



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE
PEQUEÑA ESCALA, PARA LA PRODUCCIÓN
LIMPIA DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis* sp),
CACHAMA BLANCA (*Piaractus brachypomus*) Y
RÚGULA (*Eruca vesicaria sativa*).**

Trabajo de grado para optar por el título de bióloga

GRETTA LÓPEZ VOTTELER

Universidad Militar Nueva Granada
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas
Programa de Biología Aplicada
Cajicá- Cundinamarca

2020

GRETTA LÓPEZ VOTTELER
COD. 0500843

Edwin Gómez Ramírez MSc.
DIRECTOR

Ana Constanza Torres Mesa MSc.
CODIRECTOR

Cajicá-Cundinamarca
2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dedicar el presente documento a Dios, por permitir labrarme este camino, donde me brindó la sabiduría y herramientas necesarias para lograrlo. A mi abuela, María Teresa Gómez, a quien mencione en más de una ocasión como el roble hecho mujer; ella me enseñó a enfrentar la vida con tenacidad y a saber que todo se puede lograr cuando uno se lo propone. Agradecer a mis padres, Carmen Alicia López Gómez y Edgardo Chavés Bautista, por su apoyo constante a nivel emocional y económico. Ellos no permitieron que me rindiera frente a ninguna circunstancia y me guiaron en el camino de Dios desde pequeña. Les agradezco por los valores, enseñanzas y ejemplo que dan resumen de la persona que soy hoy día. A mi hermano Nicolás López y a mis tíos Omar Chavés y Jorge López, que, con sus palabras, acciones y amor estuvieron siempre pendientes de mí, a pesar de la distancia.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Edwin Gómez Ramírez, por su constante colaboración, confianza, paciencia y enseñanza. Por no permitir que me rindiera frente a la culminación de mi carrera. Al profesor Hernán Hurtado, mi mentor en la hidroponía y en la acuaponía. Al grupo de investigación $E=mc^2$ que, de la mano con mi codirectora de trabajo de grado, Ana Constanza Torres Mesa, fueron mi guía práctica, y Edna Roció Riaño Castillo, que, en conjunto con mi codirectora, me permitieron incursionar en el mundo de la hidroponía y de la acuaponía. A toda la planta docente y auxiliar de la Universidad Militar Nueva Granada, que por más de cinco años permitieron mi desarrollo académico y personal.

Quiero agradecer también a la Universidad Militar Nueva Granada, a la Vicerrectoría de investigaciones por el apoyo al proyecto CIAS 1921 y a Colciencias por el apoyo al proyecto CT 513-2014 “Definición de la relación óptima entre peces y plantas en sistemas acuapónicos para la producción limpia e intensiva de cachama blanca, bocachico y tilapia; rúgula y berro”.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	6
CAPITULO I	7
EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA DE TILAPIA ROJA (<i>Oreochromis sp</i>), CACHAMA BLANCA (<i>Piaractus brachypomus</i>) Y RÚGULA (<i>Eruca vesicaria sativa</i>).	7
INTRODUCCIÓN	7
El uso del agua en la acuicultura y la agricultura	7
Contaminación por producción agrícola y acuícola	8
DESARROLLO Y DISCUSIÓN	12
Acuaponía	12
Ventajas de la acuaponía	13
Desventajas de la acuaponía	15
Componentes de los sistemas acuapónicos	16
Componente acuícola	17
Filtro mecánico	18
Mineralizador	19
Biofiltro	20
Zona hidropónica	20
Aireación / oxigenación	22
Producción acuícola de Colombia	22
Tilapia roja (<i>Oreochromis sp.</i>)	22
Cachama blanca (<i>Piaractus brachypomus</i>)	24
Producción de hortalizas en Colombia	25
Rúgula (<i>Eruca vesicaria</i> subsp. <i>sativa</i> (Mill). Thell)	25
CONCLUSIÓN	26
BIBLIOGRAFÍA	27

RESUMEN	36
CAPITULO II	37
EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA DE TILAPIA ROJA (<i>Oreochromis</i> sp.), CACHAMA BLANCA (<i>Piaractus brachypomus</i>) Y RÚGULA (<i>Eruca vesicaria sativa</i>).	37
INTRODUCCIÓN	37
MATERIALES Y MÉTODOS	40
Zona de estudio	40
Diseño del sistema acuapónico	40
Diseño experimental	42
Material animal	43
Material vegetal	43
Estimación de parámetros productivos y de crecimiento	44
Peces	44
Plantas	45
Evaluación de variables fisicoquímicas	46
Enmiendas	46
Análisis de datos	46
RESULTADOS	47
Parámetros productivos y de crecimiento	47
Peces	47
Plantas	49
Variables fisicoquímicas	53
DISCUSIÓN	57
Parámetros productivos y de crecimiento	57
Peces	57
Crecimiento de <i>O. sp</i>	59
Crecimiento de <i>P. brachypomus</i>	62
Plantas	65
Crecimiento de <i>E. v. sativa</i>	65
Variables fisicoquímicas	72
CONCLUSIÓN	76
RECOMENDACIÓN	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema acuapónico vertical.....	42
Figura 2. Parámetros de crecimiento del policultivo de <i>Oreochromis sp.</i> (<i>O. sp.</i>) y <i>Piaractus brachypomus</i> (<i>P. brachypomus</i>) en acuaponía	48
Figura 3. Deficiencias nutricionales de la rúgula durante el cultivo	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros productivos estimados para peces.....	44
Tabla 2. Parámetros productivos estimados para rúgula.....	45
Tabla 3. Parámetros productivos del policultivo de <i>Oreochromis sp.</i> y <i>Piaractus brachypomus</i> en acuaponía.....	47
Tabla 4. Longitud promedio de las hojas de rúgula acuapónica durante el cultivo.....	49
Tabla 5. Análisis de crecimiento de la rúgula acuapónica.....	50
Tabla 6. Rendimiento del cultivo de rúgula acuapónica.....	51
Tabla 7. Parámetros productivos del cultivo de rúgula acuapónica.....	51
Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el cultivo.	54
Tabla 9. Comportamiento de nutrientes durante el cultivo.....	56
Anexo 1. Condiciones fisicoquímicas.	87

CAPITULO I

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp*), CACHAMA BLANCA (*Piaractus brachypomus*) Y RÚGULA (*Eruca vesicaria sativa*).

INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario ha incrementado constantemente en la última década, en respuesta al rápido crecimiento poblacional a nivel mundial, esto, para suplir la demanda alimentaria que conlleva tal crecimiento (Markham, 2008; Zurruta, *et al.*, 2015). De esta forma ha aumentado también la demanda de tierras agrícolas, mismas que se han visto reducidas por el creciente desarrollo urbano, lo que impide mantener una seguridad alimentaria (Hennecke & Rettenmaier, 2015) Todas estas modificaciones del suelo, junto con la sobre explotación de los recursos naturales y la producción excesiva de desechos, generando un impacto ambiental negativo.

El uso del agua en la acuicultura y la agricultura

Uno de los principales problemas que se encuentra en los sectores de la acuicultura y la agricultura, es la distribución del recurso hídrico, ya que hay zonas a nivel mundial donde sobreabunda, sin embargo, también hay zonas con especial restricción del mismo, dificultando una producción de alimentos equitativa a nivel mundial (FAO, 2013).

La agricultura demanda cerca del 70% de las extracciones de agua dulce a nivel mundial y más del 90 % de su consumo (FAO, 2013), la evapotranspiración de suelos cultivados y el riego con aguas subterráneas, son los usos con mayor consumo de agua extraída. Bajo esta

forma de utilización del agua, se ha generado disminución de volumen de los acuíferos y reducción en el caudal de los ríos, además han inducido a que el 20% del territorio de zonas de regadío a nivel mundial se hayan salinizado, lo que dificulta la agricultura en esas regiones (Unesco, 2015).

En cuanto a la acuicultura continental, especialmente en los cultivos realizados en sistemas lóticos, se realizan cambios totales del agua más de 5 veces por día, para estaques corresponde al rango del 10% al 25% del agua, llegando algunos al 100% de recambio de agua por día, lo que hace a este tipo de acuicultura ambientalmente insostenible (Merino, Salazar, & Gómez 2006).

Contaminación por producción agrícola y acuícola

Los fertilizantes son elementos y compuestos de origen natural o artificial que, con el propósito de mejorar la calidad y productividad de los cultivos, se añaden como método de nutrición adicional y como restauración de los nutrientes en suelos cultivados previamente (Guzmán & Rodríguez, 2004). Por ejemplo, en estanques acuícolas son adicionados para promover el establecimiento de fitoplancton y niveles tróficos superiores que sean aprovechables para la alimentación de los peces (AU & USDA, 2002). También se ha descrito que se aplican directamente en plantas como un complemento para dar pronta respuesta a deficiencias nutricionales (Salas, 2002).

Los fertilizantes orgánicos son de origen animal y/o vegetal y para ser aplicados requieren de un proceso de descomposición (FAO, 2002). Entre ellos se encuentran aquellas plantas sembradas de manera previa al cultivo o como inter-cultivo (García, 2012). Los fertilizantes orgánicos aportan materia orgánica y proveen los nutrientes por medio de una liberación paulatina, lo que minimiza su lixiviación y los convierte en un beneficio para el estrato edáfico. Pese a lo anterior, el contenido de nutrientes de los fertilizantes orgánicos suele ser menor en comparación con los fertilizantes artificiales (FAO, 2002).

Los fertilizantes artificiales son productos químicos sintetizados que poseen una cantidad determinada de nutrientes disponibles en cuanto son aplicados. De esta forma, los fertilizantes artificiales enriquecen la fertilidad de los suelos. Así mismo, su disponibilidad inmediata conlleva a que se infiltre con mayor velocidad el lixiviado de estos, generando pérdidas económicas y problemas ambientales (FAO, 2002; IDAE, 2007).

Los fertilizantes orgánicos han generado un incremento en la producción de cultivos vegetales, en cuanto a número de frutos, tamaño, materia seca, contenido de flavonoides y antioxidantes, además de la reducción de trazas de pesticidas en los productos (Mitchell *et al.*, 2007; Gąstoł, Domagała-Świątkiewicz, & Krośniak, 2011; Gómez, 2013; Baranski *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2018). En el trabajo de Mosha (2015) a pesar de no haber diferencias significativas en el rendimiento del cultivo de peces, se evidencia que la ganancia de peso y la tasa de crecimiento específico fueron mayores con los fertilizantes orgánicos. Pero se ha encontrado que la nutrición de los cultivos depende de la calidad y cantidad de los fertilizantes orgánicos (Pradeepkumar *et al.*, 2017), subrayando además que aquellos que no han sido compostados generan mayores emisiones de N₂O al ambiente respecto a los artificiales (De Rosa *et al.*, 2018).

