos cortos, permite recircular la solución nutritiva sin afectar el rendimiento, obteniendo un ahorro mayor a 30% de agua y a 40% de nutrimentos comparado con los sistemas sin recirculación.

Realizar un cultivo empleando una técnica diferente a la tradicional como es el caso de la hidroponía, además, la técnica empleada para suministrar los nutrimentos puede afectar la calidad del fruto que se produce. Schmautz et al. (2016) compararon el rendimiento del tomate, la calidad del fruto morfológica (externa) y bioquímica (interna) y la vitalidad general de la planta de tomate de tres sistemas hidropónicos diferentes (técnica de película nutritiva, sistema de riego por goteo y cultivo en balsa flotante) en un cultivo acuapónico. Los resultados mostraron que el tipo de técnica utilizada para el cultivo tuvo poca influencia en la mayoría de las propiedades bioquímicas del fruto y en el crecimiento y rendimiento de la planta. No obstante, el sistema de riego por goteo funcionó ligeramente mejor obteniendo un rendimiento promedio acumulado de 18.323 kg m^{-2} frente a 16.857 kg m^{-2} en cultivo de raíz sumergida y 17.176 kg m^{-2} en cultivo de película nutritiva. Las plantas en promedio obtuvieron una altura de 6.7 m con una tasa de crecimiento de 22 cm por semana.

2.3.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas Hidropónicos

En México los cultivos de agricultura protegida (invernaderos, malla sombra, macrotúnel o

microtunel) superan las 25 000 ha (FIRA, 2019; SIAP, 2016) siendo el tomate el cultivo más importante (Sánchez-Del Castillo et al., 2014; SIAP, 2016). No obstante, la mayor parte de los cultivos que emplean esta modalidad son realizados mediante la agricultura tradicional (empleando suelo agrícola) (CEDRSSA, 2019; SIAP, 2016; Urbina-Navarro, 2011).

Prácticamente todas las plantas se pueden cultivar con la técnica hidropónica. Sin embargo, los sistemas hidropónicos comerciales cultivan principalmente: Hortalizas de fruto (p. ej., *Lycopersicon esculentum,* 180 t ha^{-1}), hortaliza de hoja (p. ej., *Lactuca sativa* 10.5 t ha^{-1}), frutas (p. ej., *Fragaria ananassa*), forrajes (p. ej., *Medicago sativa* L.), cereales (p. ej., *Oryza sativa* 5.4 t ha^{-1}) y plantas medicinales (p. ej., *Aloe vera*) (Bello et al., 2019). En México los sistemas comerciales producen principalmente lechuga (*Lactuca Sativa*, *Lactuca Crispa y Lactuca sativa* L. var. longifolia) empleando la técnica hidropónica de película nutritiva (Resh, 2013). Uno de los sistemas que destaca en este país es el de la empresa Grupo Altex, la cual produce aproximadamente 25 millones de lechugas anuales en 8 ha (Grupo Altex, 2020).

Los cultivos hidropónicos presentan rendimientos 11 veces mayores que la agricultura tradicional, sin embargo, requieren 82 veces más energía eléctrica (Barbosa et al., 2015). Lo cual muestra la principal razón de que este tipo de tecnologías no se extienda de manera significativa en países en desarrollo.

2.4. Acuaponía

2.4.1. Generalidades

Los sistemas acuapónicos son una tecnología que integra la acuicultura y la hidroponía, los cuales surgen de la necesidad de obtener alimento seguro, con una calidad constante y una producción con bajo impacto ambiental (Endo, 2019; Goddek et al., 2019). Desde los primeros planteamientos de esta tecnología, se ha extendido la idea de que estos sistemas podrían mitigar los problemas inherentes de la producción por acuicultura (Diego-Ramirez et al., 2008). Esto se basa principalmente en la lógica de operación de los sistemas acuapónicos, en la que los subproductos

(desechos) del cultivo de peces se pueden aprovechar para nutrir el cultivo vegetal (Goddek et al., 2019; Gómez-Merino et al., 2015). En este contexto, se reduce la descarga de agua cargada de nutrientes al ambiente y, por lo tanto, el impacto sobre los ecosistemas acuáticos receptores de efluentes (Tidwell, 2013). Otro aspecto que ha sido señalado como ventaja de los sistemas acuapónicos es que puede ser una alternativa tecnológica para la producción de alimentos en zonas áridas, semiáridas y costeras secas con recursos limitados de agua dulce (Diver, 2006).

Actualmente en los sistemas acuapónicos, la producción y el valor de las plantas generalmente superan con creces la producción y el valor de los peces cultivados en esos sistemas (Losordo et al., 2019; Love et al., 2015). Algunos productores de sistemas acuapónicos mencionan que los peces sirven solo para proporcionar nutrimentos para las valiosas plantas que se producen (Losordo et al., 2019). Lo anterior expone una limitación en el contexto de la producción de peces y plantea la necesidad de aumentar las densidades de cultivo de peces o dirigir la investigación a especies de peces de mayor valor en el mercado para lograr una optimización de los componentes productivos que integran al sistema acuapónico.

Debido a que la acuaponía es una tecnología reciente (Endo, 2019; Goddek et al., 2019) poca información se encuentra disponible respecto a su rendimiento comparado con un sistema de recirculación acuícola tradicional. Entre los pocos estudios donde se realiza una comparación entre sistemas de recirculación acuícola y acuapónicos y, que, además emplean tilapia (*Oreochromis niloticus*) como especie modelo se encuentran Selek et al. (2016). Su estudio se realizó en un periodo de 75 días. Utilizaron tanques de cultivo de 30 L para el cultivo de peces y tanques de 26 L para el cultivo de 22 plantas m^{-2}. Estos autores reportaron un peso promedio de los peces al final del experimento de 36.47 g en recirculación y 36.82 g en acuaponía, una tasa de crecimiento específica de 1.80% d^{-1} para recirculación y 1.81% d^{-1} en acuaponía y un factor de conversión alimenticia de 1.31 en recirculación y 1.30 en acuaponía. Los parámetros de calidad de agua se mantuvieron en una concentración inferior en el sistema acuapónico. El amonio se encontró entre 0.08-0.39 mg L^{-1} en acuaponía mientras que en recirculación la concentración fue de 0.14-2.21 mg L^{-1}. El nitrito se encontró en acuaponía entre 0.05-0.21 mg L^{-1} y 0.09-0.28 mg L^{-1} en recirculación. Se concluye que el sistema acuapónico logra mantener las concentraciones de los parámetros de calidad en los niveles aceptables sin afectar el crecimiento de los organismos. Sin embargo, considerando las condiciones experimentales empleadas en este estudio (volumen de 30 L y 5 plantas) no es posible extrapolar los resultados a un sistema comercial.

Por otro lado, Gallardo-Collí et al. (2014), emplean un cultivo "polipónico" (policultivo + acuaponía) de tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Stirling) y acocil (*Procambarus acanthophorus*) y maíz (*Zea mays*). Este estudio se realizó en un periodo de 12 semanas empleando tanques para el cultivo de peces 7 m^3 de agua (3 m de diámetro) con una densidad de siembra de 57 tilapias m^{-3} y de 35 acocil m^{-2} y 36 bandejas para forraje verde (50 x 25 x 5 cm). Los resultados en el crecimiento de la tilapia fueron estadísticamente similares en el sistema de recirculación y acuapónico. El peso final de las tilapias fue de 208.72 g en el sistema de recirculación y 215.27 g en acuaponía en un periodo de 12 semanas. Un factor de conversión alimenticia de 1.27 y 1.07 para recirculación y acuaponía respectivamente. La ganancia de peso fue de 1433.4% (13.6 g a 208.72 g) en recirculación y 1502.94% (de 13.42 g a 215.27 g) en acuaponía. El policultivo provocó dificultades cuando las tilapias alcanzan una talla superior a 13 cm ya que disminuye la supervivencia del Acocil. Además, el producto vegetal fue destinado para el consumo animal (forraje verde).

Los estudios anteriormente expuestos presentan inconvenientes con su escala o su diseño. Por su parte, Fierro-Sañudo (2013) realizó un cultivo integral de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), tomate (*Lycopersicon esculentum*) y lechuga (*Lactuca sativa*) a nivel piloto. Bajo las condiciones empleadas 75 postlarvas de 0.045 g sembradas y un periodo de 120 días, se obtuvo un factor de conversión alimenticia de 1.6, una tasa de crecimiento específica de 4.4% d^{-1} y una supervivencia de 90.1%, además, un rendimiento en la producción de tomate uva de 8.5 t ha^{-1} y 13.1 t ha^{-1} para el tomate bola. El sistema que resulta rentable requiere tres hectáreas de superficie total (una de cultivo de camarón y dos de tomate). Pese a lo anterior, el autor menciona que los resultados de la investigación son promisorios si se aumenta la densidad del cultivo de los organismos acuáticos, lo cual requiere mayor cantidad de manejo en el control de la calidad de agua.

Por otro lado, Palm, Bissa, y Knaus (2014) describen el rendimiento de un sistema acuapónico de flujo y reflujo de baja tecnología, con tilapia (*Oreochromis niloticus*) y diversas especies vegetales, entre ellas, el tomate (*Solanum lycopersicum*). El experimento de estos autores se realizó durante un periodo de 53 días en tanques de cultivo de peces con un volumen de 3.7 m^3 y una densidad de siembra de 5.62 kg m^{-3}. Los resultados de los autores muestran que un sistema acuapónico con baja tecnología puede lograr en un periodo de 53 días un aumento significativo en la biomasa de 14,054 g a 27,348 g, obteniendo una densidad final de 10.94 kg m^{-3}, un tasa de crecimiento específica 0.71 % d^{-1} y un factor de conversión alimenticia de 1.03. En este sentido se observa que la tilapia tiene

mejor rendimiento en la producción de plantas frente a otras especies de agua dulce y cálida (p. ej., el pez gato, *Clarias gariepinus*).

En el caso de la producción vegetal, se ha reportado que el rendimiento y crecimiento de un cultivo de tomate en sistemas acuapónicos es menor que el obtenido en un sistema hidropónico irrigado con solución nutritiva comercial (Reyes-Flores et al., 2016). Esto es atribuido a que el efluente del cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) no aporta los nutrientes en la concentración necesaria para el crecimiento de la planta de tomate (Reyes-Flores et al., 2016). Sin embargo, en una investigación posterior Reyes-Flores et al. (2020) probaron el efecto de una fertilización foliar con micronutrimentos en un cultivo acuapónico de tilapia y tomate saladette. Los resultados de dicha investigación mostraron que los atributos de calidad de frutos en los sistemas acuapónicos no se afectan por la aplicación foliar de nutrientes. Los autores no encontraron diferencias significativas en la concentración de licopenos en los frutos maduros entre el sistema acuapónico sin fertilización (de 15.98 mg 100 g^{-1}), cultivo hidropónico (15.45 mg 100 g^{-1}) y acuapónico con fertilización foliar (15.85 mg 100 g^{-1}). El pH del jugo fue en acuaponía sin fertilizar de 4.12 estadísticamente igual que en hidroponía (4.17). Por lo tanto, el cultivo acuapónico de tilapia y tomate resulta técnicamente viable a pesar de tener bajas concentraciones de nutrimentos en comparación con un cultivo hidropónico.

2.4.2. Estado Actual de la Aplicación Comercial de los Sistemas Acuapónicos

Rakocy et al. (1992) de la Universidad en Islas Vírgenes (UVI) desarrollaron el primer sistema acuapónico comercial acoplado a cielo abierto. El sistema se conformó por tanques circulares de 7 m^3 para la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y un sistema de balsa para la producción de lechuga (*Lactuca sativa*).

Actualmente existe una tendencia en algunos países en promover los sistemas acuapónicos “hágalo usted mismo” para un establecimiento “en el patio trasero” (Hallam, 2020; Nelson And Pade, 2020). Por ejemplo, los sistemas CHOP (Constant Height One Pump) que son sistemas eficientes en la circulación del agua o los sistemas de camas absorbentes que permite cultivar especies vegetales que no son compatibles con la acuaponía (p. ej., papas, zanahorias o cebollas).

En América Latina debido al incremento del interés en la producción de alimentos libres de pesticidas, los sistemas acuapónicos a nivel comercial centran sus trabajo en la producción de vegetales. Actualmente hay poca información sobre las dimensiones de producción de dichos sistemas. Entre los sistemas comerciales de los que se conoce su producción se encuentra en el municipio de Tenjo, Cundinamarca, la empresa "Acuapónicos La Mariana" con producción de lechuga (*Lactuca sativa*) y trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). El sistema acuapónico cuenta con 9 tanques de cultivo de 30 m^3 con una densidad 3,200 organismos, produciendo 1 t mensual de trucha arcoíris (Rico-Patiño & Reyes-Suarez, 2019; Zambrano-Hernandez, 2017). En el Pueblo de Diaguitas, Vicuña, Chile, se encuentra la "Granja Agro-Acuícola Diaguitas", la cual produce 10 t anuales de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y 80,000 piezas de lechuga (*Lactuca sativa*) (Granja Agro-Acuícola Diaguitas, 2020). Por otro lado, en Tlaquepaque, Jalisco, México, se encuentra el sistema acuapónico propiedad de la empresa BOFISH, el cual cultiva tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), lechuga (*Lactuca sativa)* y albahaca (*Ocimum basilicum*), con una producción anual de 18 t de tilapia y 60,000 piezas de lechuga (BOFISH, 2017; Gómez-Merino et al., 2015).

Lo expuesto con anterioridad exhibe que los sistemas acuapónicos industriales de los que se tiene conocimiento poseen rendimientos inferiores a los sistemas de recirculación e hidropónicos. Por lo tanto, es necesario explorar el rendimiento de estos sistemas con una producción intensiva de ambas especies para conocer las dificultades que esta tecnología enfrenta, reconocer si realmente es sostenible y resulta una alternativa viable para la producción industrial de alimento.

2.5. Especies Modelo para Cultivo

2.5.1. Tilapia

La tilapia fue seleccionada como especie de cultivo debido a que el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de los tres sistemas de producción, por lo tanto, fue necesario considerar una especie de la cual el desarrollo técnico-biológico disponible permitiera evaluar objetivamente

el desempeño de los sistemas disminuyendo la variación asociada a la especie de cultivo.

2.5.1.1. Taxonomía. Las especies que constituyen al grupo de cultivo conocido como tilapia o mojarra, pertenecen al género *Oreochromis* (con 33 especies válidas) (van der Laan et al., 2020). Históricamente, las especies de este grupo han tenido varias reclasificaciones taxonómicas a nivel de género. Por ejemplo, algunas han pertenecido a los géneros *Tilapia* y *Sarotherodon*, géneros que actualmente no contienen especies de interés acuícola (El-Sayed, 2006). Adicionalmente, las especies del género *Oreochromis* han sido sometidas a hibridación para mejorar los índices de crecimiento y resistencia a enfermedades (Nicovita, 2013). En la actualidad, la mayor producción de tilapias en el mundo se basa en el cultivo de variedades híbridas (Nicovita, 2013). La clasificación taxonómica de la especie que se utilizó como modelo de cultivo es la que se describe a continuación (van der Laan et al., 2020)

Clase Actinopteri
Orden Cichliformes
Familia Cichlidae
Subfamilia Pseudocrenilabrinae
Género *Oreochromis*
Especie: *O. niloticus* var. Chitralada

2.5.1.2. Reseña histórica. Las tilapias (*Oreochromis* spp.) son un grupo de especies altamente invasoras originarias de África (CONABIO, 2019; Lowe et al., 2004). Distintas especies de tilapias fueron propagadas en el mundo con propósitos de repoblamiento de cuerpos de aguas naturales y artificiales, y para cultivo en sistemas extensivos y semi-intensivos, debido a que presentan características adecuadas para estos fines (SAGARPA, 2015).

2.5.1.3. Producción de tilapia en México. En México la tilapia fue introducida desde 1964 (CONABIO, 2014; INAPESCA, 2018; SINCOAGRO et al., 2008). Actualmente este grupo de peces se encuentra en el tercer lugar por volumen de producción y en segundo por su valor comercial (CONAPESCA, 2017a). A nivel nacional su producción tiene una tasa de crecimiento anual del 10.23% (CONAPESCA, 2017b; FAO, 2018b; Rodríguez-González et al., 2015). Durante

el 2017, en México se produjeron 149,095 toneladas de tilapia por acuicultura, que corresponde al 91% de la producción de tilapia total (acuicultura más captura) (SIAP, 2018). En ese año, los estados con mayores producciones fueron: Jalisco, Chiapas, Michoacán, Nayarit y Veracruz (CONAPESCA, 2017a; SIAP, 2018).

2.5.1.4. Biología y requerimientos para el cultivo. El género *Oreochromis* es micrófago y su dieta es principalmente fitoplancton, zooplancton, perifiton y detritos. El sistema digestivo es simple y no especializado, esófago corto, estómago pequeño e intestino largo (reflejo de los hábitos herbívoros) (El-Sayed, 2006). Son especies eurióicas, que toleran condiciones ambientales adversas, así como una alta densidad de cultivo (Nicovita, 2013). Son omnívoras, por lo que sus requerimientos nutricionales son relativamente fáciles de cubrir y les permite soportar altos niveles de inclusión de proteína vegetal en su alimento (El-Sayed, 2006). Su capacidad de resistir a bajas concentraciones de oxígeno es debido a la cualidad de saturar su sangre y reducir su consumo (Nicovita, 2013), lo cual realiza cuando la concentración es inferior a 3 mg L^{-1}.

Actualmente es una de las especies en la acuicultura más estudiadas, por lo tanto, se conoce sobre su reproducción, requerimientos nutricionales, crecimiento y engorda (SINCOAGRO et al., 2008). Debido al estado de conocimiento, existe suministro de larvas y reproductores de calidad genética y sanitaria (SINCOAGRO et al., 2008). Presentan resistencia a enfermedades habituales en peces (El-Sayed, 2006). Por todo esto se les considera como especies convenientes y adecuadas para producir en países en desarrollo (El-Sayed, 2006). En la actualidad el cultivo de la tilapia es realizado de forma intensiva o híper-intensiva, por ello se requiere prestar mayor atención al manejo realizado, condiciones ambientales y de cultivo. Los parámetros de calidad de agua recomendados para el cultivo de tilapia se describen en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2 Parámetros promedios de calidad de agua recomendados para el crecimiento de Tilapia (El-Sayed, 2006; García-Ortega & Calvario-Martínez, 2008; Hsien-Tsang & Quintanilla, 2008; Nicovita, 2013; Saavedra-Martínez, 2006; Timmons & Ebeling, 2010). Dentro de los parámetros los más críticos son el amoniaco, nitrito, oxígeno disuelto, pH y temperatura.

Parámetro	Promedio	Unidad	Parámetro	Promedio	Unidad
Temperatura	27-32	°C	Hierro	0.05-0.2	mg L^{-1}

Oxígeno Disuelto	>4.5	mg L^{-1}	Fosfatos	0.15-0.2	mg L^{-1}
pH	6.0-9.0	-	Dióxido de Carbono	5.0-10	mg L^{-1}
Alcalinidad	20-150	mg L^{-1} $CaCO_3$	Sulfuro de Hidrógeno	0.01	mg L^{-1}
Dureza	20-200	mg L^{-1} $CaCO_3$	Ácido cianhídrico	<10	mg L^{-1}
Calcio	60-120	mg L^{-1}	Gas metano	<25	mg L^{-1}
Nitritos	<0.1	mg L^{-1}	Sólidos en suspensión	<25-100	mg L^{-1}
Nitratos	150-200	mg L^{-1}	Amonio NH_4^+	<0.1	mg L^{-1}
Amoníaco NH_3-N	<0.1	mg L^{-1}	NAT	<0.5	mg L^{-1}

Por otro lado, su sabor se ha discutido por bastante tiempo, debido a que la tilapia "salvaje" tiene un sabor a tierra (El-Sayed, 2006). El cual es proporcionado por la dieta en estos ambientes, donde las algas que consumen provocan que su carne tenga este peculiar sabor (El-Sayed, 2006). Sin embargo, si la tilapia se cultiva en tanques sintéticos su dieta se basa en pellets por lo tanto su carne no tiene ese sabor (El-Sayed, 2006).

2.5.2. Tomate

El tomate fue seleccionado debido al impacto económico que tiene en México (FIRA, 2019) y los resultados de diversas investigaciones que emplean tilapia y tomate (Hu et al., 2015; Ortega-López et al., 2015) en los cuales se muestra una alta remoción de nitrógeno del efluente del cultivo por parte de la planta de tomate.

2.5.2.1. Taxonomía. La clasificación taxonómica actualmente aceptada del tomate es la siguiente (The Plant List, 2012):

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Subclase: Asteridae
Orden: Solanales
Familia: Solanaceae
Género: Solanum
Especie: S. lycopersicum.

El fruto de la planta de tomate tiene un color intenso que va del amarillo al rojo, otorgado por los licopenos y carotenos (López-Marín, 2017). Presenta una forma redondeada, con excepciones entre variedades (SAGARPA, 2017). Es considerada la hortaliza número uno en México, herbácea anual con amplia diversidad genética, con crecimiento determinado (se conoce el orden de las ramificación donde surgen las flores) o indeterminado (las ramificaciones donde surge la flor son aleatorias) según la variedad (Allende et al., 2017; SAGARPA, 2017).

2.5.2.2. Condiciones ambientales. El cultivo de tomate se desarrolla de manera óptima en zonas templadas y cálidas, con temperaturas diurnas que van de los 20 °C a 30 °C (López-Marín, 2017). Su desarrollo óptimo se da entre los 18 y 24 ºC (**Cuadro 3**) con una humedad relativa entre 60% y 80%. (Allende et al., 2017; López-Marín, 2017). Sus raíces se desarrollan en suelos profundos (1 m o más), mullidos, con pH ligeramente ácido y bastante materia orgánica (SAGARPA, 2017). Durante la floración, fecundación y desarrollo vegetativo el tomate requiere alta iluminación (Allende et al., 2017). El sustrato adecuado para el tomate precisa de alto espacio poroso (80%), retener la humedad y poder ser aireados apropiadamente (INIFAP, 2011).

Las semillas germinan de cinco a ocho días después de ser sembradas (López-Marín, 2017). Sin embargo, la calidad de la semilla es un factor que influye en la germinación, además de la temperatura y la humedad (López-Marín, 2017). El trasplante se puede realizar dentro de 15 a 30 días después de ser sembradas (López-Marín, 2017). El fruto en la variedad saladette se podrá recolectar maduro a partir de los 90 días, con un peso promedio de 132 g. Por lo tanto, se tiene un

rendimiento de aproximadamente 8.7 kg planta^{-1} (López-Marín, 2017; Seminis, 2018).

Cuadro 3 Rangos de temperatura críticos para el desarrollo del tomate (Allende et al., 2017). Temperaturas mayores a 35 °C afectan la fructificación y temperaturas nocturnas inferiores a 10 °C puede ser determinante en la producción al disminuir su desarrollo provocando deformidades.

Condición de la planta		**Rango de temperatura**
Se hiela la planta		-2 ºC
Detiene su desarrollo		10–12 °C
Desarrollo normal de la planta		18–25 °C
Mayor desarrollo de la planta		21–24 °C
Germinación óptima		25–30 °C
Temperaturas óptimas		
Desarrollo	Diurna	23–26 °C
	Nocturna	13–16 °C
Floración	Diurna	23–26 °C
	Nocturna	15–18 °C
Maduración		15–22 °C

El tomate, al igual que la mayoría de plantas, requiere ser polinizada para poder generar fruto. En los cultivos a cielo abierto el aire se encarga de mover las flores para liberar su polen, aunque también es realizada por insectos (Allende et al., 2017). En los cultivos cerrados, como los invernaderos, al tener condiciones controladas el aire no tiene efecto en las plantas y los insectos no pueden ingresar o su presencia es reducida (Allende et al., 2017). Para lograr la polinización dentro de invernaderos se han introducido insectos como *Bombus terrestris* o desarrollado tecnologías como: sopladores, vibradores o aspersores de agua pulverizada (Allende et al., 2017). Cuando se quiere aumentar la tasa de polinización se realizan las vibraciones a horas tempranas para que el polen se desprenda con mayor facilidad (Saravia-Chávez, 2004).

La facilidad de polinizar el tomate mediante estos métodos (vibración o sopladores) es debido a la morfología y fisiología que ayuda a que ocurra la autopolinización (Santana-De Avila, 2014). En la flor del tomate los estambres están muy desarrollados y forman un tubo cónico que encierra al pistilo, esto permite que los gametos masculinos del polen lleguen al estigma (Santana-De Avila, 2014). Por lo tanto, una vibración que provoque el desprendimiento del polen permitirá el proceso de la formación del fruto (Allende et al., 2017).

2.5.2.3. Nutrición de la planta de tomate. Para un desarrollo óptimo de la planta es importante mantener una adecuada proporción de nutrientes, un alto nivel de algún nutriente puede afectar la biodisponibilidad de algún otro. Un ejemplo es el potasio, en cantidades excesivas interfiere con la absorción de magnesio o calcio, un exceso en alguno de los dos últimos interfiere con los otros dos. Los niveles y proporciones de los nutrientes necesarios para el crecimiento de la planta de tomate se describen en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4 Nivel y proporciones óptimos de nutrientes requerido para el crecimiento del tomate (López-Marín, 2017; Molina, 2016)

Parámetro	Nivel	Unidad
pH	6-7	-
Acidez	0.3-1	cmol L^{-1}
Ca	6-15	cmol L^{-1}
Mg	3-6	cmol L^{-1}
K	0.5-0.8	cmol L^{-1}
P	20-50	mg L^{-1}
Cu	1-20	mg L^{-1}
Zn	3-10	mg L^{-1}
Mn	10-50	mg L^{-1}
Fe	10-50	mg L^{-1}
Fe/Mn	3	-
Ca/Mg	2-5	-
Ca/K	5-25	-
Mg/K	2.5-15	-
(Ca + Mg)/K	10-40	-
MO	2-5	%

2.6. Análisis Financiero de los Sistemas de Producción

2.6.1. Evaluación de la rentabilidad.

Para poder conocer el desenvolvimiento futuro de un proyecto, es necesario evaluar la rentabilidad mediante un modelo financiero. Para realizar este tipo de análisis se requiere la información de las

siguientes variables financieras: inversión total, precios de venta para el producto, costos variables y costos fijos. Con la información de las variables financieras, se determinan algunos indicadores financieros como: Punto de Equilibrio de la producción (PE), Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Relación Beneficio Costo (R/BC) y Período de Recuperación (PR). Las fórmulas y definiciones se describen en: 5.6.1 Indicadores Financieros.

2.6.2. Comparación financiera de los sistemas de producción.

Los sistemas acuapónicos aún enfrentan varios desafíos, especialmente por la competencia que existe en el mercado (Goddek et al., 2019). La viabilidad financiera de los sistemas de producción intensivos (p. ej., sistemas de recirculación acuícola, acuapónicos o hidropónicos) recae principalmente en los costos iniciales. Por ejemplo, los de recirculación acuícola requieren en promedio de 5 a 8 años (Badiola et al., 2012) y los acuapónicos de 6.5 a 7.5 años (Goddek et al., 2019) para recuperar la inversión inicial. Asimismo, este tipo de sistemas demandan una operación confiable seguida de bajos costos de operación y requieren un estudio exhaustivo de mercado para asegurar la aceptación del producto (Badiola et al., 2012).

Por otro lado, se encuentra la dificultad para comercializar los productos. Se ha observado que los productores que comercializan en mercados indirectos (p. ej., supermercados, restaurantes, instituciones o mayoristas) perciben mayor beneficio que aquellos que lo hacen en mercados directos (p. ej., mercados de agricultores o puestos agrícolas) (Love et al., 2015).

