

Jesús Josafat  
De león  
Ramírez

Comportamiento de variables fisiológicas de relevancia  
productiva en *Oreochromis niloticus* y *Solanum*  
*lycopersicum* bajo condiciones de estrés en cultivo

2023



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Comportamiento de variables fisiológicas de relevancia  
productiva en *Oreochromis niloticus* y *Solanum*  
*lycopersicum* bajo condiciones de estrés en cultivo  
acuapónico intensivo.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería en Biosistemas

Presenta

Jesús Josafat De león Ramírez



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Comportamiento de variables fisiológicas de  
relevancia productiva en *Oreochromis niloticus* y  
*Solanum lycopersicum* bajo condiciones de estrés en  
cultivo acuapónico intensivo

**por**

Jesús Josafat De león Ramírez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGDCC-198159



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería en Biosistemas

Comportamiento de variables fisiológicas de relevancia productiva en *Oreochromis niloticus* y *Solanum lycopersicum* bajo condiciones de estrés en cultivo acuapónico intensivo.

## TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería en Biosistemas

### Presenta:

Jesús Josafat De León Ramírez

### Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

### SINODALES

Dr. Juan Fernando García Trejo

Presidente

Dr. Ramón G. Guevara González

Secretario

Dr. Carlos Francisco Sosa Ferreyra

Vocal

Dr. Luis Miguel Contreras Medina

Suplente

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Loarca Piña  
Directora de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Abril 2023  
México

## RESUMEN

La creciente demanda alimenticia por parte de la población se refleja en el aumento de la intensidad productiva de los sistemas agroalimentarios. Lo cual resulta en impactos relevantes tanto para el ambiente como para los organismos inmersos en este tipo de sistemas. En este sentido, la acuaponía podría contribuir a mitigar los estragos sobre el ambiente, mediante el aprovechamiento integral de los recursos con una mínima liberación de nutrientes y aguas residuales. No obstante, no se cuenta con información sobre como la acuaponía intensiva repercute sobre las variables productivas de las especies involucradas. Por lo anterior, en la presente investigación se evaluó el efecto que el estrés dentro de un cultivo acuapónico intensivo de modalidad escalonada y por lotes, genera sobre las variables fisiológicas de relevancia productiva en *Oreochromis niloticus* y *Solanum lycopersicum*. Para determinar dicho efecto se establecieron dos sistemas acuapónicos (uno de modalidad escalonada AE y otro por lotes AL); los cuales fueron valorados frente a dos sistemas acuícolas e hidropónicos convencionales (de modalidad escalonada AHE y por lotes AHL) durante un ciclo de cultivo (180 días) para evaluar los procesos de alimentación, crecimiento y desarrollo; así como el rendimiento y la calidad de los productos generados. En lo concerniente a la alimentación y crecimiento de *O. niloticus*, el cultivo acuapónico de modalidad escalonada (AE) generó la mayor ganancia de peso y tasa específica de crecimiento. En cuanto al crecimiento y desarrollo de *S. lycopersicum*, el mejor desempeño se presentó en los sistemas hidropónicos (AHE y AHL). Por su parte, los indicadores de estrés monitoreados en *O. niloticus* (cortisol y glucosa) sugieren que el cultivo acuaponico por lotes cuenta con menor presencia de factores estresantes; mientras que, los indicadores en *S. lycopersicum* (catalasa y fenoles totales) respaldan a los sistemas hidropónicos (AHE y AHL) con menores factores de estrés. Finalmente, el mayor rendimiento se obtuvo en los cultivos escalonados (AE y AHE), sistemas que de igual manera comparte la mayor calidad de los productos resultantes.

**Palabras clave:** desempeño productivo, estrés, modalidad de cultivo, sistemas acuaponicos

## SUMMARY

The growing food demand by the population is reflected in the increase in the productive intensity of agri-food systems. This results in relevant impacts both for the environment and for the organisms immersed in this type of system. In this sense, aquaponics could help mitigate the damage to the environment, through the comprehensive use of resources with a minimum release of nutrients and wastewater. However, there is no information on how intensive aquaponics affects the productive variables of the species involved. Due to the above, in the present investigation the effect that stress within an intensive aquaponic culture of staggered and batch modality generates on the physiological variables of productive relevance in *Oreochromis niloticus* and *Solanum lycopersicum* was evaluated. To determine this effect, two aquaponic systems were established (one in a staggered modality AE and another in batches AL); which were evaluated against two conventional aquaculture and hydroponic systems (AHE staggered and AHL batch) during a culture cycle (180 days) to evaluate the processes of feeding, growth and development; as well as the performance and quality of the products generated. Regarding the feeding and growth of *O. niloticus*, the aquaponic culture of staggered modality (AE) generated the highest weight gain and specific growth rate. Regarding the growth and development of *S. lycopersicum*, the best performance was presented in the hydroponic systems (AHE and AHL). On the other hand, the stress indicators monitored in *O. niloticus* (cortisol and glucose) suggest that batch aquaponics have a lower presence of stress factors; while the indicators in *S. lycopersicum* (catalase and total phenols) support the hydroponic systems (AHE and AHL) with lower stress factors. Finally, the highest yield was obtained in staggered crops (AE and AHE), systems that also share the highest quality of the resulting products.

**Key words:** productive performance, stress, cultivation modality, aquaponic systems

## Dedicatoria

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis Dr. Juan Fernando García Trejo y a mi sínodo, que me apoyaron en la realización del presente trabajo y que en su momento dieron valiosas aportaciones.

A mis compañeros, a los integrantes del laboratorio de Bioingeniería y a los todas las personas que contribuyeron en las actividades inherentes a este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para que la presente investigación se llevara a cabo de manera satisfactoria.

## Contenido

RESUMEN .....	1
SUMMARY .....	1
Dedicatoria .....	1
AGRADECIMIENTOS .....	1
INDICE DE CUADROS .....	1
INDICE DE FIGURAS .....	1
I. INTRODUCCION.....	1
I.1 Justificación.....	3
I.2 Problema.....	4
II. REVISION DE LITERATURA .....	5
2.1 Estrés .....	5
2.1.1 Estrés en peces .....	6
2.1.2 Estrés en plantas .....	7
2.2 Cultivos intensivos.....	8
2.3 Acuaponia .....	9
2.3.1 Tipos de sistemas acuaponícos .....	10
2.3.2 Modalidad de cultivo.....	11
2.3.3 Condiciones de cultivo en sistemas acuaponícos.....	12
2.3.3.1 Agua.....	12
2.3.3.2 Densidad de cultivo .....	14
2.3.3.3 Alimento y nutrientes.....	14
2.3.3.4 Especie acuática .....	15
2.3.3.4.1 <i>Oreochromis niloticus</i> .....	15
2.3.3.5 Especie vegetal .....	17
2.3.3.5.1 <i>Solanum lycopersicum</i> .....	17
2.3.4 Estrés en sistemas acuapónicos.....	18
2.3.4.1 Estrés en <i>Oreochromis niloticus</i> .....	19
2.3.4.2 Estrés en <i>Solanum lycopersicum</i> .....	20
III. Hipótesis y objetivos .....	21
3.1 Hipótesis .....	21



3.2	Objetivo general.....	21
3.3	Objetivos particulares .....	21
IV.	Metodología.....	22
4.1	Establecimiento de los sistema experimentales.....	22
4.1.1	Montaje y monitoreo de sistemas.....	23
4.1.2	Diseño experimental.....	26
4.1.3	Inserción y manejo de los organismos .....	26
4.2	Determinación de indicadores de estrés .....	31
4.3	Evaluación de las variables fisiológicas .....	32
4.3.1	Evaluación del proceso de alimentación en <i>O. niloticus</i> .....	32
4.3.3	Evaluación del proceso de crecimiento en <i>O. niloticus</i> y <i>S. lycopersicum</i> . .....	33
4.3.4	Evaluación del proceso de desarrollo en <i>S. lycopersicum</i> . .....	34
4.3.5	Análisis estadístico.....	35
4.4	Evaluación del rendimiento y calidad .....	35
4.4.1	Rendimiento .....	35
4.4.2	Calidad .....	36
4.4.3	Análisis estadístico.....	37
V.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	38
5.1	Monitoreo de calidad de agua .....	38
5.2	Indicadores de estrés .....	40
5.3	Proceso de alimentación en <i>O. niloticus</i> .....	45
5.4	Proceso de crecimiento de <i>O. niloticus</i> .....	48
5.5	Proceso de crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> .....	51
5.6	Proceso de desarrollo de <i>S. lycopersicum</i> .....	52
5.7	Rendimiento .....	54
5.8	Calidad .....	56
VI.	CONCLUSIÓN .....	58

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Características de las modalidades de cultivo	11
2.2	Ciclo biológico de <i>Oreochromis niloticus</i>	16
2.3	Morfología de <i>Solanum lycopersicum</i>	18
4.1	Condiciones fisicoquímicas requeridas en el agua para el cultivo de <i>O. niloticus</i>	25
4.2	Condiciones fisicoquímicas requeridas en el agua para el cultivo de <i>S. lycopersicum</i>	26
4.3	Particularidades de los tratamientos evaluados dentro del cultivo acuaponico	27
4.4	Especificaciones de la inserción de <i>O. niloticus</i> en los tratamientos escalonados (AE yAHE) y por lotes (AL y AHL)	27
4.5	Especificaciones de las raciones y horarios de alimentación de los ejemplares de <i>O. niloticus</i>	27
4.6	Tabla de composición de la solución nutritiva (Peters profesional 5-11-26 hydroponic special)	29
4.7	Grados de madurez de tomate	30
5.1	Calidad del agua en los estanques de peces en los diferentes tratamientos. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	38
5.2	Calidad del agua en los reservorios de riego para las plantas en los diferentes tratamientos. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	39
5.3	Indicadores del proceso de alimentación de <i>O. niloticus</i> para la etapa de alevín. Los valores se presentan como media $\pm$	46

	desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	
5.4	Indicadores del proceso de alimentación de <i>O. niloticus</i> para la etapa de juvenil. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	47
5.5	Indicadores del proceso de alimentación de <i>O. niloticus</i> para la etapa de adulto. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	48
5.6	Indicadores del proceso de crecimiento de <i>O. niloticus</i> para la etapa de alevín. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	49
5.7	Indicadores del proceso de crecimiento de <i>O. niloticus</i> para la etapa de juvenil. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	50
5.8	Indicadores del proceso de crecimiento de <i>O. niloticus</i> para la etapa de adulto. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P<0.05$ ).	50
5.9	Indicadores del proceso de crecimiento de <i>S. lycopersicum</i> . Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas	52

	( $P < 0.05$ ).	
5.10	Indicadores del proceso de desarrollo de <i>S. lycopersicum</i> . Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).	53
5.11	Rendimiento productivo total	55
5.12	Rendimiento económico total	55
5.13	Indicadores de calidad de <i>O. niloticus</i> (filete). Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el periodo experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).	56
5.14	Indicadores de calidad de <i>S. lycopersicum</i> (fruto). Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar de las muestras recolectadas durante el periodo experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).	57

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
4.1	Esquema de las etapas del trabajo experimental.	22
4.2	Sistemas implementados para los cultivos experimentales.	23
4.3	Esquema de los sistemas acuaponicos con módulos acuícola y hortícola conectados.	24
4.4	Esquema de los sistemas con módulos acuícola y hortícola independientes.	24
4.5	Esquema de los tratamientos	28
5.1	Concentraciones de cortisol para: AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hidroponico escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hidroponico por lotes) a los 60 (A), 120 (B) y 180 días (C). Los valores se presentan como medias $\pm$ DE, las diferencias significativas ( $P<0,05$ ) se indican con un superíndice diferente.	42
5.2	Concentraciones de glucosa para: AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hidroponico escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hidroponico por lotes) a los 60 (A), 120 (B) y 180 días (C). Los valores se presentan como medias $\pm$ DE, las diferencias significativas ( $P<0,05$ ) se indican con un superíndice diferente.	42
5.3	Actividad enzimática de catalasa en: AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hortícola escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hortícola por lotes) a los 60 (A), 90 (B) y 120 días (C). Los valores se presentan como medias $\pm$ DE, las diferencias significativas ( $P<0,05$ ) se indican con un superíndice diferente	43
5.4	Concentración de fenoles totales en: AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hortícola escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hortícola por lotes) a los	44

60 (A), 90 (B) y 120 días (C). Los valores se presentan como medias  $\pm$  DE, las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) se indican con un superíndice diferente

## I. INTRODUCCION

El concepto de estrés se define como la perturbación en el equilibrio biológico (homeostasis) de un organismo; siendo resultado de una alteración derivada de la intervención de estímulos bióticos o abióticos llamados agentes estresantes (Chrousos, 2009; Fotedar & Evans, 2011; Ronga *et al.*, 2015; Lang, 2018). Los agentes estresantes desencadenan una serie de variaciones fisiológicas en procesos como la alimentación, crecimiento y desarrollo, pudiendo ser positivas o negativas de acuerdo al tipo de estrés con el cual se tenga interacción; esto con el fin de restablecer su estado de homeostasis y con ello mantener sus funciones vitales (Fotedar & Evans, 2011; Ronga *et al.*, 2015; Lang, 2018). Asimismo, ciertos compuestos metabólicos que permiten determinar la intensidad de la respuesta al estrés (Cnaani *et al.*, 2006; Martínez-Porchas *et al.*, 2009; De la Cruz *et al.*, 2012).

Si bien, todo organismo en su medio natural posee una exposición constante a agentes estresantes. La presencia de estos estímulos se incrementa en los sistemas de cultivo intensivo; los cuales se caracterizan por contar con altas densidades ~~de siembra~~ así como por poseer un control estricto del entorno de cultivo, generando variaciones negativas en los procesos fisiológicos de los organismos involucrados (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013; Ronga *et al.*, 2015; Yavuzcan *et al.*, 2017). Al respecto de ello, investigaciones realizadas muestran que el estrés detona cambios fisiológicos que afectan procesos biológicos de importancia productiva (Biswal *et al.*, 2011; Pankhurst, 2011; Farroq *et al.*, 2012; Shinji *et al.*, 2012; Ronga *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2015).

Actualmente uno de los sistemas de producción agropecuaria que atrae gran interés, son los sistemas de cultivo acuapónico, los cuales son el resultado de la integración de la acuicultura y la hidróponia bajo un sistema de recirculación cerrado (Love *et al.*, 2015; Forchino *et al.*, 2017). En un sistema acuapónico los residuos generados a partir del crecimiento de los peces son aprovechados tras

una conversión microbiana como nutrientes por las plantas involucradas, las cuales a su vez brindan una depuración y limpieza del agua requerida por los peces (Liang & Chien, 2013; Wongkiew *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2018).

Dentro de los organismos acuáticos empleados en la acuaponía destaca la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) que es un pez de agua dulce originaria de los lagos y lagunas africanas perteneciente a la familia de los cíclidos; su cultivo ha extendido a lo largo del mundo llegando a ser la segunda especie producida en acuicultura y la mayormente empleada en los sistemas acuapónicos (Baßmann *et al.*, 2017; Forchino *et al.*, 2017). El empleo predilecto de la tilapia del Nilo se debe a su capacidad de tolerar y adaptarse a condiciones adversas en su medio de cultivo, como bajas temperaturas y altas concentraciones de compuestos nitrogenados (Wongkiew *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017).

Por su parte, uno de los organismos vegetales que ha sido introducido a los sistemas de cultivo acuapónico es el jitomate (*Solanum lycopersicum*) que es una especie dicotiledónea perteneciente a la familia de las Solanáceas, es una planta perenne que se cultiva como anual pudiendo desarrollarse como planta erecta, rastrera o semirrecta. El jitomate posee gran importancia e interés al ser una de las hortalizas mayormente consumidas en el mundo y ser uno de los cultivos de los cuales se pueden obtener aceptables cantidades de producción en sistemas acuapónicos (Sace & Fitzsimmons, 2013; Goddek *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Knaus & Palm, 2017).

En lo que respecta a estudios relacionados con el estrés generado en los sistemas de cultivo acuapónico y las alteraciones fisiológicas correspondientes en las especies involucradas, la información aún es incipiente; destacando trabajos enfocados en las consecuencias de altas densidades de siembra reflejadas en la especie acuática (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013; Davidson *et al.*, 2014; Baßmann *et al.*, 2017). Sin embargo, sus alcances son limitados al no considerar



los efectos y las repercusiones en la especie vegetal. (Junge *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017).

Ante esta situación, el presente trabajo pretende determinar el efecto que poseen los agentes estresantes ligados a un cultivo acuapónico intensivo sobre las variables fisiológicas de alimentación, crecimiento y desarrollo en *Oreochromis niloticus* y *Solanum lycopersicum*.

## **I.1 Justificación**

Actualmente, la acuaponia es promovida para su implementación tanto en países en desarrollo como en aquellos ya desarrollados, esto ante su cualidad de contar con un aprovechamiento integral de los recursos naturales (FAO, 2014; Goddek *et al.*, 2015; Cerozi, 2017; Han *et al.*, 2017); siendo esta particularidad, la que ubica a este tipo de sistemas como una solución potencial en la generación sustentable de alimentos (Karimanzira *et al.*, 2016; Forchino *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017).

Los estudios inherentes a estos sistemas productivos aún son reducidos, mostrando desafíos por resolver; en su mayoría derivados de la complejidad de integración de sus componentes, así como la generación de condiciones propicias para los organismos inmersos y el control de los sistemas desarrollados para el cultivo (König *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020). Lo anterior ha complicado el escalamiento de los sistemas, cuestionando con ello, la seguridad alimentaria que pudiera brindarse a partir de la acuaponia (Azadi *et al.*, 2011; Tyson *et al.*, 2011; Goddek *et al.*, 2015; Wortman, 2015; König *et al.*, 2018).

Por lo anterior, se requiere de investigaciones que diluciden las interrogantes existentes en el conocimiento de las interacciones y la dinámica al interior de los sistemas acuapónicos, explorando así la funcionalidad de este tipo de sistemas a modo de potencializarlos a una mayor escala comercial;

garantizando así, el abastecimiento alimenticio y la generación de productos de calidad a partir de la acuaponía.

## **I.2 Problema**

El incremento en la intensidad productiva en los sistemas de generación de alimentos para atender la demanda por parte de la población conlleva a impactos relevantes en los organismos biológicos inmersos en este tipo de prácticas (Wu *et al.*, 2015; Ronga *et al.*, 2015); es esta situación, la que ha planteado la necesidad de generar prácticas de cultivo que no solo se centren en el rendimiento de los sistemas; sino también en las estrategias que permitan reducir los efectos adversos a la intensidad de producción, repercutiendo así en el mantenimiento de la calidad de los productos resultantes (Van de Nieuwegiessen *et al.*, 2008; Farroq *et al.*, 2012; Martins *et al.*, 2012).

En este sentido, diversos trabajos experimentales concuerdan que para alcanzar un manejo apropiado en los sistemas de cultivos intensivos es necesario el desarrollo y generación de conocimiento sobre las variaciones fisiológicas debidas a estrés por parte de los organismos cultivados (Walley *et al.*, 2007; Nagarajan & Nagarajan, 2010; Okunlola *et al.*, 2017). No obstante, para el caso de los sistemas de producción acuapónica intensiva existen pocos estudios e información relacionada con la fisiología de los organismos inmersos en dichos sistemas (Segner *et al.*, 2012; Junge *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2018).

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Estrés

El concepto de estrés puede definirse, como la perturbación en el equilibrio biológico (homeostasis) de un organismo, siendo resultado de una alteración proveniente de la intervención de estímulos bióticos o abióticos llamados agentes estresantes (Chrousos, 2009; Ronga *et al.*, 2015); mismos que pueden ser internos como la edad y la etapa biológica, así como externos como las condiciones ambientales (Kranner *et al.*, 2010; Lang, 2018).