También, el uso de fertilizantes artificiales se hace necesario puesto que los fertilizantes orgánicos poseen contenidos de nutrientes variables. Por tal razón, el manejo integrado de fertilizantes orgánicos y de fertilizantes artificiales, donde se aprovechan ventajas de cada uno de ellos, ha arrojado mejores rendimientos de cultivo y de crecimiento de las plantas alcanzando una mejora estructural de los suelos y en el contenido nutricional de los productos (Jácome, 2011; Abid *et al.*, 2015; Sadaf *et al.*, 2017; Cobb *et al.*, 2018). En la revisión de Seufert, Ramankutty, & Foley (2012), se evidencia que los rendimientos son similares entre cultivos con fertilizantes orgánicos y cultivos con fertilizantes artificiales, siempre y cuando se manejen buenas prácticas de cultivo, adicional a esto se considera que el uso combinado de ambos tipos de fertilizantes puede llegar a generar un sistema de cultivo sostenible. Aun así, los fertilizantes artificiales sumados a fertilizantes orgánicos que no han sido

compostados arrojan mayores emisiones de N₂O y CO₂ al ambiente respecto a tratamientos con fertilizantes artificiales convencionales (De Rosa *et al.*, 2018).

El uso de fertilizantes ha tenido un incremento considerable en las últimas décadas, y teniendo en cuenta que su uso presenta respuestas positivas en el rendimiento de los cultivos, este rendimiento parece tener una relación directamente proporcional con la explosión demográfica mundial (FAO, 2000). La FAO (2015), planteó que el uso de fertilizantes artificiales a nivel mundial tendría un aumento creciente desde el 2015 hasta el 2018 de 1,8%, donde se esperaba un uso aproximado de 200 millones de toneladas de fertilizantes a nivel mundial, por su parte, para los fertilizantes orgánicos se encontró que en 2016 se reportaron aproximadamente 58 millones de hectáreas con cultivos certificados para agricultura orgánica a nivel mundial, lo que consideran un incremento del 15 % para ese año.

Se reportó también, un total de 400.000 toneladas de producción acuícola orgánica certificada, aunque se comenta que muchos países no dan información completa de esto, por lo que se estima que la producción orgánica podría ser mayor (FiBL & IFOAM, 2018). Teniendo en cuenta que el uso de fertilizantes se considera una medida indirecta de la producción de alimentos, se ve en ellos una oportunidad para recobrar la seguridad alimentaria, pues la demanda de alimentos asciende con celeridad en vista del incremento poblacional a nivel mundial (Roberts, 2009). Sin embargo, el uso indiscriminado y sin conocimiento (sin técnica) de fertilizantes por su relativo éxito de producción en la agricultura, ha causado diversos problemas ambientales dentro de los cuales cabe resaltar; la deforestación, la variación en la dinámica y el flujo de nutrientes propio de cada suelo, la salinización y la acumulación de elementos que generan desbalances en la nutrición de las plantas, y modificación de la diversidad de organismos y microorganismos propios de los suelos (Carter *et al.*, 2012; Baker & Miller, 2013).

A esto se suma la contaminación hídrica por escorrentía e infiltración, porque los fertilizantes llegan a acuíferos y a corrientes de aguas cercanas, generando concentraciones que pueden perjudicar la salud humana y de otras especies que usan estos recursos. Adicionalmente,

genera eutrofización de aguas loticas, variando la biodiversidad y la concentración de oxígeno de estas (FAO, 2003). Por otro lado, la producción agrícola, bajo regímenes de fertilización ha traído consigo el uso de múltiples pesticidas para el control de plagas y enfermedades de los cultivos. Los pesticidas son sustancias que se emplean como una herramienta para controlar poblaciones de organismos y microorganismos que afectan negativamente los cultivos y han sido propuestos en favor de mejorar el mantenimiento de los mismos (Bedmar, 2011). Los pesticidas poseen diferentes clasificaciones de acuerdo a sus características, así se pueden encontrar respecto a la base del mismo, como biológicos o sintéticos, y se pueden reconocer algunos bajo la plaga que contrarresta como: insecticidas, herbicidas, fungicidas, raticidas, bactericidas, larvicidas y nematicidas (Markets & markets, 2019).

A pesar de las bondades que los pesticidas ofrecen frente al control de plagas, la mayoría de estos, presentan altos índices de toxicidad no sólo contra las plagas, sino también para otros organismos y microorganismos presentes en el medio de aplicación y fuera de él (infiltración en suelos), así como también para el ser humano (Bedmar, 2011; Wolansky, 2011). El uso de pesticidas también genera deterioro ambiental (Martínez – Ghera, 2011), el nivel de daño depende de su toxicidad, movilidad y su permanencia en el medio. A su vez, puede actuar como antagonista de los fertilizantes, puesto que algunos fertilizantes pueden liberar pesticidas residuales de anteriores aplicaciones, afectando a los cultivos nuevos (Martínez – Ghera, 2011).

La acuicultura no es ajena a estos daños ambientales pues se han reportado problemas como la modificación de terrenos, el desvío de cauces de ríos y la destrucción de manglares con el objetivo de establecer pozos y jaulas para los cultivos, causando modificaciones en suelos, sedimentación, aumento de la turbidez del agua y cambios en las comunidades bentónicas (Mandal *et al.*, 2014). De igual manera, las acumulaciones de desechos como lo son las excreciones metabólicas, el alimento no consumido y otros agentes químicos como los fertilizantes y los medicamentos, alteran la composición y densidad de las especies propias del sitio (Dabi & Edem, 2015; Johnson & McCann, 2017).

Esto es aún más notorio en zonas de escaso flujo de corriente o en ecosistemas loticos, donde se evidencia, además: acumulación anormal de materia orgánica cargada con un sin número de químicos, disminución de niveles de oxígeno por los sedimentos, liberación de sustancias, proliferación de algas potencialmente tóxicas para la biota de los sistemas y, lo que resulta más preocupante, esta agua termina siendo no apta para los humanos (Martínez & Martínez, 2012). Esto también afecta actividades pesqueras y genera desplazamiento de especies nativas, debido a las afectaciones que ocasionan los escapes de las especies cultivadas, las que habitualmente son introducidas a los ecosistemas acuáticos (Martínez & Martínez, 2012).

Teniendo en cuenta la perspectiva anterior, los métodos de cultivos agropecuarios convencionales han dejado en duda el carácter sostenible de la producción de alimentos y que a su vez genere una seguridad alimentaria (Gruhn, Goletti, & Yudelman, 2000; Beddington, 2011), por lo que se han planteado diversas estrategias en favor de minimizar los impactos ambientales negativos, como los son la agricultura orgánica, la agricultura ecológica, la técnica de acuicultura RAS (Recirculating Aquaculture Systems), el cultivo de plantas mediante la hidroponía y la acuaponía. Esta última, consiste en un cultivo integrado que se ha proyectado para mejorar rendimientos productivos de especies vegetales y animales, además mitiga los impactos ambientales causados por la agricultura y la acuicultura tradicional, de forma que se obtienen beneficios económicos y ambientales (Aguilera *et al.*, 2012), lo que podría llevar a considerar que posee un elevado potencial en cuanto a la producción sostenible de alimentos.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Acuaponía

La acuaponía se puede definir como una técnica de cultivo de múltiples especies, que integra los sistemas RAS de acuicultura con la hidroponía de la agricultura. El primer componente de manera individual, trata del cultivo de animales acuáticos, como peces, moluscos y

crustáceos, en un sistema donde se recicla el agua por medio de la remoción de sólidos y la biofiltración, además permite realizar un mejor seguimiento y control de las condiciones físicoquímicas de la misma (Jiménez, 2012). En el segundo componente, de manera particular, trata del cultivo de plantas sin suelo, donde se implementan soluciones nutritivas que son reutilizadas, ajustando el pH, la conductividad eléctrica y los nutrientes, minimizando así las descargas al suelo o fuentes hídricas (Moreno *et al.*, 2015).

En acuaponía, a partir del componente acuícola se generan desechos que son aprovechables para el crecimiento del segundo componente que es aquel dónde se producen las plantas. En este sistema los desechos metabólicos producidos por un animal acuático (generalmente peces) y el alimento no consumido por los mismos, se transforman en residuos sólidos y residuos suspendidos, que a su vez son convertidos en nutrientes a través de procesos de nitrificación bacteriana y mineralización (Somerville *et al.*, 2014), los cuales son posteriormente aprovechados como fuente nutritiva para las plantas, de esta forma se reduce la carga de compuestos en el agua, que bajo diferentes condiciones resultan tóxicos para los peces, y así retorna filtrada al tanque de peces donde vuelve a empezar el ciclo (Blidariu & Grozea, 2011).

Si bien es cierto que la acuaponía plantea diversas ventajas productivas frente a un plano comercial, esta también se ha trabajado a nivel de investigación científica. Las investigaciones han permitido ampliar el conocimiento sobre las especies que allí se producen y la relación simbiótica que se genera, puesto que, al ser un sistema cerrado de recirculación de agua, este facilita la evaluación y el control de las variables que involucra, en comparación con los cultivos tradicionales, aun así, hace falta mucho por investigar sobre el sistema biológico que permite realizar tal simbiosis, el cual depende de las especies producidas (Junge *et al.*, 2017).

Ventajas de la acuaponía

La acuaponía presenta ventajas sobre otros cultivos convencionales tanto de animales acuáticos, como de plantas, las cuales incluyen (Rakocy, Masser, & Losordo, 2006; Aguilera *et al.* 2012; Somerville *et al.*, 2014):

1. Reduce el uso del recurso hídrico en la producción de alimentos, ya que puede reutilizar el agua luego de ser filtrada por las plantas, generando así un ciclo.
2. Permite el uso eficiente de nutrientes, teniendo en cuenta que gran parte de estos son proporcionados por excreciones metabólicas de los peces y alimento no consumido por los mismos, sumado a los procesos de nitrificación y mineralización.
3. Disminuye el uso de fertilizantes para la producción de plantas, sin embargo, en caso de requerir una fertilización adicional, se pierde un mínimo del producto aplicado debido al sistema de recirculación, por lo que no se desperdicia el fertilizante adicionado.
4. Disminuye los residuos y compuestos potencialmente contaminantes para el medio ambiente, en las descargas de agua de la zona acuícola, ya que estos son absorbidos por las plantas.
5. Mayor rendimiento del espacio de producción, puesto que se puede cultivar una gran variedad de alimentos en un área reducida.
6. Se obtienen dos o más ingresos gracias a que el cultivo de productos de origen animal y vegetal, permite un aumento de las ganancias de producción bajo un mismo sistema.
7. Se produce alimentos de calidad y saludables, bajo la premisa de no utilizar suelo, ya que puede reducir la aparición de plagas.

8. Se reutilizan los residuos del componente acuícola para nutrir el componente hidropónico.
9. Genera una producción limpia, pues el control de plagas debe ser estrictamente de origen biológico, para evitar interferir con la simbiosis presente en el sistema de cultivo o alterar el equilibrio de algún componente biológico del mismo.
10. Se consigue producir alimentos sin la necesidad de suelos con calidad agrícola o acuícola.
11. Requiere menos mano de obra, en cuanto a las actividades de labranza y cosecha.
12. Permite la implementación de múltiples diseños y montajes para su establecimiento en espacios reducidos.
13. Se puede establecer producciones cerca de los centros de consumo, que a su vez permite mejorar la economía local, promover la seguridad alimentaria y reducir los costos económicos y ambientales del transporte de alimentos.
14. Permite controlar y ajustar con mayor precisión las variables fisicoquímicas y de nutrientes de los sistemas.