Como se planteó con anterioridad, el producto de mayor volumen en los sistemas acuapónicos generalmente son los cultivos vegetales. Por lo tanto, la acuaponía compite por este mercado contra la agricultura (de hortalizas) donde se incluye la hidroponía. Además, se sabe que la acuaponía presenta rendimientos similares a los cultivos hidropónicos. Sin embargo, la productividad de estos últimos es mayor (Van Ginkel et al., 2017). Con lo anterior se explica por qué actualmente son preferidos los sistemas hidropónicos para la producción industrial sobre los sistemas acuapónicos.

En aspectos financieros, pocos son los estudios que han explorado sistemas con un enfoque comercial. Entre los cuales se encuentra el trabajo de Fierro-Sañudo (2013) quien realizó un análisis factibilidad técnico-económica de un sistema integral de camarón blanco usando agua de baja salinidad y baja tasa de recambio con dos tipos de tomate (tomate bola y tomate uva). El

experimento de este autor se llevó a cabo en un sistema acuapónico con tanques de cultivo de 3.14 m^3 con una densidad de 75 organismos m^{-2}, una superficie de plantación de 5.6 m^2. Los resultados obtenidos por este autor exponen que no es viable económicamente, debido a los altos costos de los insumos en especial de la energía eléctrica.

Por otro lado Verdugo-Mora (2009) analizó la rentabilidad y evaluó opciones de inversión (escalas de proyectos) de cultivos intensivos de tilapia en sistemas de recirculación acuícola. Este autor concluye que operar a gran escala es una manera de mantener costos unitarios a niveles bajos, siendo una opción para hacer rentable un cultivo intensivo de tilapia.

Petrea et al. (2016) realizaron un análisis comparativo de los costos entre dos sistemas acuapónicos uno integraba la técnica de balsas flotantes, mientras el otro utilizaba la técnica de camas de sustrato con arcilla expandida. Como especies modelo emplearon trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y espinaca (*Spinacia oleracea*), esturión estrellado (*Acipenser stellatus*) y albahaca (*Ocimum basilicum*), menta (*Mentha piperita*), estragón (*Artemisa dracunculus* L.) y espinaca (*Spinacia oleracea*) (cada tipo de cultivo vegetal en un sistema independiente). En cada sistema utilizaron tanques de cultivo de 2 m^3 y una superficie para el cultivo de plantas de 0.9 m^2. Los resultados muestran que la acuaponía puede ser viable económicamente sólo con ciertas especies. El costo más importante fue el eléctrico (iluminación y bombeo), representado más de la mitad de los costos variables. La combinación que muestra mejores resultados fue esturión estrellado y menta, seguido de esturión estrellado y albahaca y por último esturión estrellado y estragón. Pese a que estas combinaciones tienen alto consumo eléctrico (debido a la iluminación requerida por el fotoperiodo de las plantas) resultan viables por el alto precio de venta de las plantas y la alta producción que presentan 74 plantas m^{-2}.

Love et al. (2015) mediante una encuesta internacional documentan los métodos de producción, los rendimientos de cultivos y peces, y la rentabilidad de la acuaponía comercial en los Estados Unidos e internacionalmente. Los resultados de este estudio muestran que la mayoría de los productores comerciales de acuaponía (47%) venden otros productos agrícolas además de los cultivos de acuapónicos. La técnica de cultivo empleada con mayor frecuencia es la combinación de balsas flotantes y camas de sustrato. Las especies más cultivadas son tilapia y albahaca (no necesariamente conjuntas). Más de la mitad (55%) de las unidades de producción resulta rentable después de 12 meses. La inversión inicial se encuentra entre $5,000 a $9,999 USD, predominando los sistemas a pequeña escala. Por lo tanto, se concluye que la acuaponía es rentable si se tiene

conocimiento técnico, el mercado al que se dirige el producto es indirecto y si además se comercializa con otros productos no alimenticios (equipos o servicios).

Bosma et al., (2017) realizaron un análisis de costo-beneficio para evaluar la viabilidad financiera de una inversión en un sistema de acuaponía a pequeña escala. El sistema utilizó una densidad de 25 plantas m^{-2} de lechuga, 4 plantas m^{-2} de tomate y una densidad final de 25 kg m^{-3} *Clarias gariepinus*. Estos autores encontraron que un proyecto acuapónico de bajo precio con bagre y una producción escalonada de lechuga y tomate no es factible. Por lo tanto, a fin que una unidad pueda soportar impuestos y hacer frente a los riesgos requiere hacer un cambio de especie con mayor valor en el mercado. Concluyendo que la primera condición para el éxito es tener un mercado cercano con alta demanda y producir especies con alto precio en el mercado.

Por lo anteriormente expuesto, un sistema acuapónico es un sistema de producción complejo que enfrenta diversos riesgos que lo limitan productivamente. Por lo tanto, es necesario encontrar una relación entre la producción y exigencia de nutrientes por las especies a fin de lograr un estado estacionario en las concentraciones de los parámetros de calidad, evaluar el sistema en condiciones comerciales con un enfoque en ambas especies y realizar un análisis financiero donde se considere el mercado local y el costo de operación e inversión.

2.7. Preguntas de Investigación

A pesar de que se ha demostrado que los sistemas acuapónicos pueden ser una alternativa técnicamente viable para la producción de alimentos, aún existen incógnitas sobre si su rendimiento en términos productivos y financieros es mayor al de las tecnologías individuales que lo conforman (recirculación e hidroponía). Por lo tanto, en este estudio se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿El sistema acuapónico mantiene un estado estacionario en las concentraciones de los distintos parámetros de calidad de agua más estable que en el sistema de recirculación?
2. ¿El sistema acuapónico tiene mayor rendimiento que los sistemas de recirculación e hidroponía?
3. ¿El desempeño zootécnico de los peces criados en el sistema de recirculación es igual al de los criados en un sistema acuapónico?

4. ¿La rentabilidad financiera del sistema acuapónico es mayor que la del sistema de recirculación y del sistema hidropónico?

3. HIPÓTESIS

1) Debido a la remoción de los nutrientes (NH_3-NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, PO_4^{3-}) por el componente hidropónico de un sistema acuapónico cerrado (*AS*), la concentración de estos compuestos será menor que la concentración obtenida en un sistema de recirculación acuícola (*RS*) con biofiltro del tipo reactor de lecho en movimiento, con la misma carga biológica. Esto es: $C_{nutrientes\text{-}AS} < C_{nutrientes\text{-}RS.}$

2) Debido a que el sistema acuapónico usa la tecnología hidropónica como componente de filtración en un sistema de recirculación, la combinación de las producciones intensivas de tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada; 194 peces m^{-3}) y tomate (*Solanum lycopersicum* var. saladette; 25 plantas m^{-2}) en el sistema acuapónico tendrá como consecuencia una mayor rentabilidad (R_{AS}) que la suma de la rentabilidad individual obtenida por el sistema hidropónico (R_{HS}) y sistema RS (R_{RS}). Esto es: $R_{AS} > R_{HS} + R_{RS}$.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Comparar el rendimiento productivo y la rentabilidad entre los sistemas de recirculación, acuaponía e hidroponía en el cultivo intensivo a escala piloto usando como modelos biológicos a la tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) y al tomate (*Solanum lycopersicum* var. saladette).

4.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la variación en la calidad de agua entre los sistemas de producción, en términos de nutrientes inorgánicos (NH_3-NH_4, NO_2, NO_3, PO_4), sólidos suspendidos y totales y parámetros físicos (pH, temperatura y conductividad eléctrica).
2. Comparar el desempeño zootécnico (crecimiento, supervivencia, tasa de crecimiento específico y el factor de conversión alimenticia) de los peces entre el sistema de recirculación y el acuapónico.
3. Comparar el desempeño fitotécnico (longitud de tallo, diámetro de tallo y productividad) de las plantas de tomate entre los sistemas acuapónico e hidropónico, así como la calidad organoléptica del fruto producido (aroma, sabor, textura, jugosidad/carnosidad, dureza de la piel, acidez y dulzura) y sus propiedades físico-químicas (conductividad eléctrica, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales en grados Brix, índice de madurez y porcentaje de pérdida de peso).
4. Comparar la factibilidad y rentabilidad financiera entre sistemas de producción mediante el análisis financiero de dos escenarios: 1) considerando únicamente los gastos de explotación (gastos operativos). 2) considerando gastos de inversión y operativos

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Instalación Experimental

El estudio fue realizado en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo - Unidad Académica Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental durante un periodo de 76 días. El experimento se realizó en el sector de cuarentena de la Planta Piloto de Peces Marinos (**Figura 3**). Este sector cubre una superficie de 78 m², dispone de techo cubierto de láminas intercaladas (metal y fibra de vidrio) y perímetro cubierto con cortinas de plástico negro. La temperatura ambiental (máxima y mínima) se registró a lo largo del experimento empleando un termo-higrómetro digital (HTC-2).

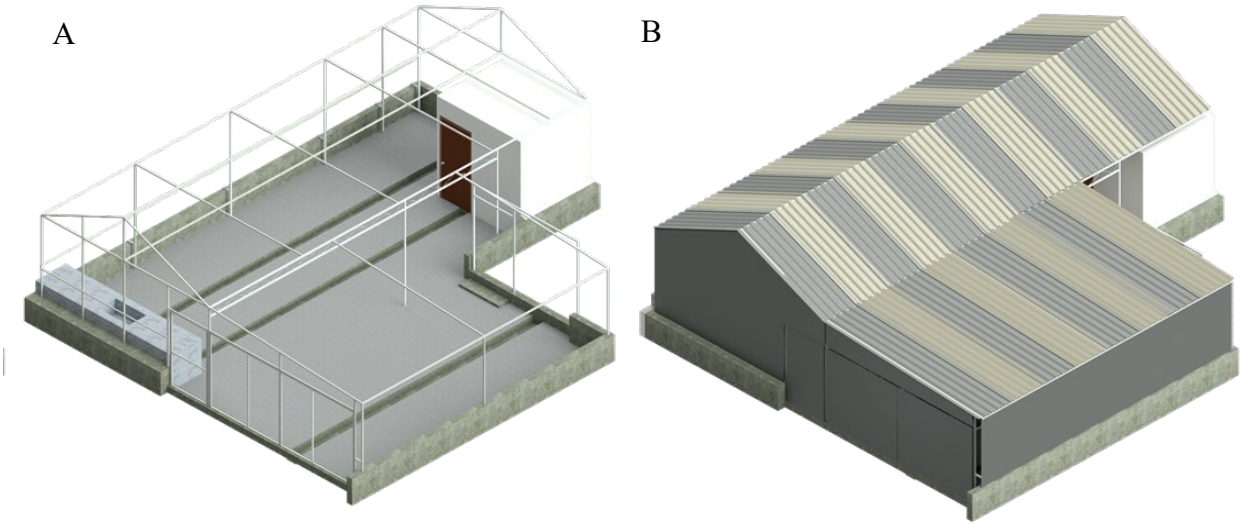


Figura 3 Sector experimental. A) vista descubierta donde se expone la configuración del área y la infraestructura. B) vista cubierta con el techo de láminas metálicas y de fibra de vidrio intercaladas, y paredes perimetrales formadas con cortinas de plástico negro.

5.1.1. Preparación del Área Experimental y Tanques de Cultivo

Se distribuyeron los tanques dentro del área buscando la mejor organización espacial para cada tipo de sistema (**Figura 4**). El sector contaba con un sistema de tuberías para la distribución de aire a baja presión, que fue suministrado por un soplador regenerativo. Sin embargo, el suministro eléctrico debió ser modificado para poder tener bajantes donde conectar las bombas de recirculación de agua y además para poder instalar la iluminación. De cada tipo de sistema de producción se construyeron tres unidades independientes que se usaron como réplicas.

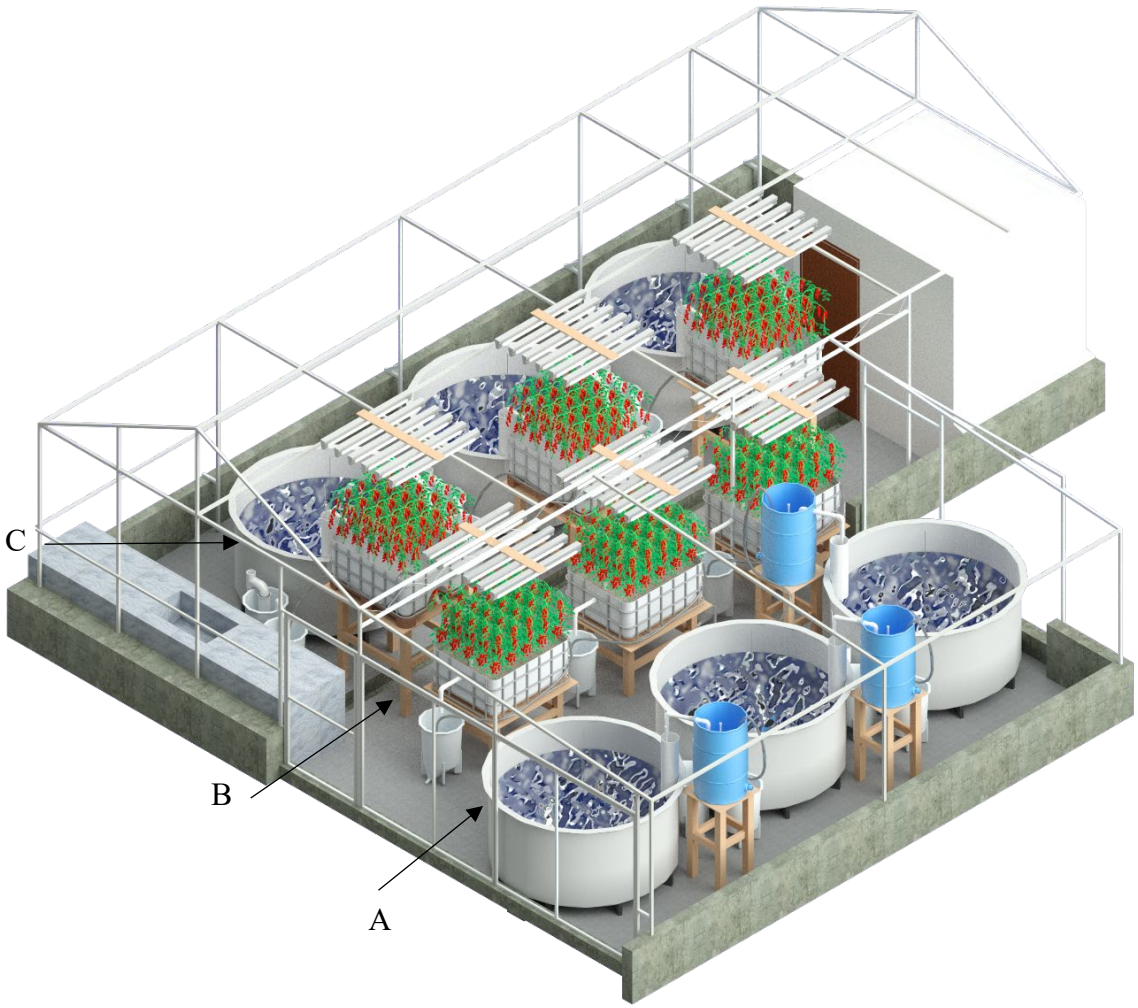


Figura 4 Disposición de los sistemas experimentales dentro del área designada para el estudio. Las unidades experimentales fueron dispuestas en columnas para evitar mezclar sistemas. La columna A) son los sistemas de recirculación, B) sistemas hidropónicos y C) sistemas acuapónicos.

5.2. Cálculos para el Diseño de los Sistemas

El proceso de balance de masa se realizó con una compilación, análisis y síntesis de parámetros biológicos, químicos y físicos, densidades de siembra y calidad del agua objetivo. La cuantificación de los parámetros se realizó a través de un estudio bibliográfico y supuestos informados. El análisis consideró el nitrógeno amoniacal total (TAN), sólidos totales, oxígeno, dióxido de carbono y alcalinidad. Los cálculos se realizaron utilizando ecuaciones reportadas por Lekang, 2013; Losordo & Hobbs, 2000; Timmons & Ebeling, 2010 cálculos que se resumen en el **Cuadro 5**.

Cuadro 5 Balance de masas, cálculos para requerimientos de flujo y dimensionamiento del biofiltro (basado en Losordo & Hobbs, 2000). Los cálculos partieron de una capacidad de carga deseada de 25 kg m^{-3} con base en dicha carga se establecieron las demás variables.

Tamaño del tanque y biomasa	Valores	Unidades
Peso de siembra	5.00	g
Longitud de siembra	6.00	cm
Peso de cosecha	107.57	g
Longitud de cosecha	16.70	cm
Incremento de talla	10.69	cm
Tasa de crecimiento	2.96	cm/mes
Profundidad del tanque	0.60	m
Radio del tanque	1.00	m
Volumen del tanque	1.88	m^3
Densidad máxima de cultivo	25.00	kg/m^3
Biomasa de peces	47.12	kg
Número de peces	438.08	
Peso promedio de los peces	107.57	g
Tasa de alimentación final	1.88	kg/día
Periodo de cultivo (días)	110.00	días
Cálculo de balance de masas para el nitrógeno amoniacal total (NAT)		
Contenido de proteína del alimento	35.00	%
Producción de NAT	0.06	kg/día
Porcentaje de NAT producido del alimento	3.22	%
Concentración de NAT deseada en agua recirculada	1.80	mg/L
Nitrificación pasiva (10%)	10.00	%
Gramos de alcalinidad como $CaCO_3$ para oxidar NAT	433.37	g
NAT disponible después de la nitrificación pasiva	0.05	kg/día
Concentración máxima deseada de nitrato	150.00	mg/L

Recambio de agua para mantener la concentración de nitrato	364.17	L/día
NAT disponible para el biorreactor después de la remoción del efluente	0.05	kg/día
Eficiencia del biorreactor para remover NAT (50%)	50.00	%
Tasa de flujo para remover NAT a la concentración deseada	41.64	L/min
Cálculo del tamaño del biorreactor		
Tasa de nitrificación estimada (45%)	0.45	g NAT/m²/día
Superficie requerida para la nitrificación activa	119.93	m^2
Superficie del sustrato	910.00	m^2/m^3
Volumen total del sustrato	0.13	m^3
Profundidad del sustrato	0.50	m
Volumen/rendimiento de la profundidad confrontada con el área	0.26	m^2
Diámetro del biorreactor	0.58	m
Cálculo de balance de masas para sólidos		
Porcentaje estimado del alimento que se convierte en desechos sólidos (25%)	25.00	%
Producción de desechos sólidos	0.47	kg/día
Concentración deseable de sólidos suspendidos	10.00	mg
Remoción estimada por la trampa de sólidos (50%)	50.00	%
Desechos sólidos remanentes de la trampa de sólidos	0.24	kg/día
Desechos sólidos remanentes de la remoción de sólidos en el efluente	0.23	kg/día
Eficiencia del filtro mecánico (50%)	50.00	%
Tasa de flujo para remover sólidos a la concentración deseada	32.22	L/min
Cálculo de balance de masas para oxígeno		
Oxígeno utilizado por kilogramo de alimento (30%)	30.00	%
Oxígeno utilizado por alimento adicionado	0.57	kg/día
Concentración deseada de oxígeno	5.00	mg/L
Concentración de oxígeno agregado	7.00	mg/L
Eficiencia de transferencia de oxígeno	90.00	%
Concentración de saturación	18.10	mg/L
Concentración de oxígeno necesaria en el influente	16.79	mg/L
Oxígeno utilizado por nitrificación pasiva	0.03	kg/día
Total de oxígeno utilizado	0.59	kg/día
Tasa de flujo estimada para mantener la concentración deseada de oxígeno	205.98	L/min

5.3. Sistemas Experimentales

5.3.1. Descripción y Operación del Sistema de Recirculación Acuícola

Se construyeron tres sistemas de recirculación independientes y fueron usados como unidades experimentales (réplicas). En la **Figura 5** se muestra la configuración del sistema de recirculación. Cada sistema de recirculación consistió en un tanque de cultivo cilíndrico de fibra de vidrio (2 m de diámetro, 1 m de altura), con un volumen máximo 3.14 m^3, el cual operó con un volumen de 1.88 m^3 (columna de agua de 60 cm). El tanque tenía un drenaje central plano de 3 pulgadas. En el drenaje se colocó, a manera de cedazo, un tubo de 0.20 m de PVC perforado, que se cubrió con malla de 4 mm para evitar la succión de los organismos. Sobre el tubo de drenaje se colocó una piedra difusora para suministrar aireación al tanque. El control de nivel fue vertical exterior. Se fabricó con tubería de 3 pulgadas y contó con una llave inferior de 1 pulgada para purga. El efluente del tanque descargó por gravedad, a través de un filtro de bolsa de 10 µm, en un reservorio de 0.220 m^3. Este reservorio estuvo constituido por dos tanques de 0.110 m^3, conectados por vasos comunicantes con una tubería en forma de "U" invertida, de 1 ½ pulgadas. En el segundo tanque del reservorio se colocó una bomba sumergible (8000 L/h; ECO XL-8000T, Boyu®) configurada a un flujo de 0.49 L s^{-1}. El agua se bombeó a través de una manguera de 1 pulgada hasta el biofiltro, que estuvo elevado a 1 m sobre una base de madera. El biofiltro fue del tipo reactor de lecho en movimiento (MBBR, *Moving Bed Bioreactor*) y estuvo formado por un barril de plástico de 0.220 m^3, relleno con 0.110 m^3 de biomedio para crecimiento de bacterias nitrificantes (SWX Bio-Media, Sweetwater®). El biomedio del biofiltro se mantuvo fluidizado con aireación suministrada a través de un recuadro de tubería de ½ pulgada, con perforaciones de 2 mm. El agua del biofiltro se descargó por gravedad hacia un desgasificador tipo columna empacada con ventilación en contracorriente, y retornó finalmente al tanque de cultivo. El desgasificador fue construido con un tramo de 0.7 m de tubo de 8 pulgadas. El volumen de agua de todo el sistema fue de 2.21 m^3 (1.88 m^3 en el tanque de cultivo, 0.220 m^3 en el reservorio y 0.110 m^3 en el biofiltro). Toda la tubería fue de PVC hidráulico de cédula 40, con excepción del desgasificador, que fue de PVC sanitario.

La temperatura dentro del sistema se mantuvo a 28° C con un calentador de titanio con controlador

electrónico (800W; Finnex HC-0800u), colocado sobre el fondo del tanque de cultivo. El control de pH se realizó añadiendo al reservorio una dosis de carbonato de sodio ligero (Na_2CO_3) calculada a partir de la tasa de alimentación. Las dosis de Na_2CO_3 se ajustaron a la siguiente regla práctica: son necesarios 7.14 g de alcalinidad para oxidar completamente 1 g de amonio (Tidwell, 2013) y 9.2% de la proteína en el alimento se convierte en amonio (Timmons & Ebeling, 2010).
Diariamente con el objetivo de disminuir la carga de materia orgánica y disminuir la concentración de amonio dentro de los tanques, se realizaron purgas de 0.03 m^3.

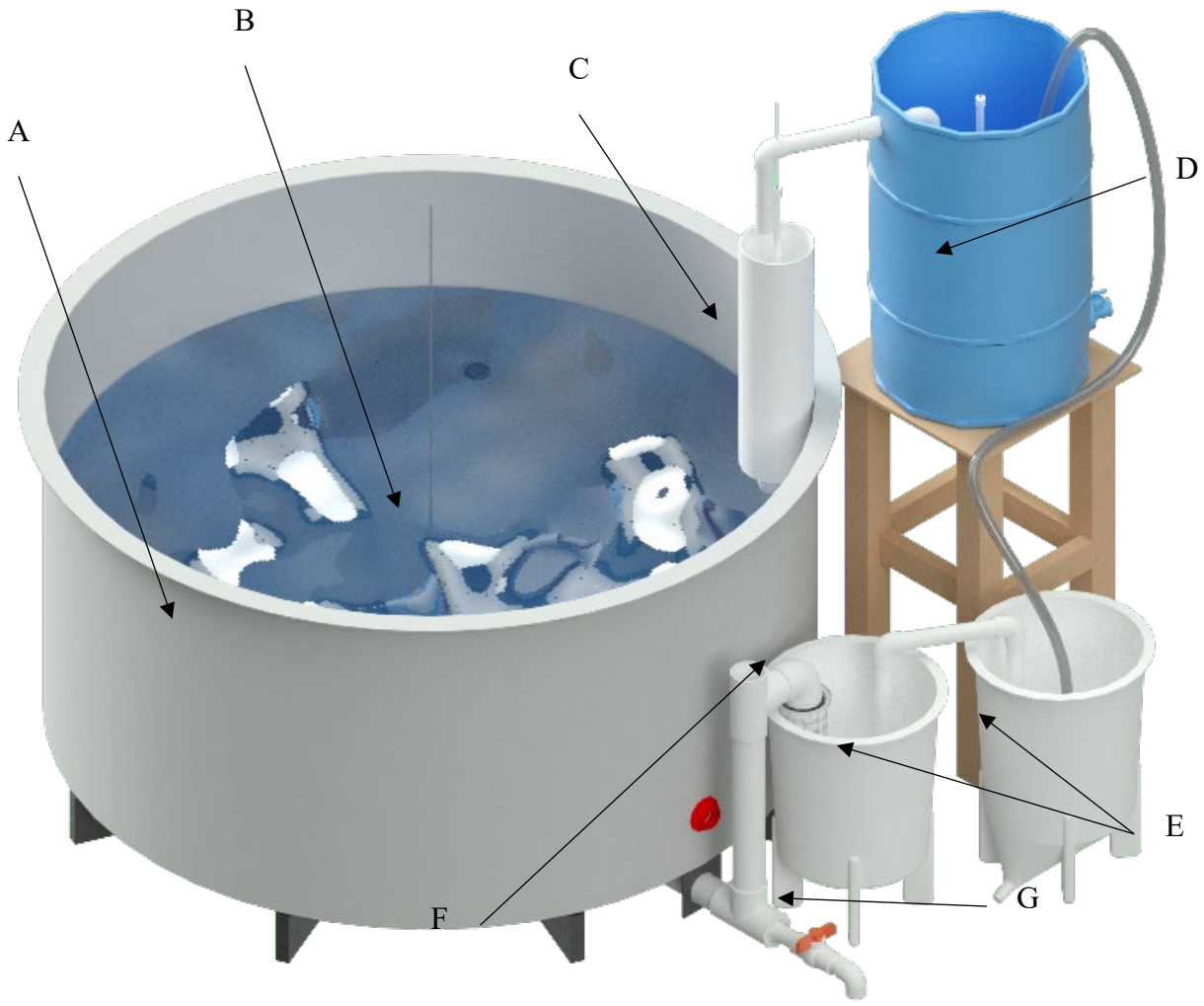


Figura 5 Configuración del sistema de recirculación acuícola empleado para el estudio. A) Tanque de cultivo. B) Piedra difusora de aire. C) Desgasificador. D) Biofiltro E) Reservorio F) Filtro de bolsa G) Llave de purga. El sistema cubre un área de 5 m^2.

5.3.2. Diseño del Sistema Hidropónico

Se diseñó un sistema hidropónico de tipo cama de sustrato. Dicha técnica de cultivo fue empleada por presentar un mayor rendimiento en comparación a la técnica NFT y DFT (Schmautz et al., 2016) y fungir como filtro biológico (Tidwell, 2013). La densidad de plantación fue calculada con base en un enfoque de balance de masa considerando la carga de nutrientes inorgánicos del efluente de los peces como la guía cuantitativa para el crecimiento del cultivo, con base a dichas estimaciones se calculó un total de 25 plantas para lograr mantener un estado estacionario en las concentraciones de nitrógeno. Los datos obtenidos se graficaron y se muestran en la **Figura 6**.