Es así como los agentes estresantes desencadenan una serie de variaciones fisiológicas en procesos como la alimentación, crecimiento y desarrollo, pudiendo ser positivas o negativas de acuerdo con el tipo de estrés con el cual se tenga interacción, con el fin de restablecer su estado de homeostasis y con ello mantener sus funciones vitales (Fotedar & Evans, 2011; Ronga *et al.*, 2015; Lang, 2018).

En este sentido, las variaciones fisiológicas debidas a estrés se pueden clasificar en dos niveles a partir del grado de interacción, ubicándose aquellas generadas con fines compensatorios o adaptativos (eustrés) con base a agentes estresantes de impacto moderado y aquellas con perdida del valor adaptativo y por tanto disfuncional (diestrés) con base a agentes estresantes crónicos severos (Mucio-Ramírez, 2007; Zavala, 2008; Mercier *et al.*, 2009; Kranner *et al.*, 2010; Lang, 2018).

Si bien, todo ser vivo en su entorno natural tiene una exposición permanente a agentes estresantes a lo largo de su ciclo biológico; esta situación se acentúa al interior de los entornos generados para el establecimiento de los cultivos intensivos (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013; Ronga *et al.*, 2015), donde las condiciones ambientales recreadas, la densidad de cultivo y la

manipulación son las causas más comunes de estrés teniendo como resultado una variación en procesos fisiológicos de relevancia productiva (Farroq *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2015; Yavuzcan *et al.*, 2017).

### **2.1.1 Estrés en peces**

Si bien los peces al igual que todos los organismos vivientes están propensos a las afecciones generadas a partir de los diferentes agentes estresantes del ambiente, es en su incorporación a sistemas productivos donde se acrecienta la exposición a los mismos (Van de Nieuwegiessen *et al.*, 2008; Martins *et al.*, 2012). Siendo que, en estos entornos se promueve a una mayor competencia por los recursos (alimento, oxígeno, espacio); puesto que se cuenta altas densidades de siembra, lo cual a su vez genera una gran excreción de desechos los cuales pueden tornarse tóxicos para las especies en cuestión (Mancuso, 2013; Yavuzcan *et al.*, 2017; Setiadi *et al.*, 2018).

Una vez que estos agentes estresantes han comprometido la homeostasis de los peces, éstos generan respuestas compensatorias a modo tal de enfrentarse a las alteraciones acontecidas, dichas respuestas pueden ser agrupadas en tres niveles: primario, secundario y terciario (Fotedar & Evans, 2011).

Las respuestas primarias consisten en la activación del sistema neuroendocrino con la liberación de hormonas y neurotransmisores hacia los distintos tejidos del organismo (Pankhurst, 2011; Shinji *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2015); donde la concentración de cortisol se utiliza como indicador de la intensidad de la respuesta (Martínez-Porchas *et al.*, 2009; Pankhurst 2011). Las respuestas secundarias, radican en procesos metabólicos que se generan en las células a partir del reconocimiento de las señales bioquímicas (Aparicio-Simón *et al.*, 2010); siendo la concentración de glucosa el indicador que permite determinar la intensidad de la respuesta (Cnaani *et al.*, 2006; Martínez-Porchas *et al.*, 2009). La

respuesta terciaria es notoria nivel del sistema inmune siendo apreciada en el desempeño biológico (Mercier *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2015).

### **2.1.2 Estrés en plantas**

Las plantas son organismos altamente sensibles, los cuales constantemente se ven afectados por los agentes estresantes del medio en el que se desarrollan; es esta situación, la que particularmente ve afectados a los sistemas de producción hortícola, puesto que, el estrés generado al interior del sistema puede repercutir en pérdidas considerables en el rendimiento de los cultivos (Walley *et al.*, 2007; Nagarajan & Nagarajan, 2010; Ronga *et al.*, 2015). Lo anterior a consecuencia de la perturbación en varios procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la transpiración, la conductancia estomática, la tasa de crecimiento, etc. (Moreno, 2009; Biswal *et al.*, 2011; Farroq *et al.*, 2012); afectaciones que resultan en deformaciones, cambios de pigmentación, baja asimilación de CO<sub>2</sub> y necrosis (Basurto Sotelo *et al.*, 2008; Okunlola *et al.*, 2017).

En presencia de agentes estresantes las plantas aumentan la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Mittler *et al.*, 2004); mismas que en cantidades elevadas causan daño en la planta (Michalak, 2006). De manera natural, las plantas generan compuestos antioxidantes (enzimáticos y no enzimáticos) que les permiten contrarrestar los efectos causados por ROS (Halliwell, 2006). Dentro de los antioxidantes enzimáticos se encuentran: la catalasa, la peroxidasa, la superóxido dismutasa, la glutatión reductasa, entre otros (Hossain *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010). Por otra parte, entre los antioxidantes no enzimáticos destacan: los carotenoides, compuestos fenólicos, ascorbato y glutatión (Yordanova *et al.*, 2004; Bai *et al.*, 2010). Por lo anterior, la concentración de dichos compuestos funge como indicador de la presencia de estrés en las plantas (Zárate-Martínez *et al.*, 2021).

## 2.2 Cultivos intensivos.

El vertiginoso crecimiento de la población humana, trae consigo un constante desafío en lo que conlleva a satisfacer las necesidades alimenticias (Davies *et al.*, 2009; Hawkesworth *et al.*, 2010). Situación que, a través de los años ha repercutido en la búsqueda continua de nuevos y mejores sistemas productivos, a modo de obtener la mayor cantidad de biomasa por superficie cultivada y tiempo destinado a tal fin (Davies *et al.*, 2009; Hawkesworth *et al.*, 2010; Cohen *et al.*, 2018).

Es así que, para atender dicha demanda alimenticia se ha recurrido a la implementación de sistemas de cultivo en entornos controlados, lo cual ha permitido incrementar la intensidad de cultivo para obtener los volúmenes de producción solicitados (Bosma & Verdegem, 2011; Gyalog *et al.*, 2011; Tyson *et al.*, 2011).

No obstante, dicha intensidad productiva posee una repercusión directa sobre la calidad de los productos; puesto que, los factores asociados a los sistemas de cultivo intensivo, poseen un efecto adverso en los organismos involucrados (Kyaw & Ng, 2017; Cohen *et al.*, 2018; Valenti *et al.*, 2018). Siendo que, dichos factores desencadenan una serie de variaciones fisiológicas negativas en las especies cultivadas, como lo son una disminución en el crecimiento, predisposición a la aparición de enfermedades o incluso la muerte (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013; Ronga *et al.*, 2015; Yavuzcan *et al.*, 2017).

Por lo anterior, se requiere que las mejoras en las prácticas de cultivo no solo se centren en el rendimiento de los sistemas; sino también en las estrategias que permitan reducir los efectos adversos a la intensidad de producción, repercutiendo así en el mantenimiento de la calidad de los productos resultantes (Baßmann *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017).

## 2.3 Acuaponia

La acuaponia hace referencia al cultivo de peces y plantas en un mismo sistema de producción, siendo entonces el resultado de la integración de la acuicultura y la hidroponia bajo un sistema de recirculación cerrado (Love *et al.*, 2015; Forchino *et al.*, 2017). En los sistemas acuapónicos los residuos generados a partir del crecimiento de los peces son aprovechados tras una conversión microbiana como nutrientes por las plantas involucradas, las cuales a su vez brindan una depuración y limpieza del agua requerida por los peces (Liang & Chien, 2013; Wongkiew *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2018).

El cultivo integrado de peces y plantas no es un concepto reciente puesto que, la evidencia histórica apunta al empleo de este tipo de sistemas por civilizaciones antiguas de China, México y Perú (Jones, 2002; Crossley, 2004; Boutwelluc, 2007). Sin embargo, es en la década de los 80's y más aún en años recientes cuando se incrementa el interés por retomar estos sistemas de producción agroalimentaria (Junge *et al.*, 2017; König *et al.*, 2018), esto derivado de la creciente inseguridad alimentaria y la degradación de los ecosistemas naturales a partir de la explotación de los recursos consumidos en los distintos sistemas productivos (Mukuve & Fenner, 2015; Kyaw & Ng, 2017; Valenti *et al.*, 2018).

Atendiendo a esta situación, la acuaponia se puede ubicar como uno de los sistemas de producción agroalimentaria con el potencial requerido para brindar la cantidad y calidad de alimentos demanda por la población (Rakocy, 2006; Endut *et al.*, 2011; Tyson *et al.*, 2011; Goddek *et al.*, 2015), así como mitigar los estragos generados a partir de los sistemas de cultivo tradicionales, mediante el aprovechamiento integral de los recursos con una mínima liberación de nutrientes y aguas residuales (Pulido-Calvo, 2014; Cerozi, 2017; Han *et al.*, 2017; Cohen *et al.*, 2018).

### 2.3.1 Tipos de sistemas acuapónicos

En términos generales, los sistemas acuapónicos se clasifican de acuerdo con los tipos de lecho de cultivo empleado para la especie vegetal (Ramírez *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017), reconociéndose principalmente tres tipos: sistema NFT (Nutrient Film Technique), sistema de raíz flotante y sistema de camas con sustrato sólido (Suhl *et al.*, 2016; Engle, 2015; Anderson *et al.*, 2017; Junge *et al.*, 2017; Knaus & Palm, 2017).

Los sistemas NFT, consisten en hacer pasar sobre las raíces de las plantas un flujo continuo y delgado de solución que contenga los nutrientes requeridos por las mismas, lo cual favorece a una mejor oxigenación de las raíces, lo cual incrementa el rendimiento (Engle, 2015; Schmautz *et al.*, 2016). Sin embargo, este tipo de sistema solo es apropiado para especies vegetales pequeñas; puesto que, el lecho de cultivo es propenso al bloqueo en el flujo de recirculación ante una elevada cantidad de raíces. Asimismo el sistema requiere de una eliminación eficiente de los sólidos provenientes de los desechos acuícolas, lo cual eleva la complejidad y el costo del sistema (Li *et al.*, 2018).

Los sistemas de raíz flotante, es el tipo de sistema mayormente empleado; puesto que, se ajusta de buena manera a una producción comercial, siendo que permite un mejor manejo sobre la especie vegetal y altas densidades de la especie acuícola (Liang & Chien, 2013). No obstante, al igual que el sistema NFT es aplicable solo a pequeñas especies vegetales, en este sistema las plantas se encuentra ubicadas en láminas de poliestireno que flotan sobre el agua que contiene los nutrientes, con lo cual las raíces absorben libremente los nutrientes provistos en el agua sin tener que pensar en la obstrucción del flujo de agua (Engle, 2015; Wongkiew *et al.*, 2017).

Los sistema de camas con sustrato sólido, son similares a los de cama flotante, solo que las plantas se encuentran ubicadas en contenedores con



sustrato inerte (piedra pómez, perlita, tezontle, fibra de coco, etc.). Estos sustratos sirven como soporte para las plantas y protección para las raíces, por lo cual, el sistema puede ser empleado para la producción de especies vegetales como: jitomate, pimiento, etc; además de que la inclusión de los sustratos permite la fijación de bacterias nitrificantes actuando como filtro biológico (Lennard & Leonard, 2006; Engle, 2015; Zou *et al.*, 2016); Sin embargo, la incorporación de los sustratos es la que, tras una operación a largo plazo lleva a la insuficiencia en los niveles de oxígeno en el lecho de cultivo, con lo cual se merma el rendimiento del sistema (Nelson & Page, 2008; Bernstein, 2011; Forchino *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Modalidad de cultivo

La acuaponía, al igual que los cultivos acuícolas, pudiera ser manejada bajo distintas modalidades: por lotes, escalonda y policultivo (cuadro 2.1); sin embargo en la práctica, se ha optado mayormente por la modalidad de cultivo por lotes. Lo anterior pudiera estar relacionado con la noción de no incrementar la complejidad de manejo del sistema acuaponico, pese a ello se generan algunos inconvenientes en el cultivo; siendo que, la selección de dicha modalidad complica el mantenimiento de la calidad de agua, así como la eventual deficiencia de nutrientes (Rakocy *et al.*, 2003; Calone *et al.*, 2019).

Cuadro 2.1 Características de las modalidades de cultivo.

Modalidad	Características
Cultivo por lotes	Ingreso de un número determinado de alevines* o larvas** en un estanque de cultivo y manteniéndose en el mismo hasta su momento de su cosecha
Cultivo escalonado	Inserción en un estanque de una cantidad conocida de alevines* o larvas** que al menos una vez durante el ciclo de cultivo serán divididos en dos o más estanques
Policultivo	Introducción de alevines* o larvas** de distintas especies capaces de converger y desarrollarse en un mismo estanque

\*Alevines = semilla en el cultivo de peces

\*\*Larvas = semilla en el cultivo de crustáceos

### **2.3.3 Condiciones de cultivo en sistemas acuaponicos**

Si bien, la acuaponia se percibe como una solución potencial a la generación sustentable de alimentos, aún se tienen algunos desafíos por subsanar, éstos derivados de la complejidad de integración y generación de condiciones propicias para el crecimiento y desarrollo de sus componentes biológicos (peces, plantas y bacterias nitrificantes), lo cual aún impide obtener una alta productividad en los cultivos (Tyson *et al.*, 2011; Goddek *et al.*, 2015; Wortman, 2015).

En este sentido, las condiciones de cultivo de los sistemas acuapónicos se encuentran constituidas por elementos multifactoriales como: las características del agua (pH, temperatura, oxígeno disuelto, etc.), la densidad de cultivo, la alimentación y nutrición de las especies biológicas involucradas (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013).

#### **2.3.3.1 Agua**

La calidad de agua se ubica como uno de los factores determinantes en el correcto funcionamiento de los sistemas acuapónicos dado que, es el medio en el cual convergen las poblaciones de peces, plantas y bacterias (Munguia-Fragozo *et al.*, 2015; Estim *et al.*, 2018).

El pH, es un factor que interviene en distintos procesos de importancia a lo largo de un cultivo acuapónico; mediando el metabolismo de los peces, las actividades microbianas y la disponibilidad de nutrientes en las plantas (Kuhn *et al.*, 2010; Zou *et al.*, 2016; Blanchard *et al.*, 2020). Un pH oscilante entre 7-9 favorece el desarrollo de los peces y las bacterias; mientras que las plantas requieren de valores ligeramente más bajos (5.5–6.5) para la correcta absorción de nutrientes como: fósforo, zinc, hierro, manganeso, cobre, calcio, potasio y boro (Rakocy *et al.*, 2006; Zou *et al.*, 2016; Wongkiew *et al.*, 2017).

La temperatura, al igual que pH influye en los procesos efectuados por los tres tipos de organismos inmersos en los sistemas acuapónicos; condicionando el metabolismo de los peces en apetito y crecimiento de acuerdo con sus necesidades biológicas, peces tropicales a 22 - 32 °C y peces de agua fría a 10 - 18 °C (Li *et al.*, 2018);

Por su parte, las bacterias nitrificantes muestran un mejor desarrollo entre 25 - 30 °C y las plantas a temperaturas cercanas a 20 °C (Connolly & Trebic, 2010). De igual manera, se debe tener presente la relación inversamente proporcional entre la temperatura y el oxígeno disuelto, ya que, este último también condiciona los procesos biológicos del sistema (Xu *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2018).

El Oxígeno disuelto, de la misma manera que los factores anteriores tiene una influencia directa sobre los organismos presentes en el sistema acuapónico; siendo que, una baja concentración de oxígeno disuelto (menor a 2 mg/L) impide la correcta realización del proceso de nitrificación, lo que se traduce en una acumulación de compuestos nitrogenados que resultan ser tóxicos para los peces, a los cuales al igual que a las plantas la poca presencia de oxígeno (inferior a 5 mg/L) merma su desarrollo y compromete su sobrevivencia (Rakocy *et al.*, 2006; Kool *et al.*, 2010; Yavuzcan *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2018).

Compuestos nitrogenados, la presencia en altas concentraciones de estas distintas moléculas trae consigo una problemática para los peces y plantas presentes en los cultivos acuapónicos, mayoritariamente el caso del amonio cuya presencia en un valor mayor a 1 mg/L resulta perjudicial en el crecimiento y daño al tejido branquial de los peces; por su parte, los nitritos superiores a 1 mg/L impiden que la hemoglobina cumpla satisfactoriamente con su función como acarreadora de oxígeno y finalmente los nitratos a pesar de no causar grandes afectaciones en el desarrollo de los peces, su concentración cobra importancia al

ser la principal fuente de nitrógeno para las plantas (Hu *et al.*, 2015; Wongkiew *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018).

### **2.3.3.2 Densidad de cultivo**

La acuaponía, al igual que el resto de los sistemas de producción agroalimentaria, tiene con objetivo final el obtener la mayor rentabilidad posible de cada una de las unidades productivas, así es que, el determinar la densidad de cultivo apropiada es limitante en dicho objetivo; siendo que, el constituir el sistema con bajas densidades si bien favorece al manejo del cultivo limita el potencial de rendimiento por unidad productiva. En contra parte, el contar con una elevada densidad de cultivo implica una mayor complejidad en el manejo y funcionamiento de la unidad de producción (Palm *et al.*, 2014; Yavuzcan *et al.*, 2017).

Es así como la densidad de cultivo en un sistema acuapónico va a estar delimitada con base a las especies acuícola y vegetal elegidas para su inserción en dicho sistema, así como en los requerimientos biológicos propios de cada una de ellas (Sace & Fitzsimmons, 2013; Knaus & Palm, 2017). De este modo, la densidad de los peces contempla los requerimientos en la calidad del agua, como los hábitos alimenticios y territoriales de las especies (Connolly & Trebic, 2010; Hu *et al.*, 2015; García-Trejo *et al.*, 2016; Wongkiew *et al.*, 2017).

Por otra parte, para determinar la densidad de las plantas se tiene que tomar en cuenta la cantidad de nutrientes que estaría disponible a partir del flujo acuícola, así como la superficie y espacio requerido entre las plantas para la realización de sus procesos biológicos (Connolly & Trebic, 2010; Baßmann *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017).

### **2.3.3.3 Alimento y nutrientes**

Dentro de los sistemas de cultivo acuapónicos, la dinámica de los nutrientes es bastante compleja; siendo que, el alimento proporcionado a los peces funge como la fuente de nutrientes para los ellos, las bacterias nitrificantes y las plantas. El alimento seleccionado debe cumplir con los requerimientos nutricionales de la especie acuática y su manejo debe minimizar la cantidad de desechos y presencia de alimento no consumido. Los residuos de alimentación de los peces y demás sustancias de desecho en el agua sirven como nutrientes de las bacterias presentes, las cuales tras el proceso de nitrificación ponen a disposición de las plantas los nutrientes requeridos (Graber & Junge, 2009; Liang & Chien, 2013; Hu *et al.*, 2015; Knaus & Palm, 2017). No obstante, un déficit de nutrientes en las plantas puede ser remediado con la adición de estos, lo cual mayoritariamente acontece en los actuales sistemas acuapónicos (Fageria *et al.*, 2009; Graber & Junge, 2009; Goddek *et al.*, 2015; Sandoval *et al.*, 2020)

#### **2.3.3.4 Especie acuática**






En lo que confiere a la inserción del organismo acuático, muchas de las especies son potencialmente aplicables a los sistemas acuapónicos; sin embargo, las especies de peces más comunes son la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), la trucha arcoíris (*Onchorynchus mykiss*), la carpa común (*Cyprinus carpio*) y el bagre africano (*Clarias gariepinus*), debido a su capacidad de tolerar y adaptarse a condiciones adversas en su medio de cultivo, como bajas temperaturas y altas concentraciones de compuestos nitrogenados, pese a las cuales presentan una tasa de conversión alimenticia y de crecimiento aceptable en cuanto a la rentabilidad del sistema (Baßmann *et al.*, 2017; Forchino *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017).