Desventajas de la acuaponía

La acuaponía también posee algunas desventajas sobre otros cultivos convencionales tanto acuícolas, como agrícolas, las cuales incluyen (Rakocy, Masser, & Losordo, 2006; Aguilera *et al.* 2012; Somerville *et al.*, 2014):

1. El costo de inversión inicial y de montaje es elevado, aun así, este dependerá del tamaño del sistema y de la tecnología implementada para su funcionamiento.

2. Los sistemas dependen completamente de la electricidad, lo que significa que sus costos de uso son elevados.
3. La gestión inadecuada de desechos afecta la calidad del agua, lo que repercute en el rendimiento de los cultivos.
4. El control de plagas está limitado por las variables biológicas del sistema, por tanto, se restringe el uso de tratamientos químicos como los pesticidas convencionales.
5. El rendimiento y densidad de cultivo de las plantas depende del número de peces y, por lo tanto, está restringido a este.
6. La baja calidad del agua puede afectar a todos los organismos del sistema (peces-plantas-bacterias).
7. Para el correcto funcionamiento de los sistemas se necesita personal de mantenimiento calificado.
8. La complejidad del sistema se incrementa bajo la premisa de las diferentes condiciones de cada una de las especies involucradas en el cultivo.

Componentes de los sistemas acuapónicos

Los sistemas acuapónicos poseen unos componentes básicos que se pueden modificar de acuerdo al diseño y necesidad de cada sistema. Estos componentes pueden incluir: un tanque de especies animales, un sistema de remoción de sólidos, un biofiltro, un sistema hidropónico

acoplado o no, junto con sistemas de bombeo de agua y aireación. La unión de estos componentes está dispuesta de tal forma que el agua se desplaza por cada uno de ellos permitiendo los procesos de remoción de sólidos, mineralización, nitrificación y posterior captura de nutrientes (Diver & Rinehart, 2010).

Componente acuícola

Los contenedores empleados para esta sección, representan hasta un 20% del costo total del montaje del sistema, por lo cual se deben tener en cuenta ciertas consideraciones, como la forma, material y cobertura. En tal caso, para la forma, se recomiendan tanques redondos de fondo plano, puesto que estos permiten la correcta circulación de los desechos sólidos, para facilitar su extracción, por lo tanto, bajo otras formas de diseño, se requiere implementar bombas de aire o agua, que permitan la correcta movilidad de los desechos (Somerville *et al.*, 2014).

Asimismo, se recomienda usar como material del contenedor, plásticos resistentes a las adversidades climáticas. Por otro lado, no recomienda el uso de estanques debido a la complejidad de mantenimiento que conllevan estos. En cuanto al color, es apropiado colores claros, ya que facilitan el control sobre las especies cultivadas y los desechos de los mismos, sin embargo, esto puede depender también de cada especie cultivada. También se recomienda mantener los tanques cubiertos, para evitar la entrada de elementos ajenos al sistema, la proliferación de algas y la intervención de potenciales depredadores (Somerville *et al.*, 2014).

Como se mencionó con anterioridad en esta sección es donde se generan los residuos aprovechables, de esta forma las excreciones metabólicas incluyen no sólo amonio y amoniaco (NAT: nitrógeno amoniacal total), sino que también por medio de transporte pasivo, se excreta calcio, potasio, sodio, cloro y carbonatos, de los cuales algunos son captados nuevamente por los peces y los otros quedan disponibles en el medio (David & Vásquez, 2010; Horng *et al.*, 2017). Asimismo, los residuos de alimento no consumido por la especie cultivada, terminan como desechos sólidos y suspendidos (Somerville *et al.*, 2014).

Para los peces el rango de tolerancia de pH es de 6.5-8.5, pese a ello, en medios que tienden a ser alcalinos hay mayor porcentaje de amoníaco el cual es tóxico para los peces, el rango de oxígeno disuelto (OD) en el medio debe ser de 4-8 mg/L, en el caso de la temperatura cada una de las especies tiene un rango específico, es por esto que peces de aguas cálidas presentan un rango general de 22-32°C, mientras que los de agua fría de 10-18 °C (Somerville *et al.* 2014).

Las especies implementadas en estos tipos de sistemas habitualmente son aquellas que han sido ampliamente utilizadas en la acuicultura ya que presentan paquetes tecnológicos de producción, dentro de las cuales se encuentran diferentes especies de tilapia (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis sp.*), la carpa común (*Cyprinus carpio*), el pez gato (*Ictalurus punctatus*), la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y el camarón gigante (*Macrobrachium rosenbergii*) (Somerville *et al.*, 2014; Thorarinsdottir *et al.*, 2015). De todas formas, esto no impide el uso de especies nativas, al contrario, permite un mejor control de las condiciones fisicoquímicas, lo que representa una ventaja para el crecimiento de las mismas.

Filtro mecánico

Este tanque es primordial para el correcto funcionamiento de los sistemas, puesto que en este se lleva a cabo la remoción mecánica de gran parte de los residuos sólidos, resultado de la excreción de las especies ícticas cultivadas y el alimento no consumido por las mismas, (Somerville *et al.*, 2014). Este tanque va unido a la salida de agua del tanque de la sección acuícola y la eliminación de los residuos de esta sección es necesaria por varios factores, dentro de los cuales se destacan en primer lugar, evitar zonas de condiciones anóxicas, donde proliferen bacterias que produzcan sustancias nocivas para las especies de cultivo acuícola, partiendo de la descomposición de tales residuos, en segundo lugar, impedir la obstrucción de los sistemas y el facilitar el flujo del agua (Somerville *et al.*, 2014), asimismo, la acumulación de estos desechos en el sistema incrementa la demanda de oxígeno en el sistema (Nelson & Pade, 2008).

Existe una gran variedad de filtros y su uso depende de la escala del sistema acuapónico, de esta forma para unidades pequeñas, se pueden reconocer los filtros de pantalla, láminas de filtro o recipientes con material de filtración, no obstante, ese tipo de filtros es insuficiente para unidades de cultivo con mayores dimensiones y densidades de cultivo, por lo que se reconocen algunos filtros como los tanques de sedimentación, clarificadores, filtros de arena y filtros deflectores, su uso está condicionado a la cantidad de residuos generados en la sección acuícola (Somerville *et al.*, 2014). Por ejemplo, los clarificadores de remolino, están diseñados con el propósito de concentrar los residuos en el fondo del tanque para posteriormente ser desechados por una tubería adicionada en la parte inferior del mismo (Somerville *et al.*, 2014).

Mineralizador

En acuaponía se identifica como el proceso de descomposición de los desechos sólidos, producidos en la sección acuícola, por parte de bacterias que los procesan y metabolizan para convertirlos en última instancia en nutrientes aprovechables para las plantas (Nelson & Pade, 2008). Mantener los desechos por tiempo prolongado en los sistemas permite una mayor mineralización, la cual se traduce en nutrientes disponibles para las plantas, por lo que en algunos sistemas se suelen dejar los residuos sólidos por tiempos prolongados, aun así, un manejo inadecuado genera las complicaciones ya mencionadas en el componente filtro mecánico, y no es recomendable para unidades acuapónicas pequeñas, por lo que la mineralización no siempre es implementada en sistemas acuapónicos, pese a ello, se puede acoplar un recipiente diferente a la salida del filtro mecánico (Nelson & Pade, 2008).

La mineralización en recipientes a parte del filtro mecánico, permitirá la descomposición de los desechos sólidos, con la implementación de aireación, por medio de bacterias que se encargaran de procesarlos y transformarlos, en nutrientes aprovechables, de esta forma el agua se puede decantar y retornar al sistema acuapónico (Somerville *et al.*, 2014).

Biofiltro

Se trata de un tanque que contiene un sustrato inerte que cuenta con gran área superficial, lo que permite el establecimiento de una mayor población de bacterias, que procederán a realizar los procesos de nitrificación (Somerville *et al.*, 2014), en este proceso se transforma el NAT (Nitrógeno amoniacal total) en nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) (Somerville *et al.*, 2014). Dependiendo del diseño de la unidad acuapónica, las bacterias pueden aprovechar la raíz de las plantas y las paredes de la sección hidropónica como medio de sustrato para adherirse, aunque, en sistemas con altas densidades de peces, se necesita un tanque específico para el proceso de nitrificación, que contenga un material con gran área superficial y que sea aireado u oxigenado (Somerville *et al.*, 2014).

El proceso de nitrificación se hace necesario para evitar la intoxicación de los peces, puesto que el amoníaco (NH_3) que hace parte del NAT, puede penetrar las branquias y causar problemas de salud y afectar el crecimiento de los peces (Blidariu & Grozea, 2011; Somerville *et al.*, 2014), de igual modo, las plantas pueden capturar el nitrógeno en forma de NO_3^- , en mayor proporción respecto a la forma NH_4^+ (Masclaux-Daubresse, *et al.*, 2010).

En adición, para poder mantener un buen funcionamiento del biofiltro se deben tener en cuenta dos factores principales, el primero tiene que ver con el área superficial del material implementado como sustrato para las bacterias, puesto que de este depende la cantidad de NAT transformado (Somerville *et al.*, 2014). El segundo tiene que ver con las condiciones adecuadas del agua, por lo que se debe considerar mantener un rango de pH de 6-8.5, temperatura entre 17-34 °C y el OD superior a los 4 mg/L, además de esto, las bacterias nitrificantes son fotosensibles, por lo que este tanque debe permanecer cubierto y ser de color oscuro (Somerville *et al.*, 2014).

Zona hidropónica

En este punto es donde se disponen las plantas, desde semilla o como plántulas, allí son aprovechados los nutrientes que han sido transformados en el biofiltro y en algunos casos en el mineralizador, esto reduce la cantidad de nutrientes o desechos presentes en el agua y permite que el agua retorne filtrada al tanque de peces (Somerville *et al.*, 2014).

El diseño de la esta sección está plenamente relacionado con los diseños implementados en la hidroponía, por lo que se pueden reconocer sistemas de cultivo como MB (Media beds), en donde las plantas crecen directamente en un substrato de soporte, NFT (Nutrient Film technique), donde las plantas están dispuestas en tubos con soporte y crecen sobre una película de agua proveniente del biofiltro, DWC (Deep water culture), donde las plantas crecen suspendidas en un tanque, sobre agua proveniente del biofiltro y son soportadas por un material a forma de balsa, Aeroponía, donde las plantas al igual que en el método NFT son soportadas en tubos, pero su nutrición e hidratación se da mediante la aplicación del agua proveniente del biofiltro en forma de aerosol (Somerville *et al.*, 2014).