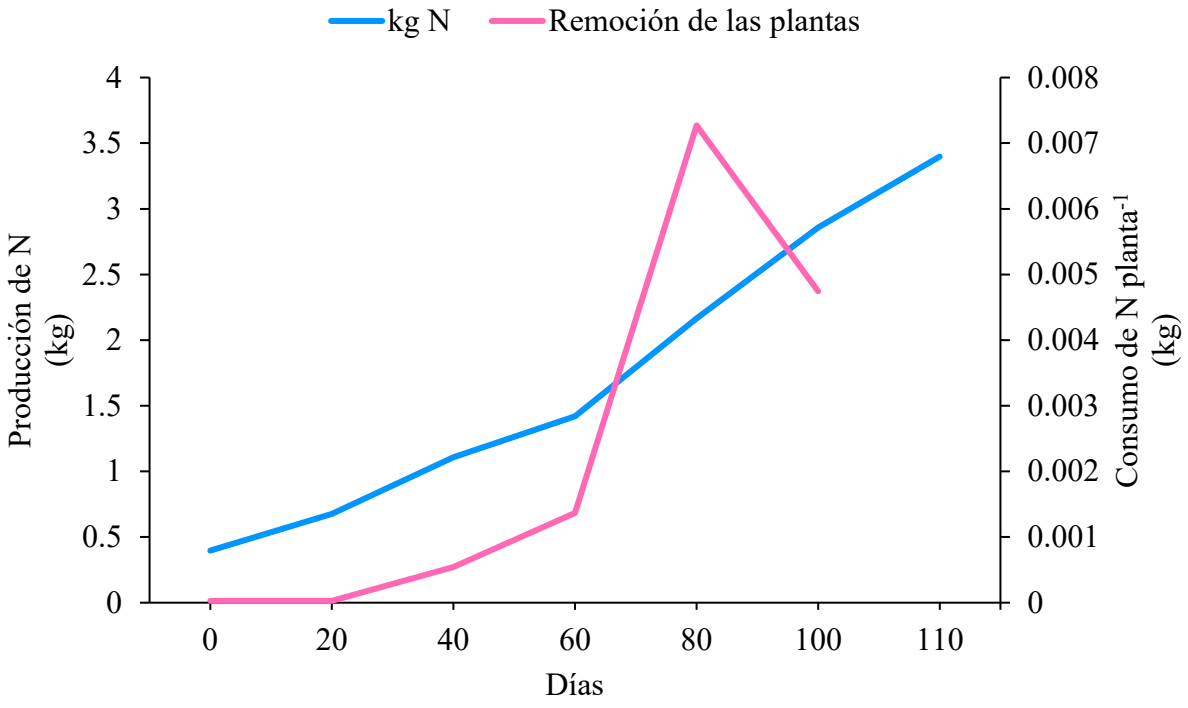


Figura 6 Producción acumulada de nitrógeno con respecto a la biomasa total y la producción diaria por las tilapias y la absorción de nitrógeno por parte de las plantas en el periodo considerado de 110 días. Elaborada con datos estimados por fórmulas (producción de nitrógeno) y tasas de remoción (aproximadamente 2.2 kg de nitrógeno por cada tonelada de fruta producida) obtenidos de literatura (Calderón-Sáenz, 2002; Carpena et al., 1988; Kinoshita & Masuda, 2011; Molina, 2016; Saravia-Chávez, 2004).

5.3.3. Descripción del Sistema Hidropónico (HS)

Se construyeron tres sistemas hidropónicos independientes, cada uno funcionó como una unidad experimental (réplicas). Cada sistema hidropónico consistió de dos componentes principales (**Figura 7**): un tanque de cultivo de plantas colocado sobre una base con una altura de 0.70 m y un tanque reservorio colocado al ras del suelo. El tanque de cultivo fue un contenedor IBC cortado por la mitad, con un volumen de 0.5 m^3 (0.9 m de ancho, 1.1 m de largo, 0.5 m de altura), recubierto con una lámina de plástico negro para evitar fugas. Se colocó dentro del tanque 0.40 m^3 de pumita, que sirvió como sustrato inerte para darle estabilidad al crecimiento radicular. El drenaje del tanque de cultivo se ubicó como rebosadero superficial con una perforación de 1 ½ pulgadas y descargó agua por gravedad, a través de tubería de 1 ½ pulgadas, al tanque reservorio de 0.110 m^3. En el reservorio se colocó una bomba sumergible (8000 L/ hora; ECO XL-8000T, Boyu®) qué bombeo agua a un flujo de 0.49 L s^{-1}, a través de una manguera reforzada de 1 pulgada de diámetro, hacia el tanque de cultivo. El volumen de agua en el sistema fue de 0.250 m^3 (0.110 m^3 en el reservorio y 0.140 m^3 en el tanque de cultivo). Toda la tubería usada fue de PVC hidráulica cédula 40.

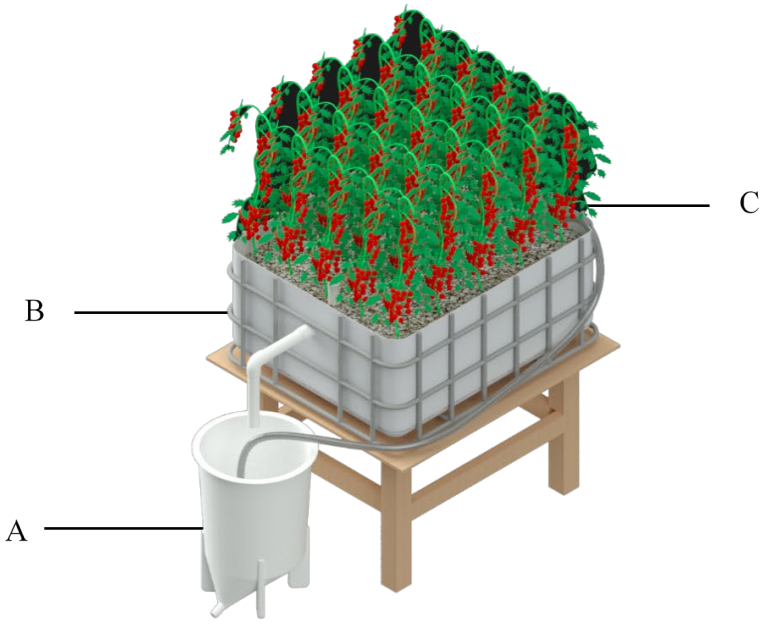


Figura 7 Configuración del sistema hidropónico empleado para el estudio. A) Reservorio. B) Unidad hidropónica de cama de crecimiento C) Cultivo de tomate saladette. El sistema cubre un área de 2 m^2.

Para la nutrición de las plantas se utilizó una solución nutritiva comercial para hortalizas (HYDRO ENVIRONMENT), la cual se disolvió en agua y se agregó al reservorio. Esta solución, una vez disuelta en agua, está ajustada a una conductividad eléctrica de 1.0 mS (milisiemens) y un pH de 6.3. Asimismo, es estable hasta por un mes, no requiere ser balanceada ni complementada y se puede emplear durante todo el ciclo productivo (vegetativo, floración y fructificación).

Por otra parte, a causa de la limitación de luz natural suficiente dentro del área donde se colocaron las unidades experimentales, se instaló una fuente de iluminación sobre cada uno de los tanques de cultivo de las plantas. Para esto, se consideró que el cultivo de tomate requiere una radiación fotosintéticamente activa aproximadamente de 85 watts m^{-2} (Jones, 2008; Dănilă et al., 2009) por lo tanto, se optó por utilizar un total de 6 lámparas por cada unidad de cultivo para cubrir este requerimiento de luz. Las lámparas empleadas fueron LEDTUB-18WLD, de 18 W de potencia, con un flujo luminoso de 1650 lm y una temperatura de color de 6500 K.

La pumita se obtuvo de un comercio de insumos de construcción, por lo tanto, debió ser separada empleando un tamiz que retiene partículas superiores a 3.3 mm obteniendo un tamaño de partícula "fino" y posteriormente se volvió a separar empleando otro tamiz de 9.1 mm para obtener un tamaño de partícula "grueso". Una vez separada fue lavada con agua para eliminar partículas adheridas de arena y basura general, una vez lavada se colocaron 0.47 m^3 de pumita en los tanques de 0.5 m^3 mezclando 50% de pumita gruesa y 50% de fina.

5.3.4. Diseño del Sistema Acuapónicos.

Se diseñó un sistema acuapónico tipo cerrado (Endo, 2019; Goddek et al., 2019). Este sistema se conformó por el componente de recirculación y el componente hidropónico, que sustituyó al biofiltro. Se usaron las mismas consideraciones de diseño y los cálculos expuestos para los sistemas independientes de recirculación e hidropónico.

5.3.5. Descripción del Sistema Acuapónico (AS)

Se construyeron tres sistemas independientes que fueron usados como unidades experimentales (réplicas). Cada sistema acuapónico fue idéntico al sistema de recirculación, pero se reemplazó el biofiltro por el componente hidropónico, conservando las mismas características del sistema hidropónico (**Figura 8**). El volumen final del sistema fue de 2.24 m³ (1.88 m³ en el tanque de cultivo, 0.220 m³ en el reservorio y 0.140 m³ en el componente hidropónico). Se usó la misma calidad de tubería y los mismos equipos que fueron usados en los otros sistemas experimentales. El circuito del flujo de agua y el caudal fue el mismo que el del sistema de recirculación. Asimismo, se realizaron purgas diarias de igual volumen que el sistema de recirculación acuícola.

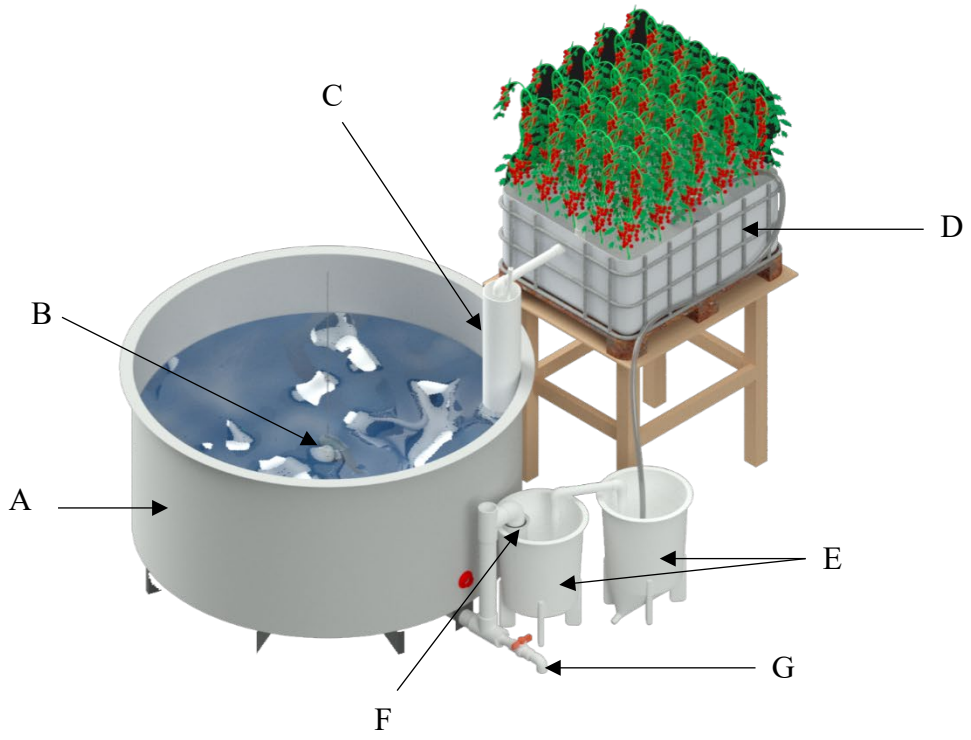


Figura 8 Configuración del sistema acuapónico empleado para el estudio. A) Tanque de cultivo. B) Piedra difusora de aire. C) Desgasificador. D) Unidad hidropónica de cama de crecimiento. E) Reservorio F) Filtro de bolsa G) Llave de purga. El sistema cubre un área de 7 m².

5.3.6. Problemas Durante la Operación de los Sistemas de Producción

Durante el desarrollo del experimento se presentaron problemas en los sistemas de recirculación y acuapónico relacionados con el aumento de la carga de sólidos sedimentables, reducción del pH y reducción de la concentración de oxígeno disuelto. Estas variaciones ocurrieron como consecuencia del aumento de la biomasa y se solucionaron de la siguiente manera: Al día 31 del experimento, para evitar la obturación del cedazo del drenaje en los tanques de cultivo y la acumulación de los sólidos sedimentables, se cambió la malla de 4 mm del cedazo por una de 12 mm. Igualmente, al día 31, se comenzó a agregar 22 g de Na_2CO_3 después de cada toma de parámetros, modificando la cantidad en días posteriores de acuerdo al incremento de la cantidad de alimento suministrado. Al día 36 se presentó una reducción en la concentración de oxígeno disuelto, por lo que se colocó una segunda piedra igualmente en el centro del tanque. Al día 42 se remplazaron los filtros de bolsa de 10 µm por unos de 300 µm. Al día 60 nuevamente ocurrió una disminución en la concentración de oxígeno disuelto. Se probó cambiar las piedras difusoras de la réplica uno de los sistemas de recirculación por un aro de manguera difusora (Angel Aqua®). Dado el éxito de dicho cambio, al día 67 se colocó un aro semejante en todos los tanques de cultivo de peces tanto en los sistemas acuapónicos como en los de recirculación. El sistema hidropónico no fue modificado a lo largo del experimento. Sin embargo, en la réplica 3 se presentó una fuga que se corrigió disminuyendo el flujo de 0.49 L s^{-1} por 0.08 L s^{-1}.

5.4. Cultivo de Tilapia

5.4.1. Adquisición y Transporte de Juveniles

Aproximadamente 2,500 juveniles masculinizados de tilapia (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada), con un peso promedio de 1.8 g, fueron adquiridos en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S. C. Unidad Nayarit. Los juveniles fueron transportados hasta las

instalaciones experimentales en bolsas de plástico. En cada bolsa se colocaron aproximadamente 500 organismos. Las bolsas fueron llenadas con 15 L de agua a una salinidad de 3 ppt. Se rellenaron con oxígeno, se colocaron en una caja plástica con hielo para mantener una temperatura de 22°C durante el transporte.

5.4.2. Aclimatación y Siembra de Juveniles

Los alevines se recibieron en dos de los sistemas de recirculación. Se colocaron las bolsas dentro de los tanques y se dejaron flotando durante 10 minutos para aclimatar los peces a la temperatura de los tanques. Después de la aclimatación, aproximadamente 1,250 organismos fueron colocados en cada tanque, evitando verter el agua de transporte dentro del tanque. Se retiraron los organismos muertos y se registró el comportamiento del resto. Durante seis días las tilapias se mantuvieron en estos dos sistemas para aclimatar los juveniles a las nuevas condiciones de confinamiento. Se alimentaron 8 veces al día (47 g en cada ración) con un alimento balanceado comercial para tilapia (Nutripec de 1.5 mm, triturado; 44% proteína).

Al tercer día de aclimatación se presentó una infección bacteriana que causó 8% de mortalidad. Para tratar este problema, los peces fueron expuestos por inmersión en oxitetraciclina al 50% (140 mg L^{-1}) durante cuatro horas. Posteriormente, para continuar con el tratamiento, se adicionaron 5 g de oxitetraciclina por cada kilogramo de alimento, mezclándolo con piloncillo líquido. Este alimento se proporcionó en 8 raciones diarias de 47 g cada una, durante 9 días.

La siembra de los peces en los diferentes sistemas se realizó el 15 de marzo del 2020. Para la siembra se agrupó a todos los peces en un tanque. Se tomó una muestra de 140 peces para hacer una biometría y conocer la dispersión de tallas. El resto fueron pesados para obtener la biomasa total, la cual fue dividida en los 6 tanques, teniendo así, una biomasa de 690 g en cada tanque. Se sembró considerando la biomasa y no por número de peces por los siguientes motivos: 1) para evitar una reinfección y mortalidades asociadas al manejo; 2) Tratar de asegurar que la producción de metabolitos secundarios fuera similar en cada unidad. Transcurridos 12 días de la siembra se reemplazaron los peces muertos en cada unidad experimental y se ajustó la población de cada tanque a 365 peces.

5.4.3. Monitoreo de la Calidad del Agua

El monitoreo de la calidad del agua se realizó midiendo parámetros físicos y químicos. Los parámetros químicos (amonio, nitrito, nitratos y ortofosfatos) fueron determinados por métodos colorimétricos para lo cual fue necesario toma de muestras. Los parámetros físicos (pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica) fueron determinados in situ a excepción de los sólidos los cuales también fueron determinados con muestras. Los sólidos (sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos volátiles totales) fueron determinados mediante diferencia gravimétrica. La mecánica de toma de muestras y medición de parámetros fue de la siguiente manera: 1) Los nutrientes inorgánicos y sólidos fueron cuantificados semanalmente tomando una muestra del efluente del tanque de cultivo y del efluente del biofiltro. 2) Los parámetros físicos fueron medidos diario cuatro veces al día (07:30, 11:00, 14:00 y 18:00 h) directamente de la tubería de descarga del tanque de cultivo.

El análisis de las muestras se hizo siguiendo los procedimientos LQyPA-PA-014 para la determinación espectrofotométrica en muestras acuosas, los cuales tienen como base las técnicas descritas en Parsons et al. (1984) para amonio y ortofosfatos, en NMX-AA-081-1986 para nitratos, en NOM-AA-099-1987 para nitritos, en Boyd & Tucker (1992) para ortofosfatos, y en la NMX-AA034-SCFI-2001 para sólidos. Las muestras se recolectaron en botellas de polietileno y se analizaron el mismo día. Cada determinación se realizó por triplicado (triplicado técnico).

5.4.4. Alimentación

El programa de alimentación se basó en la tabla de alimentación proporcionada por la Unidad Nayarit del Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S. C. (UNCIBNOR) (**Cuadro 6**; Anexo 2) La alimentación se ajustó cada semana, de acuerdo al incremento del peso promedio. El peso promedio semanal se determinó de acuerdo con el apartado 5.4.5 Determinación de los Parámetros Zootécnicos.

Se suministró alimento comercial para tilapia de la marca NUTRIPEC PURINA®, con una presentación de extruidos flotantes con diferentes diámetros dependiendo de la fase de crecimiento.

Cuadro 6 Programa de alimentación empleado para el experimento basado en la tabla del Anexo 2.

Peso promedio (g)	Tasa de Alimentación (%)	Porciones No.	Frecuencia (h)	Tamaño de partícula (mm)	Proteína (%)
1.8-5	10-8	8	01:34	1.5 (triturado)	44
6-10	6	7	01:50	1.5	44
11-46	5.5-4.3	6-5	02:12-02:45	2.4	40
47-140	4.2-3.4	5-4	02:45-03:40	3.5	35

5.4.5. Determinación de los Parámetros Zootécnicos.

El seguimiento del crecimiento de los peces se hizo de dos maneras, alternadas semanalmente, como a continuación se detalla: 1) primer método. Se tomaron 3 muestras de aproximadamente 60 peces por cada tanque. Los peces de cada muestra se pesaron en conjunto en una báscula (EQB-W 20/40) y se contaron. Con estos datos se calculó el peso promedio. La biomasa total por tanque se calculó multiplicando el peso promedio por el número de peces vivos registrados para ese día. Estos datos se usaron para ajustar la tasa de alimentación semanal. 2) segundo método. De cada tanque se tomó una muestra aleatoria de 50 peces que fueron anestesiados, uno por uno, en una solución de aceite de clavo (50 mg/L). A cada pez se les tomó el peso total con una balanza digital (± 0.01 g; Ohaus SP602 am Scout Pro) y las longitudes patrón y total con un vernier digital (± 0.1 mm, 150mm/6) o con un ictiómetro convencional (± 1 mm) a partir del día 55 del experimento. Además de calcular la biomasa total para ajustar las raciones de alimentación en esas semanas, tal como anteriormente se mencionó, con estos datos se calcularon los siguientes índices zootécnicos. La tasa crecimiento específica (SGR) se calculó utilizando la siguiente fórmula

$$SGR(\%\ d^{-1}) = \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)}{\Delta t} * 100 \quad (1)$$

Donde:

W_2 *Peso promedio final (g)*

W_1 *Peso promedio inicial (g)*

Δt *Tiempo transcurrido entre los muestreos (días)*

El factor de conversión alimenticia (FCR) se calculó usando la siguiente fórmula :

$$FCR = \frac{cantidad\ de\ alimento\ suministrado\ (g)}{biomasa\ ganada\ (g)} \quad (2)$$

Donde:

FCR Factor de conversión alimenticia

La supervivencia final se calculó empleando la siguiente fórmula:

$$Supervivencia\ (\%) = \frac{N_t}{N_0} * 100 \quad (3)$$

Donde:

N_t *Total de peces cosechados*

N_0 *Número de peces sembrados*

5.4.6. Análisis de Propiedades Organolépticas

Una vez finalizado el periodo experimental los organismos fueron sacrificados por shock térmico en una "suspensión de hielo". De cada unidad experimental se tomaron 4 organismos para realizar el análisis sensorial. Los organismos no pudieron ser analizados el mismo día del sacrificio. Por lo tanto, se congelaron a -10° C durante dos días. El día del análisis los organismos fueron descongelados y fileteados. Los filetes se separaron por unidad experimental y se cocinaron según la norma NMX-F-578-SCFI-2001. Inmediatamente después de cocinar, los filetes se entregaron a tres personas no expertas para que realizaran el análisis con base en los criterios descritos en el anexo 1.

5.5. Cultivo de Tomate

5.5.1. Producción de Plántulas

La producción de plántulas se realizó con semillas de tomate variedad saladette rio grande (HIT Semillas®) adquiridas en una casa comercial. Estas semillas no fueron híbridas ni genéticamente modificadas. Para la siembra se emplearon tres sobres de 180 semillas cada uno. Primero, las semillas se remojaron en un recipiente de 0.5 litros por 2 h con agua entre 30-35 °C. Se descartaron las semillas flotantes. Después de la hidratación, las semillas se retiraron del recipiente y se colocaron en una charola para eliminar el exceso de humedad con papel absorbente.

Posteriormente, las semillas fueron sembradas en dos charolas de germinación con 200 cavidades, previamente lavadas y desinfectadas con solución de yodo. Como sustrato de germinación se usó un sustrato especial para el cultivo de hortalizas (Peat Moss Saula®). Con anticipación a la siembra, el sustrato se preparó de la siguiente manera: 4 litros de sustrato fueron hidratados por 24 h. Después, el sustrato fue distribuido en las cavidades de las charolas de germinación, asegurándose de haber llenado las cavidades sin compactar demasiado al sustrato. Las semillas fueron depositadas en la superficie del sustrato y cubiertas con más sustrato sin hidratar, desmoronado con las manos. Posteriormente se regó el sustrato con un atomizador.

Diariamente las charolas se colocaron bajo luz artificial (6 lámparas led de 18w) por 13 h y se regaron a las 16:00 h con 250 mL de agua, empleando un atomizador. La germinación ocurrió después de cuatro días y la altura necesaria para el trasplante (15 cm) ocurrió después de 19 días después de la siembra.

5.5.2. Trasplante de las Plántulas

Una vez que las plántulas alcanzaron 20 cm de altura, se trasplantaron sobre la pumita en los sistemas acuapónico e hidropónico. La superficie de cultivo de cada unidad se delimitó en 25 parcelas (40 cm^2) mediante una cuadrícula guía (arreglo de 5x5) colocada a 5 cm sobre la pumita.

Al centro de cada parcela se cavó un hoyo de aproximadamente 6 cm de profundidad y 5 cm de diámetro. Las plántulas fueron retiradas de las charolas de germinación con un abatelenguas. Este se introdujo en cada orilla de la cavidad para aflojar el sustrato. Después se retiró la plántula de la cavidad tomándola por el tallo, apoyándose con el abatelenguas. El sustrato que se quedó en las raíces fue removido rociando agua con un atomizador. Para hacer el trasplante, primero se aseguró que las raíces estuvieran estiradas. Después se colocó una plántula en cada hoyo de cada parcela y se cubrió el hoyo con el sustrato removido, sin compactar. Se plantaron 25 plántulas en cada unidad, obteniendo una densidad de siembra de 25 plantas m^{-2}.

5.5.3. Entutorado de las Plantas

Debido al crecimiento vertical de las plantas de tomate, a los 15 días del trasplante se colocaron guías para mantener erguidas a las plantas. Las guías consistieron en 5 líneas paralelas de rafia agrícola colocadas 110 cm sobre las unidades de cultivo. Sobre cada parcela se ató un extremo de una línea vertical en la línea horizontal y el extremo libre se ató un anillo de tutoreo. La rafia vertical se ató al tallo de cada planta con una vuelta floja. Cada 8 días se ajustó la posición de la rafia para sostener siempre la parte superior de la planta.

5.5.4. Determinación de Parámetros Fitotécnicos.

El crecimiento de los tomates se evalúa midiendo la longitud del tallo (desde la base del sustrato hasta la yema terminal), el grosor del tallo (en la parte central del tallo principal) y la cantidad de ramificaciones presentes que presentan florescencia. Por otro lado, la calidad del fruto producido en la planta se evalúa determinando la cantidad de frutos por planta, el peso promedio individual, el diámetro del fruto. Además de parámetros sensoriales como apariencia general, color y textura. En el presente trabajo el seguimiento del crecimiento en las plantas no se pudo realizar de la manera planeada, debido a que la distancia entre las unidades hidropónicas y el techo del sector

experimental fue de 140 cm, al día 14 las plantas superaron dicha altura. Por lo anterior el crecimiento se vio desviado, impidiendo evaluar la altura con precisión.

Por lo anteriormente expuesto, se optó por realizar una evaluación de la biomasa vegetal producida. Al concluir el periodo experimental las plantas fueron cosechadas separando el tallo y la raíz. Se determinó la biomasa del sistema radicular y la biomasa del tallo y hojas de cada unidad experimental. Asimismo, se cuantificó la cantidad de plantas cosechadas en cada unidad. Con los datos obtenidos por las acciones anteriores se obtuvo una forma de evaluar el rendimiento aproximado entre sistemas de cultivo.

5.6. Evaluación Financiera de los Sistemas de Producción

La evaluación de la viabilidad financiera de un proyecto requiere contemplar los recursos empleados y los beneficios percibidos. Dicha evaluación permite vislumbrar la rentabilidad de un proyecto. Sin embargo, si se desea valorar en la rentabilidad de uno o más proyectos los cuales pueden emplear recursos de menor costo, omitir algún insumo o la región donde se pueden establecer es distinta, es necesario dirigir el estudio hacia un criterio estandarizado. Por lo tanto, en el presente proyecto se realizó una evaluación de los sistemas de producción en dos escenarios diferentes: 1) escenario donde se considera la capacidad de generar beneficios enfocándose solamente en su actividad productiva. 2) escenario donde se considera los recursos empleados para establecer el proyecto.

La evaluación del primer escenario se consideró el costo de operación y las ventas brutas de los sistemas. Con dicha información se determinaron los indicadores: Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones (EBITDA) y margen EBITDA.

Para la evaluación financiera del segundo escenario se consideró los costos de inversión y costos de operación (donde se incluyen costos fijos y variables). Los precios de venta fueron los precios del mercado local (utilizando los datos del Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados). Se utilizó una proyección basada en el crecimiento hasta talla comercial y una producción de frutos estimada. Con dicha información se determinaron los indicadores: Punto de Equilibrio de la producción (PE), Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR),

Relación Beneficio Costo (RB/C) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI). Para el análisis de factibilidad fue necesario tratar los costos y los beneficios, asumiendo que el proyecto fue técnicamente posible hasta una talla comercial, estableciendo que el proyecto es factible si los beneficios justifican el costo de operación.