##### **2.3.3.4.1 *Oreochromis niloticus***

Es un pez de agua dulce originaria de África perteneciente a la familia de los cíclidos y en la actualidad se distribuye en gran parte de las regiones tropicales

del mundo. *O. niloticus* se ha convertido en una de las especies mayormente cultivadas gracias a su rápido crecimiento, siendo que soporta altas densidades, resiste condiciones ambientales adversas, tolera bajas concentraciones de oxígeno (Forchino *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017). Su cuerpo es comprimido y discooidal, poseen una mandíbula ancha, a menudo bordeada por labios gruesos con dientes cónicos y en algunas ocasiones incisivos, en otros casos puede presentar un puente carnoso (freno) que se encuentra en el maxilar inferior, en la parte media debajo del labio; para su locomoción cuenta con aletas pares (aleta pectoral y ventral) e impares (aleta dorsal, caudal y la anal) (Morales, 2003).

Cuadro 2.2 Ciclo biológico de *Oreochromis niloticus* (Cantor, 2007).

Etapa		Características
Huevo		Es el periodo cuando la hembra pone los huevos fecundados
Larva		Etapa del desarrollo subsecuente a la eclosión, dura entre 3 a 5 días, se caracteriza por tener un tamaño de 0.5 a 1 cm y posee un saco vitelino en el vientre que es de donde se alimenta los primeros días de nacido.
Alevín		En esta etapa los peces han absorbido completamente el saco vitelino y comienzan a aceptar alimento balanceado, alcanzando una talla de 1 a 5 cm de longitud
Juvenil		Es la fase en la que se culmina el proceso de formación física, donde los peces cuentan con una talla que varía entre 5 y 10 cm.
Adulto		Es la última etapa del desarrollo de los peces, presentando tallas entre 10 y 28 cm.

*O. niloticus* cuenta con un ciclo de vida delimitado por 5 etapas: huevo, larva, alevín, juvenil y adulto (Cuadro 2.2), siendo reconocidas por su habilidad de madurar sexualmente a temprana edad (Benitez-Jaime *et al.*, 2015). La reproducción inicia con la preparación de nidos por parte de los machos, los cuales son construidos en lo profundo de los cuerpos de agua, siendo utilizados para cortejar a las hembras, las cuales depositan sus huevos en el nido para ser

fertilizados por el macho, posteriormente son retomados por la hembra en su boca donde son incubados aproximadamente por 5 días hasta su eclosión (Shelton & Popma, 2006; Hsien-Tsang & Martin, 2008); las larvas permanecen con su madre por un período adicional de 5 a 7 días, tiempo en el cual se alimentan de su saco vitelino; posteriormente, ya siendo alevines, peces jóvenes y adultos se alimentan con una dieta variada, pudiendo ser plancton, detritos y pequeños invertebrados (Sánchez-Muros *et al.*, 2014).

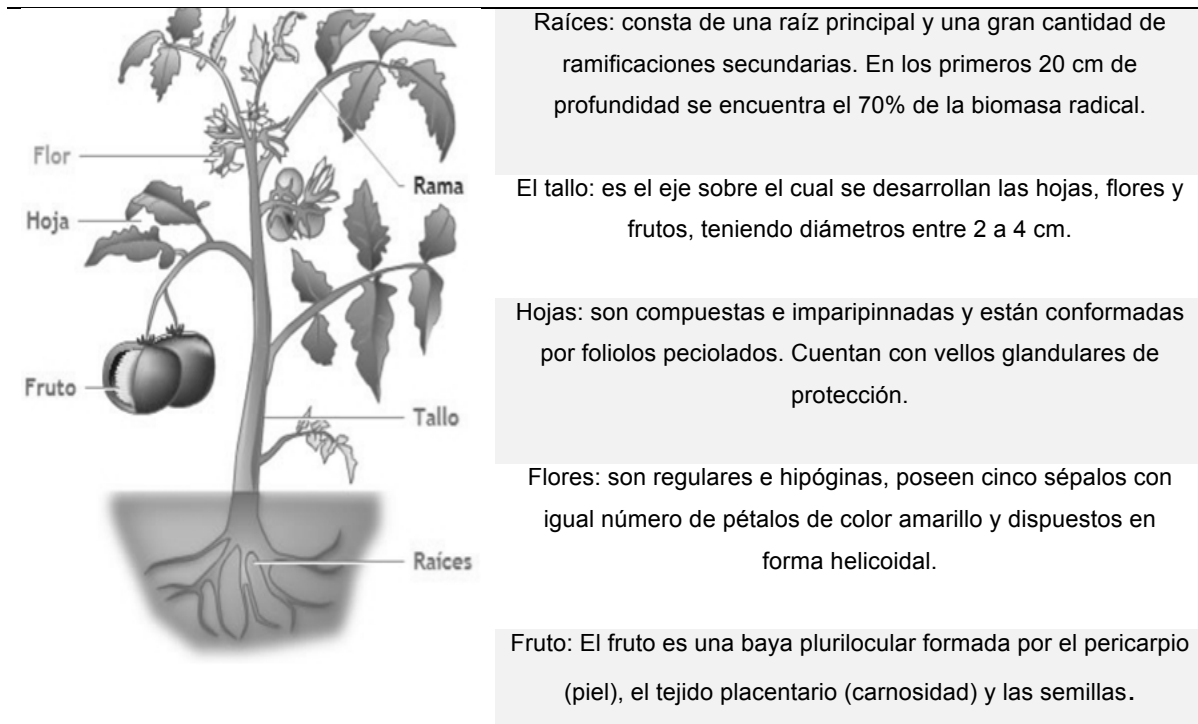
### **2.3.3.5 Especie vegetal**

La gran mayoría de los organismos vegetales que han sido empleados en hidroponía tienen la capacidad de adaptarse al desarrollo y crecimiento en sistemas acuapónico, teniéndose la opción de especies con baja demanda de nutrientes como la lechuga (*Lactuca sativa*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y espinaca (*Spinacia oleracea*), así como aquellos que al tener una generación de frutos demandan una mayor concentración de nutrientes como el jitomate (*Solanum lycopersicum*), pimiento (*Capsicum annuum*) y pepino (*Cucumis sativus*) con los cuales se obtiene aceptables cantidades de producción (Sace & Fitzsimmons, 2013; Goddek *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Knaus & Palm, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017).

#### **2.3.3.5.1 *Solanum lycopersicum***

El jitomate es una planta que se cultiva de forma anual (Cuadro 2.2), pudiendo desarrollarse de forma erecta, rastrera o semirrecta, las plantas de jitomate se desarrollan bien en un amplio rango de latitudes, tipos de suelos, temperaturas y métodos de cultivo, y es moderadamente tolerante a la salinidad prefiriendo ambientes cálidos, con buena iluminación y drenaje (Sace & Fitzsimmons, 2013; Goddek *et al.*, 2015).

Cuadro 2.3 Morfología de *Solanum lycopersicum* (Fiorco *et al.*, 2012).



Existiendo variedades de crecimiento determinado, cuyo porte es bajo y con producción precoz, caracterizándose por la formación de las inflorescencias en el extremo del ápice, y variedades de crecimiento indeterminado que pueden llegar a alturas de más de dos metros, con inflorescencias laterales y alternadas (Castillo *et al.*, 2014).

### 2.3.4 Estrés en sistemas acuapónicos

En lo que respecta a estudios relacionados con el estrés generado en los sistemas de cultivo acuapónico y el efecto correspondiente sobre los procesos fisiológicos de las especies involucradas en dichos cultivos, la información aún es incipiente; destacando trabajos enfocados en las consecuencias de altas densidades de siembra reflejadas en la especie acuática (Segner *et al.*, 2012; Mancuso, 2013; Davidson *et al.*, 2014; Baßmann *et al.*, 2017). Los anclajes de dichos estudios son limitados al no considerar los efectos generados en la especie vegetal, siendo que es de gran importancia el pleno conocimiento de íntima



relación que guardan los organismos co-cultivados; así como el intermediario entre ellos (bacterias). Lo anterior con el objetivo de potencializar este tipo de sistemas de cultivo a una mayor escala comercial e intensidad productiva garantizando el abastecimiento alimenticio y la generación de productos de calidad (Yavuzcan *et al.*, 2017).

#### **2.3.4.1 Estrés en *Oreochromis niloticus***

Si bien las tilapias cuentan con alta capacidad de adaptación a entornos con condiciones adversas, existe un punto de inflexión donde su fisiología se ve afectada ante la presencia de agentes estresores. La mayoría de los agentes causantes de estrés para las tilapias se encuentran ligados a las características del agua. La variación en la temperatura aumenta o disminuye el metabolismo de las tilapias (Li *et al.*, 2018), con lo cual se modifica el consumo de oxígeno (Yavuzcan *et al.*, 2017); mismo que debe situarse por arriba de los 3 mg/L, en caso contrario se disminuye el crecimiento al igual que la respuesta inmune y puede ocasionar la muerte. Al igual que los factores anteriores, el pH influye en los procesos de crecimiento y respiración (Kuhn *et al.*, 2010); misma situación que ocurre con la concentración excesiva de compuestos nitrogenados en el agua (Yavuzcan *et al.*, 2017).

De manera general, las respuestas de estrés en la tilapia pueden ser monitoreadas por la presencia de hormonas en la sangre, activación de señales bioquímicas y a través del funcionamiento biológico (Aparicio-Simón *et al.*, 2010; Shinji *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2015). Asimismo en variaciones presentes en procesos fisiológicos como la respiración, la alimentación y el crecimiento es posible evaluar la condición de estrés a la cual los peces pudieran estar expuestos (Barandica & Tort, 2008; Ibañez *et al.*, 2017).

#### **2.3.4.2 Estrés en *Solanum lycopersicum***

Pese a que las plantas de jitomate son capaces de crecer bajo distintas condiciones climáticas, existen una serie de factores estresantes que detonan una serie de respuestas fisiológicas que afectan su ciclo biológico (Florido & Álvarez, 2015). Es así que factores como la disponibilidad de agua, los nutrientes provistos en el suelo y la temperatura del ambiente activan mecanismos de defensa a nivel molecular, celular y morfológico (Peleg *et al.*, 2011). Las situaciones de estrés a las que están expuestos los organismos vegetales inciden en todas las etapas de su ciclo de vida, pudiendo ir desde impedir la germinación y emergencia de las plántulas, limitar el crecimiento radicular y arbóreo, afectar la estructuras reproductivas y de floración lo que merma su producción (Comlekcioglu *et al.*, 2010; Bitá *et al.*, 2011; Nahar & Gretzmacher, 2011; Florido & Fundora, 2014).

Al igual que en otros seres vivos es posible monitorear las respuestas de las plantas de jitomate ante situaciones de estrés, pudiendo realizarse desde los niveles molecular (mediante de factores de transcripción de regulan la expresión de genes que codifican proteínas de protección), morfológicos (caída de hojas, tallos y frutos así como senescencia folicular) y fisiológico (afecciones en la fotosíntesis, la transpiración, la conductancia estomática y el crecimiento) a manera de informar la exposición a estrés en la cual se pudieran encontrar (Florido *et al.*, 2002; Wahid *et al.*, 2007; Basurto Sotelo *et al.*, 2008; Florido & Álvarez, 2015; Okunlola *et al.*, 2017).

### III. Hipótesis y objetivos

#### 3.1 Hipótesis

Las condiciones de cultivo inherentes a los sistemas de producción intensiva promueven alteraciones en los organismos involucrados. Es así que, en cultivos acuapónicos intensivos de modalidad escalonada y por lotes, los organismos involucrados presentarán distintos niveles de concentración en sus indicadores de estrés. Asimismo, se tendrán variaciones en sus procesos de alimentación, crecimiento y desarrollo. Igualmente se afectará el rendimiento y calidad comercial de los productos en relación con un cultivo acuícola e hidropónico.

#### 3.2 Objetivo general

Determinar el efecto del estrés debido a la modalidad de cultivo sobre el comportamiento de las variables fisiológicas de relevancia productiva en *Oreochromis niloticus* y *Solanum lycopersicum* en un sistema acuapónico intensivo; así como los rendimientos y calidad comercial de los productos.

#### 3.3 Objetivos particulares

- Determinar los niveles de concentración de indicadores de estrés en *O. niloticus* y *S. lycopersicum* durante un cultivo acuapónico intensivo escalonado y por lotes.
- Evaluar las variaciones fisiológicas en los procesos de alimentación, crecimiento y desarrollo de *O. niloticus* y *S. lycopersicum* a lo largo de un ciclo de cultivo acuapónico intensivo escalonado y por lotes.
- Evaluar el rendimiento y calidad comercial de *O. niloticus* y *S. lycopersicum* al final del ciclo de cultivo acuapónico intensivo frente a los sistemas acuícola e hidropónico en función de las variables monitoreadas.

## IV. Metodología

El presente trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Querétaro, Qro. (20°38'43.3"N 100°25'10.3"W, 1980 m.s.n.m); la figura 4.1 resume las etapas al interior de la presente investigación.



Figura 4.1 Esquema de las etapas del trabajo experimental.

### 4.1 Establecimiento de los sistemas experimentales

La construcción de los sistemas se llevó en un área de 100 m<sup>2</sup> al interior de una estructura de invernadero (calibre 720). De manera puntal el trabajo experimental (cultivo) se llevó a cabo durante en periodo comprendido entre los meses de mayo a octubre.

#### 4.1.1 Montaje y monitoreo de sistemas

Se utilizaron 4 sistemas, cada uno integrado por 6 estanques de 100 L de capacidad, un filtro mecánico-biológico (módulo acuícola) y 4 camas de sustrato de 5.0 x 0.25 m con una superficie de 1.25 m<sup>2</sup> (módulo hidropónico) (Figura 4.2).



Figura 4.2 Sistemas implementados para los cultivos experimentales

Los 2 sistemas destinados a los cultivos acuaponicos estuvieron integrados por 6 estanques de plástico (cada uno con 100 L de capacidad) conectados entre sí mediante tubería de PVC de 1" llevando el agua al filtro; para posteriormente ser reincorporada a los estanques con una tasa de recambio de 50 L/min. El 90 % del volumen diario de agua se reincorporó directamente; mientras que el porcentaje

restante era dirigido a un reservorio, donde se realizaba el ajuste de pH a un valor de 6 para el riego de las camas de sustrato (Delaide *et al.*, 2019; Blanchard *et al.*, 2020). Finalmente, se realizó la recolección de agua de las camas de sustrato mediante bandejas plásticas reincorporando el líquido a los estanques (figura 4.3).

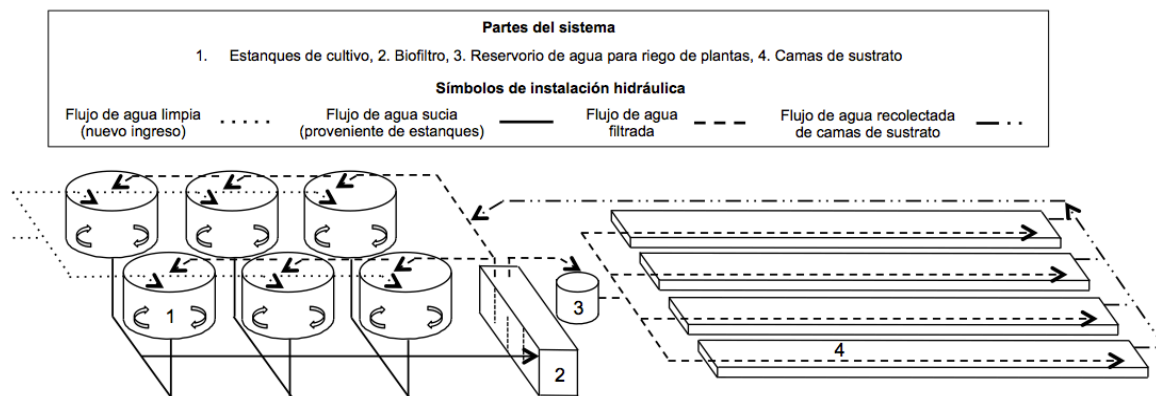


Figura 4.3 Esquema de los sistemas acuaponicos (módulos acuícola y hortícola conectados).

Por otra parte, los 2 sistemas restantes presentaron la misma conformación, excepto que los módulos acuícola e hidropónico no estuvieron vinculados. Siendo que estos sistemas fueron destinados a cultivos independientes de peces y plantas (figura 4.4).

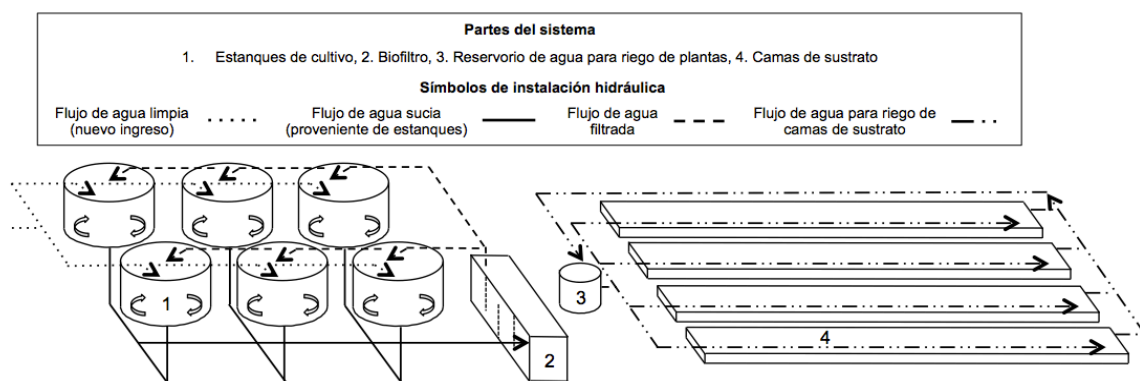


Figura 4.4 Esquema de los sistemas con módulos acuícola y hortícola independientes.

Una vez montados en su totalidad los 4 sistemas, fueron puestos en marcha durante un periodo de 15 días, donde se valoró el correcto funcionamiento

de los equipos instalados (bombas de agua, filtros, aireadores, etc.), así como la operación general del sistema, previo a la introducción de los organismos biológicos.

El agua presente en el módulo acuícola en cada sistema fue monitoreada en las variables de: oxígeno disuelto, pH y temperatura utilizando el equipo Hach® HQ40d, siendo medidas todos los días del experimento directamente en los estanques; mientras que los compuestos de nitrógeno fueron determinados por el Espectrofotómetro Hach® DR6000 a través del método 8039 para nitratos, 8507 para nitritos y 8038 para amoníaco no ionizado, tomando muestras de agua semanalmente (García-Trejo *et al.*, 2016). Lo anterior con el objetivo de mantener las características del agua dentro de los valores requeridos en el cultivo de *O. niloticus* (cuadro 4.1) durante el periodo experimental. (Ingle de la Mora *et al.*, 2003; Ibrahim & Naggar, 2010).

Cuadro 4.1 Condiciones fisicoquímicas requeridas en el agua para el cultivo de *O. niloticus* (azaza et al., 2013; Mirea et al., 2013).

Variable	Valores de cultivo	
	Mínimo	Máximo
Temperatura (°C)	20	32
Oxígeno disuelto (mg/L)	4	10
pH	5	9
Nitratos (mg/L)	< 100	
Nitritos (mg/L)	< 5	
Amonio (mg/L)	< 2	

De la misma manera, se llevó a cabo el monitoreo del agua a incorporarse en las camas de sustrato (tanto en los sistemas acuaponicos y los módulos hidropónicos aislados) para verificar que se cumpliera con los valores de pH (cuando fue requerido se realizo el ajuste con la adición de ácido cítrico), oxígeno disuelto (equipo Hach HQ40d) y conductividad eléctrica (HANNA® HI 98130) requeridos en el cultivo de *S. lycopersicum* (Cuadro 4.2) (Putra & Yuliando, 2015).