Las condiciones de cultivo dependen de cada especie cultivada pero se puede encontrar como regla general que las plantas requieren un rango de pH de 5.5 -7.5, para realizar una correcta absorción de nutrientes, asimismo un valor de OD superior a 3 mg.L⁻¹, la temperatura del medio depende de la especie cultivada (Somerville *et al.*, 2014) y como regla general se encuentra unos lineamientos básicos de concentración de elementos en el medio para su correcta nutrición como $\text{NAT} < 3 \text{ mg.L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- < 1 \text{ mg.L}^{-1}$ y $\text{NO}_3^- 70\text{-}300 \text{ mg.L}^{-1}$ (Nelson & Pade, 2008).

En cuanto a las especies usadas, se ha reportado una amplia gama de vegetales de tipo hortaliza, verdura, frutales, aromáticas y ornamentales, sin embargo, hay que tener en cuenta el tipo de sistema que se va a implementar, puesto que no todos los sistemas poseen las propiedades estructurales necesarias para el crecimiento adecuado de todos los tipos de plantas (Somerville *et al.*, 2014). Aún más importante se debe tener en cuenta la demanda nutricional de cada especie vegetal a trabajar, puesto que una especie donde su producto

aprovechable son las hojas tiene menor demanda nutricional comparativamente con una planta donde su producto aprovechable es el fruto (Caló, 2011).

Aireación / oxigenación

Por otra parte, es importante tener un buen sistema de aireación, puesto que los organismos que pertenecen al sistema (peces-plantas-bacterias), requieren de un suministro específico de oxígeno para poder crecer adecuadamente y llevar a cabo el proceso de la nitrificación (Somerville *et al.* 2014). Por medio de tuberías, mangueras de aire y piedras difusoras, en el interior de los componentes de un sistema acuapónico, las bombas inyectan aire en el agua, lo que aumenta los niveles de oxígeno disuelto en el agua, estas mangueras de aire están especialmente dispuestas en la zona acuícola y en el biofiltro, puesto que son los componentes con mayor necesidad de OD (Somerville *et al.* 2014).

Producción acuícola de Colombia

Colombia posee un gran potencial para incrementar la acuicultura, pero los incentivos económicos son bajos respecto a otros sectores agropecuarios como la ganadería (MADR, 2015; Finagro, 2017; Merino, 2018), aun así, la producción piscícola nacional incrementó un 21,7% del 2018 al 2019, los principales productos pesqueros en aguas continentales que atienden la demanda de las grandes ciudades y la exportación, son la tilapia con 95.958 t/año, la cachama con 31.434 t/año, y la trucha con 26.471 t/año (MADR, 2020).

Tilapia roja (*Oreochromis* sp.)

La tilapia roja, es un pez teleósteo híbrido, a partir de cruces de cuatro especies del género *Oreochromis* y pertenece a la familia Cichlidae (Castillo, 2003; Merino *et al.*, 2006; Froese & Pauly, 2018), este se encuentra dentro de los grupos principales de especies capturadas en aguas continentales, que con los años han presentado un incremento constante, de forma que

en el 2016 duplicó las capturas del 2005 a nivel mundial, en cuanto a su producción en acuicultura hizo el equivalente al 58% de la producción acuícola junto con la carpa y el bagre (FAO, 2018).

La tilapia fue introducida a Colombia en 1985, para 1995 empezaron proyectos de mejoramiento genético (FAO, 2005). Nacionalmente la producción de tilapia ocupa el 65,31% de los productos piscícolas cultivados, siendo Huila y Meta, los departamentos de mayor producción seguidos por Tolima, Antioquia y Casanare (Fedecua, 2015) De igual forma Colombia exporta filetes de tilapia siendo Estados Unidos su principal destino de exportación, así para 2019 se reportaron 6.956 toneladas de tilapia exportada (MADR, 2019).

La producción por Ha es de 30-50 ton/Ha/año, con densidades de hasta 20 peces/m² (FAO, 2005; FAO, 2016). para el caso de cultivos de tipo semi-intensivos e intensivos, la tasa de crecimiento es de 4,14 g/día y el factor de conversión de alimento es de 1.34, teniendo en cuenta valores proteicos 24% en el alimento (Nicovita & Alicorp, 2002).

Para el crecimiento de tilapia se utiliza alimentos con valor proteico variable, el cual depende de la edad, de esta forma para alevines se usan alimentos con PC de 30-56%, para la etapa juvenil con PC 30-40%, y para tilapia de engorde 28-30% (Mjoun, Kurt , & Michael L., 2010). También se ha descrito que las condiciones favorables para su cultivo, respecto a temperatura es de 25-30 °C, son sensibles a bajas temperaturas, por tanto de 9 a 13 °C se considera un límite letal (Sincoagro, S. C., 2009), el pH debe ser de 6.5-9.0 y por fuera de este se ve afectado el crecimiento y la respiración, el OD superior a 4 m.L⁻¹, la dureza de carbonatos de 50-350 mg.L⁻¹, respecto al NAT tiene una rango de tolerancia entre 0.6 a 2.0 mg.L⁻¹, siendo este último un nivel crítico en condiciones de pH básico, estos rangos permiten un mayor rendimiento de cultivo (Nicovita & Alicorp, 2002).

Cachama blanca (*Piaractus brachypomus*)

La cachama blanca (*P. brachypomus*, Cuvier, 1818) es un pez teleósteo perteneciente a la familia Serrasalminae (Froese R. & Pauly D, 2018), originaria de las cuencas del río Amazonas y Orinoco, además es una de las pocas especies nativas en las que se ha desarrollado la acuicultura colombiana y su cultivo fue promovido por primera vez hacia 1980, en los Llanos Orientales (AUNAP, 2014). La producción de cachama en Colombia equivale al 21,47% de los productos piscícolas cultivados, donde las principales zonas de producción son los departamentos del Meta, Santander, Córdoba, Tolima, Caquetá Antioquia y Valle (Fedecua, 2015).

Se ha reportado que la producción ha llegado hasta las 18000 ton/año y se manejan densidades de siembra hasta de 15 peces/m² en etapa de pre-engorde y hasta 5 peces/m² en etapa de engorde (González, 2001; Merino *et al.*, 2006). Para el caso de un sistema intensivo, la tasa de crecimiento es de 1.86 g/día con una conversión de alimento de 1.57, teniendo en cuenta el uso de concentrado de 43% de valor proteico (González, 2001).

Para su producción se utiliza alimento concentrado con valores proteicos de 40-45 % para alevines, 32% para juveniles y 24% en la fase de engorde (González, 2001; FAO, 2005; Vazquez torres et al., 2011 (Vásquez-Torres, Pereira-Filho, & Arias-Castellanos, 2011). Las condiciones favorables para su cultivo son un rango de temperatura del agua entre 23 y 30 °C, para pH de 5.5 – 8, la dureza del agua desde 25 mg.L⁻¹ y el OD > 3 mg.L⁻¹ presentando resistencia a bajas concentraciones de oxígeno (González, 2001; Merino *et al.* 2006).

El manejo de los dos ejemplares ícticos mencionados con anterioridad (*Oreochromis sp.* y *Piaractus brachypomus*) se ha planteado en policultivo, técnica que permite el cultivo de dos o más especies, donde se trata de aprovechar las diferentes condiciones de alimento y hábitat requeridas por cada especie, de esta forma se mejora la producción (Bocek, 2000), teniendo en cuenta que características como la temperatura y pH del agua para su cultivo deben ser

similar entre estas (Caló, 2011). *O. sp.* suele permanecer en la superficie de los estanques y es omnívoro con tendencia al consumo de larvas de insectos y plancton, mientras que *P. brachipomus* suele estar bajo los 50 cm de la superficie además es omnívora con tendencia a la frugivoría, de esta forma se emplean diferentes nichos ecológicos dentro de la misma columna de agua (Rahman *et al.*, 2008; Velasco Matveev, 2008), de hecho el CID *et al.*, (1993), publicaron un manual donde se evidencia que el policultivo de cachama y tilapia presenta mayor producción respecto a otros policultivos y monocultivos.

Producción de hortalizas en Colombia

A nivel mundial casi el 70% de los vegetales que se comercializan son hortalizas frescas enteras, asimismo en los países con mayor desarrollo, se observa mayor interés por las verduras orgánicas, para Latinoamérica se observa una venta de hortalizas a nivel regional (Rijswick, 2018). Colombia produjo para el año 2019, 2.193.338 t/año de hortalizas de las cuales Cundinamarca, fue el tercer departamento de mayor producción con 371.847 t/año (MADR, 2019), dentro de las hortalizas de hoja se encuentra la rúgula (*Eruca vesicaria sativa*), que, en el año 2018, para Colombia se reportó una producción anual de 199.364 Kg (Asohofrucol, 2018).

Rúgula (*Eruca vesicaria subsp. sativa* (Mill). Thell)

La rúgula (*Eruca vesicaria subsp. sativa* (Mill.) Thell) es una especie de la familia Brassicaceae (Warwick, Francis, & Al-Shehbaz, 2018), La rúgula es conocida por presentar propiedades diuréticas y tonificantes, se destaca además de otros vegetales de hoja por presentar mayor contenido de proteína (2,58 g.100gr⁻¹ PF) y fibra (1,60 g.100gr⁻¹ PF) (Manchali, Murthy, & Patil, 2012). Las hojas presentan un sabor entre picante y amargo, son consumidas de forma cruda en ensaladas y cocidas, se usan además en la decoración de platos, adicionalmente, se ha descrito como un suplemento en la alimentación de ganado bovino y como agente de biocontrol en intercultivo (Del Pino, 2012; Gajra & Sharma, 2014).

En Colombia, el cultivo y la producción de rúgula es reciente, por lo cual es considerado como un cultivo menor y para el 2018 en Colombia se reportó una producción anual de 199.364 Kg (Asohofrucol, 2018). Adicionalmente, se sabe de algunas empresas que se han dedicado a la exportación de este producto, como Hidrovegetal® y Dole®, y se encuentra dentro de los productos hortofrutícolas con ingreso inmediato a Estados Unidos por medio del tratado de libre comercio (Asohofrucol, 2010; MADR, 2015).

Las condiciones de cultivo han sido descritas por Del Pino (2012), donde se especifica una germinación rápida (7-10 días), con unas condiciones de temperatura que oscilan entre los 25 y 27 °C para un buen crecimiento. Para realizar su cultivo en suelo, las semillas se disponen en hileras continuas sobre el surco (bien sea en invernadero o al aire libre), para la obtención de altas densidades de producción, se pueden considerar 200 plantas por metro lineal, la separación entre semillas sembradas debe ser de 20 cm de distancia. El ciclo de cultivo es corto, se estima entre los 20 y 60 días desde su plantación, realizando de 4 a 5 cortes para la cosecha con intervalos de 10 a 20 días, o recolección total. Asimismo, se ha reportado rendimientos de cultivo de 2,01-2,47 kg.m⁻² para cultivo en tierra bajo invernadero (Varga *et al.*, 2012), 2,68 kg.m⁻² para cultivo en tierra con abono orgánico bajo invernadero (Blanco Villacorta, 2019) y 1,89-2,13 kg.m⁻² bajo sistemas hidropónicos (Jakše, Hacin, & Kacjan, 2013).

CONCLUSIÓN

La acuaponía es una estrategia de mitigación frente a los problemas ambientales generados por la agricultura y la acuicultura, así mismo puede llegar garantizar una producción sostenible de alimentos.