5.6.1. Indicadores Financieros

5.6.1.1. Punto de Equilibrio (PE). Se define como el nivel donde las ventas igualan a los costos y gastos, es decir, un punto de actividad donde no existe pérdida ni utilidad (Fierro-Sañudo, 2013; Mariscal-Lagarda, 2004; Shang, 1990; Verdugo-Mora, 2009). Se calculó de la siguiente manera:

$$Q = \frac{CF}{(P - CVU)} \quad (4)$$

P *Precio unitario*

Q *Volumen de venta (en unidades físicas)*

CF *Costes fijos totales*

CVU *Coste Variable Unitario*

5.6.1.2. Relación Beneficio/Costo (R B/C). Cuando los beneficios son divididos entre los costos, obtenemos la relación beneficio costo donde se expresa los beneficios netos obtenidos. Para calcular la relación se empleó la siguiente fórmula (Shang, 1990):

$$R\ B/C\ neto = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{(1+r)^i}} \quad (5)$$

Donde:

Y *Beneficio anual neto (ingresos brutos menos costos de operación)*

K *Costo de capital*

i *Año*

El resultado se interpreta como sigue: Si la R B/C es mayor a uno implica que los ingresos son mayores a los egresos. Resultado de un proyecto favorable. Si es igual a uno, los ingresos y egresos son iguales. Por lo tanto, el proyecto no tendrá pérdidas ni ganancias (estado de punto de equilibrio). Por otro lado, si es menor que uno, los ingresos son menores que los egresos y el proyecto no será rentable.

5.6.1.3. Periodo de Recuperación (PR). Determina el tiempo que se requiere para recuperar el total de la inversión. Este indicador financiero se calculó con la siguiente fórmula (Shang, 1990):

$$PR = \frac{inversión}{utilidad} \quad (6)$$

5.6.1.4. Valor Presente Neto (VPN). Los proyectos considerados a largo plazo son evaluados mediante el valor presente neto. El VPN expresa una medida de rentabilidad del proyecto en términos de unidades monetarias, con esto podemos determinar si realmente podremos maximizar la inversión. Este indicador se calculó con la siguiente ecuación (Shang, 1990):

$$VPN = \sum_{i=n}^{n} \frac{V_t}{(1+k)^i} - I_0 \quad (7)$$

Donde:

V_t *son los flujos de dinero en cada periodo t*

I_0 *es la inversión realiza en el momento inicial*

n *es el número de periodos de tiempo*

k *es el tipo de descuento o tipo de interés exigido a la inversión*

Si obtenemos un valor positivo se producirán ganancias sobre la rentabilidad exigida. Si es negativa se producirán pérdidas. Si es igual a cero no se tendrán ni ganancias ni pérdidas.

5.6.1.5. Tasa Interna de Retorno (TIR). La tasa de interés de un proyecto es definida por la tasa interna de retorno. La TIR es el porcentaje del rendimiento futuro que se espera de una inversión, es decir, el beneficio o pérdida. Un concepto comúnmente utilizado para definir la TIR es: la tasa de descuento cuando el VPN es igual a cero. Este indicador se calculó con la siguiente ecuación (Shang, 1990):

$$TIR = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_t}{(1+k)^i} - I_0 = 0 \quad (8)$$

Donde:

V_t *son los flujos de dinero en cada periodo t*

I_0 *es la inversión realiza en el momento inicial*

n *es el número de periodos de tiempo*

k *es el tipo de descuento o tipo de interés exigido a la inversión*

5.6.1.6. Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones (EBITDA). Es el indicador que muestra la capacidad para generar beneficios enfocándose solamente en su actividad productiva. Se utiliza especialmente para analizar el desempeño operativo, ya que excluye los gastos por intereses o impuestos, las disminuciones de valor por depreciaciones o amortizaciones (Jiménez-Falcón & Treviño-Saldívar, 2016). Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$EBITDA = ventas\ brutas - \ gastos\ de\ explotación \quad (9)$$

5.6.1.7. Margen EBITDA. Permite conocer cuánto se convierte en ganancias operativas de los ingresos que se reciben. Se calculó con la siguiente fórmula (Jiménez-Falcón & Treviño-Saldívar, 2016):

$$margen\ EBITDA\ (\%) = \frac{EBITDA}{ventas\ brutas} * 100 \quad (10)$$

5.7. Análisis Estadístico de los Datos

Los datos porcentuales fueron transformados en proporciones, posteriormente se aplicó una transformación angular. Todos los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y homocedasticidad de Levene. Todos los datos fueron normales y homocedásticos, por lo que se aplicaron únicamente pruebas paramétricas. Para comparar las variables de producción zootécnica (FCR, SGR y supervivencia) entre recirculación y acuaponía, y las de producción fitotécnica (biomasa y total de plantas) entre acuaponía e hidroponía, se realizaron prueba t de Student para cada variable.

La comparación de los parámetros de calidad de agua entre los tres sistemas productivos se hizo mediante un análisis de varianza de una vía, con un modelo de bloques aleatorizados. Este modelo permite disminuir el error asociado a la variable "tiempo". Los resultados que indicaron diferencias significativas fueron sometidos a una prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Todas las pruebas fueron hechas con un nivel de significancia de 0.05 en el programa Statgraphics® Centurion XVI.

6. RESULTADOS

6.1. Temperatura ambiental

La temperatura ambiental promedio en el periodo experimental fue de 26.0 ± 4.5° C, con una máxima de 32.6° C y una mínima de 18.7° C (**Figura 9**).

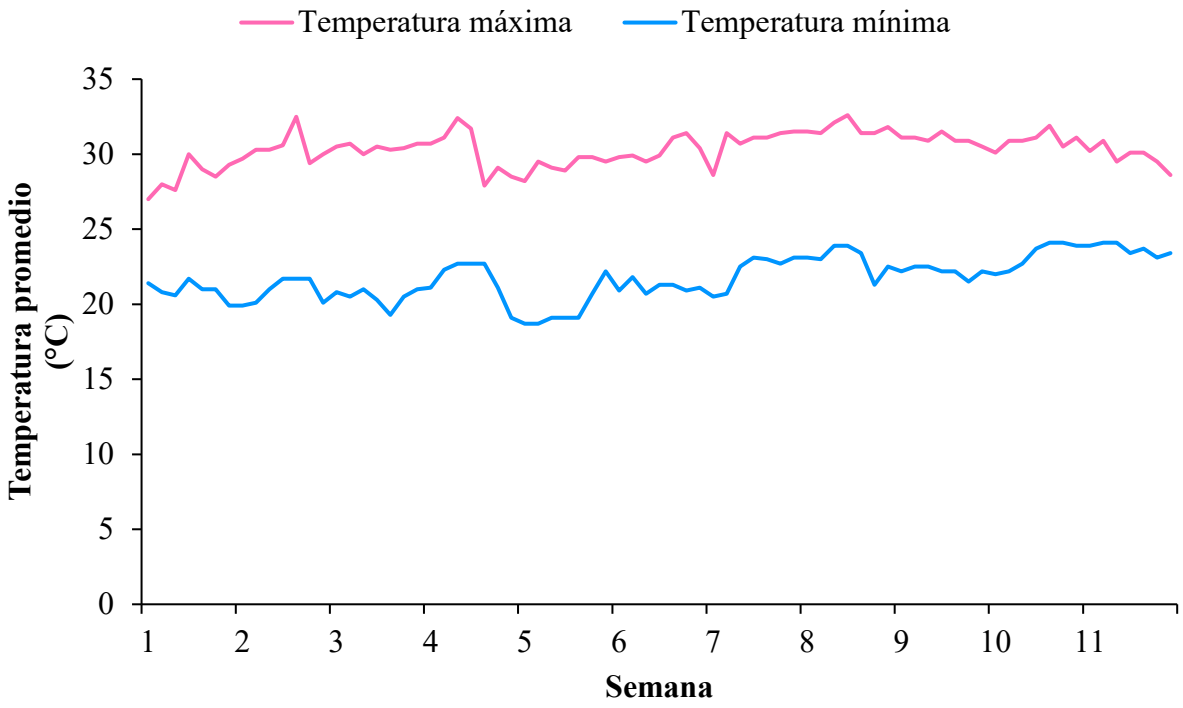


Figura 9 Temperatura ambiental máxima (diurna) y mínima (nocturna) registradas dentro del sector experimental.

5.2. Gasto de Agua en los Sistemas

En los sistemas RS y AS se realizaron purgas diarias de 0.03 m³, lo que representa un recambio

diario del 1.6%. Durante todo el experimento, en cada réplica del sistema RS se recambiaron un total de 14.63 ± 0.00 m³ (recambios diarios más los recambios eventuales para disminuir la concentración de amonio y sólidos disueltos), mientras que en cada réplica de los acuapónicos fue de 14.40 ± 0.00 m³. De los anteriores volúmenes el 90.42% en AS (13.02 m³) y el 90.58% en RS (13.25 m³) corresponden a recambios eventuales.

Por otro lado, en los sistemas hidropónicos se repuso un total de 0.61 ± 0.06 m³ por pérdidas por evaporación y recambio de solución nutritiva.

6.2. Parámetros de Calidad de Agua

6.2.1. Parámetros Físicos

No se detectaron diferencias significativas en los parámetros físicos entre los sistemas AS y RS, pero sí entre estos dos sistemas y el HS (**Cuadro 7**).

Cuadro 7 Valores promedio y desviación estándar de los parámetros físicos registrados en los tres sistemas.

	Recirculación	**Acuaponía**	**Hidroponía**
Temperatura (° C)	27.90 ± 0.82	28.12 ± 0.70	26.87 ± 1.21
pH	6.99 ± 0.45	7.02 ± 0.55	5.42 ± 0.29
Oxígeno disuelto (mg L^{-1})	5.82 ± 1.10	5.53 ± 1.27	8.06 ± 0.27
Conductividad eléctrica (µS cm^{-1})	389.33 ± 220.63	376.11 ± 219.17	1810.21 ± 326.36

No se encontraron diferencias significativas en la temperatura promedio en el agua del efluente entre AS y RS (*p=0.0700*). No obstante, se encontraron diferencias significativas en la temperatura a lo largo del experimento (*p=0.0282*). La temperatura promedio de AS y RS se mantuvo dentro del intervalo óptimo para la tilapia (**Cuadro 2**) después de la segunda semana. La temperatura máxima registrada fue 29.6° C para RS y 29.1° C en AS. La temperatura mínima (posterior a la

segunda semana) se registró al día 32 en ambos sistemas (RS registró valor de 26.44° C y AS un valor de 26.78° C). La temperatura fue diferente entre RS y HS (*p=0.0000*) y entre RS y AS (*p=0.0000*). La temperatura mínima en el sistema HS fue de 24.29° C y la máxima de 29.13° C. La **Figura 10** muestra las fluctuaciones observadas en la temperatura del efluente de los tres sistemas a lo largo del periodo experimental.

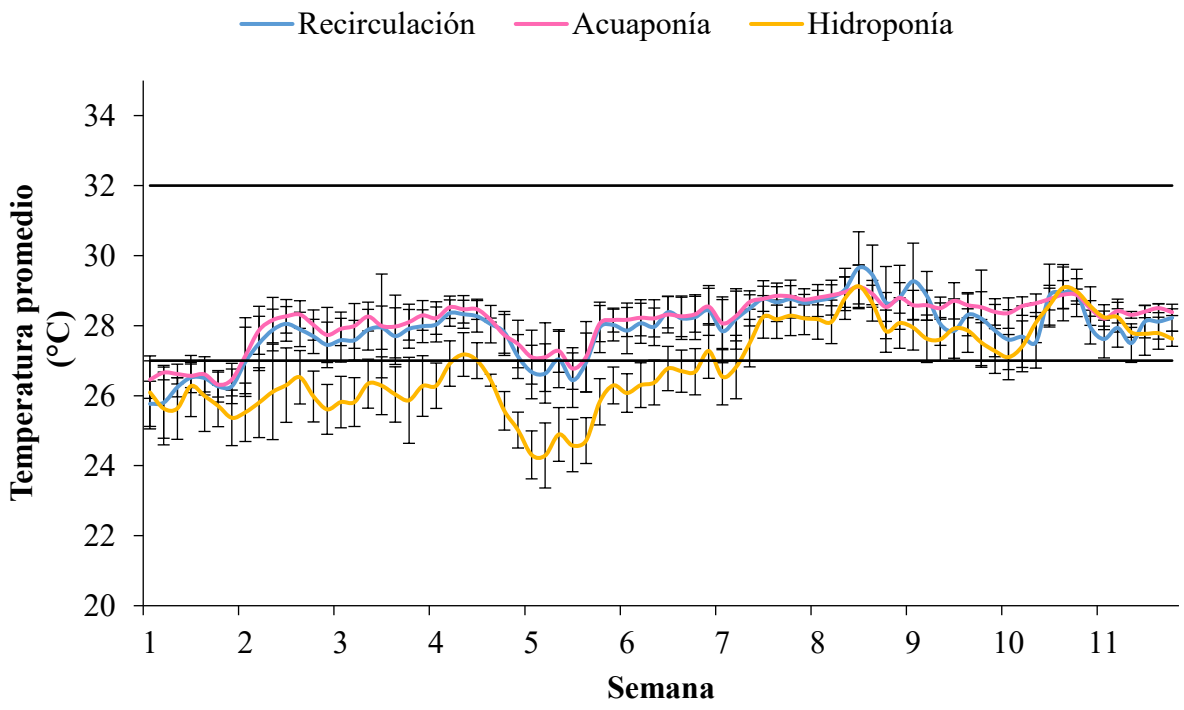


Figura 10 Variación promedio la temperatura del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. Las líneas horizontales color negro paralelas al eje "semana" indican el intervalo de temperatura recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

No se detectaron diferencias significativas en el pH entre los sistemas RS y AS durante el experimento (*p=0.6012*). Asimismo, no se encontraron diferencias en el valor promedio de pH entre AS y RS (*p= 0.6757*). No se encontraron diferencias en la cantidad de Na_2CO_3 requerida por los sistemas para mantener el pH (*p*= 0.0804). No obstante, el sistema RS ocupó un 60 % más que el AS (3024.00 ± 585.80 g de Na_2CO_3 en RS y 1880.00 ± 122.50 g de Na_2CO_3 en AS). El sistema AS fue el primero en requerir la adición de Na_2CO_3 para elevar el pH, lo que ocurrió al día 20. El

sistema RS lo requirió hasta el día 31. Por otro lado, el pH en el sistema HS fue diferente de AS y RS (*p=0.0000*). El pH mínimo registrado en HS fue de 4.64 y el máximo de 5.83. Las variaciones del pH en el efluente de los tanques de cultivo se muestran en la **Figura 11**.

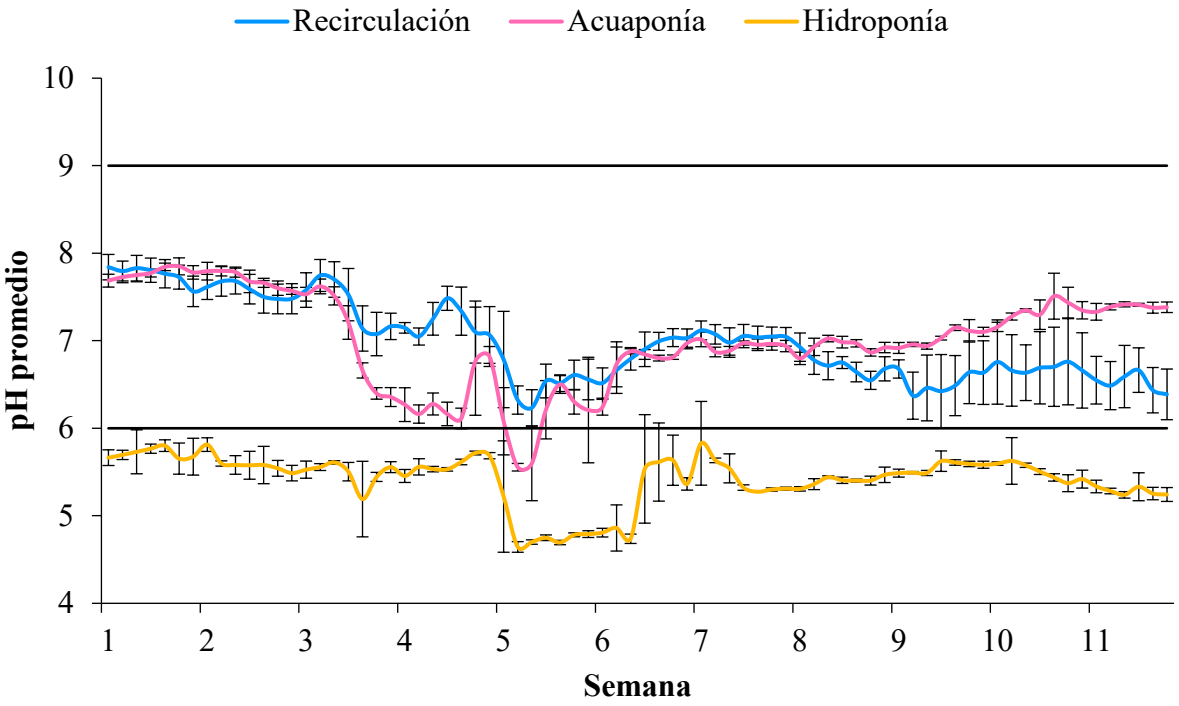


Figura 11 Variación promedio del pH del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. Las líneas horizontales color negro paralelas al eje "semana" indican el intervalo de pH recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

La concentración de oxígeno disuelto dentro del sistema hidropónico se mantuvo entre 7.5 y 8.5 mg L^{-1}. El nivel de oxígeno disuelto en el sistema AS se mantuvo sobre el límite mínimo (4.5 mg L^{-1}) hasta el día 30 y en RS hasta el día 50. La concentración mínima de oxígeno disuelto en RS fue de 3.89 mg L^{-1} y 3.64 mg L^{-1} para AS. La concentración promedio de oxígeno disuelto en AS fue un 5% menor que en RS, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas (*p=0.1347*). Además, no se encontraron diferencias en la concentración de oxígeno entre AS y RS durante el periodo experimental (*p=0.2281*). La **Figura 12** muestra la variación en la concentración del oxígeno disuelto en el efluente de los sistemas.

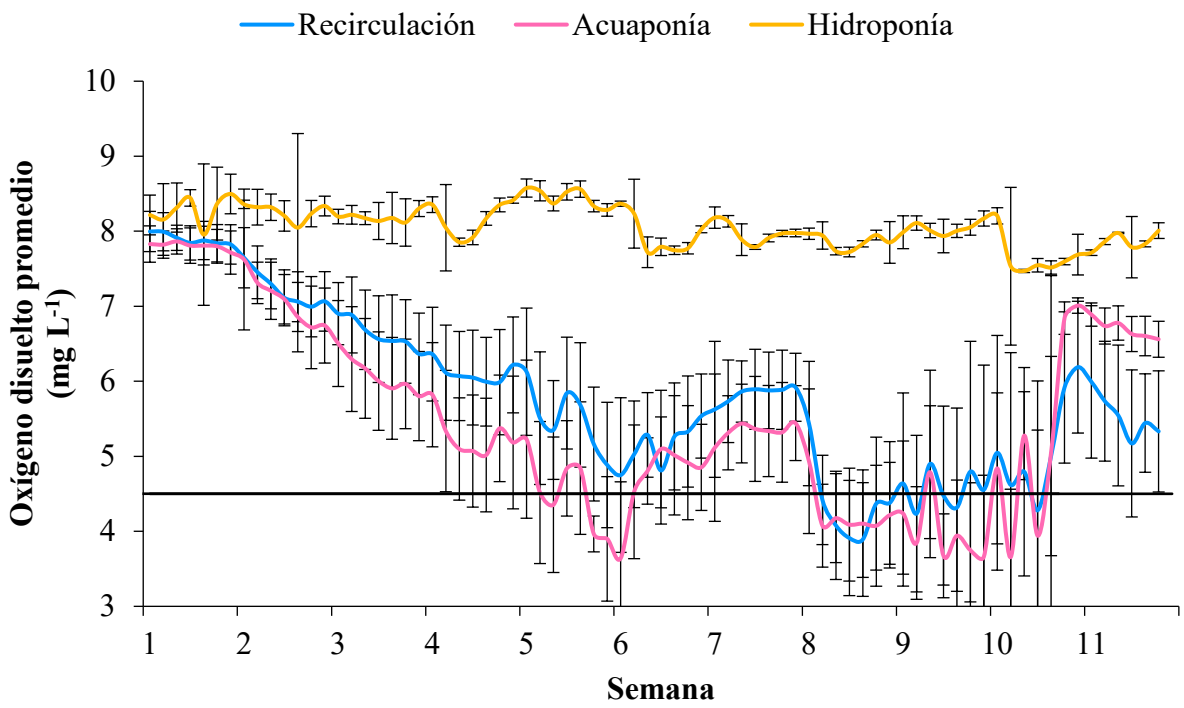


Figura 12 Variación promedio de la concentración de oxígeno en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La línea horizontal color negro paralela al eje "semana" indica el valor mínimo de oxígeno disuelto recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

La conductividad eléctrica (EC) dentro del sistema hidropónico se mantuvo dentro de lo especificado por el proveedor de la solución nutritiva (1.5-3 mS cm^{-1}). Durante todo el experimento no se registraron diferencias significativas en la conductividad eléctrica entre RS y AS (*p= 0.9931*). Además, no se encontraron diferencias en la conductividad promedio entre AS y RS (*p=0.7114*). Se registró un valor máximo de 899.92 µS cm^{-1} para RS y 900.08 µS cm^{-1} para AS. La **Figura 13** muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica durante el periodo experimental en los tres sistemas.

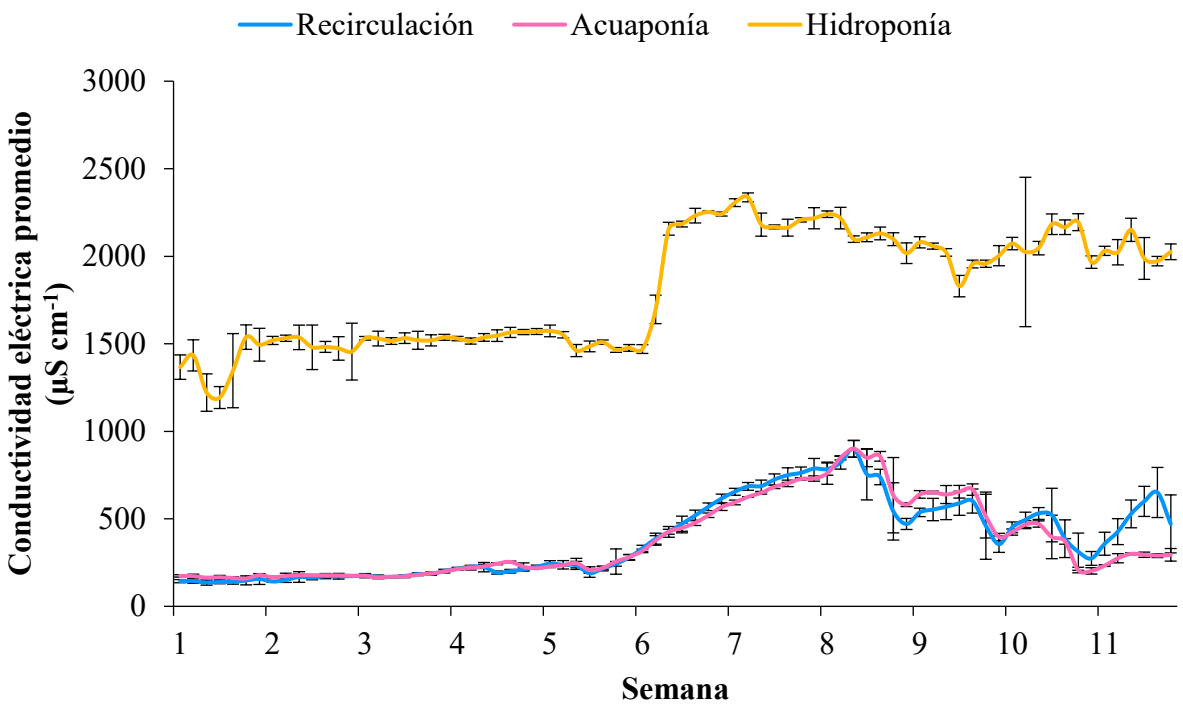


Figura 13 Variación promedio de la conductividad eléctrica del agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. En la literatura consultada no se encontró un valor de referencia para la conductividad eléctrica.

6.2.2. Parámetros Químicos

La concentración promedio de nutrientes inorgánicos (**Cuadro 8**), incluido el amonio (NH_4^+), el nitrito (NO_2^-) y el nitrato (NO_3^-) y sólidos (sólidos totales y volátiles totales) tiende a ser ligeramente menor en AS que en RS. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas. La concentración promedio de los sólidos suspendidos totales en AS es significativamente menor que en RS.

Cuadro 8 Concentración promedio (desviación estándar) de nutrientes inorgánicos y sólidos en el efluente de los sistemas experimentales.

	Recirculación	Acuaponía	Hidroponía
NH_4^+ (mg L^{-1})	1.00 ± 0.98	1.03 ± 1.10	0.73 ± 0.91

NO_2^- (mg L^{-1})	0.44	±	0.22	0.26	±	0.35	0.07	± 0.08
NO_3^- (mg L^{-1})	2.78	±	1.42	2.31	±	0.90	2.91	± 1.40
PO_4^{-3} (mg L^{-1})	0.48	±	0.42	0.74	±	0.29	1.72	± 0.12
ST (mg L^{-1})	348.81	±	203.82	322.42	±	160.19	1720.85	± 303.16
SVT (mg L^{-1})	224.71	±	131.21	197.94	±	91.94	835.88	± 106.30
SST (mg L^{-1})	64.33	±	104.76	9.54	±	13.78	6.84	± 17.01

No se detectaron diferencias significativas en la concentración de NH_4^+ entre los sistemas AS y RS durante todo el periodo (*p =0.9962*) y en la concentración promedio (*p =0.9372*). La concentración promedio en AS durante las primeras tres semanas se mantuvo por debajo de 0.50 mg L^{-1}. Posteriormente la concentración aumentó hasta un valor de 1.52 ± 0.57 mg L^{-1} en la quinta semana para después disminuir a 0.21 ± 0.06 mg L^{-1} en la octava semana. Después de la octava semana la concentración aumentó bruscamente hasta un valor de máximo de 2.33 ± 1.00 mg L^{-1} en la décima semana.

El sistema RS mantuvo una concentración de NH_4^+ inferior a 0.50 mg L^{-1} solo la primera semana. En la segunda semana la concentración fue de 0.02 ± 0.01 mg L^{-1} la cual aumentó hasta un valor máximo de 2.48 ± 0.47 mg L^{-1} en la cuarta semana. Posteriormente disminuyó hasta un valor de 0.15 ± 0.13 mg L^{-1} en la sexta semana y se mantuvo por debajo de 0.50 mg L^{-1} hasta la novena semana para después aumentar en la décima semana hasta 2.23 ± 1.38 mg L^{-1} y disminuir en la onceava semana a 2.18 ± 1.34 mg L^{-1}.

El sistema HS mostró aumentos bruscos en las semanas posteriores a la adición de solución nutritiva (semana 1 y 6). En las semanas 4, 5, 6, 8, 9 y 10 la concentración se mantuvo por debajo de 0.5 mg L^{-1}. La concentración máxima registrada para este sistema fue en la segunda semana con un valor 2.64 ± 0.43 mg L^{-1}

La **Figura 14** muestra las concentraciones promedio de NH_4^+ en el efluente de los sistemas durante el periodo experimental.