Cuadro 3.2 Condiciones fisicoquímicas requeridas en el agua para el cultivo de *S. lycopersicum*. (Mercado-Luna, 2007)

Variable	Valores de cultivo	
	Mínimo	Máximo
Oxígeno disuelto (mg/L)	3	6
pH	5.5	7
Conductividad eléctrica (mS)	2	3

#### 4.1.2 Diseño experimental

Para determinar el comportamiento a condiciones de estrés de las variables fisiológicas de relevancia productiva de *O. niloticus* y *S. lycopersicum* en un cultivo acuapónico intensivo, se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro tratamientos durante un periodo de 180 días, los tratamientos consistieron en dos tipos de cultivo (acuaponico y acuícola-hidropónico) y dos modalidades de cultivo (escalonado y por lotes) (cuadro 4.3).

#### 4.1.3 Inserción y manejo de los organismos

Los ejemplares de *Oreochromis niloticus* fueron tomados de la unidad acuícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, ubicada en el municipio de El Marqués, Querétaro. Para el caso de los sistemas con modalidad de cultivo escalonado se emplearon peces en tres etapas productivas distintas (alevín, juvenil y adulto); mientras que para la modalidad de cultivo por lotes solo se comenzó empleando peces en la etapa de alevín (cuadro 4.4). Los organismos fueron alimentados cuatro veces al día con una dieta comercial de la marca Malta-Cleyton® (Cuadro 4.5); la cantidad de alimento suministrado se fue ajustando de acuerdo con las biometrías realizadas quincenalmente.



Cuadro 4.3 Particulares de los tratamientos evaluados dentro del cultivo acuapónico.

Tratamiento	Tipo de sistema	Modalidad de cultivo	Densidad proyectada de peces	Densidad de siembra plantas
AE	Acuapónico	Cultivo Escalonado	40 kg/m <sup>3</sup>	6 pz/m <sup>2</sup>
AHE	Acuícola-Hidropónico	Cultivo Escalonado	40 kg/m <sup>3</sup>	6 pz/m <sup>2</sup>
AL	Acuapónico	Cultivo por Lotes	40 kg/m <sup>3</sup>	6 pz/m <sup>2</sup>
AHL	Acuícola-Hidropónico	Cultivo por Lotes	40 kg/m <sup>3</sup>	6 pz/m <sup>2</sup>

Cuadro 4.4 Especificaciones de la inserción de *O. niloticus* en los tratamientos escalonados (AE y AHE) y por lotes (AL y AHL).

Tratamiento	Tipo de cultivo	Modalidad de cultivo	Numero de estanques y características de los peces ingresados (cantidad, etapa y talla)		
AE	Acuapónico	Escalonado	1 estanque con 48 alevines de 5.00 ± 0.10 g	2 estanques con 24 juveniles de 50.00 ± 5 g	3 estanques con 16 adultos de 150.00 ± 10 g
AHE	Acuícola-Hidropónico	Escalonado	6 estanques con 16 alevines de 5.00 ± 0.10 g		
AL	Acuapónico	Por lotes			
AHL	Acuícola-Hidropónico	Por lotes			

Cuadro 4.5 Especificaciones de las raciones y horarios de alimentación de los ejemplares de *O. niloticus* (modificado de autores)

Etapa del pez	Peso del pez (gramos)	Porcentaje de alimento suministrado	Horarios y ración de alimentación	Características del alimento		
				Diámetro de pellet (mm)	Cantidad de proteína (%)	Cantidad de lípidos (%)
Alevines	5 – 25	10		1.5	45	16
Alevines	25 – 50	8.0	8:00 am (15%)	2.5	45	16
Juveniles	51 – 100	5.0	11:00 am (30%)	2.5	45	16
Juveniles	101 – 150	3.5	2:00 pm (30%)	3.5	40	3.5
Adultos	151 – 200	2.5	5:00 pm (25%)	3.5	40	3.5
Adultos	201 – 250	2.0		4.5	35	3.5

Transcurridos los primeros 60 días del periodo experimental, al interior de los sistemas con modalidad de cultivo escalonado y como parte del manejo de los peces se realizaron los siguientes movimientos (figura 4.5):

- Los peces en etapa adulta (48) fueron retirados del sistema, una vez que alcanzaron la talla deseada de 250 gramos c/u aproximadamente.
- Los peces en etapa juvenil (48) fueron redistribuidos en 3 estanques (16 peces en c/u), una vez que ha alcanzado la talla deseada de 150 gramos c/u aproximadamente.
- Los peces en etapa de alevín (48) fueron redistribuidos en 2 estanques (24 peces en c/u), una vez que ha alcanzado la talla deseada de 50 gramos c/u aproximadamente.
- En el estanque libre nuevamente se ingresaron 48 peces de etapa alevín con 5 gramos c/u aproximadamente.

Los movimientos anteriores fueron repetidos los días 120 y 180 del experimento. Por otro lado, los peces de los sistemas con modalidad de cultivo por lotes se mantuvieron en los estanques que fueron ingresados al inicio del experimento.

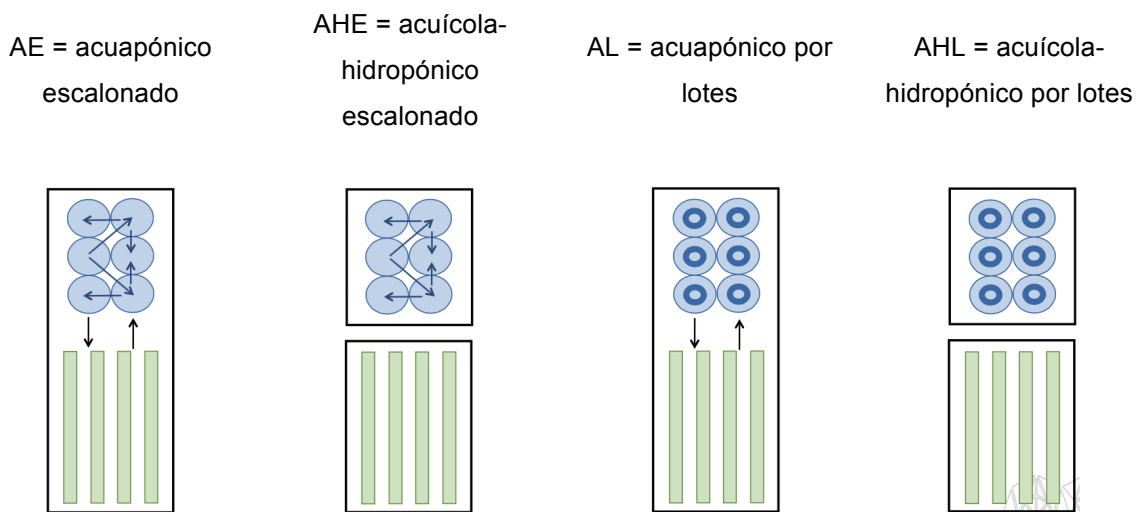


Figura 4.5 Esquema de los tratamientos

Para la obtención de las plantas de *Solanum lycopersicum* se utilizaron semillas de tomate variedad rio grande (germinadas en charola de unicel de 200

cavidades con peat moss como sustrato) cuyas características de cultivo son: densidad de siembra de 4 plantas por m<sup>2</sup>, crecimiento determinado, ciclo de 90 a 120 días y un rendimiento de 50 – 80 toneladas por hectárea (1.25 – 2 kg/planta). El riego se realizó diariamente con agua potable hasta la emergencia de la plántula, posteriormente se regó cada tercer día con solución fertilizante (cuadro 4.6) durante un periodo de seis semanas; para finalmente realizar el trasplante a los distintos sistemas plantas de entre 15 – 25 cm de altura, con una densidad de siembra de 6 plantas por m<sup>2</sup>, teniendo un total de 60 plantas por tratamiento (Sánchez-Del-Castillo *et al.*, 2014).

Cuadro 4.6 Tabla de la composición de la solución nutritiva empleada (Peters profesional 5-11-26 hydroponic special)







Nutriente	ppm
Nitrógeno (N)	150
Fósforo (P)	48
Potasio (K)	216
Magnesio (Mg)	31
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	125
Hierro (Fe)	3
Manganeso (Mn)	0.5
Zinc (Zn)	0.15
Cobre (Cu)	0.15
Boro (B)	0.5
Molibdeno (Mo)	0.1
Calcio (Ca)	116

El manejo de las plantas varió ligeramente de acuerdo a la etapa fenológica, teniendo las siguientes particulares (Flores *et al.*, 2007; Luna 2007):

- Etapa vegetativa: El riego se realizó por el goteo con un volumen diario de 1.5 L (por planta) divididos equitativamente en tres horarios (10:00, 14:00 y 16:00 h). Pasados 20 días posterior al trasplante y cuando la planta contaba con aproximadamente 30 cm de altura se comenzó con el tutoreo.

- Etapa de floración: El riego cambió a un volumen diario de 2.4 L (por planta) divididos equitativamente en los horarios mencionados anteriormente. El proceso de polinización se realizó de forma manual, sacudiendo las líneas de tutores diariamente entre las 10:00 y 12:00 h. Asimismo se comenzó con la poda de brotes axilares y de hojas.
- Etapa de fructificación: El riego cambió a un volumen diario de 3.6 L (por planta) divididos equitativamente en los horarios mencionados anteriormente. Se realizó el aclareo de frutos, dejando 6 frutos en cada uno de los racimos. De igual manera se continuó con la poda de brotes axilares y de hojas.
- Etapa de maduración: El riego cambió a un volumen diario de 2.4 L (por planta) divididos equitativamente en los horarios mencionados anteriormente. Se comenzó con el corte del fruto, cuando éste contaba con un grado 4 de madurez (cuadro 4.7). Los cortes se realizaron 2 veces por semana en un horario de 9:00 a 10:00 h.

Cuadro 4.7 Grados de madurez de tomate (Camelo, 2003).

Grados de madurez	Descripción	
1	La piel del tomate está completamente verde con tonalidades claras u oscuras (puede verse una estrella blanca en el extremo apical)	
2	10 % de la superficie del fruto con colores amarillos, anaranjados ó rojos	
3	10 al 30 % de la superficie del fruto con colores amarillos, anaranjados ó rojos	
4	30 al 60 % de la superficie del fruto tiene color rosado o rojo	
5	60 al 90 % de la superficie del fruto tiene color rosado o rojo	
6	Mas del 90 % de la superficie del fruto es color rojo	

## 4.2 Determinación de indicadores de estrés

Como indicadores de estrés en *Oreochromis niloticus*, se extrajeron y cuantificaron los niveles de cortisol y glucosa en sangre. Antes del muestreo, los peces se mantuvieron en ayunas durante 24 horas (Abdel-Tawwab *et al.*, 2005). El muestreo se realizó los días 60 (tomando 8 peces de 50 gramos aprox.), 120 (tomando 4 peces de 150 gramos aprox.) y 180 (tomando 2 peces de 250 gramos aprox.) del período experimental. Los peces fueron anestesiados con una solución de eugenol (100 mg/L) con un tiempo de exposición de 3 minutos (Santiago-Rucínque *et al.*, 2017).

Las muestras se tomaron de la vena caudal y se depositaron en un tubo con coagulante para centrifugar a 3500 rpm durante 15 minutos, tomando el plasma sanguíneo para su análisis. La concentración de cortisol se determinó mediante un kit ELISA de la marca Neogen®; mientras que la glucosa se determinó mediante el kit de pruebas analíticas de la marca Biodiagnostic® (Inoue *et al.*, 2008; Haraz *et al.*, 2018).

Por su parte, los indicadores de estrés en *Solanum lycopersicum* fueron la concentración de catalasa y fenoles totales presentes en hoja. El muestreo se realizó los días 60, 90 y 120 del período experimental; tomando como muestras todas las hojas retiradas mediante la poda en los días mencionados. Las hojas fueron secadas (45 °C durante 5 días) y molidas, para posteriormente tomar 0.3 g y homogeneizarse con 1 mL de buffer de fosfatos (0.1 M, pH 7.2) y centrifugar a 13 000 rpm durante 20 min a 4 °C. Los sobrenadantes se usaron para determinar las actividades enzimáticas (Parola-Contreras *et al.*, 2020).

La catalasa se midió a través del cambio de absorbancia a 240 nm durante 1 min, tomando 3 mL de extracto vegetal y 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.022 M; el blanco consistió en 3 ml de fosfato de potasio (0.05 M y pH 8) y 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Mejía-teniente *et al.*, 2013). De igual manera se empleó el extracto vegetal para

cuantificar el contenido de proteína a través del método de Bradford y con ello determinar la actividad específica de la catalasa expresada como  $\mu\text{mol}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  oxidado por  $\text{mg}$  de proteína por minuto ( $\mu\text{mol}/\text{mg}$  proteína/min).

El contenido de fenoles totales se determinó tomando 2 mL del extracto vegetal con 0.4 mL de solución metanol:cloroformo:agua (2:1:1) para su centrifugación a 2200 rpm durante 15 minutos. Posteriormente se tomó el sobrenadante y se adicionaron 10 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (10 % m/v), seguido de un calentamiento durante 15 min a 38 °C, al término de cual se tomará 1 mL de la solución junto a 1mL de reactivo Folin-Ciocalteu dejando reposar en oscuridad durante 15 minutos. Como paso final se realizó la lectura en espectrofotómetro a 760 nm, expresando el resultando en  $\mu\text{g}$  de GAE / g de muestra tomando como referencia una curva estándar de ácido gálico (Arab *et al.*, 2019).

### 4.3 Evaluación de las variables fisiológicas

Para realizar las evaluaciones correspondientes a las variaciones fisiológicas presentes en cada uno de los tratamientos establecidos, se realizaron muestreos de manera quincenal a lo largo del periodo experimental (180 días), para lo cual se tomó una muestra representativa con forme a la fórmula 1 en cada uno de los días de muestreo (Liu, 2009; Arya *et al.*, 2012).

$$\text{a) Tamaño de muestra} = \frac{\frac{(Z^2)(p)(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{(Z^2)(p)(1-p)}{(e^2)(N)}} \quad (1)$$

Donde: Z es la cantidad de desviaciones estándar que se alejan de la media,  $p$  es el nivel de confianza expresado en decimales,  $e$  el margen de error expresado en decimales y N es el tamaño de la población.

#### 4.3.1 Evaluación del proceso de alimentación en *O. niloticus*

Para la evaluación del proceso de la alimentación de *O. niloticus* se consideraron como variables: la ganancia de peso total, la ganancia de peso diaria, el factor de conversión alimenticia, así como la eficiencia proteica (Abdel-Tawwab *et al.*, 2010; Haidar *et al.*, 2018).

b) Ganancia de peso total  $GPT (g) = P_f - P_i$  (2)

Donde:  $P_f$  es el peso final y  $P_i$  es el peso inicial

c) Ganancia de peso diaria  $GPD (g) = \frac{P_f - P_i}{t}$  (3)

Donde:  $P_f$  es el peso final,  $P_i$  es el peso inicial y  $t$  es el tiempo en días

d) Factor de conversión alimenticia (4)

FCA= gramos de alimento consumido /gramos de incremento en biomasa

e) Eficiencia proteica (5)

EP= gramos de incremento de biomasa/gramos de proteína ingerida

#### 4.3.3 Evaluación del proceso de crecimiento en *O. niloticus* y *S. lycopersicum*.

Dentro de la evaluación del crecimiento por parte de *O. niloticus* se establecieron como variables: la tasa específica de crecimiento, tasa de sobrevivencia y factor de condición (M'balaka *et al.*, 2013; García-Trejo *et al.*, 2016).

f) Tasa específica de crecimiento  $TEC = \frac{(\ln P_f - \ln P_i)}{t}$  (6)

Donde:  $\ln P_f$  es el logaritmo natural del peso final,  $\ln P_i$  es el logaritmo natural del peso inicial y  $t$  es el tiempo en días.

g) Tasa de sobrevivencia  $TS (\%) = \frac{\text{Número final de animales}}{\text{Número inicial de animales}} \times 100$  (7)

h) Factor de condición  $FC = \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Longitud en centímetros}^3} \times 100$  (8)

Las variables evaluadas para *S. lycopersicum* fueron: la altura de la planta, peso seco (retirando 4 plantas en cada momento de medición: floración, fructificación y cosecha), tasa de crecimiento relativa y tasa de sobrevivencia (De la Rosa *et al.*, 2016).

i) Altura de la planta  $AP \text{ (cm)} = A_f - A_i$   
 Donde:  $A_f$  es la altura final y  $A_i$  es la altura inicial (9)

j) Peso seco  $PS \text{ (g)} = \text{peso de la planta posterior a inserción a un deshidratador durante 72 horas a } 70^\circ\text{C}$  (10)

k) Tasa de crecimiento relativa  $TCR = \frac{(\ln PS_f - \ln PS_i)}{t}$   
 Donde:  $\ln PS_f$  es el logaritmo natural del peso seco final y  $\ln PS_i$  es el logaritmo natural del peso seco inicial (11)

l) Tasa de sobrevivencia  $TS \text{ (\%)} = \frac{\text{Número final de plantas}}{\text{Número inicial de plantas}} \times 100$  (12)

#### 4.3.4 Evaluación del proceso de desarrollo en *S. lycopersicum*.

En lo que concierne a la evaluación del proceso de desarrollo por parte de *S. lycopersicum* se tuvieron como indicadores el área foliar (a partir de las hojas retiradas por las podas y considerando la presentes en planta), índice de área foliar, área foliar específica, tasa de asimilación neta y crecimiento del cultivo (Bastida, 2012; Li *et al.*, 2019).

m) Área foliar  $AF \text{ (cm}^2\text{)}$ : Se determinó empleando la aplicación Easy Leaf Area desarrollada por Easlon & Bloom en 2014.



$$n) \text{ Índice de área foliar } \quad IAF = \frac{AF}{AS}$$

Donde: AF es el área foliar expresada en m<sup>2</sup> y AS es la superficie de suelo en m<sup>2</sup> (13)

$$o) \text{ Área foliar específica } \quad AFE = \frac{AF}{PS}$$

Donde: AF es el área foliar en cm<sup>2</sup> y PS es el peso seco en gramos (14)

$$p) \text{ Tasa de asimilación neta } \quad TAN \text{ (g/cm}^2\text{día)} = \frac{(PS_2 - PS_1)(\ln AF_2 - \ln AF_1)}{(T_2 - T_1)(AF_2 - AF_1)}$$

Donde: PS<sub>2</sub>, PS<sub>1</sub> es el peso seco final e inicial de la planta; lnAF<sub>2</sub>, lnAF<sub>1</sub> logaritmo natural del área foliar final e inicial; T<sub>2</sub>, T<sub>1</sub> tiempo en días; AF<sub>2</sub>, AF<sub>1</sub> área foliar final e inicial. (15)

$$q) \text{ Tasa de crecimiento del cultivo } \quad TCC \text{ (g/cm}^2\text{día)} = \frac{(1)(PS_2 - PS_1)}{(AS)(T_2 - T_1)}$$

Donde: PS<sub>2</sub>, PS<sub>1</sub> es el peso seco final e inicial de la planta AS es la superficie de suelo en cm<sup>2</sup>; T<sub>2</sub>, T<sub>1</sub> tiempo en días. (16)

#### 4.3.5 Análisis estadístico

El análisis de datos se realizó mediante el software JMP® (9.0.1). Los datos recogidos para cada una de las variables se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) expresando los resultados como media ± desviación estándar. Asimismo, se realizó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

### 4.4 Evaluación del rendimiento y calidad

#### 4.4.1 Rendimiento

El rendimiento de un cultivo es definido como la cantidad de biomasa generada en un espacio determinado, pudiendo ser ligado a un periodo de tiempo; es así que, esta variable fue expresada como se muestra a continuación.

$$r) \text{ } O. \textit{niloticus}: \text{ Ren-O} = \frac{\text{kilogramos de tilapia}}{m^3} \quad (17)$$

$$s) \text{ } S. \textit{lycopersicum}: \text{ Ren-S} = \frac{\text{kilogramos de tomate}}{m^2} \quad (18)$$

#### 4.4.2 Calidad

Para evaluar la calidad de *O. niloticus* se tuvieron como variables el contenido de humedad (determinada por el método AOAC 925.23), proteína (determinada por el método Kjeldahl AOAC 925.15), lípidos (determinados por el método Soxhlet AOAC 920.39), cenizas (determinadas por el método AOAC 945.46) y carbohidratos (determinados por diferencia a partir de los componentes de proteína, grasa, cenizas y humedad) presentes en el músculo (filete) de dicho organismo (Wortman, 2015).

$$t) \text{ Carbohidratos} \quad (19)$$

$$\% = 100 - (\% \text{ de humedad} + \% \text{ de proteínas} + \% \text{ de lípidos} + \% \text{ de cenizas})$$

Por su parte la evaluación de la calidad de *S. lycopersicum* se tomaron muestras aleatorias de los frutos cosechados, consideraron como variables: el pH, los sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), la relación SST/AT y cantidad de licopeno (San Marín-Hernández *et al.*, 2012; Schmutz *et al.*, 2016; Delgado-Díaz *et al.*, 2019; Sandoval *et al.*, 2020).