Los principales componentes de las unidades acuapónicas son: la zona acuícola, el filtro mecánico, el mineralizador, el biofiltro, la zona hidropónica y el sistema de aireación.

La producción piscícola de Colombia ha incrementado con los años, siendo la tilapia, la cachama y la trucha los ejemplares piscícolas de mayor importancia productiva.

Es posible realizar un policultivo de ejemplares ícticos como lo son la tilapia roja y la cachama blanca, donde se esperaría incrementar la producción de estas, bajo un mismo espacio de cultivo.

La rúgula es una hortaliza de hoja, de reciente cultivo en Colombia, con mayor contenido de proteína y fibra que otras hortalizas, además es una especie promisoría para exportación y para modular la dieta regional.

BIBLIOGRAFÍA

- Abid, M., Ahmed, R., Umair, A., & Islam, M. (2015). Effect of integrated nutrient application on growth and yield of maize. *Biological Sciences-PJSIR*, 58(3), 122-125.
- Aguilera, M., Hernández, F., Mendieta, E., & Herrera, C. (2012). Producción integral sustentable de alimentos. *Ra Ximhai (Revista de sociedad cultura y desarrollo sustentable)*, 8(3), 71-74.
- Asohofrucol –(Asociación Hortifrutícola de Colombia). (2018). *Informe de gestión 2018*. Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola.
- Asohofrucol (Asociación Hortifrutícola de Colombia). (septiembre-octubre de 2010). El agricultor convencional aceptará cada vez más los hidropónicos. *Frutas & Hortalizas*(14), 24-26.
- AU (Auburn university) & USDA (U.S. Department of Agriculture). (2002). *Pond fertilization*. Alabama aquaculture best management (pág. 3).
- AUNAP -(Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca). (2014). *Plan nacional para el desarrollo de la acuicultura sostenible en colombia*. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), Bogotá D.C.
- Baker, T., & Miller, S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed . *Journal of hydrology*, 486, 100-111.

- Baranski, M., Srednicka-Tober, D., Volakakis, N., Seal, C., Sanderson, R., Stewart, G. B., . . . Leifert, C. (2014). Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses. *British Journal of Nutrition*, 112, 794–811.
- Beddington, J. (2011). The future of food and farming. . (I. F. Management, Ed.) *International Journal of Agricultural Management*, 1(2).
- Bedmar, F. (2011). ¿Qué son los plaguicidas? 21(122), 11-16.
- Blanco Villacorta, M. W. (2019). Determinación del efecto del humus de lombriz en el cultivo de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) en la estación experimental Patacamaya. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 6(2), 60-65.
- Blidariu, F., & Grozea, A. (2011). Increasing the economical efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics . *Animal Science and Biotechnologies*, 44(2), 1-8.
- Bocek, A. (2000). *Introducción al policultivo de peces*. . Internacional Center For Aquaculture and Acuatic Enviroments, Asburn University , Alabama USA.
- Caló, P. (2011). *Introducción a la acuaponía* . Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Pesca, Centro Nacional de Desarrollo acuícola (CENADAC), Argentina.
- Carter, C. D., Doneen, L. V., Kylin, A., Peck, A., Quatrano, S., & Thomson, W. (2012). Plants in saline environments. (A. Poljakoff-Mayber, & J. Gale, Edits.) *Springer Science & Business Media*, 15, 199.
- Castillo, L. (2003). Modelo de desarrollo de cultivo de tilapia en América Latina; perspectivas. En G. D. SAGARPA -(Secretaría de Agricultura, *1er Foro internacional de acuicultura, un encuentroo con el mercado* (pág. 263). Guadalajara.
- CIID; Inderena; INPA; Colciencias. (1993). *El policultivo, la mejor alternativa de producción*. Bogotá, Colombia.: Guadalupe.
- Cobb, A. B., Wilson, G. W., Goad, C. L., & Grusak, M. A. (2018). Influence of alternative soil amendments on mycorrhizal fungi and cowpea production . *Heliyon*, 4(7), e00704.
- Dabi, M., & Edem, S. (2015). The Impact of Aquaculture on the Environment: A Ghanaian Perspective. *The International Journal of Science and Technoledge*, 3, 106-113.

- David, C., & Vásquez, W. (2010). Transporte iónico en el epitelio branquial de peces de agua dulce. *Lasallista de Investigación*, 7(1), 85-99.
- Del Pino, M. (2012). *El cultivo de Rúcula. Curso Introducción a las Ciencias Agrarias y Forestales*. Boletín informativo, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Diver, S., & Rinehart, L. (2010). Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture. *ATTRA—National Sustainable Agriculture Information Service*, 28.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2003). *World agriculture: towards 2015/2030 an FAO perspective*. Roma: Earthscan.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2015). *World fertilizer trends and outlook to 2018*. Fertilizer Organizations Working Group, Roma.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Manual, IFA (Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes), París.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2000). *Estrategias en Materia de Fertilizantes*. IFA -(Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes).
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2018). *Global production by production source 1950-2016 (FishstatJ)*. . (F. F. [online], Productor) Recuperado el Agosto de 2020, de Fishery and Aquaculture Statistics: www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2005). *Visión general del sector acuícola nacional - Colombia*. . Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO , Roma.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos*. Roma.

- Fedeacua -(Federación Colombiana de Acuicultores). (2015). *Plan de negocios sectorial de la piscicultura de Colombia*. AUNAP -(Autoridad Nacional de Agricultura y Pesca).
- FiBL -(Research Institute of Organic Agriculture, Frick) & IFOAM -(Organics International, Bonn). (2018). *The world of organic agriculture - Statistics & emerging trends 2018*. (H. Willer, & J. L., Edits.)
- Finagro -(Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario). (2017). *Informe de gestión sostenible*. Informe de gestión.
- Froese, R., & Pauly, D. (2018). FishBase (version Feb 2018). En Y. Roskov, T. Orrell, D. Nicolson, N. Bailly, P. Kirk, T. Bourgoignie, . . . L. Penev, *Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 31st July 2018*.
- Gajra, G., & Sharma, V. (2014). *Eruca sativa* (L.): Botanical Description, Crop Improvement, and Medicinal Properties. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 20(2), 171-182.
- García, A. G. (2012). *Los abonos verdes*. Informe técnico, Cabildo de Tenerife, Agrocabildo, Tenerife.
- Gąstoł, M., Domagała-Świątkiewicz, I., & Krośniak, M. (2011). Organic versus conventional – a comparative study on quality and nutritional value of fruit and vegetable juices. *Biological Agriculture & Horticulture*, 27(3-4), 310-319.
- Gómez, K. (2013). *Evaluación del efecto de los fertilizantes químicos y orgánicos en el suelo, caso de estudio: Cultivo de jitomate en invernadero tipo tunel*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de planeación urbana y regional, Toluca de Lerdo.
- González, R. (2001). El cultivo de la cachama. En H. Rodríguez, P. Daza, & M. Carrillo, *Fundamentos de acuicultura continental*. INPA (Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura).
- Gruhn, P., Goletti, F., & Yudelman, M. (2000). *Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: current issues and future challenges*. Discussion Paper 32, International Food Policy Research Institute, Food, Agriculture, and the Environment.

- Guzmán, M., & Rodríguez-Díaz, E. (2004). Características de los fertilizantes para su uso en la fertirrigación. (M. Guzmán, & J. L.-G., Edits.) *Medios, agua y fertilizante*, 191-202.
- Hennecke, A., & Rettenmaier, N. (2015). Sustainable Land Use: Food Production or Fuels. En S. Hartard, & W. L. (Edits.), *Competition and Conflicts on Resource Use. Natural Resource Management and Policy* (Vol. 46, págs. 245-258). Springer, Cham.
- Hong, J., Yu, L., Liu, S., Chen, P., & Lin, L. (2017). Potassium Regulation in Medaka (*Oryzias latipes*) Larvae Acclimated to Fresh Water: Passive Uptake and Active Secretion by the Skin Cells. *Sci Rep Nature Research*, 7(1), 1-14.
- Jácome, A. (2011). *Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris l.) En un inceptisol con propiedades andicas en la microcuenca centella dagua – valle*. Tesis de grado, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería.
- Jakse, M., Hacin, J., & Kacjan, N. M. (2013). Production of rocket (*Eruca sativa* Mill.) on plug trays and on a floating system in relation to reduced nitrate content/Pridelava navadne rukvice (*Eruca sativa* Mill.) v gojitvenih ploscah in na plavajocem sistemu in moznosti redukcije vsebnosti nitrata. . *Acta Agriculturae Slovenica*, 101(1), 59.
- Jiménez, A. (2012). Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para Latinoamérica. *Revista Industria Acuícola*, 8(2), 6-10.
- Johnson, L., & McCann, K. (2017). *Freshwater aquaculture: a review of the environmental implications*. . Revisión, University of Guelph, Integrative biology.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. (2017). Strategic Points in Aquaponics. *Water*. 9, 182.
- MADR –(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) . (2015). *Política integral para el desarrollo de la pesca sostenible en Colombia*. FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), Programa de pesca y agricultura.
- MADR –(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). (2019). *Cadena de las hortalizas*. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales.
- MADR. (2020). *Cadena de la acuicultura*. Informe, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección de cadenas pecuaria, pesqueras y acuícolas.

- Manchali, S., Murthy, K., & Patil, B. (2012). Crucial facts about health benefits of popular cruciferous vegetables . *Journal of Functional Foods*, 4(1), 94-106.
- Mandal, S., Barman, D., Gupta, S., & Singh, K. (2014). Management and control of land degradation with special reference to aquaculture . En S. Kumar, & P. Kumar (Edits.), *Aquaculture and fisheries environment* (págs. 164-186). New Delhi, India.
- Markets & markets. (2019). *Pesticide inert ingredients market by type (emulsifiers, solvents, and carriers), source (synthetic and bio-based), form (dry and liquid), pesticide type (herbicides, insecticides, fungicides, and rodenticides), and region - global forecast to 2023*. . Reporte AGI 6827, Pesticide inert ingredients market. .
- Markham, V. D. (2008). *U.S. Population, energy & climate change*. Reporte, Center for Environment & Population.
- Martinez-Ghersa, M. (2011). Consecuencias ambientales del uso de pesticidas. Informe especial sobre plaguicidas agrícolas. *Ciencia hoy*, 21(122), 30-35.
- Martínez, M., & Martínez, L. (2012). World aquaculture: environmental impacts and troubleshooting alternatives. *The Scientific World Journal* , 1-9.
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., & Suzuki, A. (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of botany*, 105(7), 1141-1157.
- Merino-Archila, M. C., Salazar-Ariza, G., & Gomez-Leon, D. (2006). *Guía práctica de piscicultura en Colombia*. Guía práctica, Instituto Colombiano de Desarrollo Rural - INCODER, Bogotá D.C.
- Merino, M. (2018). *Acuicultura en Colombia*. AUNAP -(Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca) , Dirección técnica de administración y fomento.
- Mitchell, A. E., Hong, Y.-J., Koh, E., Barret, D. M., Bryant, D. E., Ford-Denison, R., & Kaffka, S. (2007). Ten-year comparison of the influence of organic and conventional crop management practices on the content of flavonoids in tomatoes. *Agricultural and Food Chemistry*, 55(15), 6154–6159.
- Mjoun, K., Rosentrater, K., & Brown, M. (2010). *tilapia: Environmental Biology and nutritional requirements*. Hojas informativas, South Dakota State University.