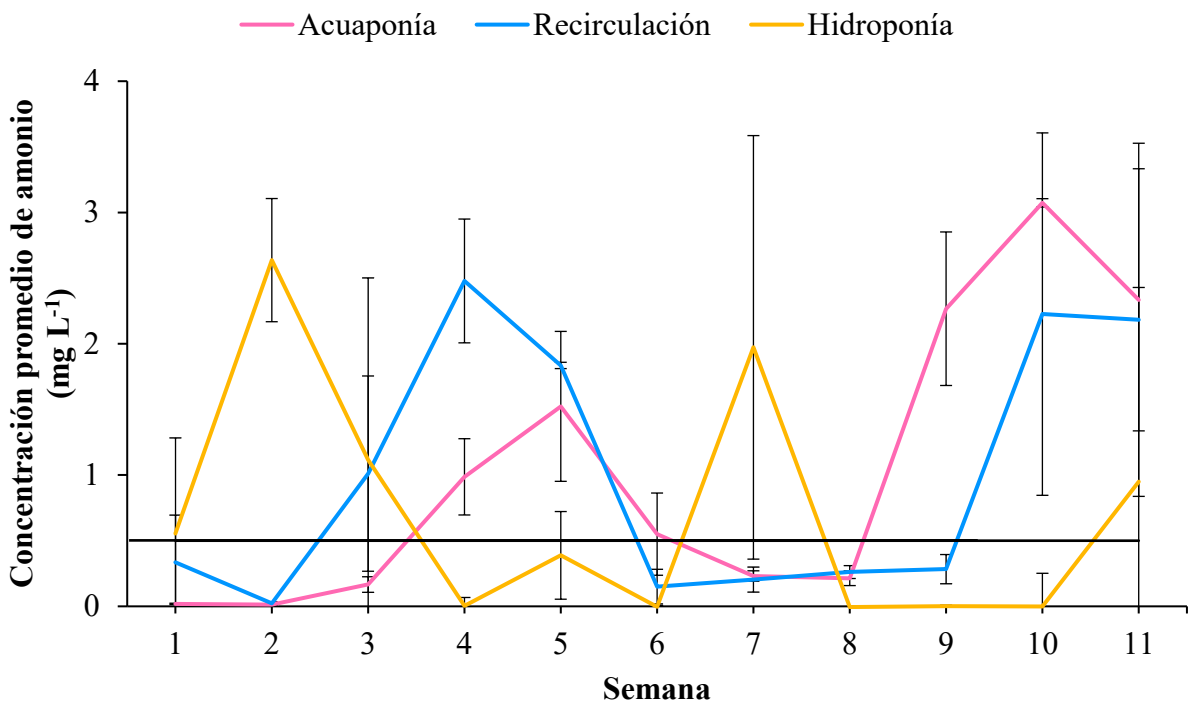


Figura 14 Variación promedio de amonio (NH_4^+) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La línea horizontal color negro paralela al eje "semana" indica el valor máximo en la concentración de amonio recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

No se detectaron diferencias entre los sistemas AS y RS en la concentración promedio de NO_2^- (*p=0.1589*). No se detectaron diferencias durante todo el periodo experimental (*p=0.1372*). No obstante, la concentración promedio de NO_2^- en el efluente del sistema AS desde la primera semana (0.16 ± 0.04 mg L^{-1} en AS y 0.10 ± 0.13 mg L^{-1} en RS) hasta la séptima semana (0.07 ± 0.05 mg L^{-1} en AS y 0.22 ± 0.03 mg L^{-1} en RS) fue significativamente menor (*p=0.0019*). En la octava semana la concentración de NO_2^- en AS aumentó significativamente de 0.07 ± 0.05 mg L^{-1} a 0.76 ± 0.04 mg L^{-1} (*p=0.0000*). La concentración en RS aumentó de 0.1 ± 0.13 mg L^{-1} en la primera semana hasta 0.72 ± 0.11 mg L^{-1} en la tercera semana. Después disminuyó hasta 0.40 ± 0.34 mg L^{-1} en la quinta semana y aumentó a 0.52 ± 0.37 mg L^{-1} en la sexta semana. Posteriormente se observó una disminución hasta 0.22 ± 0.03 mg L^{-1} en la octava semana y un aumento hasta 0.82 ± 0.02 mg L^{-1} en la onceava semana. Durante el periodo de la octava a la onceava semana la concentración en AS y RS fue similar. La concentración de nitritos en el sistema HS se mantuvo debajo de 0.1 mg L^{-1} con un valor máximo de 0.05 ± 0.04 mg L^{-1} en la séptima semana. La **Figura 15** muestra la

gráfica de la concentración promedio semanal de los tres sistemas durante todo el periodo experimental.

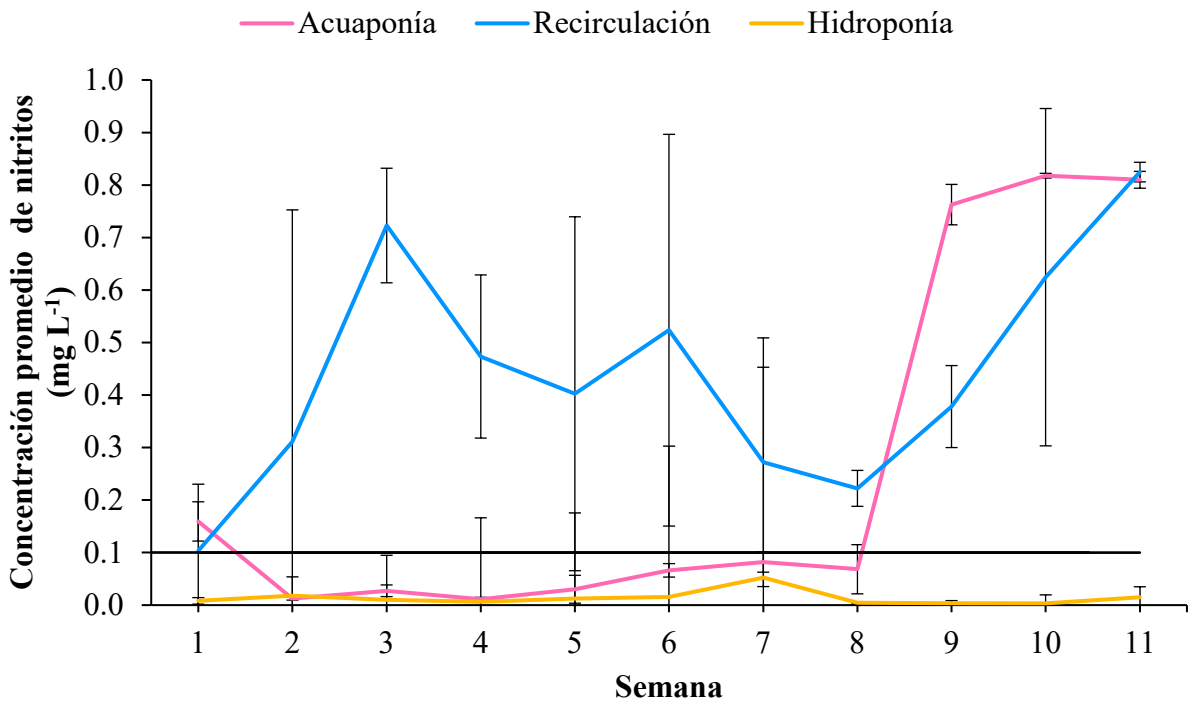


Figura 15 Variación promedio de nitritos (NO_2^-) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La línea horizontal color negro paralela al eje "semana" indica el valor máximo en la concentración de nitritos recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus*.

Durante el periodo experimental no se registraron diferencias significativas entre AS y RS en la concentración de NO_3^- (*p=0.1360*). La concentración promedio de NO_3^- tuvo un patrón similar en los tres sistemas (**Figura 16**). En el sistema AS la concentración promedio (0.69 ± 0.03 mg L^{-1}) en la primera semana fue 91% mayor que en RS (0.36 ± 0.23 mg L^{-1}). La concentración en AS para la tercera semana (2.75 ± 0.42 mg L^{-1}) fue 50% menor que en RS (5.44 ± 1.44 mg L^{-1}), sin embargo, no se detectaron diferencias (*p= 0.0902*). A partir de la sexta semana no se registraron diferencias significativas entre RS y AS.

La concentración promedio en RS aumentó bruscamente de 0.52 ± 0.15 mg L^{-1} (segunda semana) a 5.44 ± 1.44 mg L^{-1} (tercera semana). En la cuarta semana la concentración disminuyó hasta 3.23

± 0.69 mg L^{-1} y se mantuvo entre 3.76 ± 0.15 mg L^{-1} y 2.45 ± 0.48 mg L^{-1} hasta el final del experimento.

En el sistema HS la concentración promedio aumentó de 1.12 mg L^{-1} en la segunda semana hasta 4.73 mg L^{-1} en la tercera semana. Posteriormente disminuyó en la quinta semana a 2.95 mg L^{-1} y se mantuvo hasta la onceava semana entre 3.65 mg L^{-1} (semana 6) y 2.93 mg L^{-1} (semana 10).

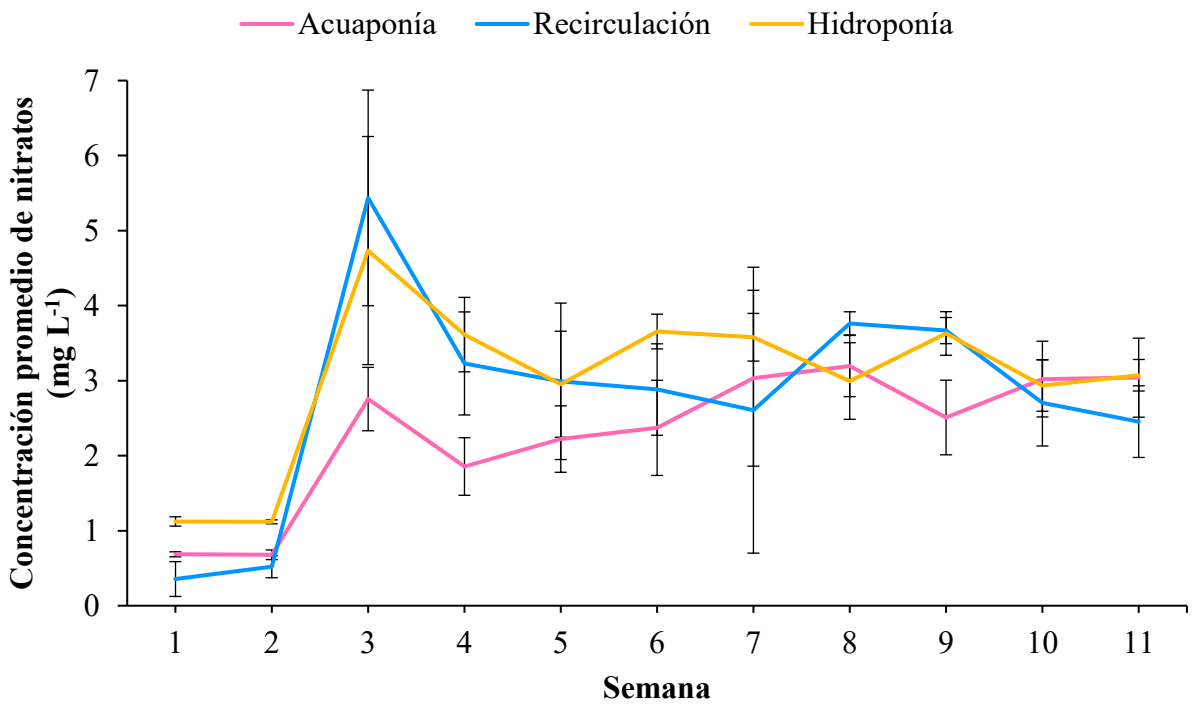


Figura 16 Variación promedio de nitratos (NO_3^-) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La concentración máxima de NO_3^- recomendada para el cultivo de tilapia es 200 mg L^{-1}.

Durante el periodo experimental no se registraron diferencias entre AS y RS en la concentración de PO_4^{3-} (*p=0.1131*). La concentración promedio de PO_4^{3-} en la primera semana para el sistema AS fue de 1.17 ± 0.06 mg L^{-1}, la cual disminuyó hasta 0.29 ± 0.08 mg L^{-1} en la quinta semana. Durante las primeras cinco semanas la concentración promedio de PO_4^{3-} entre AS y RS fue diferente estadísticamente (*p=0.0106*). En la sexta semana la concentración en ambos sistemas aumentó hasta alcanzar en la onceava semana un valor promedio de 1.20 ± 0.22 mg L^{-1} en RS y 1.04 ± 0.04 mg L^{-1} en AS. Durante este periodo no se encontraron diferencias significativas

($p=0.8285$). En HS la concentración se mantuvo entre 1.51 ± 0.05 y 1.94 ± 0.02 mg L^{-1} durante todo el experimento.

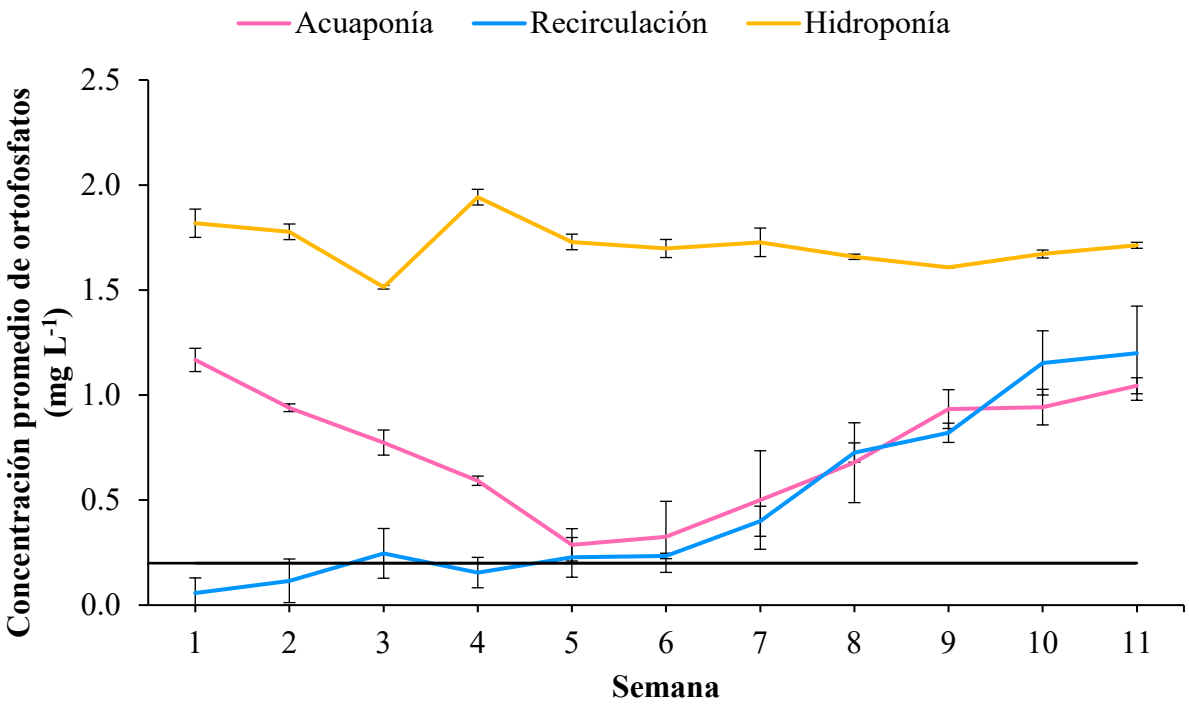


Figura 17 Variación promedio de ortofosfatos (PO_4^{3-}) en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La línea horizontal color negro paralela al eje "semana" indica el valor máximo en la concentración de ortofosfatos recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

6.2.3. Sólidos

En el presente proyecto no se encontraron diferencias significativas en la concentración de sólidos totales en los sistemas AS y RS ($p=0.8618$). No se detectaron diferencias en la concentración promedio de sólidos totales entre AS y RS ($p=0.7394$). La concentración promedio en la onceava semana fue mayor en RS ($p=0.0031$). La concentración en AS y RS durante todo el experimento se encontró entre 100 mg L^{-1} y 700 mg L^{-1}. El valor máximo registrado en AS fue de 676.44 ± 52.14 mg L^{-1} y de 634.67 ± 23.09 mg L^{-1} en RS. El valor mínimo fue 156.00 ± 21.33 mg L^{-1} en AS y 129.33 ± 15.38 mg L^{-1} en RS.

Por otro lado, el sistema HS alcanzó una concentración máxima de 2247.56 ± 619.02 mg L^{-1} y mínima de 1287.56 ± 84.54 mg L^{-1}.

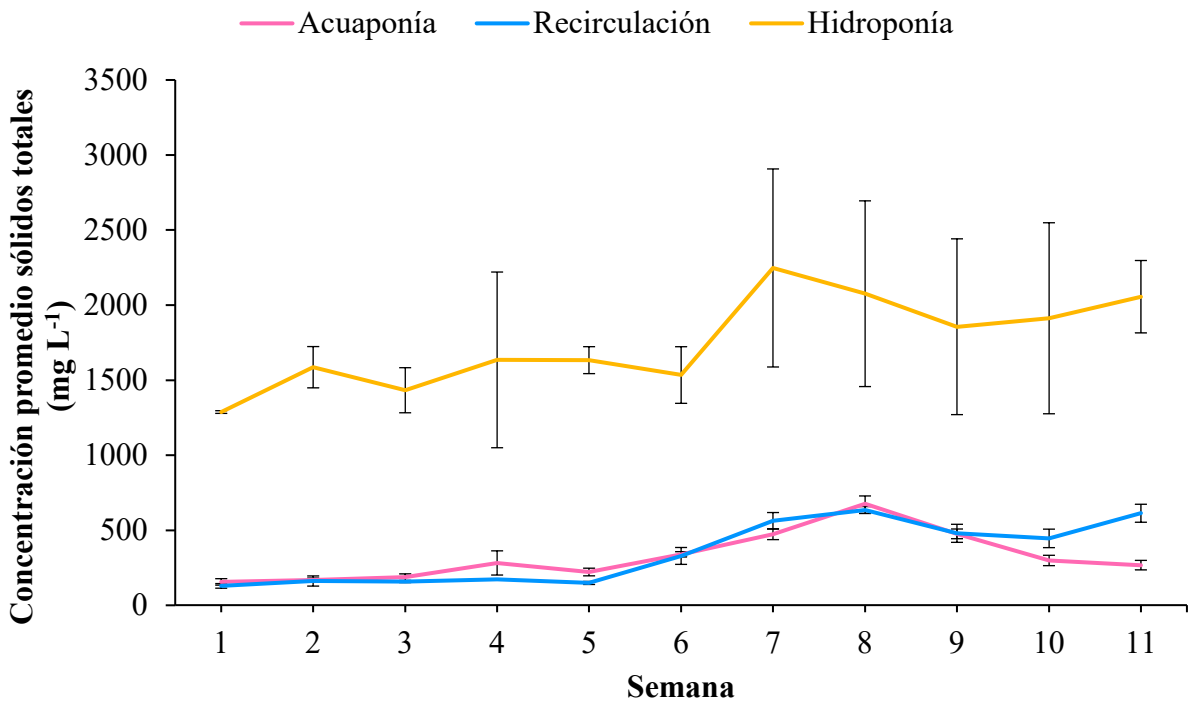


Figura 18 Variación promedio de sólidos totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. En la literatura consultada no se encontró una concentración máxima recomendada de sólidos totales para el cultivo de tilapia.

La concentración de sólidos volátiles totales en los sistemas AS y RS no mostró diferencias significativas (*p= 0.6605*). La concentración promedio de sólidos volátiles totales fue igual en AS y RS (*p=0.5863*). Después de la décima semana la concentración en RS fue un 164% mayor que en AS (*p=0.0010*). La concentración máxima fue de 421.78 ± 66.08 mg L^{-1} (semana 8) en AS y de 461.33 ± 44.86 mg L^{-1} (semana 11) en RS. La concentración mínima fue de 101.33 ± 10.26 mg L^{-1} (semana 2) en AS y de 93.33 ± 9.61 mg L^{-1} (semana 3) en RS

El sistema HS muestra una concentración de SVT con un valor máximo de 1057.78 ± 274.98 mg L^{-1} (semana 7) y mínimo de 680.00 ± 52.46 mg L^{-1} (semana 1).

La **Figura 19** muestra la variación registrada en la concentración de sólidos volátiles totales en los tres sistemas durante el experimento.

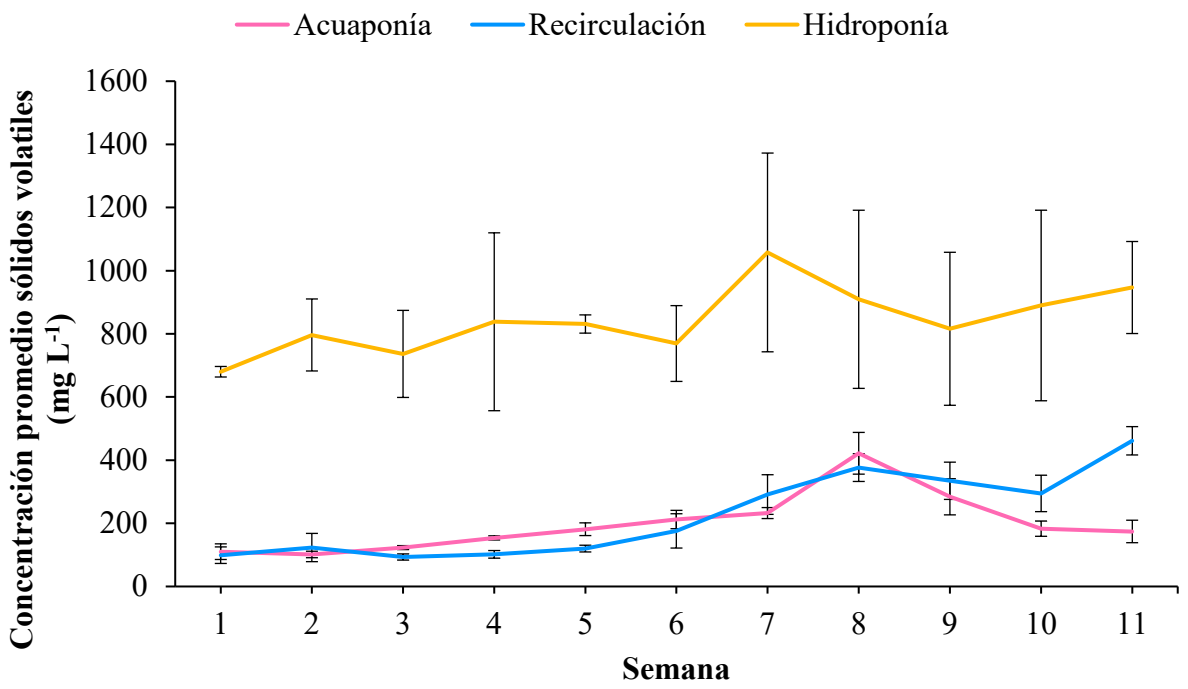


Figura 19 Variación promedio de sólidos volátiles totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. En la literatura consultada no se encontró una concentración máxima recomendada de sólidos volátiles para el cultivo de tilapia.

La concentración de sólidos suspendidos totales en el sistema HS durante todo el experimento fue inferior a 50 mg L^{-1}. La concentración promedio máxima registrada fue de 45.00 ± 18.03 mg L^{-1} (quinta semana).

En el sistema AS y RS no se registraron diferencias en la concentración promedio las primeras seis semanas (*p=0.5094*). Sin embargo, la concentración aumentó bruscamente en RS después de la séptima semana de 19.44 ± 4.28 mg L^{-1} a 328.89 ± 142.37 mg L^{-1} en la onceava semana. Durante todo el experimento la concentración en AS fue inferior a 50 mg L^{-1}, con un valor máximo de 40.09 ± 20.87 mg L^{-1}.

La **Figura 20** muestra la variación en la concentración promedio de sólidos suspendidos totales en los tres sistemas durante el experimento.

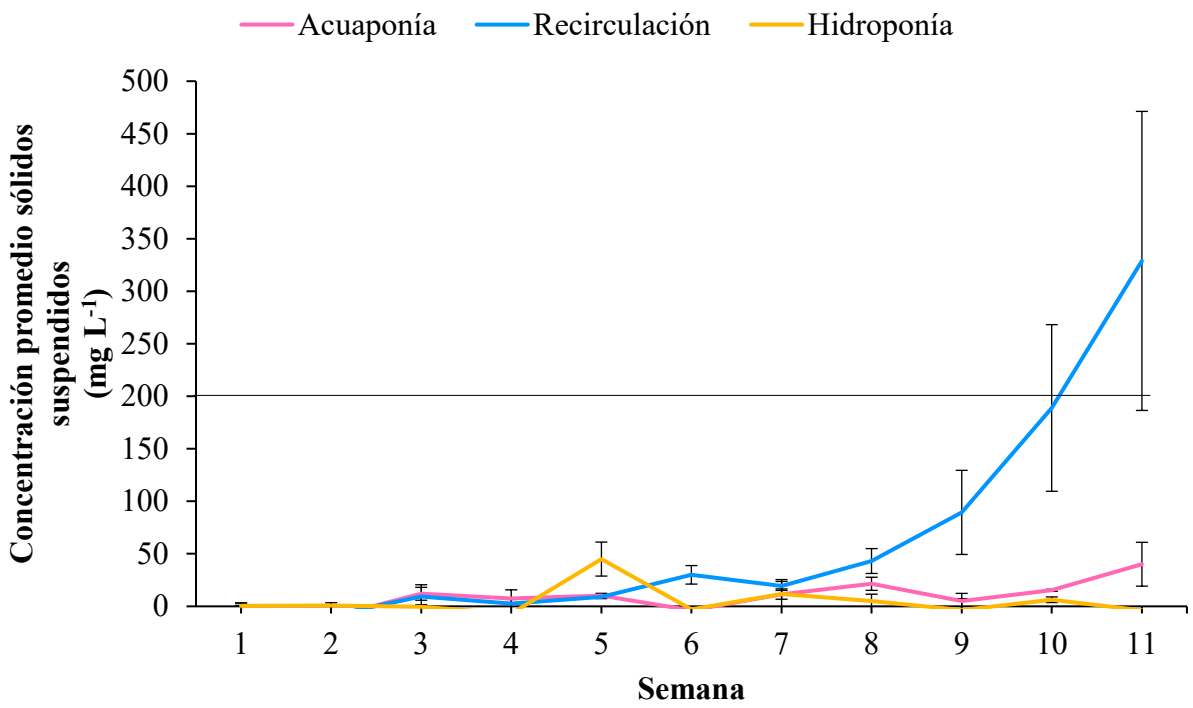


Figura 20 Variación promedio de sólidos suspendidos totales en el agua del efluente del tanque de cultivo registrada en los sistemas de recirculación, acuapónico e hidropónico durante el experimento. La línea horizontal color negro paralela al eje "semana" indica el valor máximo en la concentración de sólidos suspendidos totales recomendado para el cultivo de *Oreochromis niloticus.*

6.3. Parámetros Zootécnicos

No se registraron diferencias significativas en los parámetros zootécnicos entre AS y RS (**Cuadro 9**). La supervivencia promedio final entre el sistema RS y el AS no presentó diferencias significativas (89.36 ± 1.67% *vs*. 92.33 ± 1.45%; p= 0.1258). El rendimiento (kg m^{-2}) en el sistema AS fue inferior en un 31% respecto al de RS, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas (9.60 ± 0.10 vs. 6.61 ± 0.47; *p= 0.0718*). La tasa de crecimiento específica fue un 5% menor en AS. El factor de conversión alimenticia fue aproximadamente un 4% menor en RS.