Para la determinación del pH se tomaron 20 g de jitomate para licuarse con 50 mL de agua destilada y filtrarse con papel Wathman N°42; posteriormente se aforó a 100 mL para su medición con un potenciómetro digital (Reyes-Flores *et al.*, 2020). Los sólidos solubles totales fueron medidos empleando un refractómetro digital para análisis de grados Brix (Generic Home019) en alimentos (Reyes-Flores *et al.*, 2020). La acidez titulable se midió usando NaOH 0.1N y fenolftaleína como indicador, expresando los resultados como % de ácido cítrico (Galiotta *et al.*, 2005).

El contenido de licopeno se midió mezclando 0.5 g de pulpa con 50 mL de solución hexano:acetona:etanol (2:1:1) agitándose durante 10 minutos, seguido de la incorporación de 7.5 mL de agua destilada con nueva agitación de 5 minutos, tomándose una muestra del sobrenadante para su lectura en espectrofotómetro a 503 nm, expresando el resultando en mg/100 g (Fish *et al.*, 2002).

u) Concentración de licopeno: 
$$\text{licopeno} = \frac{A_{503 \text{ nm}} \times 3.1}{\text{g de pulpa}} \quad (20)$$

#### **4.4.3 Análisis estadístico**

El análisis de datos se realizó mediante el software JMP® (9.0.1). Los datos recogidos para cada una de las variables se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) expresando los resultados como media  $\pm$  desviación estándar. Asimismo, se realizó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

## V. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1 Monitoreo de calidad de agua

Durante los 180 días de experimentación los valores obtenidos en el monitoreo de la calidad del agua estuvieron dentro de los rangos de tolerancia para el cultivo de *O. niloticus* (Cuadro 5.1). La temperatura tuvo su oscilación por debajo del valor óptimo de 28 °C (Azaza *et al.*, 2008), sin presentar diferencias significativas entre los tratamientos; descartando su interferencia como factor limitante. La concentración de oxígeno disuelto (OD) tuvo una disminución a lo largo de las etapas de desarrollo (alevín, juvenil y adulto); esto se explica por el aumento de biomasa total en cada uno de los tanques, lo cual conlleva mayor consumo de oxígeno (Valbuena-Villareal *et al.*, 2006; Tomalá *et al.*, 2014). Por lo que se puede inferir que el OD no limitó el desarrollo de los peces.

Cuadro 5.1 Calidad del agua en los estanques de peces en los diferentes tratamientos. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental.

Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Valores de cultivo	AE	AHE	AL	AHL
Temperatura (°C)	20 – 32	24.1 $\pm$ 1.1 <sup>a</sup>	23.7 $\pm$ 1.4 <sup>a</sup>	24.3 $\pm$ 1.5 <sup>a</sup>	23.9 $\pm$ 1.3 <sup>a</sup>
Oxígeno disuelto (mg/L)	4 -10	6.81 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>	6.73 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>	6.85 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	6.62 $\pm$ 0.32 <sup>a</sup>
pH	5 – 9	7.8 $\pm$ 0.5 <sup>a</sup>	8.1 $\pm$ 0.6 <sup>a</sup>	7.9 $\pm$ 0.6 <sup>a</sup>	8.2 $\pm$ 0.6 <sup>a</sup>
Nitratos (mg/L)	< 100	21.05 $\pm$ 3.84 <sup>b</sup>	32.02 $\pm$ 3.03 <sup>a</sup>	20.25 $\pm$ 2.73 <sup>b</sup>	34.67 $\pm$ 3.59 <sup>a</sup>
Nitritos (mg/L)	< 5	1.13 $\pm$ 0.76 <sup>b</sup>	2.92 $\pm$ 0.85 <sup>a</sup>	1.84 $\pm$ 0.68 <sup>ab</sup>	3.33 $\pm$ 0.71 <sup>a</sup>
Amonio (mg/L)	< 2	0.81 $\pm$ 0.13 <sup>c</sup>	1.19 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.74 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	1.67 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

En cuanto a los compuestos nitrogenados, los valores obtenidos estuvieron por debajo de los niveles tóxicos para el cultivo de tilapia (Azaza *et al.*, 2013; Mirea *et al.*, 2013). La menor concentración de amonio y nitritos se presentaron en los sistemas acuaponicos (AE y AL); lo anterior se atribuye a la

complementariedad entre los biofiltros y el sustrato de las plantas para la remoción de dichos compuestos (Calone *et al.*, 2019). En contra parte, las mayores concentraciones de amonio y nitrito se dieron en los tratamientos con los módulos independientes (AHE y AHL) que carecen de la sinergia entre los componentes de depuración de ambos módulos. La concentración de nitrato presentó un comportamiento similar, siendo mayor en los tratamientos con módulos independientes (AHE y AHL) y menor en los sistemas acuapónicos (AE y AL), lo cual está relacionado directamente con el consumo del nitrato como nutriente por parte de las plantas (Reyes-Flores *et al.*, 2016).

Con respecto al agua de riego para las plantas de *S. lycopersicum*, los valores obtenidos estuvieron dentro de los rangos de tolerancia para las variables monitoreadas; sin embargo, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 5.2). El oxígeno disuelto fue mayor en los tratamientos acuapónicos (AE y AL), pudiendo relacionarse con la perturbación diaria en el reservorio de agua para riego, debido a la entrada de agua del módulo de los peces. Asimismo, se podría vincular la renovación diaria de agua (en AE y AL) con los mayores valores de pH.

Cuadro 5.2 Calidad del agua en los reservorios de riego para las plantas en los diferentes tratamientos. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Valores de cultivo	AE	AHE	AL	AHL
Oxígeno disuelto (mg/L)	3 - 6	4.82 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	3.54 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>	4.35 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	3.68 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>
pH	5 - 7	6.7 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	5.8 $\pm$ 0.2 <sup>b</sup>	6.6 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	5.6 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>
Conductividad eléctrica (mS)	1.5 - 2.5	2.2 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.7 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	2.1 $\pm$ 0.03 <sup>ab</sup>	1.6 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

En cuanto a la conductividad eléctrica, si bien los cuatro tratamientos se mantuvieron en los rangos requeridos, los valores presentes en AE y AL indican una mayor salinidad. Por lo anterior, la absorción de nutrientes por parte de las plantas de dichos tratamientos pudiera haber sido menor a la ocurrida en AHE y AHL (Suhl *et al.*, 2016) permitiendo explicar parte del menor rendimiento en la producción de AE y AL (cuadro 5.11).

## 5.2 Indicadores de estrés

En el caso de la especie animal, los niveles de cortisol mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 5.1); presentando un incremento a través de las etapas de desarrollo.

Durante la etapa de alevin, todos los valores estuvieron dentro del rango normal reportado (5 - 60 ng/mL) para *O. niloticus* (Barreto & Volpato, 2006); sin embargo, los tratamientos con modalidad escalonada presentaron las mayores concentraciones de cortisol (AE =  $10.81 \pm 0.85$  y AHE =  $11.93 \pm 0.59$  ng/mL). Lo anterior podría relacionarse a la densidad de población (ya que en estos tratamientos la densidad promedio fue de 2.39 kg / 100 L; mientras AL y AHL 0.86 kg / 100 L); así como la eventual competencia por espacio y alimento (Ellis *et al.*, 2002). Por otra parte, la diferencia presente entre los tratamientos por lote (AL =  $5.37 \pm 0.42$  y AHL =  $6.82 \pm 0.78$  ng/mL) se vincula a la calidad de agua en cada tratamiento (cuadro 5.1); esto a su vez se atribuye a la depuración complementaria por parte de las plantas presentes en AL (Calone *et al.*, 2019).

En cuanto a la etapa juvenil, los valores de cortisol también se mantuvieron por debajo del límite superior reportado (60 ng/mL); manteniendo el mismo comportamiento que en alevines. Es decir, la mayor concentración se presentó en AE ( $54.98 \pm 3.09$  ng/mL) y AHE ( $58.27 \pm 2.95$  ng/mL); coincidiendo nuevamente una mayor densidad de población en estos tratamientos (AE = 3.17, AHE = 2.88 AL = 2.17 y AHL = 1.87 kg / 100 L). Finalmente, en la etapa adulta, los valores de

cortisol en todos los tratamientos (AE =  $109.12 \pm 9.64$ , AHE =  $129.89 \pm 7.81$ , AL =  $103.22 \pm 8.15$  y AHL =  $143.54 \pm 10.85$  ng/mL) superaron el rango normal (5 - 60 ng/mL).

Lo anterior puede atribuirse en primera instancia al estrés relacionado con la biomasa en los tanques de cultivo; siendo que la densidad de cada tratamiento estuvo cercana a 4 kg / 100 L ( $40 \text{ kg/m}^3$  que corresponde a un cultivo intensivo) al momento de la medición de los tratamientos (AE = 3.56, AHE = 3.36, AL = 3.63 y AHL = 3.19 kg / 100 L). No obstante, los tratamientos acuapónicos presentaron los menores valores; haciendo suponer que la sinergia entre los módulos de peces y plantas disminuye la presencia de factores estresantes que propician el aumento del cortisol en comparación con los tratamientos con módulos aislados.

Por otro lado, los niveles de glucosa también mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 5.2); mostrando un incremento a través de las etapas de desarrollo, vinculándose directamente con el aumento de cortisol; siendo que, la hormona (cortisol) contribuye a la biosíntesis de la glucosa (Abreu *et al.*, 2009).

En la etapa de alevines, los valores de todos los tratamientos estuvieron por debajo del límite normal reportado (<70 mg/dL) para *O. niloticus* (Kajimura *et al.*, 2003). La mayor concentración se presentó en AE y AHE ( $42.26 \pm 1.28$  y  $46.19 \pm 0.98$  mg/dL respectivamente), tratamientos que también presentaron los valores más altos de cortisol. Para el caso de la etapa juvenil, la relación entre la concentración de cortisol y glucosa se mantuvo; teniendo a AE y AHE con la mayor concentración de glucosa sin llegar a superar el límite normal (<70 mg/dL). Finalmente, en la etapa adulta las concentraciones de glucosa para los todos los tratamientos estuvieron por encima del límite normal (<70 mg/dL), lo que está directamente relacionado con los altos niveles de cortisol para esta etapa.

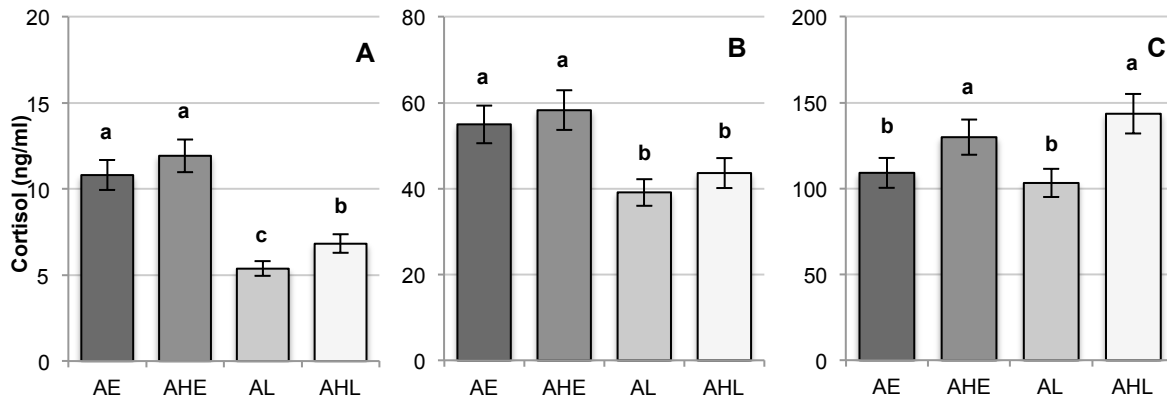


Figura 5.1 Concentraciones de cortisol para: AE (acuaponico escalonado), AHE (acuicola-hidroponico escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuicola-hidroponico por lotes) a los 60 (A), 120 (B) y 180 días (C). Los valores se presentan como medias  $\pm$  DE, las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) se indican con un superíndice diferente.

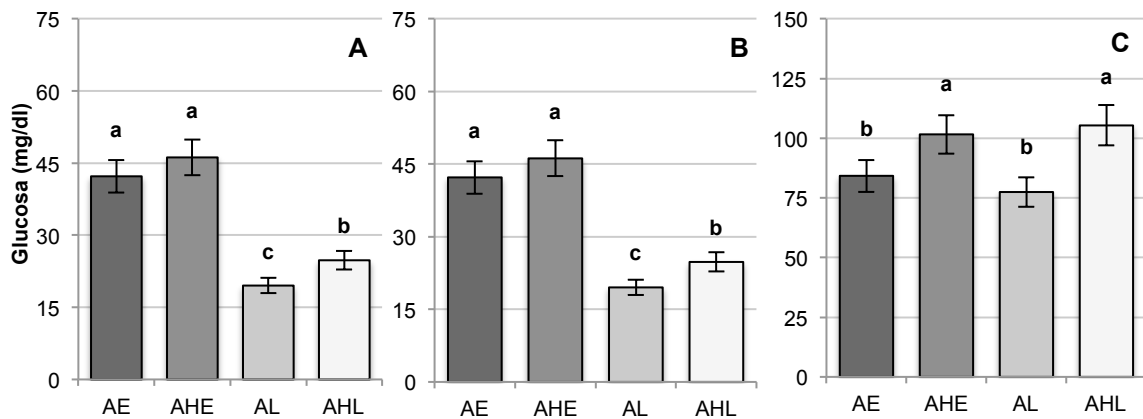


Figura 5.2 Concentraciones de glucosa para AE (acuaponico escalonado), AHE (acuicola-hortícola escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuicola-hortícola por lotes) a los 60 (A), 120 (B) y 180 días (C). Los valores se presentan como medias  $\pm$  DE, las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) se indican con un superíndice diferente.

Considerando tendencia de la concentración de colesterol y glucosa a lo largo de las diferentes etapas del cultivo (alevines, juveniles y adultos); se considera que la variación de la etapa fisiológica de los peces en conjunto con la densidad poblacional, la competencia por espacios y alimento, así como la calidad de agua provocan la estimulación del eje hipotalámico-pituitario suprarrenal, de



igual manera la expresión de genes relacionados con el transporte de glucosa, lo que explicaría la liberación creciente de cortisol y glucosa (Zeitoun *et al.*, 2017). De esta forma, en ambos casos se podría explicar la variación metabólica en los diferentes días de cultivo.

En lo que concierne a la especie vegetal, la actividad específica de la catalasa mostró diferencias significativas entre tratamientos (Figura 5.3); presentando un incremento a través de los días de muestreo (día 60, 90 y 120). Lo anterior es similar a lo reportado por Guimarães *et al.* en 2019 quienes enuncian el aumento de la actividad de catalasa con el transcurso de las etapas fenológicas de la planta.

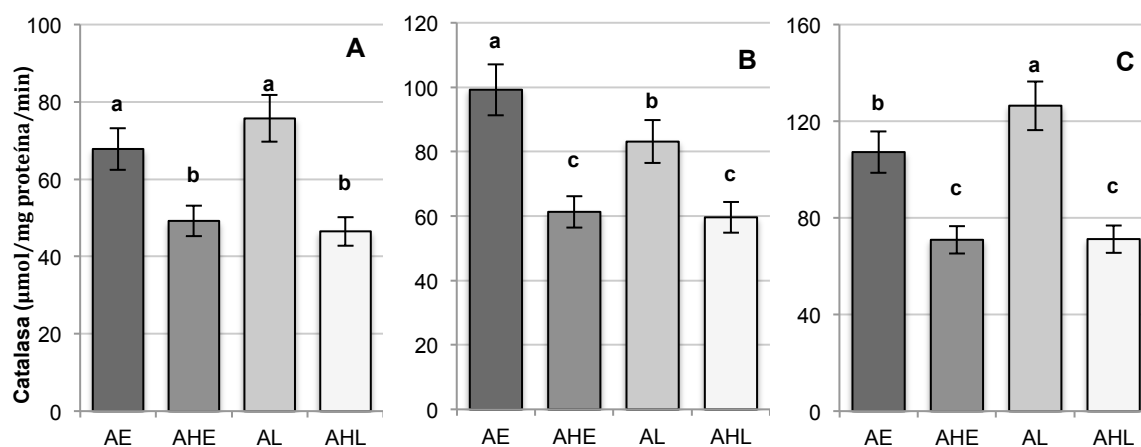


Figura 5.3 Actividad enzimática de catalasa en AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hortícola escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hortícola por lotes) a los 60 (A), 90 (B) y 120 días (C).

Los valores se presentan como medias  $\pm$  DE, las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) se indican con un superíndice diferente

Durante el primer muestreo (día 60) las plantas se encontraban en etapa de crecimiento vegetativo, para este momento la mayor actividad de catalasa se presentó en los tratamientos acuaponicos (AE =  $67.8 \pm 5.4$  y AL =  $75.7 \pm 4.8$   $\mu\text{mol/mg proteína/min}$ ). Dichos tratamientos presentaron valores menores a los reportados por Tiwari *et. al.* en 2017 quienes expusieron plantas de tomate a distintas concentraciones de nanoparticulas como detonantes de estrés abiótico.

Sin embargo, los valores de este estudio se encontraron por encima de los reportados por Rivero *et. al.* en 2004 ( $17.21 \pm 1.36$   $\mu\text{mol/mg}$  proteína/min) quienes variaron la temperatura como factor de estrés biótico.

En el segundo muestreo (día 90, en etapa de floración) el tratamiento con la mayor actividad de catalasa fue AE ( $99.2 \pm 6.7$   $\mu\text{mol/mg}$  proteína/min). Finalmente, en el tercer muestreo (día 120, en etapa de fructificación) la actividad de catalasa tuvo su mayor valor en AL ( $124.6 \pm 7.3$   $\mu\text{mol/mg}$  proteína/min). Por el contrario, en los tres momentos de muestreo, los tratamientos de módulos independientes (AHE y AHL) presentaron la menor actividad enzimática. Los valores del segundo muestreo fueron menores a los reportados por Méndez-Vázquez *et. al.* en 2021 ( $220 \pm 30$   $\mu\text{mol/mg}$  proteína/min) quienes expusieron plantas de tomate a déficit hídrico. Por otra parte, los valores obtenidos en la etapa de fructificación (tercer muestreo) fueron mayores a los reportados en la misma etapa por Méndez-Vázquez *et al.* ( $110 \pm 30$   $\mu\text{mol/mg}$  proteína/min).

Por otra parte, la cantidad de fenoles totales también presentó un incremento a través de los días de muestreo (día 60 = etapa vegetativa, 90 = etapa de floración y 120 = etapa de fructificación) mostrando diferencias significativas entre tratamientos (Figura 5.4).