- Moreno, E., Castillo, F., Gutiérrez, J., González, L., & Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. . *Chapingo Ser. Hortic.*, 21(5), 43-55.
- Mosha, S. S. (2015). *Effect of organic and inorganic fertilizers on natural food composition and performance of african catfish (Clarias gariepinus) fry produced under artificial propagation*. Tesis de maestría, Lilongwe University of Agriculture and Natural Resources Bunda Campus .
- Nelson, R., & Pade, J. (2008). *Aquaponic food production: Raising fish and vegetables for food and profit*. Montello, United States of America: Nelson & Pade, Inc.
- Nicovita & Alicorp. (2002). *Manual de crianza de Tilapia* .
- Pradeepkumar, T., Bonny, B. P., Midhila, R., John, J., Divya, M., & Varun-Roch, C. (2017). Effect of organic and inorganic nutrient sources on the yield of selected tropical vegetables. *Scientia Horticulturae*, 224, 84-92.
- Rahman, M., Nagelkerke, L., Verdegem, M., Wahab, A., & Verreth, J. (2008). Relationships among water quality, food resources, fish diet and fish growth in culture ponds: a multivariate approach Aquaculture. *Aquaculture*, 275(1-4), 108-115.
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center*, 454, 16.
- Rijswick, C. (2018). *World vegetable map 2018*. Investigación, Rabobank, Raboresearch-Food & Agribusiness.
- Riley, M. B., Williamson, M. R., & Maloy, O. (2002). Plant Disease Diagnosis. *The Plant Health Instructor.*, 10.
- Roberts, T. (2009). The role of fertilizer in growing the world's food. *Better Crops*, 93(2), 12-15.
- Rosa, D. D., Rowlings, D. W., Biala, J., Scheer, C., Basso, B., & Grace, P. R. (2018). N2O and CO2 emissions following repeated application of organic and mineral N fertiliser from a vegetable crop rotation . *Science of the Total Environment*, 637-638, 813-824.
- Sadaf, J., Abbas-Shah, G., Shahzad, K., Ali, N., Shahid, M., Ali, S., . . . Imtiza-Rashid, M. (2017). Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-

- application of biochars and chemical fertilizers . *Science of the Total Environment*, 607-608, 715-724.
- Salas, R. (2002). Herramientas de diagnóstico para definir recomendaciones de fertilización foliar. En U. d. Rica, G. Meléndez, & E. Molina (Edits.), *Fertilización foliar: principios y aplicaciones* (págs. 7-18).
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485, 229-232.
- Sincoagro, S. C. (2009). *Manual de producción de tilapia con especificaciones de calidad e inocuidad*. Manua de producción.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production*. Technical Paper, FAO Fisheries and Aquaculture, Integrated fish and plant farming, Rome.
- Thorarinsdottir, R., Kledal, P., Skar, L., Sustaeta, F., Ragnarsdottir, K., Mankasingh, U., . . . Shultz, C. (2015). *Aquaponics Guidelines*. technical report, Lifelong Learning Programme.
- Unesco. (2015). *Agua para un mundo sostenible datos y cifras*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015.
- Varga, J., Apahidean, A., Laczi, E., & Apahidean, A. (2012). Studies concerning the sowing period in the arugula (*Eruca sativa* Mill.) plants development. *Acta universitatis sapientiae, Agriculture and environment*, 4, 5-10.
- Vásquez-Torres, W., Pereira-Filho, M., & Arias-Castellanos, J. (2011). Optimum dietary crude protein requirement for juvenile cachama *Piaractus brachypomus*. *Ciência Rural*, 41(12), 2183-2189.
- Velasco Matveev, L. A. (2008). *Comportamiento productivo de la Piaractus brachypomus (cachama blanca) bajo diferentes densidades de siembra* . Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. , Facultad de Ciencias Pecuarias- Escuela de Ingeniería Zootécnica.
- Warwick, S., Francis, A., & Al-Shehbaz, I. (2018). Brassicaceae species checklist and database (version 2). En R. Y, N. D. Orrell T., B. N, K. P.M, B. T, D. R.E, . . . P. L,

Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 31st July 2018. Obtenido de www.catalogueoflife.org/col.

- Wolansky, M. J. (2011). Plaguicidas y salud humana. Informe especial sobre plaguicidas agrícolas. *Ciencia hoy*, 21(122), 23-29.
- Yu, X., Guo, L., Jang, G., Song, Y., & Abdimuratovich-Muminov, M. (2018). Advances of organic products over conventional productions with respect to nutritional quality and food security. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 53-60.
- Zurrita, A., M. B., A. G., Serrato, O. L., & Garnica, J. A. (2015). Factores Causantes de Degradación Ambiental. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1-9.

RESUMEN

Para enfrentar la contaminación y la explotación excesiva de suelos y fuentes hídricas, provocadas por un aumento en la demanda del sector agropecuario, en concordancia con el incremento poblacional, se han planteado nuevas estrategias de cultivo como la acuaponía, que consiste en la integración de la acuicultura con la hidroponía, para producir alimentos de origen animal y vegetal, beneficiando así la rentabilidad y disminuyendo los costos ecológicos y económicos del sistema de producción. La tilapia (*Oreochromis* sp.) y la cachama (*Piaractus brachypomus*) son las especies con mayor producción de la acuicultura colombiana. La rúgula (*Eruca vesicaria sativa*), es un vegetal de reciente cultivo en Colombia que posee un buen potencial comercial. El objetivo de este trabajo fue evaluar un sistema acuapónico de pequeña escala para la producción limpia de tilapia (*O. sp.*), cachama blanca (*P. brachypomus*) y rúgula (*E. v. sativa*). Se analizó el crecimiento y la productividad de los cultivos, además de la calidad del agua. Se empleó un diseño completamente al azar, en el cual se establecieron 3 sistemas acuapónicos (NFT) de tipo vertical en invernadero. Se usaron 180 plantas/sistema de rúgula (*E. v. sativa*), 25 Tilapias rojas/sistema (*O. sp.*) y 60 Cachamas blancas/sistema (*P. brachypomus*). Para *E. v. sativa* se midieron parámetros productivos y de crecimiento para cosecha tipo “Baby leaf” y para cosecha final. Los datos obtenidos de los nutrientes y de medidas de los peces y de las plantas se sometieron a las pruebas Shapiro-Wilk, ANOVA y Tukey, al nivel de significancia del 5% ($p \leq 0.05$) con el programa R. Como resultado se obtuvo para *O. sp.* un rendimiento de $13,4 \text{ kg.m}^{-3}$, un PF de 557 g.ind^{-1} , una GP de 410 g.ind^{-1} , una TDC de $2,36 \text{ g.día}^{-1}$, una TCE de $0,79 \text{ \%.día}^{-1}$, un K de 2,65, un %S de 94,7% y un FCA de $1,73 \text{ g.g}^{-1}$. Para *P. brachypomus* se obtuvo un rendimiento de $15,6 \text{ kg.m}^{-3}$, un PF de 261 g.ind^{-1} , una GP de 248 g.ind^{-1} una TDC de $1,39 \text{ g.día}^{-1}$, una TCE de $1,70 \text{ \%.día}^{-1}$, un K de 2,71, un %S de 100% y un FCA de $1,74 \text{ g.g}^{-1}$. Para *E. v. sativa* se encontraron valores diferentes entre las réplicas tanto para la CBL como para la CF. Se obtuvo mejores rendimientos de cultivo para *O. sp.* respecto a *P. brachypomus* teniendo en cuenta la cantidad de individuos de cada ejemplar en el cultivo, *E. v. sativa*, presento un mejor desempeño para cultivo tipo “baby leaf”, respecto al cultivo comercial de hoja larga.

Palabras clave: Producción limpia, cultivo sin suelo, efluente de acuicultura, hidroponía integrada, rúcula, arugula, cachama roja, pacú de panza roja, mojarra.

CAPITULO II

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp.*), CACHAMA BLANCA (*Piaractus brachypomus*) Y RÚGULA (*Eruca vesicaria sub. sativa*).

INTRODUCCIÓN

La sobre explotación de los recursos naturales, junto con la producción excesiva de desechos y el rápido crecimiento poblacional, son factores determinantes sobre el impacto ambiental. En efecto, estos amenazan la seguridad y el bienestar alimentario e hídrico de la humanidad, promoviendo a su vez el cambio climático (Markham, 2008; IPCC 2014; Zurrita *et al.*, 2015). Por su parte, el incremento exponencial de la población implica una expansión del desarrollo, lo que genera múltiples modificaciones en el uso del suelo que impiden satisfacer la creciente demanda de tierras destinadas a la producción agropecuaria, promover una seguridad alimentaria y al mismo tiempo mantener un equilibrio con el medio ambiente (Hennecke & Rettenmaier, 2014).

Colombia, según el reporte del DANE (2020), para el 2019 presentó un 35,7% de pobreza en su población de casi 50 millones de habitantes, asimismo es uno de los países con mayores deficiencias de desarrollo internas regionales, en donde la dimensión de bienestar que va ligada a la seguridad alimentaria está por debajo de la media registrada para Latinoamérica (Rodriguez & Vial, 2020), así la demanda de desarrollo y de tierras con destino agropecuario aumenta con celeridad, esto repercute severamente en el medio ambiente.

De acuerdo a los cambios en el uso del suelo, para proporcionar tierras de producción agrícola y el establecimiento de acuicultura en sistemas lóticos o en suelo, con un manejo tradicional, dejan como resultado el deterioro de ambientes naturales (Smith *et al.*, 2014; Tolleson & Meiman, 2015; Merino, 2018), puesto que contribuyen a la disminución de la biodiversidad, a la salinización, a la contaminación y a la variación en el flujo de nutrientes en los suelos y las fuentes hídricas naturales, donde se modifica además la orientación de los ríos (Carter *et al.*, 2012; Baker & Miller, 2013). Adicionalmente el uso indiscriminado de agua en estas prácticas tradicionales de cultivo agrícola y acuícola es evidente. La agricultura demanda cerca del 70% de las extracciones de agua dulce y más del 90 % de su consumo (FAO, 2013). En cuanto a la acuicultura continental, especialmente en los cultivos realizados en sistemas lóticos, se realizan cambios totales del agua más de 5 veces por día, en cuanto a estaques corresponde al rango del 10-25% de agua, sin embargo, hay algunos que alcanzan el 100% de recambio de agua por día, lo que genera un alto consumo de agua por kilogramo de organismo producido (Merino *et al.*, 2006).

Tanto la agricultura, como la acuicultura han desarrollado nuevas estrategias, que sin duda mejoran el aprovechamiento de los recursos, mitigando los costos de producción y el impacto ambiental, como los son la agricultura orgánica, la agricultura ecológica, la técnica de acuicultura RAS (Recirculating Aquaculture Systems), el cultivo de plantas mediante la hidroponía y la acuaponía.