Cuadro 9 Promedios ± desviación estándar del rendimiento obtenido en el crecimiento de la tilapia *Oreochromis niloticus* var. Chitralada en los sistemas de recirculación y acuaponía.

	Recirculación	**Acuaponía**	***p***
Densidad de siembra (kg m^{-3})	0.40 ± 0.00	0.40 ± 0.00	-
Densidad de cosecha (kg m^{-3})	25.54 ± 0.28	24.59 ± 2.49	0.6862
Días de cultivo	76.00 ± 0.00	76.00 ± 0.00	-
Peso inicial (g)	1.73 ± 0.11	1.98 ± 0.12	0.1501
Peso final (g)	140.37 ± 6.02	133.20 ± 9.31	0.4370
Crecimiento (g $día^{-1}$)	1.80 ± 1.36	1.71 ± 1.17	0.9387
Tasa de crecimiento específico (% $día^{-1}$)	5.78 ± 1.27	5.58 ± 1.25	0.8782
Supervivencia (%)	89.36 ± 1.67	92.33 ± 1.45	0.1258
FCR	0.86 ± 0.03	0.89 ± 0.00	0.1607
Rendimiento (kg m^{-2})	9.60 ± 0.10	6.61 ± 0.47	0.0718

El crecimiento en ambos sistemas se mantuvo muy similar durante todo el experimento (**Figura 21**). El peso final estimado fue de 33.07 g lo cual es aproximadamente un 75% menor al obtenido. No se encontraron diferencias en la biomasa total cosechada (*p=0.5496*). Se cosechó una biomasa total de 48.02 ± 0.52 kg en RS y 46.64 ± 3.31 kg en AS. La cantidad de alimento suministrada fue igual en ambos sistemas (*p= 0.5559*). Se suministró al sistema RS un total de 40.59 ± 1.15 kg de alimento y 38.73 ± 4.45 kg al AS.

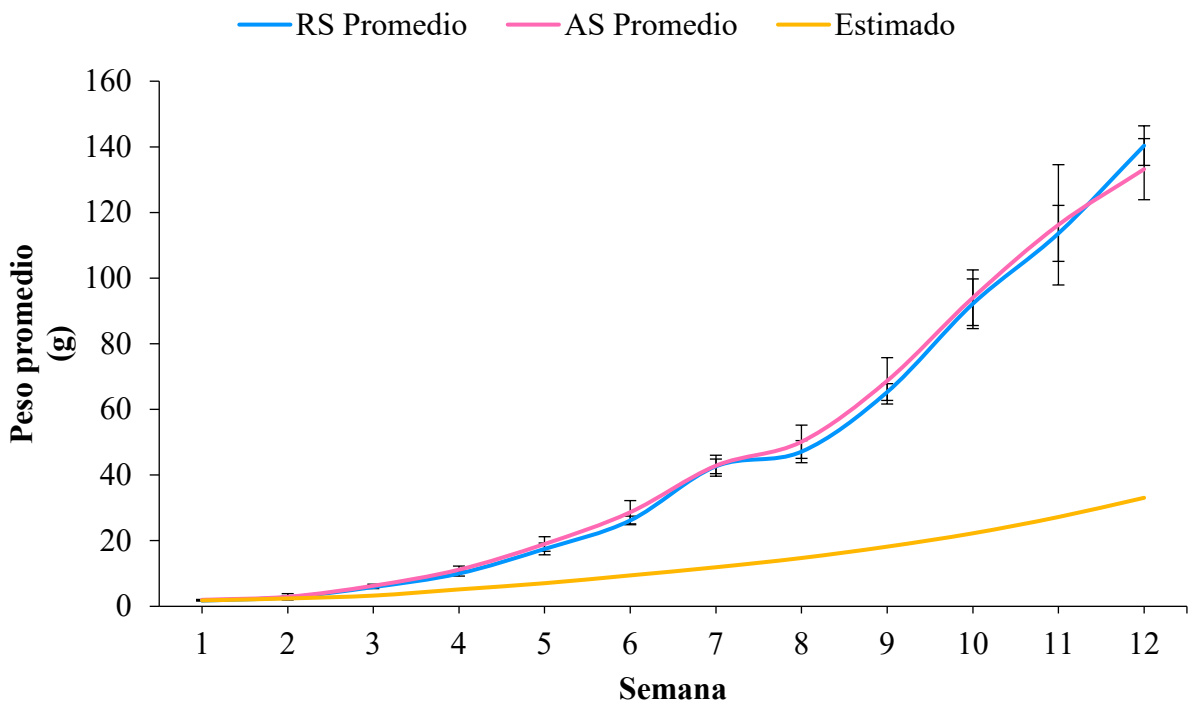


Figura 21 Gráfica del peso promedio obtenido en los sistemas de recirculación y acuaponía contra el peso estimado calculado a partir de la tabla proporcionada por el UNCIBNOR

6.4. Cultivo de Tomate

En el presente trabajo no se obtuvo producción de frutos, por lo que los rendimientos de los mismos no pudieron ser evaluados. Como se mencionó en el apartado: 5.5 Cultivo de tomate, se evaluó la producción de biomasa vegetal (tallo y hojas), biomasa total del sistema radicular y número de plantas restantes (**Cuadro 12**). No se encontraron diferencias significativas en la producción de biomasa vegetal, raíz y la cantidad de plantas restantes entre AS y HS. Pese a no encontrar diferencias significativas los cultivos del sistema acuapónico tuvieron un 25% más de biomasa vegetal y un 202 % más de biomasa del sistema radicular.

Cuadro 10 Datos de producción de biomasa promedio y desviación estándar en los sistemas acuapónico e hidropónico.

	Acuaponía	Hidroponía	*p*
Biomasa vegetal (kg)	5.50 ± 2.94	4.37 ± 0.96	0.5906
Biomasa del sistema radicular (kg)	0.726 ± 0.50	0.24 ± 0.10	0.2258
Número de plantas (u)	24.67 ± 0.60	24.67 ± 0.60	1.0000

6.5. Análisis Sensorial

Los resultados del análisis sensorial permitieron determinar de forma subjetiva la calidad de la carne de los organismos producidos en AS y RS (**Cuadro 11**). El nivel de rechazo de la apariencia general y el olor del filete en ambos sistemas fue de 1. El nivel de rechazo del sabor del filete de los organismos cosechados en AS fue de 4 con el comentario de que presentó un sabor a "tierra". La consistencia del filete en ambos sistemas obtuvo un nivel de rechazo de 0. La puntuación final obtenida por AS fue de 6, mientras que en RS fue de 2. Sin embargo, ambos filetes obtuvieron la clasificación E (apto para consumo humano).

Cuadro 11 Resultados del análisis sensorial de los filetes (cocinados) producidos en el sistema AS y RS.

Sistema	Apariencia general	Olor del filete	Sabor	Consistencia del filete	Puntuación	Clasificación
RS	1	1	1	0	2	E
AS	1	1	4	0	6	E

6.6. Análisis Financiero

6.6.1. Evaluación Financiera del Primer Escenario.

Los resultados del análisis del primer escenario indican la dimensión de la cantidad que generan en sí mismo cada uno los sistemas, es decir, su resultado operativo (**Cuadro 13**). Con ello se expone

que el sistema AS es el que tiene mayor capacidad de compensar los gastos de la línea operativa y ofrecer una ganancia. Respecto al margen EBITDA el sistema HS es el sistema con mayor valor con un 86.8%. A pesar de presentar ingresos más bajos frente al sistema AS, el margen EBITDA del sistema HS es más alto. Eso quiere decir que los costes incurridos en las operaciones comerciales son comparativamente más bajos. Por lo tanto, este sistema es más rentable en sus operaciones diarias. El sistema RS es el proyecto que menor cantidad de efectivo dispone para pagar sus deudas (intereses, impuestos, depreciación y amortización) una vez restados sus gastos más importantes (gastos operativos). Asimismo, el RS presenta el menor margen EBITDA con 14.72%. Por otro lado, el conjunto del sistema HS y RS resultan en un EBITDA de $89,163.64 MXN y un margen EBITDA de 57.99% ambos indicadores son menores que los obtenidos por el sistema AS.

Cuadro 12 Resumen de los costos operativos y ventas brutas de los sistemas experimentales. Los valores de moneda están expresados en peso mexicano (MXN).

Parámetro	Recirculación	Hidroponía	Acuaponía	Recirculación + Hidroponía
Ventas brutas	$ 60,147.00	$ 93,600.00	$ 155,776.50	$ 153,747.00
Costo eléctrico	$ 25,136.87	$ 4,321.66	$ 28,154.23	$ 29,458.53
Costos variables	$ 25,715.84	$ 8,944.76	$ 25,715.84	$ 34,660.60
Costos fijos	$ 25,577.58	$ 4,345.18	$ 28,592.16	$ 29,922.76
Costo operación	$ 51,293.42	$ 13,289.95	$ 54,308.00	$ 64,583.36
EBITDA	$ 8,853.58	$ 80,310.05	$ 101,468.50	$ 89,163.64
Margen EBITDA	14.72%	85.80%	65.14%	57.99%

Comparando los costos de operación por metro cuadrado entre los tratamientos (**Cuadro 12**), encontramos que el sistema RS tiene los mayores costos con un valor de $10,258.68 MXN por metro cuadrado ocupado (5 m^2 por sistema). En los costos de operación por metro cúbico de agua empleado, el sistema HS es el que presenta mayor costo con $1,310.65 MXN por metro cúbico empleado (0.25 m^3 por sistema).

6.6.2. Evaluación Financiera del Segundo Escenario.

Una vez terminado el cultivo, se elaboró un análisis financiero correspondiente al proyecto piloto, tomando en cuenta los datos de producción, una talla comercial de 500 g y los datos de inversión para tres unidades de cultivo. La producción de tomate se estimó con base en la literatura, obteniendo una producción estimada de 10 kg de fruto por planta (Urbina-Navarro, 2011; Yara México, 2002). Además, se realizó la estimación de dos cosechas de tilapia por año y cuatro de tomate. Los resultados del análisis financiero muestran que el sistema HS es el más viable debido al menor costo de inversión y mayor utilidad por área ocupada (**Cuadro 12**). El sistema AS presentó indicadores financieros favorables. Por otro lado, el sistema RS presentó indicadores negativos.

Cuadro 13 Resumen financiero de los tres sistemas experimentales. AcuaponiaSNT: es el análisis financiero del sistema acuapónico sin considerar la producción de tomate. Los valores de moneda están expresados en peso mexicano (MXN).

Parámetro	Recirculación	Hidroponía	Acuaponía	AcuaponíaSNT
Inversión	$ 163,332.68	$ 104,232.34	$ 160,772.91	$ 160,772.91
Costo eléctrico	$ 25,136.87	$ 4,321.66	$ 28,154.23	$ 28,154.23
Costos variables	$ 25,715.84	$ 8,944.76	$ 25,715.84	$ 25,715.84
Costos fijos	$ 25,577.58	$ 4,345.18	$ 28,592.16	$ 28,592.16
Costo operación	$ 51,293.42	$ 13,289.95	$ 54,308.00	$ 54,308.00
Ventas brutas	$ 60,147.00	$ 93,600.00	$ 155,776.50	$ 62,176.50
Ingresos/m²	$ 12,029.40	$ 46,800.00	$ 22,253.79	$ 8,882.36
CT/m²	$ 10,258.68	$ 6,644.97	$ 7,758.29	$ 7,758.29
Ingresos/m³	$ 316.63	$ 9,230.77	$ 825.26	$ 329.39
CT/m³	$ 270.02	$ 1,310.65	$ 287.71	$ 287.71
Ingresos/$100000	$ 36,824.84	$ 89,799.38	$ 96,892.26	$ 38,673.49
VAN	-$ 108,931.25	$ 389,238.18	$ 462,707.11	-$ 112,424.37
TIR	-9.82%	76.79%	62.63%	-11.25%
R B/C	$ 0.17	$ 6.04	$ 1.87	$ 0.14
PRI	2.72	1.11	1.03	2.59
Producción vegetal kg/anual	-	3000.00	3000.00	0.00
Producción animal kg/anual	978.00	-	1011.00	1011.00

Los costos de operación de los sistemas AS y RS son similares, $51,293.42 MXN y $54,308.00 MXN respectivamente. La diferencia en los costos de operación entre AS y RS es de $3,014.58 MXN y es atribuida al consumo eléctrico. El sistema HS tiene el menor costo de operación ($13,289.95 MXN). El sistema AS es el que tiene mayor beneficio por las ventas ($155,776.50 *vs.* $60,147.00 y $93,600.00). El VAN fue calculado considerando una tasa de interés del 10%. El sistema RS muestra un VAN negativo lo cual indica que el proyecto piloto no soporta la tasa de interés. La TIR indica la tasa de interés que puede soportar el proyecto, para lo cual se observó que tanto AS como HS pueden soportar una tasa de interés alta (62.63% y 76.79% respectivamente). En cambio, el sistema RS mostró una TIR negativa. En cuanto a la R B/C el sistema HS genera $6.04 MXN por cada $1.00 MXN invertido, siendo este sistema el que presenta mayor R B/C. Entre el sistema RS y AS el que presenta mayor R B/C es el sistema AS. El periodo requerido para recuperar la inversión inicial resulta ser menor en el sistema AS, seguido del HS y por último RS requiriendo 2 años 8 meses para recuperar el costo de inversión.

El monto total de la infraestructura para la construcción del proyecto piloto de tres unidades de un sistema RS fue de un total de $163,332.68 MXN. El costo de inversión para un sistema AS y RS es muy similar (con una diferencia de $2,559.77 MXN). El insumo más costoso en los tres sistemas es el medidor de oxígeno disuelto ($70,000.00 MXN). El costo de construcción en el sistema RS se eleva debido al Kaldnes k1.

Considerando las utilidades por cada $100,000.00 MXN de inversión el sistema AS es el que genera mayor valor con $96,892.26 MXN. Por otro lado, el sistema HS es el que genera mayor utilidad por metro cuadrado y por metro cúbico con un valor de $46,800.00 MXN y $1,310.65 MXN respectivamente.

7. DISCUSIÓN

7.1. Parámetros Físicos

Estudios realizados sobre la temperatura óptima para el cultivo de tilapia del Nilo han demostrado que el rango de temperatura óptimo para el crecimiento es 28° C (dos Santos et al., 2013; El-Sayed & Kawanna, 2008). La tasa de crecimiento obtenida en el presente estudio se puede explicar en parte, a la temperatura promedio obtenida en los sistemas experimentales (27.90 ± 0.82 en RS y 28.12 ± 0.70 en AS). Martínez et al. (2003) menciona que el rango de temperatura de 28° C aumenta la tasa metabólica, por lo tanto, se produce un mayor consumo de oxígeno. Lo anterior puede explicar la disminución en la concentración del oxígeno disuelto en el presente estudio, la cual se presentó cuando los organismos tenían un peso de aproximadamente 50 g. Por otro lado, el sistema hidropónico mantuvo una temperatura dentro del rango considerado óptimo para el cultivo de tomate según lo descrito por Allende et al. (2017) debido que el clima local es cálido y el área experimental se cubrió con plástico negro.

El pH registrado dentro del sistema hidropónico fue un 12.5% inferior al especificado por el proveedor de la solución nutritiva (COMERCIALIZADORA HYDRO ENVIRONMENT S.A. DE C.V.). Sin embargo, el valor promedio pH se mantuvo ligeramente menor (cercano al 2%) al rango mínimo para crecimiento del tomate (Sánchez-Del Castillo et al., 2014).

La diferente cantidad de Na_2CO_3 suministrada a los sistemas fue debido a que en la octava semana la capacidad de nitrificación del sistema acuapónico se vio reducida por la acumulación de sólidos suspendidos. En el sistema RS debido a un desfase en la planeación, el biofiltro no se encontraba maduro al momento de la siembra de los peces, el proceso de nitrificación se demoró aproximadamente 4 semanas en alcanzar su estado óptimo. Por lo anterior, el sistema RS mantuvo el pH en un estado estacionario durante un periodo mayor que el sistema AS.

La EC obtenida en el sistema HS se encuentra en lo recomendado para el cultivo de tomate (Sánchez-Del Castillo et al., 2014) con una valor de 2336.33 - 1192.75 $\mu S\ cm^{-1}$. Se ha mencionado que la EC en sistemas hidropónicos cerrados tiende aumentar (Sánchez-Del Castillo et al., 2014); sin embargo, se observó que durante un mes la EC se mantuvo en un estado estacionario. Al día 36

la EC aumentó debido a la reposición de solución nutritiva sin haber vaciado el sistema previamente. Sin embargo, no se registraron aumentos significativos en la concentración de los nutrientes inorgánicos (nitrito, nitrato y ortofosfato). En el **Cuadro 14** se recopilaron diversos parámetros físicos registrados en cultivos acuapónicos y recirculación que emplean a la tilapia como especie de cultivo.

Cuadro 14 Parámetros físicos de diversos sistemas de producción acuapónicos y recirculación

Temperatura (°C)	pH	Saturación de Oxígeno (%)	Oxígeno disuelto (mg L^{-1})	Conductividad eléctrica	Referencia
27.9 ± 0.82	6.99 ± 0.45	-	5.82 ± 1.10	389.33 ± 220.63	Presente estudio, recirculación
28.12 ± 0.70	7.02 ± 0.55	-	5.53 ± 1.27	376.11 ± 219.17	Presente estudio, acuaponía
25.7 ± 0.8	7.1 ± 0.4	-	7.0 ± 0.2	1009 ± 193	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
25.7 ± 0.8	7.0 ± 0.4	-	7.0 ± 0.2	985 ± 189	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
24-25	5.56-7.09	80	-	-	(Selek et al., 2016), recirculación
25	5.72-7.28	86	-	-	(Selek et al., 2016), acuaponía
28	8.27	-	6.4	-	(Watten & Busch, 1984), acuaponía
29.86 ± 0.27	6.04 ± 0.23	-	5.45 ± 0.77	-	(Effendi et al., 2018), acuaponía
28.69 ± 1.50	6.94 ± 0.51	-	4.38 ± 0.45	-	(Oladimeji et al., 2018), acuaponía
25.0-29.5	6.9-7.4	-	3.7-5.1	486-721	(Gallardo-Collí et al., 2014), recirculación
25-29.5	6.9-7.6	-	3.3-5.1	1060-1080	(Gallardo-Collí et al., 2014), acuaponía
24.94±2.30	7.79±0.33	66.37±31.55	5.43±2.48	1018.79±246.26	(Palm, Seidemann, et al., 2014), acuaponía
26.0±1.8	8.0±0.2	-	7.0±0.3	-	(Wang et al., 2016), acuaponía
22.5 ± 0.2	6.28 ± 0.04	-	6.5 ± 0.1	2309 ± 99	(Day et al., 2016), biofloc

7.2. Parámetros Químicos

Los resultados obtenidos en el presente estudio respecto a la calidad de agua exponen que la incorporación de la producción de plantas en un sistema RS, puede mantener la concentración de los nutrientes inorgánicos adecuados para el cultivo de tilapia. Asimismo, se puede lograr un rendimiento igual en el crecimiento de los peces y las plantas que en los sistemas RS y HS respectivamente.

Lo anterior permite responder a nuestra primera pregunta de investigación: *¿El sistema acuapónico mantiene un estado estacionario en las concentraciones de los distintos parámetros de calidad de agua más estable que en el sistema de recirculación?* Siendo que bajo las condiciones experimentales que prevalecieron en el presente estudio el sistema AS permite mantener la concentración de los nutrientes inorgánicos igual que un sistema RS.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Selek et al. (2016), quienes compararon un sistema RS y un sistema AS, empleando a la tilapia del Nilo y a la albahaca como especies de cultivo. Dichos autores encontraron que el sistema AS mantiene la concentración de los parámetros de calidad adecuados para el cultivo de tilapia y en la misma magnitud que un sistema RS. Estos autores concluyeron que el sistema AS resulta ser un sistema de producción de alimentos sostenible y ecológico. Asimismo, Gallardo-Collí et al. (2014), obtuvieron parámetros de calidad de agua semejantes entre el sistema RS y el sistema AS utilizando un sistema "poliponico". Por otro lado, Palm, Seidemann, et al. (2014) describen los efectos del diseño del sistema y los parámetros físicos-químicos sobre la estabilidad de un sistema acuapónico de baja tecnología con tilapia del Nilo, donde los parámetros de calidad de agua resultaron en un buen bienestar animal y crecimiento coincidiendo con lo encontrado en el presente estudio. Los resultados de los estudios anteriores se encuentran en el **Cuadro 15**.

Debido a la saturación del componente hidropónico del sistema AS con materia orgánica particulada la concentración de NH_4^+ aumentó bruscamente en la octava semana. Dicha acumulación provocó zonas anóxicas dentro de la unidad disminuyendo la capacidad de nitrificación. Asimismo, el sistema RS en la novena semana mostró un comportamiento similar, debido a la alta cantidad de materia orgánica dentro del biofiltro. Además, el sistema RS mostró una demora en la nitrificación debido a que el biofiltro no se encontraba maduro y las bacterias no

se habían establecido en el medio. Las fluctuaciones en la concentración de NH_4^+ en el sistema HS son debidas a que este compuesto común en las soluciones nutritivas para hortalizas (Luna-Fletes et al., 2018).

La concentración de NO_3^- en el sistema AS fue menor que RS debido a que este compuesto es captado por las plantas junto con el NH_4^+. En el sistema HS la concentración de NO_3^- se mantiene estable debido a que este compuesto es suministrado por la solución nutritiva.

La alta concentración inicial de PO_4^{3-} en el sistema AS es debido a que se agregó solución nutritiva para mantener las plantas debido a un desfase en la obtención de los peces. El sistema RS mostró un aumento constante en la concentración de este nutriente debido al aumento de la producción de materia orgánica (Cerozi & Fitzsimmons, 2017) dentro del tanque. En el sistema HS la concentración permanece estable ya que al igual que el NO_3^- la solución nutritiva proporciona PO_4^{3-} (Fertilab, 2016).

La concentración de SST en el sistema HS es nula ya que los componentes de la solución nutritiva son partículas más pequeñas que el tamaño del poro de filtro empleado (Fertilab, 2016; Hydro Environment, 2011). En el sistema RS la concentración aumentó bruscamente debido al incremento en la producción de materia orgánica con el aumento de la talla de los organismos (Rafiee & Saad, 2005). En el **Cuadro 15** se muestra una recopilación y comparación de parámetros químicos registrados en diferentes sistemas de recirculación y acuapónicos.

Cuadro 15 Parámetros químicos de diversos sistemas de producción acuapónicos y recirculación

NH_4 (mg L^{-1})	TAN (mg L^{-1})	NH_3 (mg L^{-1})	NO_2 (mg L^{-1})	NO_3 (mg L^{-1})	PO_4 (mg L^{-1})	TDS (mg L^{-1})	Referencia
1.00 ± 0.98	-	-	0.44 ± 0.22	2.78 ± 1.42	0.48 ± 0.42	64.33 ± 104.76	Presente estudio, recirculación.
1.03 ±1.10	-	-	0.26 ± 0.35	2.31 ± 0.90	0.74 ± 0.29	9.54 ± 13.78	Presente estudio, acuaponía.
-	0.79 ± 0.11	0.78 ± 0.83	0.82 ± 0.13	91.9 ± 9.77	-	554 ± 83	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
-	1.13 ± 1.22	1.11 ± 0.16	0.73 ± 0.09	92.44 ± 9.91	-	540 ± 81	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
0.14-2.21	-	-	0.09-0.28	3-175	2.25-40.1	0	(Selek et al., 2016), recirculación.
0.08-0.39	-	-	0.05-0.21	11-106	0.41-22.7	-	(Selek et al., 2016), acuaponía.
-	0.18	0.025	0.06	5.23	-	-	(Watten & Busch, 1984), acuaponía
1.35 ± 0.05	-	0.015 ± 0.05	0.32 ± 0.03	0.72 ± 0.03	1.19 ± 0.04	-	(Effendi et al., 2018), acuaponía
-	-	1.53 ± 0.33	0.59 ± 0.04	80.31 ± 3.24	-	-	(Oladimeji et al., 2018), acuaponía
3.50±1.0	-	-	1.92±1.1	3.23±1.5	10.85±3.9	-	(Rodríguez-González et al., 2015), acuaponía
0.1-1.2	-	-	0.3-3.3	20-110	2.5-> 5.0	311-461	(Gallardo-Collí et al., 2014), recirculación.
0.1-1.2	-	-	0.3-3.3	20-> 110	2.5-> 5	670-690	(Gallardo-Collí et al., 2014), acuaponía.
-	1.12±1.98	-	0.25±0.24	9.25±5.67	-	-	(Palm, Seidemann, et al., 2014), acuaponía
146±16	-	-	34.1±6.0	8.4±1.3	-	-	(Wang et al., 2016), acuaponía
-	3.8 ± 0.4	-	3.510 ± 0.799	5.6 ± 0.9	6.4 ± 1.6	1.493 ± 0.063	(Day et al., 2016), biofloc

7.3. Parámetros Zootécnicos

La supervivencia resultó similar a la obtenida por otros autores que emplean densidades de cultivo inferiores **Cuadro 16**. Lo cual indica que el sistema AS en términos de supervivencia es técnicamente factible en cultivo intensivo de peces y plantas a escala piloto. El FCR en el presente estudio fue en ambos sistemas inferior a 1, el cual comparado al registrado en otros estudios donde se emplean sistemas de recirculación y acuaponía (**Cuadro 16**) es menor. Este valor de FCR es debido al régimen de alimentación empleado, como describe Chowdhury (2011). Este autor estudió diversas tasas de alimentación en tilapia del Nilo, encontró un FCR de 0.87 con una tasa de alimentación del 3% en tilapias de 80 g a 115 g. Esto concuerda con lo encontrado en otros estudios donde se experimenta con un sistema acuapónico con condiciones similares al presente estudio (Palm, Bissa y Knaus, 2014; Palm, Seidemann, et al., 2014). Asimismo, Stathopoulou et al. (2019) encontraron un FCR de 0.7 en un sistema acuapónico de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y albahaca (*Ocimum basilicum*). Por lo tanto, con un valor inferior a 1 y debido a que no se encontraron diferencias significativas, un sistema AS logra mantener un FCR igual que un sistema RS, permitiendo reducir el tiempo de cultivo y costos.

En el presente estudio, se encontró un SGR mayor que lo obtenido en otros estudios con densidades inferiores **Cuadro 16**. En este sentido un sistema AS bajo las condiciones del presente estudio logró mantener el crecimiento de los peces semejante a un sistema RS. El rendimiento kg m^{-2} disminuyó en el sistema AS debido al área total que este cubre, 7 m^2 frente a los 5 m^2 del sistema RS, sin embargo, la biomasa total cosechada fue igual.

En relación a nuestra tercera pregunta de investigación: *¿El desempeño zootécnico de los peces criados en el sistema de recirculación es igual al de los criados en un sistema acuapónico?* Tenemos que el desempeño zootécnico en un sistema AS es igual al obtenido en un sistema RS. Siendo este desempeño favorable para un cultivo intensivo a escala piloto.