En el primer día de muestreo (día 60) la mayor cantidad de fenoles totales se presentó en los tratamientos acuaponicos (AE =  $27.24 \pm 2.11$  y AL =  $24.69 \pm 1.85$   $\mu\text{g}$  de GAE/g de muestra). Para el segundo muestreo (día 90), el tratamiento con la mayor cantidad de fenoles totales fue AL ( $73.32 \pm 4.76$   $\mu\text{g}$  de GAE/g de muestra). Finalmente, en el tercer muestreo (día 120) los fenoles totales tuvieron su mayor valor en AE ( $105.78 \pm 6.73$   $\mu\text{g}$  de GAE/g de muestra); pese a ello, dichos valores fueron inferiores a los reportados por Arab *et al.* en 2019 ( $240$   $\mu\text{g}$  de GAE/g de muestra) para distintas variedades de tomate provenientes de cultivos comerciales.

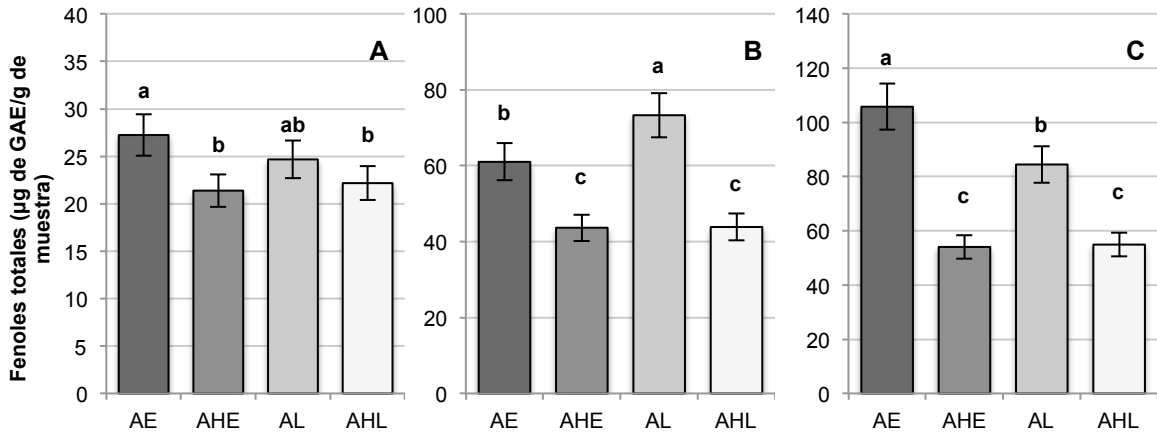


Figura 5.4 Fenoles totales en AE (acuaponico escalonado), AHE (acuícola-hortícola escalonado), AL (acuaponico por lotes) y AHL (acuícola-hortícola por lotes) a los 60 (A), 90 (B) y 120 días (C). Los valores se presentan como medias  $\pm$  DE, las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) se indican con un superíndice diferente

Por otra parte, al igual que lo acontecido para la actividad de catalasa, los tratamientos de modulos independientes (AHE y AHL) presentaron la menor cantidad de fenoles totales en los tres momentos de muestreo. No obstante, en cada uno de los muestreos, los valores de todos los tratamientos fueron superiores a los reportados por Javanmardi & Akbari en 2016, quienes evaluaron el efecto del ácido salicílico sobre metabolitos secundarios en las mismas tres etapas fenológicas de las plantas de tomate cultivadas en suelo. Lo anterior sugiere que, el cultivo hidropónico y acuaponico conllevan mayor presión sobre el crecimiento del tomate y con ello mayor síntesis de metabolitos secundarios.

### 5.3 Proceso de alimentación en *O. niloticus*

El cuadro 5.3 muestra los datos de las variables monitoreadas para el proceso de alimentación durante la etapa de alevin. En el inicio del experimento, no hubo diferencias significativas en cuanto al peso de los alevines presentes en cada tratamiento; sin embargo, si se presentaron diferencias una vez concluida la etapa productiva mencionada. La ganancia de peso diaria (GPD) no mostró discrepancia entre los tratamientos; mientras que la ganancia de peso total (GPT) fue mayor estadísticamente en el tratamiento AL; lo anterior puede estar

relacionado con la menor densidad de población en dicho tratamiento (Moniruzzaman *et al.*, 2015); así como a la calidad de agua derivada de la nitrificación en conjunto con las plantas presentes en el sistema (Michaud *et al.*, 2006).

Cuadro 5.3 Indicadores del proceso de alimentación de *O. niloticus* para la etapa de alevín. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de alevin			
	AE	AHE	AL	AHL
Peso inicial (g)	4.72 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	4.88 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	4.71 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	4.83 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>
Peso final (g)	59.10 $\pm$ 1.91 <sup>ab</sup>	56.21 $\pm$ 3.55 <sup>b</sup>	64.48 $\pm$ 3.98 <sup>a</sup>	54.20 $\pm$ 4.62 <sup>b</sup>
GPT (g)	54.66 $\pm$ 2.03 <sup>b</sup>	51.33 $\pm$ 3.74 <sup>b</sup>	59.77 $\pm$ 3.05 <sup>a</sup>	49.37 $\pm$ 4.85 <sup>b</sup>
GPD (g)	0.91 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	0.85 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.99 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.83 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>
FCA	1.74 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	1.98 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	2.05 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	2.13 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>
EP	1.43 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	1.26 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	1.22 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	1.17 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

GPT = ganancia de peso total

GPD = ganancia de peso diaria

FCA = factor de conversión alimenticia

EP = eficiencia proteica

Por otro lado, los valores destacados de factor de conversión alimenticia (FCA) y la eficiencia proteica (EP) contrastaron con el incremento de biomasa; siendo que, AE fue el tratamiento con mejor desempeño para dichas variables. Lo anterior plantea que, si bien la modalidad de cultivo por lotes conlleva a una mayor ganancia de peso para la etapa de alevin, la relación de alimento brindado e incremento en biomasa es mayor a aquella existente en un cultivo escalonado. Por lo tanto, para los intereses de un cultivo comercial la elección de la modalidad escalonado sería mayormente favorable; siendo que, lo que se pretende es aminorar los gastos de operación, en este caso el correspondiente a la compra de alimento.

Con respecto a la etapa juvenil, los datos de las variables monitoreadas para dicha etapa se muestran en el cuadro 5.4. Al comienzo de esta etapa, los individuos de los distintos tratamientos presentaban diferencias significativas en cuanto al peso inicial; esto derivado de las discrepancias de la etapa de alevín. Al término de esta segunda etapa, la ganancia de peso diaria (GPD) y total (GPT) nuevamente presentaron diferencias significativas, siendo AHL el tratamiento con el menor desempeño. De los resultados de esta etapa se resalta que los tratamientos escalonados mantienen mejor relación en cuanto al suministro de alimento y el incremento en biomasa.

Cuadro 5.4 Indicadores del proceso de alimentación de *O. niloticus* para la etapa de juvenil. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de juvenil			
	AE	AHE	AL	AHL
Peso inicial (g)	59.10 $\pm$ 1.91 <sup>ab</sup>	56.21 $\pm$ 3.55 <sup>b</sup>	64.48 $\pm$ 3.98 <sup>a</sup>	54.20 $\pm$ 4.62 <sup>b</sup>
Peso final (g)	158.89 $\pm$ 2.32 <sup>a</sup>	151.74 $\pm$ 1.43 <sup>b</sup>	155.54 $\pm$ 1.71 <sup>a</sup>	143.49 $\pm$ 2.27 <sup>c</sup>
GPT (g)	99.79 $\pm$ 4.23 <sup>a</sup>	95.53 $\pm$ 3.98 <sup>ab</sup>	91.06 $\pm$ 5.59 <sup>ab</sup>	89.29 $\pm$ 4.89 <sup>b</sup>
GPD (g)	1.66 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	1.59 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	1.51 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	1.48 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>
FCA	1.72 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	1.87 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	1.95 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	2.07 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>
EP	1.64 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	1.53 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.47 $\pm$ 0.05 <sup>ab</sup>	1.38 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

GPT = ganancia de peso total

GPD = ganancia de peso diaria

FCA = factor de conversión alimenticia

EP = eficiencia proteica

Finalmente, para la etapa de adulto, los valores presentaron diferencias significativas en cuanto al peso inicial y final (cuadro 5.5). En este caso favoreciendo al tratamiento AE; siendo que al término de esta etapa, todos los indicadores monitoreados del proceso de alimentación tuvieron mayor desempeño

en AE. Lo anterior en conjunto con los valores de las etapas de alevín y juvenil exponen que la implementación de un cultivo acuaponico de modalidad escalonada conlleva al mayor desempeño productivo para el módulo de los peces, en este caso para la tilapia.

Cuadro 5.5 Indicadores del proceso de alimentación de *O. niloticus* para la etapa de adulto. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de adulto			
	AE	AHE	AL	AHL
Peso inicial (g)	158.89 $\pm$ 2.32 <sup>a</sup>	151.74 $\pm$ 1.43 <sup>b</sup>	155.54 $\pm$ 1.71 <sup>a</sup>	143.49 $\pm$ 2.27 <sup>c</sup>
Peso final (g)	274.34 $\pm$ 2.61 <sup>a</sup>	266.17 $\pm$ 3.35 <sup>b</sup>	259.88 $\pm$ 3.36 <sup>b</sup>	245.88 $\pm$ 3.86 <sup>c</sup>
GPT (g)	115.45 $\pm$ 4.92 <sup>a</sup>	114.43 $\pm$ 4.78 <sup>a</sup>	104.34 $\pm$ 5.07 <sup>b</sup>	102.39 $\pm$ 6.13 <sup>b</sup>
GPD (g)	1.92 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.90 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	1.73 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	1.70 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>
FCA	1.69 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	1.83 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	1.85 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	1.79 $\pm$ 0.08 <sup>ab</sup>
EP	1.85 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.73 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	1.69 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	1.74 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

GPT = ganancia de peso total

GPD = ganancia de peso diaria

FCA = factor de conversión alimenticia

EP = eficiencia proteica

#### 5.4 Proceso de crecimiento de *O. niloticus*

Los indicadores monitoreados para el proceso de crecimiento durante la etapa de alevín se presentan en el cuadro 5.6. La tasa específica de crecimiento (TEC) para esta etapa favorece a los tratamientos de cultivo acuaponico (AE =  $3.81 \pm 0.12$  y AL =  $3.69 \pm 0.13$ ) sobre aquellos de módulos independientes (AHE =  $3.59 \pm 0.09$  y AHL =  $3.42 \pm 0.07$ ). No obstante, los valores de todos tratamientos fueron superiores al 2.56 reportado por Rayhan *et al.* en 2018 (donde se trabajó con una densidad de siembra de alevines similar a la de esta investigación) y al 2.9 reportado por Thomas *et al.* en 2021 (pese a manejar una densidad de

siembra fue menor a la de este trabajo). Por su parte, el factor de condición (FC) presentó valores inferiores a 1; lo cual sugiere que, los alevines inmersos en los distintos tratamientos estuvieron bajo un cierto grado de estrés (Migiro *et al.*, 2014). Lo anterior, para el caso AE y AHE (cuyos valores estuvieron más alejados del valor 1) se vincula a la densidad de siembra; mientras que en AHL se podría relacionar con la calidad de agua.

Cuadro 5.6 Indicadores del proceso de crecimiento de *O. niloticus* para la etapa de alevín. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de alevín			
	AE	AHE	AL	AHL
TEC	3.81 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	3.59 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	3.69 $\pm$ 0.13 <sup>ab</sup>	3.42 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>
FC	0.82 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.80 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.94 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.88 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
TS (%)	89.6 $\pm$ 2.1 <sup>b</sup>	82 $\pm$ 2 <sup>c</sup>	93.8 $\pm$ 2.1 <sup>a</sup>	87.6 $\pm$ 1 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

TEC = tasa específica de crecimiento

FC = factor de condición

TS = tasa de sobrevivencia (AE y AHE con base en 144 alevines, mientras que AL y AHL en 96).

En lo que respecta a la etapa de juveniles, los indicadores se muestran en el cuadro 5.7. Primeramente, se resalta que la tasa específica de crecimiento (TEC) es superior en los tratamientos con modalidad escalonada (AE = 1.69  $\pm$  0.05 y AHE = 1.68  $\pm$  0.02). Los valores obtenidos en dicha etapa estuvieron por debajo del rango de 2.43 – 2.28 reportado por Yildiz & Bekcan en 2017, donde de igual manera se estableció un cultivo acuaponico entre tilapia y tomate. Sin embargo, se denota que la concentración de compuestos nitrogenados fue menor a la observada en este trabajo; lo cual pudiera ligarse a la reducción en la tasa de crecimiento (Monsees *et al.*, 2017). En cuanto al factor de condición (FC), AE y AHE contaron con valores sobre 1, indicando un crecimiento sin afectaciones debidas a estrés.

Cuadro 5.7 Indicadores del proceso de crecimiento de *O. niloticus* para la etapa de juvenil. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de juvenil			
	AE	AHE	AL	AHL
TEC	1.69 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.68 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.43 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	1.59 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>
FC	1.16 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.07 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	0.98 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	0.92 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>
TS (%)	94.6 $\pm$ 1.5 <sup>a</sup>	93.2 $\pm$ 0.9 <sup>a</sup>	93.3 $\pm$ 1.1 <sup>a</sup>	92.8 $\pm$ 1.3 <sup>a</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

TEC = tasa específica de crecimiento

FC = factor de condición

TS = tasa de sobrevivencia (AE con base en 129 individuos, AHE en 118, AL en 90 y AHL 84).

Con respecto a la etapa de adulto, los indicadores de crecimiento se presentan en el cuadro 5.8. La tasa específica de crecimiento (TEC) para etapa tuvo el valor más alto en AE (0.92  $\pm$  0.03). No obstante, todos los tratamientos presentaron valores similares a los reportados por Cisneros en 2021, donde adultos de tilapia presentes en un cultivo acuaponico con lechugas tuvieron un rango de TEC entre 1.53 - 0.78. En lo referente al factor de condición (FC) todos los tratamientos mostraron valores superiores al valor 1 de referencia, lo que sugiere que en la etapa de adulto no se presentan afectaciones debidas a estrés.

Cuadro 5.8 Indicadores del proceso de crecimiento de *O. niloticus* para la etapa de adulto. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Etapa de adulto			
	AE	AHE	AL	AHL
TEC	0.92 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.73 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	0.86 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.87 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>
FC	1.19 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.27 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.08 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	1.10 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>
TS (%)	97.5 $\pm$ 0.9 <sup>b</sup>	100 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	100 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	100 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

TEC = tasa específica de crecimiento

FC = factor de condición



TS = tasa de sobrevivencia (AE con base en 122 individuos, AHE en 118, AL en 90 y AHL 84).

### **5.5 Proceso de crecimiento de *S. lycopersicum***

Con respecto al tomate, los estimadores de crecimiento se exponen en la tabla 5.9. En dicho cuadro se aprecia que para la altura de la planta (AP), los tratamientos de módulos independientes (AHE y AHL) contaron con los mayores valores ( $134.7 \pm 4.2$  y  $130.6 \pm 5.1$  cm respectivamente). Lo anterior es atribuido al riego con solución hidróponica; ya que los tratamientos acuaponicos al carecer de suplementación de nutrientes, la deficiencia de algunos de ellos podría haberse hecho presente (Reyes-Flores *et al.*, 2016).

Asimismo, el peso seco, que fue evaluado en tres momentos del cultivo (floración = PS-FO, Fructificación = PS-FU y cosecha = PS-CO) presentó valores estadísticamente superiores en AHE y AHL; lo cual, al igual que para la variable de la AP se puede vincular directamente al riego con la solución hidropónica dando el resultado de mayor generación de biomasa. Por otra parte, la posible carencia de algunos nutrientes en los tratamientos acuaponicos (AE y AL) afectó la tasa de crecimiento relativa (TCR) siendo que en la etapa de floración AE y AL fueron 16.66 y 11.32 % menores respectivamente en relación con los tratamientos de módulos independientes (AHE y AHL). Mientras que, en la etapa de fructificación se tuvo un 27.27 y 6.89 % menos en AE y AL respectivamente en comparación con AHE y AHL. Finalmente en la etapa de cosecha, AE y AL presentaron una TCR de 20.0 y 8.69 % menos (respectivamente) con respecto a los tratamientos provistos de solución hidropónica (AHE y AHL). En cuanto a la tasa de sobrevivencia (TS), los tratamientos presentaron diferencias significativas, favoreciendo a los tratamientos de módulos independientes (AHE y AHL).

Cuadro 5.9 Indicadores del proceso de crecimiento de *S. lycopersicum*. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Plantas de tomate			
	AE	AHE	AL	AHL
AP (cm)	117.4 $\pm$ 6.8 <sup>b</sup>	134.7 $\pm$ 4.2 <sup>a</sup>	109.2 $\pm$ 5.4 <sup>b</sup>	130.6 $\pm$ 5.1 <sup>a</sup>
PS-FL (g)	135.34 $\pm$ 5.42 <sup>b</sup>	145.92 $\pm$ 4.73 <sup>a</sup>	129.78 $\pm$ 3.92 <sup>c</sup>	147.83 $\pm$ 4.28 <sup>a</sup>
PS-FU (g)	208.79 $\pm$ 9.37 <sup>ab</sup>	218.02 $\pm$ 8.13 <sup>a</sup>	189.19 $\pm$ 8.09 <sup>b</sup>	221.25 $\pm$ 9.93 <sup>a</sup>
PS-CO (g)	304.67 $\pm$ 13.63 <sup>b</sup>	345.86 $\pm$ 16.52 <sup>a</sup>	286.24 $\pm$ 18.32 <sup>b</sup>	339.76 $\pm$ 12.69 <sup>a</sup>
TCR-FL	0.085 $\pm$ 0.003 <sup>c</sup>	0.102 $\pm$ 0.003 <sup>a</sup>	0.094 $\pm$ 0.002 <sup>b</sup>	0.106 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>
TCR-FU	0.024 $\pm$ 0.001 <sup>c</sup>	0.033 $\pm$ 0.004 <sup>a</sup>	0.027 $\pm$ 0.001 <sup>b</sup>	0.029 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>
TCR-CO	0.020 $\pm$ 0.001 <sup>b</sup>	0.025 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>	0.021 $\pm$ 0.002 <sup>b</sup>	0.023 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>
TS (%)	*85.4 $\pm$ 2.1 <sup>b</sup>	*97.9 $\pm$ 4.1 <sup>a</sup>	*87.5 $\pm$ 2.1 <sup>b</sup>	*95.9 $\pm$ 2.1 <sup>a</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

AP = altura de la planta

PS-FL = peso seco en floración

PS-FU = peso seco en fructificación

PS-CO = peso seco en cosecha

TCR-FL = tasa de crecimiento relativa en floración

TCR-FU = tasa de crecimiento relativa en fructificación

TCR-CO = tasa de crecimiento relativa en cosecha

TS = tasa de sobrevivencia, cosidenrando 48 plantas tras del retiro de 12 piezas para determinación de peso seco.

## 5.6 Proceso de desarrollo de *S. lycopersicum*

En lo concerniente al desarrollo por parte de las plantas de tomate; los estimadores de dicho proceso se exponen en el cuadro 5.10. Los mayores valores de área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), área foliar específica (AFE), tasa de asimilación neta (TAN) y Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) (que fueron evaluados en tres momentos del cultivo: floración = FL, fructificación = FU y cosecha = CO) se presentaron en los tratamientos de módulos independientes

(AHE y AHL) favoreciendo la actividad fotosintética, desarrollo de biomasa y con ello la productividad en estos tratamientos (5.11).