Por ejemplo, la acuaponía es una técnica basada en la integración de la técnica RAS de acuicultura con la hidroponía, esta recicla los desechos orgánicos producidos en el componente de acuicultura para luego ser convertidos en biomasa vegetal en el componente hidropónico, la acuaponía beneficia la rentabilidad y disminuye los costos ecológicos durante la producción (Palm *et al.*, 2014). Asimismo, es considerada una técnica de producción limpia, puesto que al no estar en contacto directo la plantas con tierra reduce la incidencia de plagas y enfermedades, lo que evita en uso de controles de plagas, de igual forma permite mayor control sobre los peces, al estar en un sistema de cultivo cerrado (Somerville *et al.*, 2014).

Esta técnica es viable y sostenible en espacios reducidos, desde un sistema tipo “backyard” o uno de pequeña escala, se pueden llegar a producir grandes cantidades de alimento de origen vegetal y animal, esto la sugiere como una posible solución de seguridad alimentaria, en donde se promueven dos ingresos diferentes, en la cual además no se requiere de suelos con calidad agrícola, se disminuye la cantidad de nitrato-nitrógeno en las descargas de agua acuícola, se reduce la cantidad de agua para la producción de alimentos y facilita las labores de mantenimiento-cosecha (Rakocy *et al.*, 2006; Aguilera *et al.*, 2012) .

Por otra parte, Colombia posee un gran potencial para incrementar la producción acuícola, especialmente la producción piscícola nacional incrementó un 21,7% del 2018 al 2019, los principales productos pesqueros en aguas continentales que atienden la demanda de las grandes ciudades y la exportación, son la tilapia con 95.958 t.año⁻¹, la cachama con 31.434 t/año, y la trucha con 26.471 t.año⁻¹ (MADR, 2020). Ahora, el manejo de la tilapia roja y la cachama blanca se ha planteado ya en policultivo, esta técnica permite el cultivo de dos o más especies, donde se aprovecha las diferentes condiciones de alimento y habitad requeridas por cada organismo (Bocek, 2000). Trabajos como el del CIID *et al.*, (1993), dan evidencia de que el policultivo de tilapia roja y cachama blanca presenta mayor producción respecto a otros policultivos y monocultivos, por lo que se puede considerar un cultivo viable para recuperar la seguridad alimentaria, a partir del montaje de una unidad de pequeña escala.

De igual modo Cundinamarca, es el tercer departamento de mayor producción de hortalizas en Colombia, con 371.847 t.año⁻¹ en 2019 (MADR, 2019), dentro de las hortalizas de hoja se encuentra la rúgula (*Eruca vesicaria sativa*), esta especie presenta un gran potencial de exportación, además de buena aceptación en diferentes mercados de tipo gourmet, sobre todo en ensaladas de hoja verde tipo “baby leaf”, además los cultivadores la prefieren ya que puede ser cultivada en altas densidades y cosecharse en menos tiempo, lo que rentabiliza este cultivo (Rincón, 2012; Fernández *et al.*, 2015).

Aunque el cultivo de rúgula en Colombia es poco conocido en consumo y producción, este ha cobrado relevancia en los últimos años, debido a las diversas propiedades que posee como las curativas, diuréticas y tonificantes (Bosetti *et al.*, 2012), además de esto, se destaca de otros vegetales de hoja por presentar mayor contenido de proteína, fibra (Manchali *et al.*, 2012). Para el 2018 en Colombia se reportó una producción anual de 199.364 Kg (Asohofructol, 2018), a esto se añade que la rúgula se ha utilizado en investigación aplicada bajo invernadero enfocándose en su producción (Gamba, Barrientos, & Cuervo, 2007; Colorado, Rodríguez, & Cortés, 2010).

La acuaponía es una tecnología innovadora que puede llegar a incrementar las ganancias del sector agropecuario en el país, además mitiga el impacto negativo generado por la producción de alimentos para el abastecimiento de las diferentes comunidades y puede aportar conocimientos para mejorar la calidad de los diferentes productos (Somerville *et al.*, 2014; Fedeacua, 2015). Así, basado en tales razones, el objetivo de este trabajo fue evaluar un sistema acuapónico de pequeña escala para la producción limpia de tilapia (*Oreochromis sp.*), cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y rúgula (*Eruca vesicaria sativa*), donde se analizó la productividad de los cultivos y la calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El experimento se desarrolló en el invernadero del laboratorio de Ictiología y laboratorio de fisiología animal de la Universidad Militar Nueva Granada, sede campus, ubicado en el municipio de Cajicá km 2 vía Zipaquirá, Cundinamarca, a una altura de 2.558 m.s.n.m. y una temperatura ambiente (fuera del invernadero) promedio de 14 °C.

Diseño del sistema acuapónico

Este diseño fue propuesto por el grupo de investigación $E=mc^2$ de la Universidad Militar Nueva Granada (**Figura 1**). Cada unidad experimental consistió en un sistema acuapónico vertical, conformado por los siguientes componentes:

El tanque de peces: tenía una capacidad de 1000 L y una profundidad de 1m, dispuesto sobre una estiba de madera para evitar posibles desniveles del suelo. En la parte inferior, se acopló un tubo de PVC de 1” con una válvula de bola al medio, para permitir y controlar el paso de agua. También, para cada unidad se dispusieron 4 mangueras aireadoras con piedras difusoras y 3 termostatos de 300W, el tanque fue envuelto alrededor con “yumbolon” para mantener la temperatura del agua.

Filtro mecánico: Un tanque tipo “hidrociclón” o filtro de remolino, con capacidad de 500 L, en la parte superior presentaba un filtro “matala”, para la captura de sólidos suspendidos. En la parte media del tanque, se instaló un tubo de 1” en forma de “T” con puntas inversas, que se conectó al tubo ligado al tanque de peces, con el objetivo generar un movimiento circular que disminuya la velocidad del flujo contribuyendo a la precipitación de los sólidos. Además, se instaló un drenaje de fondo 1” para limpieza de este componente.

Biofiltro: Un tanque plástico con capacidad de 200 L, el cual contenía una malla de angeo provista con 10kg de tubería corrugada “conduit” plástica seccionada cada 2 cm, que sirvió como sustrato de adherencia de las bacterias nitrificantes. El tanque fue cubierto además con plástico negro para minimizar la entrada de luz (Somerville, 2014). Se introdujeron 2 mangueras aireadoras con piedras difusoras.

Tanque de compensación o sumidero: Un tanque plástico con capacidad de 200 L, en el cuál se instaló una bomba de agua de 6000 L.h⁻¹ en su interior, a esta se le conectó tubería de PVC de ½”.

Torres verticales para las plantas: se implementó una estructura de madera, que soportaba el tubo de PVC de ½” proveniente del tanque de compensación, que contaba con 6 aberturas dispuestas sobre 6 torres cuadradas de PVC, con una altura de 1,60 m, dispuestas de forma vertical a 25 cm de distancia entre estas, cada torre contó con 30 semicodos de PVC de ¾ a los costados, a una distancia de 8 cm entre estos. Se dispuso también en medio de las torres

un termómetro de máximas y mínimas para medir la temperatura ambiental. En la parte inferior de las torres, se acopló un tubo de 4" como drenaje que retornaba el agua al tanque de compensación.

Para la aireación se implementó una turbina-blower con una capacidad de 370W, para 3 sistemas acuapónicos, conectada a un tubo de PVC de 1", al cual se acoplaron un total de 18 líneas de aire, de las cuales 6 correspondían a cada una de las unidades experimentales.

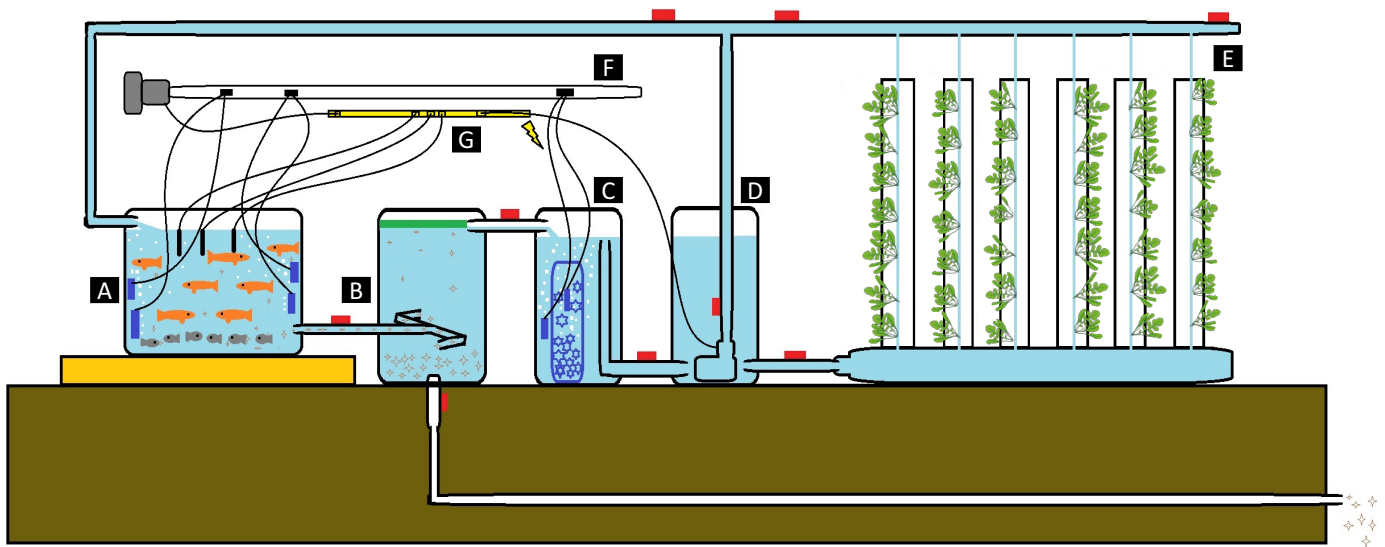


Figura 1. Sistema acuapónico vertical. A: tanque de peces. B: filtro mecánico. C: biofiltro. D: tanque de compensación. E: Torres de las plantas. F: Línea de aireación. G: Línea eléctrica. (Tomado y modificado de (Igua, 2019).

Diseño experimental

Para la evaluación del sistema acuapónico vertical se empleó un diseño completamente al azar, en donde se usaron 3 unidades experimentales correspondientes a las repeticiones. Para las plantas se desarrolló el experimento por un periodo aproximado de 6 semanas y se realizaron 3 réplicas, con dos semanas de por medio entre estas, correspondientes al tiempo de germinación de las semillas. Para los peces, el experimento se llevó a cabo hasta el final de la tercera réplica de plantas, correspondiente a 178 días. Inicialmente se realizó una maduración química del sistema, con una versión modificada de la solución de Masser *et al.*, (1999) propuesta por Cifuentes & Torres (2012). Este proceso se llevó a cabo durante un mes

hasta conseguir concentraciones de NAT (nitrógeno amoniacal total) $< 1.0 \text{ mg.L}^{-1}$, NO_2^- (nitrito) $< 1.0 \text{ mg.L}^{-1}$ y NO_3^- (nitrato) $> 5 \text{ mg.L}^{-1}$. Posterior a la maduración se hizo la siembra de peces y luego se realizó un ajuste paulatino del pH en un rango de 6.0 – 6.5 el cual es apropiado para el cultivo de plantas y es un rango tolerado por los peces, con ácido nítrico al 37% (Cifuentes & Torres, 2012; Somerville, 2014).