Cuadro 16 Datos promedio de producción de sistemas acuapónicos y recirculación

Especie	Densidad de siembra (kg m^{-3})	Días de cultivo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	SGR (% $día^{-1}$)	Supervivencia (%)	FCR	Referencia
Oreochromis niloticus var. Chitralada	0.40 ± 0.00	76	1.73 ± 0.11	140.37 ± 6.02	5.78 ± 1.27	89.36 ± 1.67	0.86 ± 0.03	Presente estudio, recirculación
Oreochromis niloticus var. Chitralada	0.40 ± 0.00	76	1.98 ± 0.12	133.20 ± 9.31	5.58 ± 1.25	92.33 ± 1.45	0.89 ± 0.00	Presente estudio, acuaponía
Oreochromis niloticus	2.361	55	50	-	1.8±0.17	100.00	0.70	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
Oreochromis niloticus	2.361	55	50	-	1.2±0.16	100.00	1.10	(Stathopoulou et al., 2019), acuaponía
Oreochromis niloticus	0.056	42	14	-	-	-	-	(Effendi et al., 2018), acuaponía
Clarias gariepinus	-	112	9.97 ± 0.21	-	-	-	-	(Oladimeji et al., 2018), acuaponía
Oreochromis niloticus	-	75	21.99 ± 0.55	36.47 ± 1.36	1.80 ± 0.13	100	1.31 ± 0.09	(Selek et al., 2016), recirculación.
Oreochromis niloticus	-	75	22.16 ± 0.52	36.82 ± 0.94	1.81 ± 0.01	100	1.30 ± 0.03	(Selek et al., 2016), acuaponía.
Sarotherodon aurea	-	-	-	521	-	97.5	1.59	(Watten & Busch, 1984), acuaponía
Oreochromis niloticus	0.04	160	1.13 ± 0.10	364.64 ± 25.1	-	-	-	(Rodríguez-González et al., 2015), acuaponía
Oreochromis niloticus Stirling	0.11	84	13.60 ± 0.46	208.72 ± 4.57	3.24 ± 0.34	85.33 ± 1.96	1.27 ± 0.17	(Gallardo-Collí et al., 2014), recirculación.
Oreochromis niloticus Stirling	0.11	84	13.42 ± 0.46	215.27±4.26	3.30 ± 0.29	81.5 ± 1.84	1.07 ± 0.05	(Gallardo-Collí et al., 2014), acuaponía.
Oreochromis niloticus	0.028	160	0.5	61.43	3.04	99.09	0.83	(Palm, Seidemann, et al., 2014), acuaponía
Oreochromis niloticus	0.028	160	0.5	51.79	2.98	100	0.93	(Palm, Seidemann, et al., 2014), acuaponía
Oreochromis niloticus	6.77	-	79.2	813.8	-	98.3	1.7	(Rakocy et al., 2006), acuaponía
Oreochromis sp.	5.5	84	165.2 ± 0.5	259.5	0.54	-	-	(Wang et al., 2016), acuaponía
Oreochromis niloticus	9.82 ± 0.54	70	36.82 ± 0.59	-	-	100	1.01 ± 0.05	(Day et al., 2016), biofloc

7.4. Cultivo de Tomate

La dificultad para medir el rendimiento en el cultivo fue en parte debido a la presencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) que se detectó en el cultivo al séptimo día, la cual provocó en la planta una pérdida de vigor (López-Marín, 2017). Además, cabe la posibilidad que la alta cantidad de nitrógeno en el agua haya reducido la cantidad y calidad de las flores (Yara México, 2019). Asimismo, la planta presentó signos de una infección viral como: enrollamiento de la hoja del ápice al envés, manchas de clorosis y debilidad de la hoja (Vaghi-Medina et al., 2018).

La disposición de las plantas usada en el presente estudio (dosel uniforme) mostró un rendimiento aceptable en la remoción de nutrientes. Por lo tanto, cabe la posibilidad de elevar este rendimiento cambiando la disposición de las plantas, según los resultados obtenidos por Zarandona-Pastor (2014). Este autor encontró que una disposición de escalera con 7 plantas m^{-1} tiene un mayor rendimiento que una disposición de escalera con 5 plantas m^{-1}.

7.5. Análisis Financiero de los Sistemas de Producción

Respecto a nuestra segunda hipótesis podemos señalar que esta si se cumple. Al realizar el análisis del desempeño operativo del sistema AS se encontró que este sistema presenta un EBITDA de $101,468.50, mientras que el del conjunto RS+HS fue de $89,163.64. Asimismo, el margen EBITDA en AS fue superior al del conjunto (65.14% *vs.* 57.99%). En este sentido, si el sistema AS operara durante un periodo de 12 meses con las condiciones que prevalecieron en el presente estudio el rendimiento sería mayor que operar un sistema RS y un sistema HS en conjunto. Asimismo, respecto a nuestra segunda pregunta: *¿El sistema acuapónico tiene mayor rendimiento que los sistemas de recirculación e hidroponía?* Tenemos que el sistema acuapónico tiene un rendimiento (zootécnico y fitotécnico) igual que los sistemas RS y HS y un rendimiento financiero mayor que el conjunto RS+HS.

Para conocer a qué escala sería viable un sistema RS se estimó la cantidad de unidades de cultivo que generan indicadores financieros favorables para el establecimiento de un proyecto. Se encontró

que son necesarias 8 unidades de cultivo. Asimismo, se estimó la cantidad de unidades necesarias de un sistema AS para obtener un VAN y TIR positivos cuando no se cuenta con la venta del producto vegetal, siendo necesarias 5 unidades. Por otro lado, se realizó el análisis del sistema HS sin considerar el medidor de oxígeno disuelto, obteniendo una VAN de $459,238.18, una TIR de 235% y un PRI de 0.37 años.

El incremento en el costo de operación de AS es debido a la energía eléctrica empleada en las lámparas. El sistema HS tiene el menor costo eléctrico debido a que no requiere suministro de aireación. El sistema AS tiene un valor de ventas brutas un 159% en RS y 61% HS más alto, lo cual se debe a la producción intensiva de tomate y tilapia. Por el contrario, el sistema RS es el que presenta menor valor en ventas brutas debido al bajo precio de mercado de la tilapia, lo que provoca indicadores negativos (VAN y TIR).

Debido a que los proyectos con enfoque en la producción a nivel industrial requieren una importante inversión, son aquellos que más amortizaciones deben registrar, por lo tanto, el EBITDA sirve como atajo para estimar el flujo de efectivo disponible y nos proporciona una estimación de la solvencia del proyecto independientemente de los recursos empleados para establecerlo. Por lo tanto, el indicador EBITDA permitió hacer una comparación entre los diferentes sistemas, al depurar el efecto de distintos sistemas impositivos y de depreciación y amortización contable y países. Al comprar el margen de EBITDA y los indicadores financieros de los sistemas, nos permite comprender que el motivo de la baja rentabilidad del sistema RS, es debido al bajo ingreso obtenido. Por lo tanto, un sistema RS de tilapia con las condiciones del presente estudio no es viable con el precio actual de venta de la tilapia.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones experimentales del presente estudio y los resultados obtenidos, se concluye que:

Los sistemas de producción acuapónicos intensivos son técnicamente factibles, pero el sistema de recirculación acuícola no es viable económicamente a esta escala, debido a los altos costos de los insumos para la filtración biológica y al bajo precio del producto en el mercado.

El componente hidropónico en un sistema AS puede actuar de manera eficiente como filtro biológico; sin embargo, es más sensible a los sólidos suspendidos que un biofiltro de lecho fluidizado.

La planta de tomate permite remover nutrientes inorgánicos de un cultivo intensivo de tilapia; no obstante, es más sensible a la presencia de plagas.

El rendimiento en términos de calidad de agua de un sistema AS es igual al obtenido por un sistema RS, el rendimiento vegetal es similar entre el sistema AS y HS, el rendimiento financiero del sistema AS es superior al sistema RS, inferior al sistema HS, pero superior al del conjunto RS+HS.

La calidad del filete producido en AS y RS es igual en olor, textura y apariencia general; no obstante, el sabor de la carne producida en AS se vio afectado por el sustrato empleado.

Se concluye que la técnica de cultivo acuapónica es una alternativa sostenible, con una rentabilidad mayor que el conjunto recirculación e hidroponía y un rendimiento igual que los sistema de recirculación acuícola e hidroponía. Sin embargo, la rentabilidad del sistema acuapónico depende de la intensidad de la producción y el precio de los productos en el mercado.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios en sistemas acuapónicos con dimensiones similares a las comerciales, para obtener datos más concretos sobre el desempeño bajo estas circunstancias. Así también, evaluar dichos sistemas en condiciones ambientales controladas para evitar el ingreso de insectos novicios para los cultivos.

Profundizar en la eliminación de sólidos suspendidos, debido a que es uno de los factores que perjudican el rendimiento de un sistema acuapónico y es un factor ambiental y económico importante en el diseño de los mismos.

Realizar estudios financieros con especies de alto valor comercial, debido a que es una de las principales limitantes en la rentabilidad de los sistemas intensivos.

10. REFERENCIAS

Aalto, S. L., Suurnäkki, S., von Ahnen, M., Siljanen, H. M. P., Pedersen, P. B., & Tiirola, M. (2020). Nitrate removal microbiology in woodchip bioreactors: A case-study with full-scale bioreactors treating aquaculture effluents. *Science of the Total Environment*, *723*, 138093. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138093

Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., Antúñez, A., Martínez, J., Corradini, F., Sepúlveda, P., Abarca, P., Guzmán, A., & Felmer, S. (2017). Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. *Boletín INIA*, *12*, 112. http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/12 Manual de Tomate Invernadero.pdf

Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, *51*, 26–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004

Barbosa, G. L., Almeida-Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *12*(6), 6879–6891. https://doi.org/10.3390/ijerph120606879

Barón-Sevilla, B., Bückle-Ramírez, L. F., & Hernández-Rodríguez, M. (2004). Cultivo intensivo de Litopenaeus vannamei Boone 1931, en un sistema de agua de mar recirculada. *Ciencias Marinas*, *30*(1 B), 179–188. https://doi.org/10.7773/cm.v30i12.109

Barraza-Guardado, R. H., Martínez-Córdova, L. R., Enríquez-Ocaña, L. F., Martínez-Porchas, M., Miranda-Baeza, A., & Porchas-Cornejo, M. A. (2014). Effect of shrimp farm effluent on water and sediment quality parameters off the coast of Sonora, Mexico. *Ciencias Marinas*, *40*(4), 221–235. https://doi.org/10.7773/cm.v40i4.2424

Bastida-Cañada, O. A. (2012). *Métodos de cultivo hidropónico de jitomate (Solanum lycopersicum L.) Bajo invernadero basados en doseles escaleriformes*. 115. https://chapingo.mx/horticultura/pdf/tesis/TESISMCH2012112309124791.pdf

Bello, A., Ahmed, T., & Ben.Hamadou, R. (2019). Hydroponics: Innovative Option for Growing Crops in Extreme Environments-The Case of the Arabian Peninsula (A Review). *Open Access Journal of Agricultural Research*, *4*(5), 1–15. https://doi.org/10.23880/oajar-16000235

BOFISH. (2017). *Acuaponía BOFISH*. NUESTRO PORTAFOLIO. https://www.acuaponia.com/

Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., & Yin, Y. (2017). The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering*, *78*, 146–154. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1992). *Water quality and pond soil analyses for aquaculture.* Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.

Burghi-Echeverriarza, J. M., & Montero Velázquez, G. I. (2015). *Evaluación sensorial de la*

frescura en Tilapia (Oreochromis niloticus). Universidad De La República.

Buschmann, A. H. (2001). Impacto ambiental de la acuicultura. El estado de la investigación en Chile y el mundo. *Terram*, *56 2*, 67. https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2009.02.001

Calderón-Sáenz, F. (2002). *Requerimientos nutricionales de un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero en la Sabana de Bogotá*. Dr. Calderón Laboratorios Ltda. http://www.drcalderonlabs.com/Cultivos/Tomate/Requerimientos_Nutricionales.htm

Carpena, O., Masaguer, A., & Sarro, M. J. (1988). Nutrient uptake by two cultivars of tomato plants. *Plant and Soil*, *105*(2), 294–296. https://doi.org/10.1007/BF02376796

CEDRSSA. (2019). *Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017*.

Cerozi, B. S., & Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems*, *153*, 94–100. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020

Chowdhury, D. . (2011). *Optimal feeding rate for Nile tilapia (Oreochromis niloticus)*. Norwegian University of Life Sciences.

CodexAlimentarius. (1999). Directrices para la evaluación sensorial del pescado y los mariscos en laboratorio. In *Cac/Gl 31-1999* (pp. 1–25).

CONABIO. (2014). Oreochromis niloticus Linnaeus, 1758. *Ponderación de Invasividad de Especies Exóticas En México (SIEI)*, 1–14.

CONABIO. (2019). *EnciclоVida*. Sistema de Información Sobre Especies Invasoras En México.; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://enciclovida.mx/especies/29951-oreochromis-niloticus

CONAPESCA. (2017a). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*.

CONAPESCA. (2017b). La Acuacultura en Mexico, retos y oportunidades. In *XII Foro Internacional de Acuicultura (FIACUI) 2017* (p. 1.25). FIACUI. https://fiacui.com/2017/Tilapia/Jueves 28 sep/Copia de 05 Situación actual de la acuicultura en México COMISIONADO MARIO AGUILAR SANCHEZ CONAPESCA.pdf

Dănilă, E., Cuciureanu, D., Lucache, D. D., & Ioachim, D. (2009). Efficiency of some growing light systems for tomatoes. *7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND POWER SYSTEMS*, *8–9*. https://www.researchgate.net/publication/271371047_EFFICIENCY_OF_SOME_GROWING_LIGHT_SYSTEMS_FOR_TOMATOES

Day, S. B., Salie, K., & Stander, H. B. (2016). A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aquaculture International*, *24*(5), 1309–1322. https://doi.org/10.1007/s10499-016-9986-z

Diego-Ramirez, D. S., Jiménez, P., & Hernán-Hurtado, G. (2008). La Acuaponía : Una Alternativa Orientada Al Desarrollo Sostenible. *Facultad de Ciencias Básicas*, *4*(1), 32–51.

Diver, S. (2006). Aquaponics — Integration of Hydroponics with aquaculture. In *ATTRA*. ATTRA.

dos Santos, V. B., Mareco, E. A., & Silva, M. D. P. (2013). Curvas de crescimento de linhagens de tilapias do Nilo (Oreochromis niloticus) cultivadas em diferentes temperaturas. *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, *35*(3), 235–242.

https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v35i3.19443

Effendi, H., Widyatmoko, Utomo, B. A., & Pratiwi, N. T. M. (2018). Ammonia and orthophosphate removal of tilapia cultivation wastewater with Vetiveria zizanioides. *Journal of King Saud University - Science*, 0–5. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.04.018

El-Sayed, A. F. M. (2006). *Tilapia Culture* (first edit). CABI Publishing.

El-Sayed, A. F. M., & Kawanna, M. (2008). Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) fry reared in a recycling system. *Aquaculture Research*, *39*(6), 670–672. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.01915.x

Endo, M. (2019). Aquaponics in Plant Factory. In H. F. and T. W. Masakazu Anpo (Ed.), *Plant Factory Using Artificial Light* (1st Editio, pp. 339–352). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00032-4

FAO. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. In Mundi-Prensa (Ed.), *Earthscan/FAO* (2012th ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). https://doi.org/10.1016/S0096-3003(99)00104-6

FAO. (2018a). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura* (2018th ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). http://www.fao.org/publications/es

FAO. (2018b). *The State of Fisheries and Aquaculture in the world*. https://doi.org/issn 10

Fertilab. (2016). *Soluciones nutritivas para Tomate*. 2010–2012.

Fierro-Sañudo, J. F. (2013). *Cultivo Integral De Camarón Blanco (Litopenaeus Vannamei)-Tomate (Lycopersicon Esculentum)-Lechuga (Lactuca Sativa) Con Agua De Bajabsalinidad Y Cero Recambio: Factibilidad Técnica-Económica Y Valuación Ambiental* (Issue October 2013) [Universidad Nacional Autónoma De México]. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1463.1444

FIRA. (2019). Panorama Agroalimentario Tomate Rojo. In *Dirección de investigacion y evaluacion económica y sectorial*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Gallardo-Collí, A., Hernández-Vergara, M. P., Pérez-Rostro, C. I., & Ramírez-Gutiérrez, S. C. (2014). Biculture tilapia / crayfish in aquaponic system Biculture of Tilapia (Oreochromis niloticus) and crayfish (Procambarus acanthophorus) and production of green corn fodder (Zea mays) in an aquaponic system . *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*, *3*(8), 233–244.

García-Ortega, A., & Calvario-Martínez, O. (2008). *Manual de Buenas Prácticas de Producción Acuícola de Tilapia para la Inocuidad Alimentaria* (A. García-Ortega & O. Calvario-Martínez (eds.); Primera Ed). SENASICA.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). *Aquaponics Food Production Systems* (S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (eds.); First). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6

Gómez-Merino, F. C., Ortega-López, N. E., Trejo-Téllez, L. I., Sánchez-Páez, R., Salazar-Marcial, E., & Salazar-Ortiz, J. (2015). La acuaponía: alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *AGRO PRODUCTIVIDAD*, 60–65.

Granja Agro-Acuícola Diaguitas. (2020). *Granja Agro-Acuícola Diaguitas*. La Grnaja. http://www.acuiponia.cl/index.php?page=lagranja

Grupo Altex. (2020). *Grupo Altex*. Productos. https://www.grupoaltex.com/productos/

Hallam, M. (2020). *Practical Aquaponics*. https://www.aquaponics.net.au/

Heiderscheidt, E., Tesfamariam, A., Pulkkinen, J., Vielma, J., & Ronkanen, A. (2020). Solids management in freshwater-recirculating aquaculture systems: Effectivity of inorganic and organic coagulants and the impact of operating parameters. *Science of The Total Environment*, *742*, 140398. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140398

Holland, J. (2019). Is RAS the game-changer that Europe ' s aquaculture sector needs ? *Global Accounting Alliance*, *Leadership*, 1–5. Is RAS the game-changer that Europe's aquaculture sector needs?

Hsien-Tsang, S., & Quintanilla, M. (2008). *Manual sobre "Reproducción y cultivo de tilapia"* (S. Hsien-Tsang & M. Quintanilla (eds.); Primera ed). CENDEPESCA.

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., & Khanal, S. K. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. In *Bioresource Technology* (Vol. 188). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013

Huss, H. H. (1998). El Pescado Fresco : Su Calidad y Cambios de su Calidad. *FAO Documento Tecnico de Pesca.*, *348*, 1–144. http://www.fao.org/DOCREP/V7180S/v7180s00.htm#Contents

Hydro Environment. (2011). *Solucion Nutritiva para Hortalizas*. Solucion Nutritiva Para Hortalizas. https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=product_info&cPath=49&products_id=190

INAPESCA. (2018). *Acuacultura| Tilapia*. Acciones y Programas > Acuacultura Comercial. https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tilapia

INEGI. (1996). *Encuesta del estado actual de la información ambiental en américa latina y el caribe* (Primera ed). OEA/CEPAL.

INIFAP. (2011). *Guía para cultivar jitomate en condiciones hidropónicas de invernadero en San Luis Potosí* (Primera, Issue 41). SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN LIC.

Jiménez-Falcón, H. J., & Treviño-Saldívar, E. J. (2016). Análisis de los costos operativos y su incidencia en el ebitda caso de estudio de una empresa Regiomontana. *Vincula Tégica EFAM*, *2*(1), 341–368.

Jones, J. B. (2008). *Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden* (2nd ed). CRC Press Taylor & Francis Group. http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf

Jover, M., Martínez, S., Tomás, A., & Pérez, L. (2003). Propuesta metodológica para el diseño de instalaciones piscícolas Introducción Establecimiento del número de lotes y plan de producción. *AquaTIC*, *19*(19), 35–40. http://www.revistaaquatic.com/aquatic/pdf/19_3.pdf

Kinoshita, T., & Masuda, M. (2011). Differential nutrient uptake and its transport in tomato plants on different fertilizer regimens. *HortScience*, *46*(8), 1170–1175.

Kramer, L. (2019). Israeli firm ’ s ‘ plug-and-play ’ RAS solution attracts investment. *Global Aquaculture Advocate*, 7–10. https://www.aquaculturealliance.org/advocate/israeli-firms-plug-and-play-ras-solution-attracts-investment/

Kramer, L. (2020). Smaller RAS farms say size isn ’ t everything. *Global Aquaculture Advocate*, *February*, 7–10. https://www.aquaculturealliance.org/advocate/smaller-ras-farms-say-size-isnt-everything/?headlessPrint=AAAAAPIA9c8r7gs82oWZBA

Lekang, O. (2013). *Aquaculture Engineering* (First edit). Wiley-Blackwell.

Lewandowski, I., Lippe, M., Montoya, J. C., Dickhöfer, U., Langenberger, G., Pucher, J., Schließmann, U., Schmid-Staiger, U., Derwenskus, F., & Lippert, C. (2018). Bioeconomy. In I. Lewandowski (Ed.), *Bioeconomy: Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8

Lewis, W. M., Yopp, J. H., Jr, H. L. S., & Brandeburg, A. M. (1978). Use of Hydroponics to Maintain Quality of Recirculated Water in a Fish Culture System. *Transactions of the American Fisheries Society*, *107*(1). https://doi.org/10.1577/1548-8659(1978)107<92

López-Marín, M. L. (2017). *Manual técnico del cultivo de tomate* (L. R. Cartín (ed.); first ed). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria Manual. http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3143/1/BVE17079148e.pdf

Losordo, T. M., Haider, D., & Tran, H. (2019). Recirculation meets aquaponics Aquaponics systems. *Global Aquaculture Advocate*, 1–7.

Losordo, T. M., & Hobbs, A. O. (2000). Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, *23*(1–3), 95–102. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00048-0

Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, *435*, 67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S., & De Poorter, M. (2004). *100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database. Publicado por el Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI)* (B. Zilletti & L. Capdevila-Argüelles (eds.); Primera ed). Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI).

Lu, J., Zhang, Y., Wu, J., & Wang, J. (2020). Nitrogen removal in recirculating aquaculture water with high dissolved oxygen conditions using the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification system. *Bioresource Technology*, *305*(February), 123037. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123037

Luna-Fletes, J. A., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Bugarín-Montoya, R., & Valdivia-Reynoso, M. G. (2018). Intensidad de raleo y soluciones nutritivas en la calidad de tomate cherry. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *41*(1), 59–66.

Marinho-Soriano, E., Nunes, S. O., Carneiro, M. A. A., & Pereira, D. C. (2009). Nutrients’ removal from aquaculture wastewater using the macroalgae Gracilaria birdiae. *Biomass and Bioenergy*, *33*(2), 327–331. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.002

Mariscal-Lagarda, M. M. (2004). *Análisis con función producción y análisis financiero del cultivo semi-intensivo de camarón blanco (Litopenaeus vannamei) en tres parques carnaronicolas*

del sur de Sonora. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C.

Martínez-Córdova, L. R., Porchas, M. M., & Cortés-Jacinto, E. (2009). Camaronicultura mexicana y mundial: ¿actividad sustentable o industria contaminante? *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *25*(3), 181–196.

Martinez-Porchas, M., & Martinez-Cordova, L. R. (2012). World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. In *The Scientific World Journal* (Vol. 2012). https://doi.org/10.1100/2012/389623

Molina, E. (2016). *Fertilización de tomate*. Centro de Investigaciones Agronómicas.

Nelson And Pade. (2020). *Nelson & Pade Aquaponics*. https://aquaponics.com/

Nicovita. (2013). Manual de Crianza Tilapia. In *Nicovita*. http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual de crianza de tilapia.pdf

Oladimeji, A. S., Olufeagba, S. O., Ayuba, V. O., Sololmon, S. G., & Okomoda, V. T. (2018). Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system. *Journal of King Saud University - Science*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.02.001

Ortega-López, N. E., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Alonso-López, A., & Salazar-Ortiz, J. (2015). Crecimiento de tilapia (Oreochromis niloticus L.) Y tomate (Solanum lycopersicum L.) En un sistema acuapónico abierto. *AGRO PRODUCTIVIDAD*, *8*(3), 20–25. http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=108617507&site=ehost-live

Palm, H. W., Bissa, K., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part II: fish and plant growth. *International Journal of the Bioflux Society*, *7*(3), 162–175.

Palm, H. W., Seidemann, R., Wehofsky, S., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. *International Journal of the Bioflux Society*, *7*(1), 20–32.

Parsons, T. R., Maita, Y., & Lalli, C. M. (1984). A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. In *A Manual of Chemical & Biological Methods for Seawater Analysis* (First edit). Pergamon Press Inc. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-030287-4.50032-3

Pedersen, L., Lier, A. M. R., & Jensen, D. J. (2020, January). Electrochemical treatment of RAS water. *Innovation & Investment*, 1–5. https://www.aquaculturealliance.org/advocate/electrochemical-treatment-of-ras-water/?headlessPrint=AAAAAPIA9c8r7gs82oWZBA

Petrea, S. M., Coadã, M. T., Cristeaa, V., Dediu, L., Cristea, D., Rahoveanu, A. T., Zugravu, A. G., Rahoveanua, M. M. T., & Mocuta, D. N. (2016). A Comparative Cost —Effectiveness Analysis in Different Tested Aquaponic Systems. *Agriculture and Agricultural Science*, *10*, 555–565. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.034

Rafiee, G., & Saad, C. R. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (Oreochromis sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*,

244(1–4), 109–118. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.10.029

Rakocy, J. E., Losordo, T. M., & Masser, M. P. (1992). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems - Integrating Fish and Plant Culture. *SRAC*, *454*(3), 3–5. https://doi.org/10.4067/S0718-34292011000300001

Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. *SRAC-454*, 1–16. http://dasnr22.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-10215/SRAC-454web.pdf

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production* (Seventh ed). CRC Press Taylor & Francis Group. https://www.taylorfrancis.com/books/9781439878699

Reyes-Flores, M., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, M. de las N., & Trejo-Téllez, L. I. (2020). Calidad de tomate (Solanum lycopersicum L.) producido en acuaponía complementado con fertilización foliar de micronutrimentos. *AgroProductividad*, *13*(5), 79–86. https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1635

Reyes-Flores, M., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, N., Trejo-Téllez, L. I., & Sánchez-Escudero, J. (2016). Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de Solanum lycopersicum L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *17*, 3529–3542.

Rico-Patiño, R. S., & Reyes-Suarez, J. I. (2019). Diseño automatico para sistema sostenible de acuaponia [Universidad Santo Tomás]. In *Universidad Santo Tomás*. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17861/2019jonnathanreyes.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Rodríguez-González, H., Rubio-Cabrera, S. G., García-Ulloa, M., Montoya-Mejía, M., & Magallón-Barajas, F. J. (2015). Análisis técnico de la producción de tilapia (Oreochromis niloticus) y lechuga (Lactuca sativa) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad*, *3*, 15–19.

Rubio-Asensio, J. S., Parra, M., & Intrigliolo, D. S. (2020). Open field hydroponics in fruit crops: Developments and challenges. In A. K. Srivastava & C. Hu (Eds.), *Fruit Crops* (first ed, pp. 419–430). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00030-7

Saavedra-Martínez, M. A. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*. http://www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA-CIDEA.pdf

SAGARPA. (2015). *Estudio para la determinación de esquemas de mejora para rendimiento en las granjas de producción acuícola de tilapia*.

SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Jitomate Mexicano. In J. U. Gallardo Sánchez (Ed.), *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030* (Primera ed, p. 20). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., & Rodríguez-Pérez, Juan E. Osuna-Encino, T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (Solanum lycopersicum L.) Con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, *48*, 185–197.

Santaella, M., Martínez-Graciá, C., Periago, M. J., & Santaella, J. (2012). Evaluación sensorial de diferentes presentaciones comerciales de dorada (Sparus aurata L.) de acuicultura. *Anales de Veterinaria de Murcia*, *28*(0), 85–96. https://doi.org/10.6018/j/188751

Santana-De Avila, E. A. (2014). *Producción de tomate tipo bola (Lycopersicon esculentum Mill.) En invernadero con soluciones nutritivas inorgánicas*. Universidad Autónoma Agraria.