Cuadro 5.10 Indicadores del proceso de desarrollo de *S. lycopersicum*. Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el período experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Plantas de tomate			
	AE	AHE	AL	AHL
AF-FL (cm <sup>2</sup> )	1285 $\pm$ 50 <sup>c</sup>	1840 $\pm$ 65 <sup>a</sup>	1195 $\pm$ 50 <sup>cd</sup>	1680 $\pm$ 65 <sup>b</sup>
AF-FU (cm <sup>2</sup> )	1780 $\pm$ 35 <sup>b</sup>	2445 $\pm$ 45 <sup>a</sup>	1575 $\pm$ 35 <sup>c</sup>	2410 $\pm$ 50 <sup>a</sup>
AF-CO (cm <sup>2</sup> )	2345 $\pm$ 40 <sup>b</sup>	2895 $\pm$ 35 <sup>a</sup>	2095 $\pm$ 50 <sup>c</sup>	2870 $\pm$ 30 <sup>a</sup>
IAF-FL	1.71 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	2.45 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	1.59 $\pm$ 0.07 <sup>cd</sup>	2.24 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>
IAF-FU	2.37 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	3.26 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	2.10 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	3.21 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>
IAF-CO	3.12 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	3.86 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	2.79 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>	3.82 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>
AFE-FL	9.49 $\pm$ 0.33 <sup>c</sup>	12.61 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	9.21 $\pm$ 0.29 <sup>c</sup>	11.36 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>
AFE-FU	8.51 $\pm$ 0.21 <sup>b</sup>	11.21 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>	8.32 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	10.89 $\pm$ 0.46 <sup>a</sup>
AFE-CO	7.69 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	8.37 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	7.31 $\pm$ 0.31 <sup>b</sup>	8.44 $\pm$ 0.19 <sup>a</sup>
TAN-FL (g/cm <sup>2</sup> día)	0.0054 $\pm$ 0.0002 <sup>b</sup>	0.0053 $\pm$ 0.0001 <sup>b</sup>	0.0061 $\pm$ 0.0003 <sup>a</sup>	0.0060 $\pm$ 0.0002 <sup>a</sup>
TAN-FU (g/cm <sup>2</sup> día)	0.0027 $\pm$ 0.0001 <sup>a</sup>	0.0029 $\pm$ 0.0001 <sup>a</sup>	0.0031 $\pm$ 0.0002 <sup>b</sup>	0.0036 $\pm$ 0.0001 <sup>b</sup>
TAN-CO (g/cm <sup>2</sup> día)	0.0025 $\pm$ 0.0001 <sup>a</sup>	0.0026 $\pm$ 0.0001 <sup>a</sup>	0.0027 $\pm$ 0.0001 <sup>b</sup>	0.0025 $\pm$ 0.0001 <sup>b</sup>
TCC-FL	0.027 $\pm$ 0.001 <sup>b</sup>	0.034 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>	0.028 $\pm$ 0.002 <sup>b</sup>	0.036 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>
TCC-FU	0.058 $\pm$ 0.002 <sup>c</sup>	0.086 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>	0.061 $\pm$ 0.003 <sup>c</sup>	0.075 $\pm$ 0.003 <sup>b</sup>
TCC-CO	0.072 $\pm$ 0.002 <sup>c</sup>	1.001 $\pm$ 0.003 <sup>a</sup>	0.069 $\pm$ 0.003 <sup>c</sup>	0.093 $\pm$ 0.003 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

AF-FL = área foliar en floración

AF-FU = área foliar en fructificación

AF-CO = área foliar en cosecha

IAF-FL = índice de área foliar en floración

IAF-FU = índice de área foliar en fructificación

IAF-CO = índice de área foliar en cosecha

AFE-FL = área foliar específica en floración

AFE-FU = área foliar específica en fructificación  
AFE-CO = área foliar específica en cosecha  
TAN-FL = tasa de asimilación neta en floración  
TAN-FU = tasa de asimilación neta en fructificación  
TAN-CO = tasa de asimilación neta en cosecha  
TCC-FL = tasa de crecimiento del cultivo en floración  
TCC-FU = tasa de crecimiento del cultivo en fructificación  
TCC-CO = tasa de crecimiento del cultivo en cosecha

## 5.7 Rendimiento

Al término de los 180 días de cultivo, el mayor rendimiento de peces para cosecha se presentó en AHE, además de contar con individuos en las etapas de alevín y juvenil (situación similar al ocurrido con AE). Lo anterior muestra que, la implementación de la modalidad escalonada no solo conlleva a rendimientos elevados, sino que también permite la continuidad del sistema en cuanto a la generación de biomasa (Cuadro 5.11). Por su parte, el mayor rendimiento de tomate se presentó en AHE y AHL, coincidiendo dichos tratamientos como los mejor evaluados en el resto de las variables monitoreadas para la especie vegetal.

Por otro lado, se llevó a cabo un análisis económico de cada uno de los tratamientos (Cuadro 5.12), destacando que si bien AHE (módulos independientes) culminó con la mayor productividad de peces y plantas esto no se tradujo con en el mayor rendimiento monetario del sistema. Lo anterior tiene su explicación en que bajo las características del tratamiento no existe un aprovechamiento integral de los recursos empleados. Por el contrario, AE resultó con la mejor relación costo – beneficio; esto al mantener una producción constante de peces debida a la modalidad escalonada y evitar el gasto de solución nutritiva al implementar para riego el agua proveniente de los peces.

Cuadro 5.11 Rendimiento productivo total

Variable	AE	AHE	AL	AHL
Cantidad de tomate cosechado (kg)	32.2	41.8	26.8	43.4
Producción de tomate (kg) / planta	0.785	0.889	0.638	0.943
Rendimiento de tomate (kg) / m <sup>2</sup>	3.22	4.18	2.68	4.34
Cantidad cosechada de tilapia (kg)	32.6	29.2	21.8	19.1
Rendimiento de tilapia (kg) / m <sup>3</sup>	54.3	48.6	36.3	31.8
Biomasa de peces restantes en el sistema (kg)	2.5 (inicio juvenil) 6.4 (inicio adulto)	2.2 (inicio juvenil) 5.5 (inicio adulto)	NA	NA

Cuadro 5.12 Rendimiento económico total

Insumos	AE	AHE		AL	AHL	
	Acuaponico (escalonado)	acuícola (escalonado)	hortícola	Acuaponico (por lotes)	acuícola (por lotes)	hortícola
Alimento / nutrición	\$ 624.60	\$ 760.76	\$ 472.5	\$ 700.77	\$ 770.6	\$ 472.5
Reactivo para pH	\$ 239.75	NA	\$ 212.85	\$ 234.25	NA	\$ 212.85
Peces / semillas	\$ 1364.0	\$ 1344.0	\$ 20.0	\$ 500.0	\$ 480.0	\$ 20.0
Total de gastos	\$ 2228.35	\$ 2104.26	\$ 705.85	\$ 1435.02	\$ 1250.6	\$ 705.95
Monto por producto generado	\$ 515.2 To \$ 2934 Pc \$ 801 Ps	\$ 2628 Pc \$ 693 Ps	\$ 668.8 To	\$ 428.8 To \$ 1962 Pc	\$ 1719 Pc	\$ 694.4 To
Producción - gastos	\$ 2021.85	\$ 1217.44	-\$37.05	\$ 955.78	\$ 468.4	-\$11.45
Balance del sistema	\$ 2021.85	\$ 1180.39		\$ 955.78	\$ 456.95	

Monto por producto calculado con base a precios del 06/mayo/22 (tomate \$ 16 y tilapia \$ 90).  
<http://www.economia-sniim.gob.mx/>

To = tomates

Pc = peces cosechados

Ps = peces en sistema

## 5.8 Calidad

Con respecto a la calidad de *O. niloticus* (filete), las distintas variables monitoreadas presentaron diferencias significativas. Los tratamientos que contaron con el mejor desempeño fueron AE y AHE, presentando los mayores porcentajes de proteína ( $32.25 \pm 0.81$  y  $30.98 \pm 0.73$  %); así como la menor cifra de lípidos ( $2.42 \pm 0.16$  y  $2.51 \pm 0.14$  %). Estos resultados sugieren que la modalidad de cultivo escalonada conlleva a la obtención de un producto de mayor calidad, independientemente de si el cultivo es acuícola o acuaponico.

Cuadro 5.13 Indicadores de calidad de *O. niloticus* (filete). Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estandar de las muestras recolectadas durante el periodo experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Filete de tilapia			
	AE	AHE	AL	AHL
Humedad	$61.98 \pm 0.11^d$	$63.23 \pm 0.12^c$	$65.73 \pm 0.11^b$	$66.14 \pm 0.09^a$
Proteína	$32.15 \pm 0.81^a$	$30.98 \pm 0.73^a$	$28.53 \pm 0.92^b$	$27.25 \pm 0.67^b$
Lípidos	$2.42 \pm 0.16^b$	$2.51 \pm 0.14^b$	$2.96 \pm 0.19^a$	$2.97 \pm 0.11^a$
Cenizas	$1.71 \pm 0.04^a$	$1.42 \pm 0.04^b$	$1.31 \pm 0.06^c$	$1.68 \pm 0.04^a$
Carbohidratos	$1.74 \pm 0.09^b$	$1.86 \pm 0.08^a$	$1.47 \pm 0.10^c$	$1.96 \pm 0.09^a$

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

En lo concerniente a la calidad de los frutos de *S. lycopersicum* el mayor valor de pH se presentó en el AL, estando por encima de los tratamientos con solución hidropónica. Esto se vincula a los mayores valores de grados brix y acidez titulable presentes en dicho tratamiento (AL). Sin embargo, los valores de los cuatro tratamientos se sitúan por encima de los 5 ° brix y 0.4 % de acidez

titulable; lo cual de acuerdo a Beckles en 2012 son valores deseables en tomates de calidad.

En cuanto a la cantidad de licopeno, todos los tratamientos contaron con valores inferiores a los reportados por Reyes-Flores et al. en 2020 que trabajaron con cultivo hidropónico (15.45 mg/100 g) y acuaponico con suplementación foliar de nutrientes (17.08 mg/100 g). Lo cual sugiere que la calidad de los frutos obtenidos por los tratamientos acuaponicos es aceptable pese a no haber realizado el proceso de suplementación de nutrientes.

Cuadro 5.14 Indicadores de calidad de *S. lycopersicum* (fruto). Los valores se presentan como media  $\pm$  desviación estándar de las muestras recolectadas durante el periodo experimental. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Variable	Tomate			
	AE	AHE	AL	AHL
pH	4.49 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	4.12 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	4.67 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	4.15 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>
SST (° brix)	6.42 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	5.66 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	6.34 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	5.89 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>
AT (%)	0.57 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	0.51 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	0.65 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.55 $\pm$ 0.02 <sup>bc</sup>
SST / AT	11.26 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	11.09 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	9.75 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>	10.71 $\pm$ 0.21 <sup>b</sup>
Licopeno (mg / 100 g)	11.58 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	13.27 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	10.07 $\pm$ 0.11 <sup>d</sup>	12.79 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>

Valores con distinto superíndice presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

SST = sólidos solubles totales

AT = acidez titulable

SST/AT = relación entre sólidos solubles totales y acidez titulable

## **VI. CONCLUSIÓN**

Las condiciones de cultivo concernientes a los sistemas de producción alimentaria impactan de manera directa el desempeño productivo de los mismos. En este sentido, la implementación de un cultivo acuaponico en condiciones intensivas de modalidad escalonada conlleva el mejor desempeño para los procesos de alimentación y crecimiento del organismo animal (tilapia); esto pese a contar con mayor concentración de indicadores de estrés sin que estos se encuentren fuera del rango normal en etapa de alevin y juvenil. Por su parte, el crecimiento y desarrollo del organismo vegetal (tomate) se ve ligeramente afectado; no obstante, se obtienen rendimientos aceptables en ambas especies (tilapia y tomate en este caso); acompañado de variables de calidad productiva iguales o superiores con respecto a los cultivos acuícola e hidropónico convencionales. Esto pese a la falta de suplementación de nutrientes para las plantas; sin embargo, se precisa el control sobre el pH del agua para promover la mayor absorción de los nutrientes generados en el sistema. Es así que, con base en lo observado que el cultivo acuaponico tilapia-tomate se lleve acabo mediante la modalidad escalonada.



## LITERATURA CITADA

Abdel-Tawwab, M., Mousa, M. A., Sharaf, S. M., & Ahmad, M. H. 2005. Effect of crowding stress on some physiological functions of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) fed different dietary protein levels. *International Journal of Zoological Research*, 1(1), 41-47.

Abdel-Tawwab, M., Ahmad, M. H., Khattab, Y. A., & Shalaby, A. M. (2010). Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 298(3- 4), 267-274.

Aebi, H. (1974). Catalase. In *Methods of enzymatic analysis* (pp. 673-684). Academic press.

Ako, H., & Baker, A. (2009). Small-scale lettuce production with hydroponics or aquaponics.

Anderson, T. S., de Villiers, D., & Timmons, M. B. (2017). Growth and tissue elemental composition response of butterhead lettuce (*Lactuca sativa*, cv. Flandria) to Hydroponic and Aquaponic Conditions. *Horticulturae*, 3(3), 43.

Aparicio-Simón, B., Piñón, M., Racotta, R., & Racotta, I. S. (2010). Neuroendocrine and metabolic responses of Pacific whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* exposed to acute handling stress. *Aquaculture*, 298(3-4), 308- 314.

Arab, M., Bahramian, B., Schindeler, A., Valtchev, P., Dehghani, F., & McConchie, R. (2019). Extraction of phytochemicals from tomato leaf waste using subcritical carbon dioxide. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 57, 102204.

Arya, R., Antonisamy, B., & Kumar, S. (2012). Sample size estimation in prevalence studies. *The Indian Journal of Pediatrics*, 79(11), 1482-1488.

Ashley, P. J. (2007). Fish welfare: current issues in aquaculture. *Applied Animal Behaviour Science*, 104(3-4), 199-235.

Ashley, J.M., 2016. *Food Security in the Developing World*. Academic Press. Elsevier, London.

Azadi, H.; Schoonbeek, S.; Mahmoudi, H.; Derudder, B.; de Maeyer, P.; Witlox, F. Organic agriculture and sustainable food production system: main potentials. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2011, 144, 92–94.

Bai, T., Li, C., Ma, F., Feng, F., & Shu, H. (2010). Responses of growth and antioxidant system to root-zone hypoxia stress in two *Malus* species. *Plant and Soil*, 327(1), 95-105.

Bastida, O. (2012). Métodos de cultivo hidropónico de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero basados en doseles escaleriformes. Obtenido de [chapingo. mx: https://chapingo. mx/horticultura/pdf/tesis/TESISMCH2012112309124791. pdf.](https://chapingo.mx/horticultura/pdf/tesis/TESISMCH2012112309124791.pdf)

Basurto Sotelo, M., Núñez Barrios, A., Pérez Leal, R., & Hernández Rodríguez, A. (2008). Fisiología del estrés ambiental en plantas. *Synthesis*, 12, 12-16.

Baßmann, B., Brenner, M., & Palm, H. W. (2017). Stress and Welfare of African Catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a Coupled Aquaponic System. *Water*, 9(7), 504.

Beckles, D. M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140.

Béné, C., Arthur, R., Norbury, H., Allison, E.H., Beveridge, M., Bush, S., Campling, L., Leschen, W., Little, D., Squires, D., Thilsted, S.H., Troell, M., Williams, M., 2016. Contribution of fisheries and aquaculture to food security and poverty reduction: assessing the current evidence. *World Dev.* 79, 177–196.

Benitez Jaimes, M., Rebollar Rebollar, S., González Razo, F. D. J., Hernández Martínez, J., & Gómez Tenorio, G. (2015). Viabilidad económica para la producción y venta de tilapia (*oreochromis niloticus*) en amatepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 37(1345-2016-104472), 147.

Bernstein, S. (2011). *Aquaponic gardening: a step-by-step guide to raising vegetables and fish together*. New society publishers.

Biswal, B., Joshi, P. N., Raval, M. K., & Biswal, U. C. (2011). Photosynthesis, a global sensor of environmental stress in green plants: stress signalling and adaptation. *Current Science*, 47-56.

Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on Cucumber Growth and Nutrient Availability in a Decoupled Aquaponic System with Minimal Solids Removal. *Horticulturae*, 6(1), 10.

Bosma, R. H., & Verdegem, M. C. (2011). Sustainable aquaculture in ponds: principles, practices and limits. *Livestock Science*, 139(1-2), 58-68.

Boutwelluc, J. (2007). Aztecs' aquaponics revamped. *Napa Valley Register*. Accessed on June, 18, 2014.

Calone, R., Pennisi, G., Morgenstern, R., Sanyé-Mengual, E., Lorleberg, W., Dapprich, P., ... & Gianquinto, G. (2019). Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics. *Science of the total environment*, 687, 759-767.

Cantor A., F. 2007. *Manual de Producción de Tilapia*. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla. México. 135 p.

Castillo, S. D., Moreno-Pérez, E. D. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E., & Osuna-Encino, T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185- 197.

Camello, A. (2003). Manual para la preparacion y venta de frutas y hortalizas. Servicios Agrícolas de la FAO, 1.

Cerozi, B. S., & Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural systems*, 153, 94-100.

Chen, P., Zhu, G., Kim, H. J., Brown, P. B., & Huang, J. Y. (2020). Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122888.

Chrousos, G. P. (2009). Stress and disorders of the stress system. *Nature reviews endocrinology*, 5(7), 374.

Cisneros Ruiz, K. L. (2021). Producción acuapónica de tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) con adición de nutrientes deficitarios en el sistema.

Cohen, A., Malone, S., Morris, Z., Weissburg, M., & Bras, B. (2018). Combined Fish and Lettuce Cultivation: An Aquaponics Life Cycle Assessment. *Procedia CIRP*, 69, 551-556.

Connolly, K., & Trebic, T. (2010). Optimization of a backyard aquaponic food production system. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Macdonald Campus, McGill University, BREE, 495.

Conte, F. S. (2004). Stress and the welfare of cultured fish. *Applied Animal Behaviour Science*, 86(3-4), 205-223.

Costa-Pierce, B.A., 2010. Sustainable ecological aquaculture systems: the need for a new social contract for aquaculture development. *Mar. Technol. Soc. J.* 44 (3), 88–112.

Crossley, P. L. (2004). Sub-irrigation in wetland agriculture. *Agriculture and Human Values*, 21(2-3), 191-205.

Davies, B.; Baulcombe, D.; Crute, I.; Dunwell, J.; Gale, M.; Jones, J.; Pretty, J.; Sutherlnd, W.; Toulmin, C. Reaping the Benefits: Science and the Sustainable Intensification of Global Agriculture; the Royal Society: London, UK, 2009.

De la Cruz Jiménez, J., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96-109.

De la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Lozano-Gutiérrez, J., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., & Castañeda-Miranda, R. (2016). Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17).

Delgadillo-Díaz, M., Gullian-Klanian, M., Sosa-Moguel, O., Sauri-Duch, E., & Cuevas-Glory, L. F. (2019). Evaluation of physico-chemical characteristics, antioxidant compounds and antioxidant capacity in creole tomatoes (*Solanum lycopersicum* L. and *S. pimpinellifolium* L.) in an aquaponic system or organic soil. *International Journal of Vegetable Science*, 25(2), 124-137.

Davidson, J., Good, C., Welsh, C., & Summerfelt, S. T. (2014). Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 59, 30-40.

Delaide, B., Teerlinck, S., Decombel, A., & Bleyaert, P. (2019). Effect of wastewater from a pikeperch (*Sander lucioperca* L.) recirculated aquaculture system on hydroponic tomato production and quality. *Agricultural Water Management*, 226, 105814.

Easlon, H. M., & Bloom, A. J. (2014). Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. *Applications in plant sciences*, 2(7), 1400033.

Estim, A., Saufie, S., Mustafa, S., 2018. Water quality remediation using aquaponics sub- systems as biological and mechanical filters in aquaculture. *J. Water Process Eng.*

Endut, A.; Jusoh, A.; Ali, N.; Wan Nik, W.B. Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalin. Water Treat.* 2011, 32, 422–430.

Engle, C. R. (2015). Economics of aquaponics. *Economics of aquaponics.*, (5006).

Ellis, T., North, B., Scott, A. P., Bromage, N. R., Porter, M., & Gadd, D. (2002). The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. *Journal of fish biology*, 61(3), 493-531.

Fageria, N. K., Filho, M. B., Moreira, A., & Guimarães, C. M. (2009). Foliar fertilization of crop plants. *Journal of plant nutrition*, 32(6), 1044-1064.