Saravia-Chávez, F. M. (2004). *Elaboración de curvas de absorción de nutrientes para la variedad de tomate (Lycopersicon esculentum Mill) Alboran bajo condiciones de invernadero en Zamorano, Honduras*. Escuela Agricola Panamericana.

Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water (Switzerland)*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/w8110533

Selek, M., Endo, M., Yiğit, M., & Takeuchi, T. (2016). The integration of fish and plant production: nile tilapia (Oreochromis niloticus) and basil (Ocimum basilicum) culture in recirculating and aquaponic systems. *Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research*, *3*(1), 28–43. https://doi.org/10.3153/jaefr17005

Seminis. (2018). *Los tres principales tipos de tomate en México y sus diferencias*. Productos. https://www.seminis.mx/los-tres-principales-tipos-de-tomate-en-mexico-y-sus-diferencias/

Shang, Y.-C. (1990). *Aquaculture economic analysis: an introduction* (2nd ed.). World Aquaculture Society.

SIAP. (2016). *Atlas Agoalimentario 2016* (Primera ed). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. www.gob.mx/siap

SIAP. (2018). Atlas Agroalimentario 2012-2018. In *Sevicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)* (Primera ed, Vol. 1). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://doi.org/10.1111/resp.12002

SINCOAGRO, FUNPROVER, & COVECA. (2008). Manual de Producción de Tilapia con Especificaciones de Calidad e Inocuidad. In *Buenas Prácticas de Producción Acuícola de Tilapia* (p. 143). Servicios Integrales para la Competitividad Agropecuaria (SINCOAGRO S.C).

Sommer, M. (2009). Acuicultura Insostenible en Chile. *REDVET Revista Electrónica de Veterinaria*, *10*(3), 1–23. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63617318014%0ACómo

Stathopoulou, P., Berillis, P., Levizou, E., Sakellariou-Makrantonaki, M., Kormas, A., Aggelaki, A., Kapsis, P., Vlahos, N., & Mente, E. (2019). Basil and Nile tilapia Production in a Small Scale Aquaponic System. *Journal of FisheriesSciences.Com*, *12*(4), 1–3. https://doi.org/10.21767/1307-234x.1000152

The Plant List. (2012). *Solanum lycopersicum L.* Solanum Lycopersicum L. http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/tro-29605838

Tidwell, J. H. (2013). Aquaculture Production Systems. In J. H. Tidwell (Ed.), *World Aquaculture Society* (First edit). A John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7047-9_10

Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating Aquaculture 2nd Edition* (2nd Editio). NRAC Publication.

Urbina-Navarro, E. (2011). Producción de tomate saladette (Lycopersicum esculentum Mill.) Bajo condiciones de invernadero en una unidad de producción Chaparrosa, de Villa de Cos, Zacatecas. In *Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro Division Agronomia*.

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Vaghi-Medina, C. G., Teppa, E., Bornancini, V. A., Flores, C. R., Marino-Buslje, C., & Lambertini, P. M. L. (2018). Tomato apical leaf curl virus: A novel, monopartite geminivirus detected in tomatoes in Argentina. *Frontiers in Microbiology*, *8*(JAN), 1–11. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02665

van der Laan, R., Fricke, R., & Eschmeyer, W. N. (2020). *Eschmeyer's Catalog of Fishes Classification | California Academy of Sciences*. http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp

Van Ginkel, S. W., Igou, T., & Chen, Y. (2017). Energy, water and nutrient impacts of California-grown vegetables compared to controlled environmental agriculture systems in Atlanta, GA. *Resources, Conservation and Recycling*, *122*, 319–325. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.003

Velasco-Amaro, P. I., Calvario-Martínez, O., Pulido-Flores, G., Acevedo-Sandoval, O., Castro-Rosas, J., & Román-Gutiérrez, A. D. (2012). Problemática Ambiental de la Actividad Piscícola en el Estado de Hidalgo, México. *Ingenieria*, *16*(3), 165–174. https://www.redalyc.org/pdf/467/46725267007.pdf

Verdugo-Mora, L. (2009). *Análisis bioeconómico para determinar rentabilidad y economías de escala en el cultivo intensivo de tilapia en sistemas de recirculación, bajo escenarios de riesgo*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

Wang, C. Y., Chang, C. Y., Chien, Y. H., & Lai, H. T. (2016). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *107*, 21–30. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.016

Watten, B. J., & Busch, R. L. (1984). Tropical production of tilapia (Sarotherodon aurea) and tomatoes (Lycopersicon esculentum) in a small- scale recirculating water system. *Aquaculture, Elsevier Science Publishers*, *41*, 271–283.

Waycott, B. (2020, March). A salmon farm in Dubai , because of course. *Global Aquaculture Advocate*, 1–4. https://www.aquaculturealliance.org/advocate/a-salmon-farm-in-dubai-because-of-course/?headlessPrint=AAAAAPIA9c8r7gs82oWZBA

Yara México. (2002). *Producción mundial de tomates*. Producción Mundial de Tomates. https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/tomate/produccion-mundial-de-tomates/

Yara México. (2019). *Función del nitrógeno en la producción de tomates*. https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/tomate/funcion-del-nitrogeno-en-la-produccion-de-tomates/

Zambrano-Hernandez, L. F. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en el cultivo de tilapia roja (Oreochromis mossambicus) y lechuga crespa (Lactuca sativa).* [Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/62310/1/1057592154.2018.pdf

Zarandona-Pastor, O. A. (2014). *Disposición de plantas, cultivares y densidades de población en la producción hidropónica de jitomate*. Universidad Autónoma Chapingo.

11. ANEXOS

11.1. Características Evaluadas en el Análisis Sensorial

Características empleadas para la evaluación sensorial de los filetes cocidos elaborado con base en la literatura (Burghi-Echeverriarza & Montero Velázquez, 2015; CodexAlimentarius, 1999; Huss, 1998; Santaella et al., 2012).

Nivel de rechazo	Apariencia general	Olor de las masas musculares	Sabor	Consistencia de las masas musculares
0	Característica de pescado cocido, brillante	Característico, dulzón con ligerísimo olor a barro	Característico, muy suculento	Firme y elástica, se desmenuza con facilidad
1	Característica, menos intensa	Característico menos intenso, carne cocida	Característico, suculento	Menos firme y elástica
2	Ligeramente apagada	Característico menos intenso, a leche o patatas cocidas	Característico, menos intenso, suculento	Menos elástica
3	Reseca	Neutro, patatas cocidas	Neutro, un poco dulce, insípido	Blanda
4	Aumento del atributo anterior	Dulce, afrutado	Un poco metálico, seco	Muy blanda
5	Aspecto gelatinoso	A pescado	Un poco agrio, ácido o rancio	Pastosa
6	Presencia de abundante exudado lechoso	Olor intenso a pescado, ácido, agrio	Amargo, agrio, rancio, picante	Aumento del atributo anterior
7	Aumento del atributo anterior	Ácido láctico, amoniacal, rancio, olor “cadavérico” ofensivo para los sentidos.	Amoniacal, muy picante, ofensivo para los sentidos.	Muy pastosa

11.2. Tabla de Alimentación Proporcionada por el UNCIBNOR

Cuadro 17 Tabla de Alimentación en la cual se basó el criterio de alimentación, proporcionada por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S C. Unidad Nayarit y cotejada con (Nicovita, 2013).

Etapa del pez	Peso del pez	% del peso de alimento diario	% Mínimo de proteína	% Máximo de proteína	Cantidad de alimento al día para 365 peces (g)	No. de raciones al día	Cantidad de alimento por ración (g)	Crecimiento diario (g/d)	Conversión alimenticia	Tipo de alimento	Tamaño de alimento (mm)
Alevín	<0.5	15	50	52	27	10	3			MIKROPELETEXT	<0.4
Alevín	1	10	45	50	37	8	5		0.83	MIKROPELETEXT	0.4
Alevín	3	10	40	45	110	8	14	0.27	0.85	MIKROPELETEXT	0.6-0.8
Alevín	5	8	40	45	146	8	18	0.27	0.85	MINI PELET EXT	0.8-1.15
Alevín	7	6	40	45	153	7	22	0.34	0.86	MINI PELET EXT	1.15-2.0
Alevín	10	5.7	40	45	208	7	30	0.36	0.9	MINI PELET EXT	1.15-2.0
Juvenil	13	5.5	40	45	261	6	43	0.46	0.9	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	17	5.1	40	45	316	6	53	0.58	0.9	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	22	5.1	35	40	410	6	68	0.71	0.91	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	29	5	35	40	529	5	106	0.93	0.95	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	36	4.5	35	40	591	5	118	1.14	0.98	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	46	4.3	35	40	722	5	144	1.29	0.98	MINI PELET EXT	2.5
Juvenil	56	4.2	30	35	858	5	172	1.51	1	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	69	4.1	30	35	1,033	5	207	1.7	1.03	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	83	4	30	35	1,212	4	303	2.07	1.03	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	100	4	30	35	1,460	4	365	2.43	1.1	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	120	3.5	30	35	1,533	4	383	2.85	1.15	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	140	3.4	30	35	1,737	4	434	2.86	1.15	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	162	3.2	30	35	1,892	4	473	3.14	1.25	ENG EXTRUIDO	3.5

Etapa del pez	Peso del pez	% del peso de alimento diario	% Mínimo de proteína	% Máximo de proteína	Cantidad de alimento al día para 365 peces (g)	No. de raciones al día	Cantidad de alimento por ración (g)	Crecimiento diario (g/d)	Conversión alimenticia	Tipo de alimento	Tamaño de alimento (mm)
Pre-engorda	184	2.9	30	35	1,948	4	487	3.14	1.25	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	207	2.8	30	35	2,116	4	529	3.29	1.26	ENG EXTRUIDO	3.5
Pre-engorda	231	2.6	30	35	2,192	3	731	3.43	1.28	ENG EXTRUIDO	3.5
Engorda	256	2.4	25	30	2,243	3	748	3.57	1.28	ENG EXTRUIDO	4
Engorda	282	2.3	25	30	2,367	3	789	3.71	1.28	ENG EXTRUIDO	4
Engorda	309	2.2	25	30	2,481	3	827	3.85	1.3	ENG EXTRUIDO	5
Engorda	337	2.1	25	30	2,583	3	861	4	1.37	ENG EXTRUIDO	5
Engorda	365	1.9	25	30	2,531	3	844	4	1.37	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	393	1.8	25	30	2,582	3	861	4	1.37	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	422	1.7	25	30	2,619	3	873	4.14	1.37	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	451	1.6	25	30	2,634	3	878	4.14	1.34	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	480	1.5	25	30	2,628	3	876	4.14	1.34	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	510	1.4	25	30	2,606	3	869	4.14	1.38	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	540	1.4	25	30	2,759	3	920	4.14	1.45	ENG EXTRUIDO	5.5
Engorda	570	1.4	25	30	2,913	3	971	4.14	1.47	ENG EXTRUIDO	7.5
Engorda	600	1.3	20	25	2,847	3	949	4.14	1.49	ENG EXTRUIDO	7.5
Engorda	650	1.2	20	25	2,847	3	949	4.14	1.65	ENG EXTRUIDO	7.5
Engorda	700	1.1	20	25	2,811	3	937	4.14	1.65	ENG EXTRUIDO	7.5
Engorda	750	1	20	25	2,738	3	913	4.2	1.65	ENG EXTRUIDO	7.5
Engorda	800	1	20	25	2,920	3	973	4.2	1.7	ENG EXTRUIDO	7.5

11.3. Desglose Costos de Inversión

Cuadro 18 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema RS.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario ($)	Importe ($)
Infraestructura				
Tanque de cría	pieza	3	5,200.00	15,600.00
Reservorio	pieza	6	499.00	2,994.00
Blower 4.5 Hp Regenerativo	pieza	1	22,000.00	22,000.00
			Subtotal	40,594.00
Construcción				
Plomería				
Tubo PVC 38 mm x 6 m	pieza	1.05	137.88	144.77
Reducción PVC 76x38mm	pieza	3	41.39	124.17
Tubo PVC sanitario 204 mm x 6 m	pieza	0.45	864.61	389.07
Válvula PVC 38 mm	pieza	3	57.27	171.81
Tapón PVC 38 mm	pieza	3	5.26	15.78
Codo PVC 90 x 38 mm	pieza	18	8.86	159.48
Tee PVC 76 mm	pieza	6	49.56	297.36
Adaptador macho PVC 38 mm	pieza	6	4.80	28.80
Adaptador hembra PVC 38 mm	pieza	3	6.32	18.96
Tapón PVC 1-2"	pieza	12	3.00	36.00
Tee PVC 1/2"	pieza	12	5.44	65.28
Codo PVC 90 x 1/2"	pieza	12	17.24	206.88
Manguera industrial transparente 3/16 "	m	5	1.20	6.00
Manguera industrial transparente 1/2 "	m	30	2.00	60.00
Manguera industrial transparente 1 "	m	9	53.00	477.00
Adaptador para tanque 38 mm POLIMEX	pieza	3	136.55	409.65
Tubo PVC 1/2" x 6 m	pieza	4.5	59.35	267.08
Codo PVC 90 x 76 mm	pieza	3	99.17	297.51
Conexión Tee PVC 1/2"	pieza	6	9.50	57.00
Manguera difusora tipo Aero-Tube Diámetro: ¾”	pieza	3	997.00	2,991.00
			Subtotal	7,219.38
Miscelánea				
Filtro de bolsa	pieza	12	189.00	2,268.00
Bio medio Kaldnes	m^3	0.33	26,951.53	8,894.00
Bomba sumergible	pieza	3	2,250.00	6,750.00
Tambo 220 L	pieza	3	320.00	960.00

Cinta métrica	pieza	3	4.99	14.97
Polín de madera pino	pieza	6	257.48	1,544.88
Triplay de pino 12 mm	pieza	3	495.00	1,485.00
			Subtotal	25,423.55

Equipamiento

LAQUAtwin EC-11	pieza	1	3,900.00	3,900.00
pH	pieza	1	399.00	399.00
Medidor de oxígeno disuelto portátil HQ30D	pieza	1	70,000.00	70,000.00
Termómetro	pieza	1	249.99	249.99
Calentador y termostato	pieza	3	2,500.00	7,500.00
			Subtotal	82,048.99

Herramientas

Arco para segueta	pieza	1	169.00	169.00
Bolsa de Barra de silicón (500g)	pieza	1	122.00	122.00
Bolsa de 100 pijas para madera 8x3"	pieza	1	70.00	70.00
Cinta teflón	pieza	1	7.00	7.00
Corta círculos	pieza	1	125.00	125.00
Esmeriladora angular	pieza	1	480.00	480.00
Flexómetro	pieza	1	120.00	120.00
Formón	pieza	1	89.00	89.00
Herramienta rotatoria	pieza	1	319.76	319.76
Juego de brocas	pieza	1	76.00	76.00
Juego de herramientas	pieza	1	595.00	595.00
Lija grano 120	pieza	1	16.00	16.00
Lija grano 200	pieza	1	16.00	16.00
Navaja	pieza	1	199.00	199.00
Pistola de calor	pieza	1	580.00	580.00
Pistola calafateadora	pieza	1	55.00	55.00
Punta para taladro	pieza	1	10.00	10.00
Segueta	pieza	1	16.00	16.00
Serrucho	pieza	1	199.00	199.00
Sierra caladora	pieza	1	749.00	749.00
Sierra sable	pieza	1	3,169.00	3,169.00
Sika Flex	pieza	1	169.00	169.00
Taladro	pieza	1	689.00	689.00
Cinta aislante	pieza	1	7.00	7.00
			Subtotal	8,046.76
			Total	**163,332.68**

Cuadro 19 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema AS

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario ($)	Importe ($)
Infraestructura				
Tanque de cría	pieza	3	5,200.00	15,600.00
Reservorio	pieza	6	499.00	2,994.00
Blower 4.5 Hp Regenerativo	pieza	1	22,000.00	22,000.00
			Subtotal	40,594.00
Construcción				
Plomería				
Tubo PVC 38 mm x 6 m	pieza	1.05	137.88	144.77
Reducción PVC 76x38mm	pieza	3	41.39	124.17
Tubo PVC sanitario 204 mm x 6 m	pieza	0.45	864.61	389.07
Válvula PVC 38 mm	pieza	3	57.27	171.81
Tapón PVC 38 mm	pieza	3	5.26	15.78
Codo PVC 90 x 38 mm	pieza	12	8.86	106.32
Tee PVC 76 mm	pieza	6	49.56	297.36
Adaptador macho PVC 38 mm	pieza	6	4.80	28.80
Adaptador hembra PVC 38 mm	pieza	3	6.32	18.96
Manguera industrial transparente 3/16 "	m	5	1.20	6.00
Manguera industrial transparente 1/2 "	m	30	2.00	60.00
Manguera industrial transparente 1 "	m	9	53.00	477.00
Adaptador para tanque 38 mm POLIMEX	pieza	3	136.55	409.65
Tee PVC 1 1/2"	pieza	3	23.21	69.63
Codo 90 x 76mm	pieza	3	99.17	297.51
Tubo PVC 1/2" X 6 m	pieza	0.6	59.35	35.61
Tapón PVC 1/2 "	pieza	9	3.00	27.00
Tee PVC 1/2 "	pieza	3	5.44	16.32
Codo PVC 90 x 76mm	pieza	3	99.17	297.51
Conexión Tee PVC 1/2"	pieza	6	9.50	57.00
Manguera difusora tipo Aero-Tube Diámetro: ¾”	pieza	3	997.00	2,991.00
			Subtotal	7,007.88
Miscelánea				
Filtro de bolsa	pieza	12	189.00	2,268.00
Bomba sumergible	pieza	3	2,250.00	6,750.00
Tanque IBC	pieza	3	1,650.86	4,952.58
Cinta métrica	pieza	3	4.99	14.97
Polín de madera pino	pieza	6	257.48	1,544.88
Triplay de pino 12 mm	pieza	3	495.00	1,485.00
			Subtotal	19,737.90

Plantas				
Jal	m^3	1.5	500.00	750.00
Charola de germinación	pieza	3	29.90	89.70
Peat moss	pieza	1	128.36	128.36
Rafia agrícola	pieza	1	215.43	215.43
Lampara LED 18 w	pieza	18	43.47	782.46
Base para lampara LED	pieza	18	47.30	851.40
Paquete de Semillas de tomate	pieza	3	19.90	59.70
			Subtotal	3,337.38
Equipamiento				
LAQUAtwin EC-11	pieza	1	3,900.00	3,900.00
pH	pieza	1	399.00	399.00
Medidor de oxígeno disuelto portátil HQ30D	pieza	1	70,000.00	70,000.00
Termómetro	pieza	1	249.99	249.99
Calentador y termostato	pieza	3	2,500.00	7,500.00
			Subtotal	82,048.99
Herramientas				
Arco para segueta	pieza	1	169.00	169.00
Bolsa de Barra de silicón (500g)	pieza	1	122.00	122.00
Bolsa de 100 pijas para madera 8x3"	pieza	1	70.00	70.00
Cinta teflón	pieza	1	7.00	7.00
Corta círculos	pieza	1	125.00	125.00
Esmeriladora angular	pieza	1	480.00	480.00
Flexómetro	pieza	1	120.00	120.00
Formón	pieza	1	89.00	89.00
Herramienta rotatoria	pieza	1	319.76	319.76
Juego de brocas	pieza	1	76.00	76.00
Juego de herramientas	pieza	1	595.00	595.00
Lija grano 120	pieza	1	16.00	16.00
Lija grano 200	pieza	1	16.00	16.00
Navaja	pieza	1	199.00	199.00
Pistola de calor	pieza	1	580.00	580.00
Pistola calafateadora	pieza	1	55.00	55.00
Punta para taladro	pieza	1	10.00	10.00
Segueta	pieza	1	16.00	16.00
Serrucho	pieza	1	199.00	199.00
Sierra caladora	pieza	1	749.00	749.00
Sierra sable	pieza	1	3,169.00	3,169.00
Sika Flex	pieza	1	169.00	169.00
Taladro	pieza	1	689.00	689.00
Cinta aislante	pieza	1	7.00	7.00

			Subtotal	8,046.76
			Total	**160,772.91**

Cuadro 20 Costos de inversión para tres unidades de producción de un sistema HS

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario ($)	Importe ($)
Infraestructura				
Tanque IBC	pieza	3	1,650.86	4,952.58
Reservorio	pieza	3	499.00	1,497.00
			Subtotal	6,449.58
Construcción				
Plomería				
Tubo PVC 38 mm x 6 m	pieza	0.45	137.88	62.05
Codo PVC 90 x 38mm	pieza	6	8.86	53.16
Tapón PVC 38 mm	pieza	3	5.26	15.78
Tee PVC 1 1/2"	pieza	3	23.21	69.63
Adaptador macho PVC 38 mm	pieza	3	4.80	14.40
Adaptador hembra PVC 38 mm	pieza	3	6.32	18.96
Manguera industrial transparente 1 "	m	9	53.00	477.00
			Subtotal	824.73
Miscelánea				
Bomba sumergible	pieza	3	2,250.00	6,750.00
Polín de madera pino	pieza	6	257.48	1,544.88
Triplay de pino 12 mm	pieza	3	495.00	1,485.00
			Subtotal	11,344.66
Plantas				
Jal	m^3	1.5	500.00	750.00
Charola de germinación	pieza	3	29.90	89.70
Peat moss	pieza	1	128.36	128.36
Rafia agrícola	pieza	1	215.43	215.43
Lampara LED 18 w	pieza	18	43.47	782.46
Base para lampara LED	pieza	18	47.30	851.40
Paquete de Semillas de tomate	pieza	3	19.90	59.70
			Subtotal	3,337.38
Equipamiento				
LAQUA EC	pieza	1	3,900.00	3,900.00
pH	pieza	1	399.00	399.00
Oxímetro	pieza	1	70,000.00	70,000.00
Termómetro	pieza	1	249.99	249.99
			Subtotal	74,548.99
Herramientas				

Arco para segueta	pieza	1	169.00	169.00
Bolsa de Barra de silicón (500g)	pieza	1	122.00	122.00
Bolsa de 100 pijas para madera 8x3"	pieza	1	70.00	70.00
Cinta teflón	pieza	1	7.00	7.00
Corta círculos	pieza	1	125.00	125.00
Esmeriladora angular	pieza	1	480.00	480.00
Flexómetro	pieza	1	120.00	120.00
Formón	pieza	1	89.00	89.00
Juego de brocas	pieza	1	76.00	76.00
Juego de herramientas	pieza	1	595.00	595.00
Lija grano 120	pieza	1	16.00	16.00
Lija grano 200	pieza	1	16.00	16.00
Navaja	pieza	1	199.00	199.00
Pistola de calor	pieza	1	580.00	580.00
Pistola calafateadora	pieza	1	55.00	55.00
Punta para taladro	pieza	1	10.00	10.00
Segueta	pieza	1	16.00	16.00
Serrucho	pieza	1	199.00	199.00
Sierra caladora	pieza	1	749.00	749.00
Sierra sable	pieza	1	3,169.00	3,169.00
Sika Flex	pieza	1	169.00	169.00
Taladro	pieza	1	689.00	689.00
Cinta aislante	pieza	1	7.00	7.00
			Subtotal	7,727.00
			Total	**104,232.34**

11.4. Desglose Costos Operación

Cuadro 21 Costos operativos de tres unidades de un sistema de recirculación

Descripción	**Cantidad**	**Unidad**	**Precio Unitario ($)**	**Importe ($)**
Ventas Brutas				
Tilapia	489	kg/ciclo	61.50	30,073.50
			Total	30,073.50
Costos Variables				

Siembra				
Juveniles	1095	pieza	1.52	1,664.40
			Subtotal	1,664.40
Alimentación				
Alimento 1.5 mm	3	Saco de 25 kg	906.00	2,718.00
Alimento 2.4 mm	3	Saco de 25 kg	545.00	1,635.00
Alimento 3.5 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
Alimento 4.8 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
Alimento 5.5 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
			Subtotal	7,845.00
Combustible				
Flete	1		1,500.00	1,500.00
Transporte	252	L	16.81	4,236.12
			Subtotal	5,736.12
Mantenimiento calidad de agua				
Carbonato de sodio ligero bulto de 25 kg	1.5	kg	700.00	1,050.00
			Subtotal	1,050.00
			Costos Variables Totales	16,295.52

Costos fijos

Electricidad				
Bomba	1	ciclos	652.15	652.15
Calentadores	1	ciclos	2,239.49	2,239.49
Sopladores	1	ciclos	9,676.80	9,676.80
			Subtotal	12,568.44
Agua				
Volumen del sistema	6.63	m^3	2.32	15.38
Limpieza de filtros	32.4	m^3	2.32	75.17
Purgas	16.2	m^3	2.32	37.58
Recambios	39.75	m^3	2.32	92.22
			Subtotal	220.35
			Costos Fijos Totales	12,788.79
			Costos Totales	**29,084.31**

Cuadro 22 Costos operativos de tres unidades de un sistema acuapónico

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Importe
Ventas Brutas				
Tilapia	505.5	kg/ciclo	61.50	31,088.25
Tomate	1500	kg/ciclo	31.20	46,800.00
			Total	77,888.25
Costos Variables				
Siembra				
Juveniles	1095	pieza	1.52	1,664.40
			Subtotal	1,664.40
Alimentación				
Alimento 1.5 mm	3	Saco de 25 kg	906.00	2,718.00
Alimento 2.4 mm	3	Saco de 25 kg	545.00	1,635.00
Alimento 3.5 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
Alimento 4.8 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
Alimento 5.5 mm	3	Saco de 25 kg	388.00	1,164.00
			Subtotal	7,845.00
Combustible				
Flete	1		1,500.00	1,500.00
Transporte	252	L	16.81	4,236.12
			Subtotal	5,736.12
Mantenimiento calidad de agua				
Carbonato de sodio ligero bulto de 25 kg	1.5	kg	700.00	1,050.00
			Subtotal	1,050.00
			Costos Variables Totales	16,295.52
Costos fijos				
Electricidad				
Bomba	1	ciclos	652.15	652.15
Calentadores	1	ciclos	2,239.49	2,239.49
Sopladores	1	ciclos	9,676.80	9,676.80
Lámparas	1	ciclos	1,508.68	1,508.68
			Subtotal	14,077.12
Agua				
Volumen del sistema	6.72	m^3	2.32	15.59
Limpieza de filtros	32.4	m^3	2.32	75.17

Purgas	16.2	m^3	2.32	37.58
Recambios	39.06	m^3	2.32	90.62
			Subtotal	218.96
			Costos Fijos Totales	14,296.08
			Costos Totales	**30,591.60**

Cuadro 23 Costos operativos de tres unidades de un sistema hidropónico

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario ($)	Importe ($)
Ventas Brutas				
Tomate	1500	kg/ciclo	31.20	46,800.00
			Total	46,800.00
Costos Variables				
Combustible				
Transporte	252	L	16.00	4,032.00
			Subtotal	4,032.00
Mantenimiento calidad de agua				
Solución nutritiva	6.48	kg	67.96	440.38
			Subtotal	440.38
			Costos Variables Totales	4,472.38
Costos fijos				
Electricidad				
Bomba	1	ciclos	652.15	652.15
Lámparas	1	ciclos	1,508.68	1,508.68
			Subtotal	2,160.83
Agua				
Volumen del sistema	0.75	m^3	2.32	1.74
Recambios	4.32	m^3	2.32	10.02
			Subtotal	11.76
			Costos Fijos Totales	2,172.59
			Costos Totales	**6,644.97**