FAO, 2014. Small-scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming. *FAO Fisheries Aquac. Techn.* (Paper No. 589).

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., Siddique, K.H.M., 2012. Drought stress in plants: an overview. In: Aroca, R. (Ed.), *Plant Responses. From Morphological to Molecular Features*. Springer, Heidelberg, New York, London, pp. 1–36.

Fiorco, C., Buono, S., & Giorgini, S. (2012). *Guía de consulta: Enfermedades de tomate*.

Fish, W.W., Perkins-Veazie, P., Collins, J.K., 2002. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *J. Food Compos. Anal.* 15, 309–317. Forchino, A.A., Lourguioui, H., Brigolina, D., Pastresa, R., 2017. Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquac. Eng.* 77, 80–88.

Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127-134.

Fotedar, S., & Evans, L. (2011). Health management during handling and live transport of crustaceans: a review. *Journal of Invertebrate Pathology*, 106(1), 143-152.

García-Mier, L., Guevara-González, R., Mondragón-Olguín, V., del Rocío Verduzco- Cuellar, B., & Torres-Pacheco, I. (2013). Agriculture and bioactives: achieving both crop yield and phytochemicals. *International journal of molecular sciences*, 14(2), 4203-4222.

García-Trejo, J. F., Peña-Herrejon, G. A., Soto-Zarazúa, G. M., Mercado-Luna, A., Alatorre-Jácome, O., & Rico-García, E. (2016). Effect of stocking density on growth performance and oxygen consumption of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under greenhouse conditions. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(1).

Galiotta, G., Harte, F., Molinari, D., Capdevielle, R., & Diano, W. (2005). Aumento de la vida útil poscosecha de tomate usando una película de proteína de suero de leche. *Revista iberoamericana de tecnología poscosecha*, 6(2), 117-123.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R., 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7, 4199–4224,

Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156.

Guimarães, S. F., Lima, I. M., & Modolo, L. V. (2019). Phenolic content and antioxidant activity of parts of *Passiflora edulis* as a function of plant developmental stage. *Acta Botanica Brasilica*, 34, 74-82.

Gyalog, G., Váradi, L., & Gál, D. (2011). Is intensification a viable way for pond culture in Central and Eastern Europe. *AAFL Bioflux*, 4(5), 584-589.

Haidar, M. N., Bleeker, S., Heinsbroek, L. T. N., & Schrama, J. W. (2018). Effect of constant digestible protein intake and varying digestible energy levels on energy and protein utilization in Nile tilapia. *Aquaculture*, 489, 28-35.

Halliwell, B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant physiology*, 141(2), 312-322.

Han, Y., Wang, J., Zhao, Z., Chen, J., Lu, H., & Liu, G. (2017). Fishmeal application induces antibiotic resistance gene propagation in mariculture sediment. *Environmental science & technology*, 51(18), 10850-10860.

Haraz, Y. G., El-Hawarry, W. N., & Shourbela, R. M. 2018. Culture Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in a bioflocbased intensive system. *Alexandria Journal for Veterinary Sciences*, 58(1).

Hawkesworth, S.; Dangour, A.D.; Johnston, D.; Lock, K.; Poole, N.; Rushton, J.; Uauy, R.; Waage, J. Feeding the world healthily: The challenge of measuring the effects of agriculture on health. *Phil. Trans. Roy. Soc. B* 2010, 365, 3083–3097.

Hossain, Z., López-Climent, M. F., Arbona, V., Pérez-Clemente, R. M., & Gómez-Cadenas, A. (2009). Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage. *Journal of plant physiology*, 166(13), 1391-1404.

Hsien-Tsang, S., & Martin, Q. (2008). *Manual sobre reproducción y cultivo de Tilapia*. CENDEPESCA. San Salvador.

Hu, Z., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S., Khanal, S.K., 2012. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission from aquaculture: a review. *Environ. Sci. Technol.* 46, 6470–6480

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. *Bioresour. Technol.* 188, 92–98, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>.

Ibrahim, N., & Naggar, G. E. (2010). Water quality, fish production and economics of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus*, monoculture and polycultures. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41(4), 574-582.

Ingle de la Mora, G., Villareal-Delgado, E. L., Arredondo-Figueroa, J. L., Ponce-Palafox, J. T., & Barriga-Sosa, I. D. L. A. (2003). Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica*, 13(4), 247-253.

Inoue, L. A. K. A., MorAes, G., IwAMA, G. K., & Afonso, L. O. B. 2008. Physiological stress responses in the warm-water fish matrinxã (*Brycon amazonicus*) subjected to a sudden cold shock. *Acta Amazonica*, 38(4), 603-609.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

Javanmardi, J., & Akbari, N. (2016). Salicylic acid at different plant growth stages affects secondary metabolites and physico-chemical parameters of greenhouse tomato. *Advances in Horticultural Science*, 30(3), 151-158.

Jones, S. (2002). Evolution of aquaponics. *Aquaponics J*, 6(1). Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., Jijakli, M.H., 2017. Strategic points in aquaponics. *Water* 9 (3), 182.

Karimanzira, D., Keesman, K. J., Kloas, W., Baganz, D., & Rauschenbach, T. (2016). Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system. *Aquacultural engineering*, 75, 29-45.

Killebrew, K., y Wolff, H. (2010). *Impactos ambientales de las tecnologías agrícolas* (No. UWEC-2011-01).

Knaus, U., & Palm, H. W. (2017). Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring- summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 473, 62-73.

König, B., Junge, R., Bittsanszky, A., Villarroel, M., Komives, T., 2016. On the sustainability of aquaponics. *Ecocycles* 2 (1), 9e15.

König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., & Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *Journal of Cleaner Production*, 180, 232-243.

Kool, D.M., Wrage, N., Zechmeister-Boltenstern, S., Pfeffer, M., Brus, D., Oenema, O., Van Groenigen, J.-W., 2010. Nitrifier denitrification can be a source of N<sub>2</sub>O from soil: a revised approach to the dual-isotope labelling method. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 759–772.

Kranner, I., Minibayeva, F. V., Beckett, R. P., & Seal, C. E. (2010). What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science. *New Phytologist*, 188(3), 655-673.

Kuhn, D. D., Drahos, D. D., Marsh, L., & Flick Jr, G. J. (2010). Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 43(2), 78-82.

Kyaw, T. Y., & Ng, A. K. (2017). Smart Aquaponics System for Urban Farming. *Energy Procedia*, 143, 342-347.

Lang, C. G. R. (2018). Estrés, conceptos básicos y su relación con el bienestar animal. BIENESTAR ANIMAL EN LA PRÁCTICA, EN PRODUCCIONES LECHERAS, DESDE LA PERSPECTIVA EUROPEA, 7

Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub- systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14(6), 539-550.

Li, C., Zhang, B., Luo, P., Shi, H., Li, L., Gao, Y., ... & Wu, W. M. (2018). Performance of a pilot-scale aquaponics system using hydroponics and immobilized biofilm treatment for water quality control. *Journal of Cleaner Production*.

Liang, J.Y., Chien, Y.H., 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *Intern. Biodeteriorat. Biodegrad.* 85, 693–700.

Liu, X. S. (2009). Sample size and the width of the confidence interval for mean difference. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 62(2), 201-215.

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.

Luna, Mercado A. (2007). Manual de producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) en variedades de crecimiento indeterminado bajo invernadero

Mancuso, M. (2013). Fish welfare in aquaculture. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 4(6), 1.

Martins, C. I., Galhardo, L., Noble, C., Damsgård, B., Spedicato, M. T., Zupa, W., ... & Planellas, S. R. (2012). Behavioural indicators of welfare in farmed fish. *Fish Physiology and Biochemistry*, 38(1), 17-41.

M'balaka, M., Kassam, D., & Rusuwa, B. (2012). The effect of stocking density on the growth and survival of improved and unimproved strains of *Oreochromis shiranus*. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38(3), 205-211.

Mehrim, A. I. (2014). Physiological, biochemical and histometric responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) by dietary organic chromium (chromium picolinate) supplementation. *Journal of advanced research*, 5(3), 303-310.

Mejía-Teniente, L., Durán-Flores, F. D. D., Chapa-Oliver, A. M., Torres-Pacheco, I., Cruz-Hernández, A., González-Chavira, M. M., ... & Guevara-González, R. G. (2013). Oxidative and molecular responses in *Capsicum annuum* L. after hydrogen peroxide, salicylic acid and chitosan foliar applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 10178-10196.

Méndez-Vázquez, J. R., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A., Cabrera-De la Fuente, M., Robledo-Olivo, A., & González-Morales, S. (2021). Efecto del riego deficitario en la acumulación de compuestos antioxidantes en plantas de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2).

Mercado Luna, A. (2007). Manual de producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) en variedades de crecimiento indeterminado bajo invernadero (Doctoral dissertation).

Mercier, L., Racotta, I. S., Yepiz-Plascencia, G., Muhlia-Almazán, A., Civera, R., Quiñones-Arreola, M. F., ... & Palacios, E. (2009). Effect of diets containing different levels of highly unsaturated fatty acids on physiological and immune responses in Pacific whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) exposed to handling stress. *Aquaculture Research*, 40(16), 1849-1863.

Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(4).

Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F. (2004). Questions and future challenges. *Trends in Plant Science*, 10(9), 490-498

Moniruzzaman, M., Uddin, K. B., Basak, S., Mahmud, Y., Zaher, M., & Bai, S. C. (2015). Effects of stocking density on growth, body composition, yield and economic returns of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) under cage culture system in Kaptai Lake of Bangladesh. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 6(8), 1.

Monsees, H., Klatt, L., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 48(7), 3482-3492.



Morales D. A. 2003. La tilapia. Biología, cultivo y comercialización de la tilapia. México. AGT editor 1-12pp

Moreno, F., & Patricia, L. (2009). Plant responses to water deficit stress. A review. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191.

Mucio-Ramírez, J. S. (2007). La neuroquímica del estrés y el papel de los péptidos opioides. *Revista de educación bioquímica*, 26(4), 121-128.

Munguia-Fragozo, P., Alatorre-Jacome, O., Rico-Garcia, E., Torres-Pacheco, I., Cruz- Hernandez, A., Ocampo- Velazquez, R. V., ... & Guevara-Gonzalez, R. G. (2015). Perspective for aquaponic systems:“omic” technologies for microbial community analysis. *BioMed research international*, 2015.

Mukuve, F.M., Fenner, R.A., 2015. The influence of water, land, energy and soil-nutrient resource interactions on the food system in Uganda. *Food Policy* 51, 24–37.

Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, 13(8), 10823-10843.

Nagarajan, S., & Nagarajan, S. (2010). Abiotic stress adaptation in plants. Pareek, A., Sopory, SK, Bohnert, HI, Govindjee (eds.) *Physiological, Molecular, and Agronomic Foundation*, 1-11.

Nelson, R. L., & Pade, J. S. (2008). Aquaponic food production: growing fish and vegetables for food and profit. *History of Aquaponics*. 2: 218.

Okunlola, G. O., Olatunji, O. A., Akinwale, R. O., Tariq, A., & Adelus, A. A. (2017). Physiological response of the three most cultivated pepper species (*Capsicum* spp.) in Africa to drought stress imposed at three stages of growth and development. *Scientia Horticulturae*, 224, 198-205.

Pankhurst, N. W. (2011). The endocrinology of stress in fish: an environmental perspective. *General and comparative endocrinology*, 170(2), 265-275.

Palm, H. W., Bissa, K., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part II: fish and plant growth. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 7(3), 162- 175.

Patti, J., Esteve, M., & Gaviria, J. I. (2011). Consumo de oxígeno del híbrido de tilapia roja florida *Oreochromis* sp. en agua de mar, bajo condiciones de laboratorio. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 23(2), 99-106.

Parola-Contreras, I., Tovar-Perez, E. G., Rojas-Molina, A., Luna-Vazquez, F. J., Torres-Pacheco, I., Ocampo-Velazquez, R. V., & Guevara-González, R. G. (2020). Changes in affinin contents in *Heliopsis longipes* (chilcuague) after a

controlled elicitation strategy under greenhouse conditions. *Industrial Crops and Products*, 148, 112314.

Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J. C., Díaz-Rubio, E., & De La Rosa, I. (2014). Assisted management of water exchange in traditional semi-intensive aquaculture ponds. *Computers and electronics in Agriculture*, 101, 128- 134.

Putra, P. A., & Yuliando, H. (2015). Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 283-288.

Rakocy, J.E.; Masser, M.P.; Losordo, T.M. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Integrating Fish and Plant Culture*; SRAC Publication: Stoneville, MS, USA, 2006; No. 454, pp. 1–16.

Ramirez, D., Sabogal, D., Jiménez, P., & Giraldo, H. H. (2017). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 4(1-2), 32-51.

Rakocy, J., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2003). Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. In *South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC 648* (pp. 63-69).

Rayhan, M. Z., Rahman, M. A., Hossain, M. A., Akter, T., & Akter, T. (2018). Effect of stocking density on growth performance of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) with Indian spinach (*Basella alba*) in a recirculating aquaponic system. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 3(2), 239073.

Ren, Q., Zhang, L., Wei, Y., & Li, D. (2018). A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 384-391.

Reyes-Flores, M., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, M. D. L. N., & Trejo-Téllez, L. I. (2020). Tomato quality (*Solanum lycopersicum* L.) produced in aquaponics complemented with foliar fertilization of micronutrients. *Agroproductividad*, 13(5).

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

Rivero, R. M., Ruiz, J. M., & Romero, L. (2004). Oxidative metabolism in tomato plants subjected to heat stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(4), 560-564.

Ronga, D., Lovelli, S., Zaccardelli, M., Perrone, D., Ulrici, A., Francia, E., ... & Pecchioni, N. (2015). Physiological responses of processing tomato in organic and conventional Mediterranean cropping systems. *Scientia Horticulturae*, 190, 161-172.

Rubio-Gastelum, D., Valenzuela-Quinonez, W., Parra-Bracamonte, G. M., & Santamaria- Miranda, A. (2014). Response of metabolites in hemolymph and productive performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured at high densities in laboratory. *REVISTA DE BIOLOGIA MARINA Y OCEANOGRAFIA*, 49(3), 601-606. *biochemistry*, 38(1), 85-105.

Sace, C.F., Fitzsimmons, K.M., 2013. Vegetable production in a recirculating aquaponics using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Acad. J. Agric. Res.* 1 (12), 236–250.

Sánchez-Del-Castillo, F., Moreno-Pérez, E. D. C., Contreras-Magaña, E., & Sahagún- Castellanos, J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 20(3), 239-251.

Sánchez-Muros, M. J., Barroso, F. G., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 16-27.

Sandoval, M., Reyes-Flores, M., de las Nieves Rodríguez-Mendoza, M., & Trejo-Téllez, L. I. (2020). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en acuaponía complementado con fertilización foliar de micronutrientes. *AgroProductividad*, 13(5).

Santiago-Rucinque, D., Polo, G., Borbón, J., & González Mantilla, J. F. 2017. Anesthetic use of eugenol and benzocaine in juveniles of red tilapia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 30(1).

Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8(11), 533.

Segner, H., Sundh, H., Buchmann, K., Douxfils, J., Sundell, K. S., Mathieu, C., ... & Vaughan, L. (2012). Health of farmed fish: its relation to fish welfare and its utility as welfare indicator. *Fish physiology and biochemistry*, 38(1), 85-105.

Shelton W.L. and T.J. Popma, 2006. *Biology*. pp. 1-49. In: C. Lim, C.D. Webster (eds.). *Tilapia: Biology, Culture, and Nutrition*. Haworth Press, Inc., Binghamton, NY. (in press).

Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., & Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural water management*, 178, 335-344.

Setiadi, E., Widyastuti, Y. R., & Prihadi, T. H. (2018). Water Quality, Survival, and Growth of Red Tilapia, *Oreochromis niloticus* Cultured In Aquaponics System. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 47, p. 02006). EDP Sciences.

Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8(11), 533.

Shinji, J., Kang, B. J., Okutsu, T., Banzai, K., Ohira, T., Tsutsui, N., & Wilder, M. N. (2012). Changes in crustacean hyperglycemic hormones in Pacific whiteleg shrimp *Litopenaeus*

*vannamei* subjected to air-exposure and low- salinity stresses. *Fisheries science*, 78(4), 833-840.

Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., & Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335-344.

Tapia, P. J., Puebla, M. C., Muñoz, A., Rojas, E., Marchant, C. M., Cornejo, M. A., ... & Small, B. C. (2012). Evaluation of the cortisol stress response in a marine perciform fish, the San Pedro Oplegnathus insignis. *North American Journal of Aquaculture*, 74(3), 438-442.

Thomas, R. M., Verma, A. K., Krishna, H., Prakash, S., Kumar, A., & Peter, R. M. (2021). Effect of salinity on growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and spinach (*Spinacia oleracea*) in aquaponic system using inland saline groundwater. *Aquaculture Research*, 52(12), 6288-6298.

Trang, N. T. D., & Brix, H. (2014). Use of planted biofilters in integrated recirculating aquaculture hydroponics systems in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquaculture Research*, 45(3), 460-469.

Tiwari, M., Sharma, N. C., Fleischmann, P., Burbage, J., Venkatachalam, P., & Sahi, S. V. (2017). Nanotitania exposure causes alterations in physiological, nutritional and stress responses in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Frontiers in plant science*, 8, 633.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 6-13.

Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. D. L., & Moraes-Valenti, P. (2018). Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*, 88, 402-413.

Valbuena-Villarreal, R. D., & Cruz-Casallas, P. E. (2006). Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Orinoquia*, 10(1).

Van de Nieuwegiessen, P. G., Boerlage, A. S., Verreth, J. A., & Schrama, J. W. (2008). Assessing the effects of a chronic stressor, stocking density, on welfare indicators of juvenile African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell. *Applied Animal Behaviour Science*, 115(3-4), 233-243.

Villarroel, M., Tupac-Yupanqui, I., Nicodemus, N., Rico, M., Cañón, J., Menoyo, D., ... & Dunner, S. (2005). Expresión diferencial de genes en tilapia *Oreochromis niloticus* (L., 1758) bajo estrés alimentario. Boletín. Instituto Español de Oceanografía, 21(1-4), 261- 270.

Walley, J. W., Coughlan, S., Hudson, M. E., Covington, M. F., Kaspi, R., Banu, G., ... & Dehesh, K. (2007). Mechanical stress induces biotic and abiotic stress responses via a novel cis-element. PLoS genetics, 3(10), e172.

Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. Aquacultural engineering, 76, 9-19.

Wortman, S. E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb- and-flow hydroponic system. Scientia Horticulturae, 194, 34-42.

Wu, H., Aoki, A., Arimoto, T., Nakano, T., Ohnuki, H., Murata, M., ... & Endo, H. (2015). Fish stress become visible: A new attempt to use biosensor for real-time monitoring fish stress. Biosensors and Bioelectronics, 67, 503-510.

Xu, L., Liu, S., & Li, D. (2017). Prediction of water temperature in prawn cultures based on a mechanism model optimized by an improved artificial bee colony. Computers and Electronics in Agriculture, 140, 397-408.

Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. Water, 9(1), 13.

Yıldız, H. Y., & Bekcan, S. (2017). Role of stocking density of tilapia (*Oreochromis aureus*) on fish growth, water quality and tomato (*Solanum lycopersicum*) plant biomass in the aquaponic system. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 2(6), 238971.

Yordanova, R. Y., Christov, K. N., & Popova, L. P. (2004). Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding. Environmental and Experimental Botany, 51(2), 93-101.

Zárate-Martínez, W., González-Morales, S., Ramírez-Godina, F., Robledo-Olivo, A., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Effect of phenolic acids on the antioxidant system of tomato plants (*Solanum lycopersicum* Mill.). Agronomía Mesoamericana, 32(3), 854-868.

Zavala Zavala, J. (2008). Estrés y burnout docente: conceptos, causas y efectos.

Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C., & Fang, Y. (2016). Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. Bioresource technology, 210, 81-87.