Material animal

Se emplearon el híbrido de tilapia roja (*O. sp.*) y la cachama blanca (*P. brachypomus*) en una densidad de siembra por unidad experimental de 25 tilapias, con un peso inicial de $137,33 \pm 20,66 \text{ g}$ y una longitud total de $18,05 \pm 1,10 \text{ cm}$, y 60 cachamas, con un peso inicial de $12,98 \pm 2,16 \text{ g}$ y una longitud total de $8,83 \pm 0,66 \text{ cm}$. Los peces fueron obtenidos de un distribuidor autorizado del Departamento del Meta. Para este trabajo se siguió la tabla de alimentación propuesta por Cifuentes y Torres (2012), en la cual se ajusta la cantidad de comida con respecto a la biomasa total del sistema y el peso promedio por individuo. Sin embargo, para la tercera réplica se evidenció que el consumo del alimento era menor, por lo que se ajustó al 2% de la biomasa total teniendo en cuenta la tabla de alimentación propuesta por Saavedra (2006). Se utilizó una frecuencia de alimentación de tres veces al día (7:00am; 12:00m; 5:00pm) con alimento comercial (Mojarrina ®), con un contenido de proteína cruda de 43% para la primera réplica de plantas y del 32%, para las siguientes réplicas, correspondientes a las etapas juveniles y de levante de los peces.

Material vegetal

Se utilizó rúgula (*E. vesicaria sativa*), donde la sección de plantas de cada unidad experimental se estableció en $0,98 \text{ m}^2$, con una densidad de siembra de 180 plantas /sistema. Las plántulas fueron obtenidas de la Fundación para el Desarrollo Universitario (FDU) de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, en Chía. El trasplante se realizó 15 días después de la siembra, con una longitud promedio de 2,9 cm y de 2-4 hojas verdaderas, con previa verificación de posibles plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales.

Estimación de parámetros productivos y de crecimiento

Peces

Para obtener el peso de *O. sp* y *P. brachypomus* se utilizó una balanza digital (ACCULAB, modelo SVI – 20B, con capacidad de 2.0 g a 20 kg), y se registró la longitud total (desde la boca hasta la punta de la aleta caudal) y la estándar (desde la boca al final del pedúnculo caudal) fueron medidos con un ictiómetro de 30 cm. Adicionalmente se estimó la biomasa de cada especie, estas mediciones fueron realizadas al 20% *O. sp* y al 16% de *P. brachypomus* de la densidad de siembra total de cada uno, esto se llevó a cabo en los mismos tiempos de la siembra y cosechas de *E.v. sativa*.

Dentro de los parámetros productivos (Tabla 1), se evaluó la ganancia de peso por individuo, la tasa de crecimiento diaria por individuo, la tasa de crecimiento diaria, la tasa de crecimiento específico por individuo, el factor de condición y la supervivencia del cultivo. Para la determinación del factor de conversión alimenticia (FCA) se usó el ajuste de la tasa alimenticia diaria y la ganancia de peso para cada especie (Navarro, 2002).

Tabla 1. Parámetros productivos estimados para peces, donde Ln = logaritmo natural, t= tiempo del cultivo (Cifuentes & Torres, 2012).

Índice	Descripción	Fórmula	Unidades
GP	Ganancia de peso	GP = peso final (g) – peso inicial (g)	g
TCD	Tasa de crecimiento diaria	TCD= (peso final (g) – peso inicial (g)) / t	g.día ⁻¹
TCE	Tasa de crecimiento específico	TCE = 100 * [(Ln peso final – Ln peso inicial) / (t ₂ -t ₁)]	% .día ⁻¹
K	Factor de condición	K = (Peso/Longitud ³) * 100	
S	Supervivencia	S = (# de peces final/ # de peces inicial) * 100	%
FCA	Factor de conversión alimenticio	FCA= Alimento consumido/ ganancia de peso	g.g ⁻¹

Plantas

Para la primera cosecha se implementó el parámetro de longitud de 8-12 cm, propuesta por Fernández *et al.*, (2015) para cosecha tipo “baby leaf”. En la cosecha final se tuvo en cuenta el primer brote del tallo floral en la primera planta (Fernández A. , 2010; Buchholz, 2015). Para el análisis de crecimiento se realizó un muestreo destructivo inicial, uno medio y uno al final del experimento, donde se tomaron 54 plantas correspondientes al 10% de la densidad total. Para ello se registró la longitud de las hojas, estimada por medio del software ImageJ®, en donde se promedió la longitud de las mismas. El peso fresco y el peso seco de la parte aérea de cada planta se registró por medio de una balanza digital (Balanza Vibra®, modelo CJ 820E, 820 ± 0.1 g), y el proceso de secado se realizó a 70°C durante 48h en un horno eléctrico (Memmert®, modelo 600).

Se determinaron otros parámetros productivos y de rendimiento (producción g.m^{-2}), la tasa de crecimiento del cultivo, la tasa relativa de crecimiento y la sobrevivencia del cultivo, implementando las fórmulas propuestas por Gómez, Franco, & Gallego (2004) (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros productivos estimados para plantas (E. sativa), donde AT = área del cultivo, PS1= peso seco inicial, PS2= peso seco final, T1= tiempo inicial, T2= tiempo final.

Índice	Descripción	Fórmula	Unidades
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo	$(1/AT) * (PS_2 - PS_1 / T_2 - T_1)$	$\text{g.}(\text{cm}^2.\text{día})^{-1}$
TRC	Tasa relativa de crecimiento	$(\ln PS_2 - \ln PS_1) / (T_2 - T_1)$	$\text{g.}(\text{g.día})^{-1}$
S	Supervivencia	$(\# \text{ de plantas final} / \# \text{ de plantas inicial}) * 100$	%

Evaluación de variables fisicoquímicas

Para la evaluación de la calidad del agua se tomaron muestras semanales en la mañana entre las 7:00 - 8:00 am. Se usó el equipo Spectroquant Multy® con kit de alta sensibilidad de MERCK®, para medir NAT, NO^{2-} , NO^{3-} , PO_4^{3-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} y K^{+} sólo al inicio y al final de cada réplica. Por otra parte, por medio del equipo HANNA Multiparameter HI9829® se registró semanalmente el pH, el oxígeno disuelto (mg/L) y la temperatura del agua. Para la temperatura ambiente se implementó un termómetro de máximas y mínimas. Adicional a esto se estimó el flujo de agua en la entrada de la sección de plantas, en cada torre, por medio del uso de una probeta graduada y un cronómetro.

Enmiendas

Teniendo en cuenta la evapotranspiración, semanalmente se completó el nivel del agua, con agua de tanques de reserva, tratada previamente para nivelar el pH y retirar el cloro. Cada 15 días se realizó el lavado del hidrociclón para prevenir altas concentraciones de NAT en el sistema, equivalente al 10% aproximadamente del volumen total de agua del sistema.

Para regular el pH dentro de los sistemas, se aplicó hidróxido de Calcio, hidróxido de potasio y se implementó también bicarbonato de sodio, teniendo en cuenta que los niveles de NAT eran elevados y que el pH era inferior al rango requerido para el cultivo de las plantas, intercalando el reactivo con los anteriores mencionados según el número de aplicaciones necesarias. Para el hierro se realizó una aplicación inicial de Quelato de hierro DTPA al 11,3 % y dos aplicaciones adicionales una semana antes de las cosechas de rúgula tipo “baby leaf” de la réplica 2 y 3, teniendo en cuenta las concentraciones de hierro en los sistemas.

Adicional a lo anterior se reportó para la segunda réplica de plantas múltiples cortes de energía que afectaron la aireación y flujo de agua de los sistemas.

Análisis de datos

Se realizó un análisis descriptivo donde se determinó el promedio y la desviación estándar de los datos de peso y longitud para cada una de las especies. Para los datos de los fisicoquímicos, se determinaron los valores promedio $\pm$ desviación estándar. En cuanto al

análisis estadístico, en los datos se validaron los supuestos de normalidad con una prueba de shapiro-wilk, a partir de los cuales se realizó una prueba ANOVA para evidenciar las posibles diferencias a través del tiempo y entre las réplicas, por lo que se utilizó una prueba de Tukey. En todas las pruebas evaluadas se tuvo en cuenta un nivel de significancia del 5 %. Estos análisis fueron realizados por medio del paquete estadístico R versión 2.12.2 de libre distribución en internet (www.r-project.org).

RESULTADOS

Parámetros productivos y de crecimiento

Peces

Este estudio presento un incremento de biomasa de 9,9 kg para *O. sp.* mientras que para *P. brachypomus* fue de 14,9 kg en 178 días de cultivo (Tabla 3). En cuanto a la GP se observó una mayor ganancia por parte de *O. sp.*, al igual que una mayor TCD, por el contrario, *P. brachypomus* presentó una mayor sobrevivencia (%S) y un mayor FCA.

Tabla 3. Parámetros productivos del policultivo de *O. sp.* y *P. brachypomus* en acuaponía. Datos de peso inicial por individuo (PI), peso final por individuo (PF), biomasa inicial del sistema (BI), biomasa final del sistema (BF), ganancia en peso por individuo (GP), tasa de crecimiento específica (TCE), factor de condición (K), porcentaje de supervivencia (%S), factor de conversión alimenticia (FCA). Valores promedio $\pm$ la desviación estándar.

Parámetro	<i>O. sp.</i>	<i>P. brachypomus</i>
PI (g.ind ⁻¹)	137,33 $\pm$ 20,66	12,98 $\pm$ 2,16
PF (g.ind ⁻¹)	557,20 $\pm$ 113,43	260,76 $\pm$ 26,87
BI (g)	3.433 $\pm$ 172,14	779 $\pm$ 29,21
BF (g)	13.372 $\pm$ 821,85	15.646 $\pm$ 184,90
GP (g.ind ⁻¹)	419,87 $\pm$ 33,59	247,79 $\pm$ 3,02
TCD (g.día ⁻¹)	2,36 $\pm$ 0,19	1,39 $\pm$ 0,02

TCE (%.día ⁻¹)	0,79 ± 0,04	1,70 ± 0,02
K	2,65 ± 0,32	2,71 ± 0,24
% S	94,7 ± 2,3	100
FCA (g.g ⁻¹)	1,73	1,74

En la figura 2, se observa que para *O. sp.* se obtuvo una LE final de 23,49 ± 1,68cm, una LT final de 27,59 ± 1,81cm y un PF de 557, 20 ± 113,46g. Para *P. brachypomus* una LE final de 17,70 ± 0,89cm, una LT final de 21,29 ± 1,26cm y un PF 260,76 ± 26,87g.

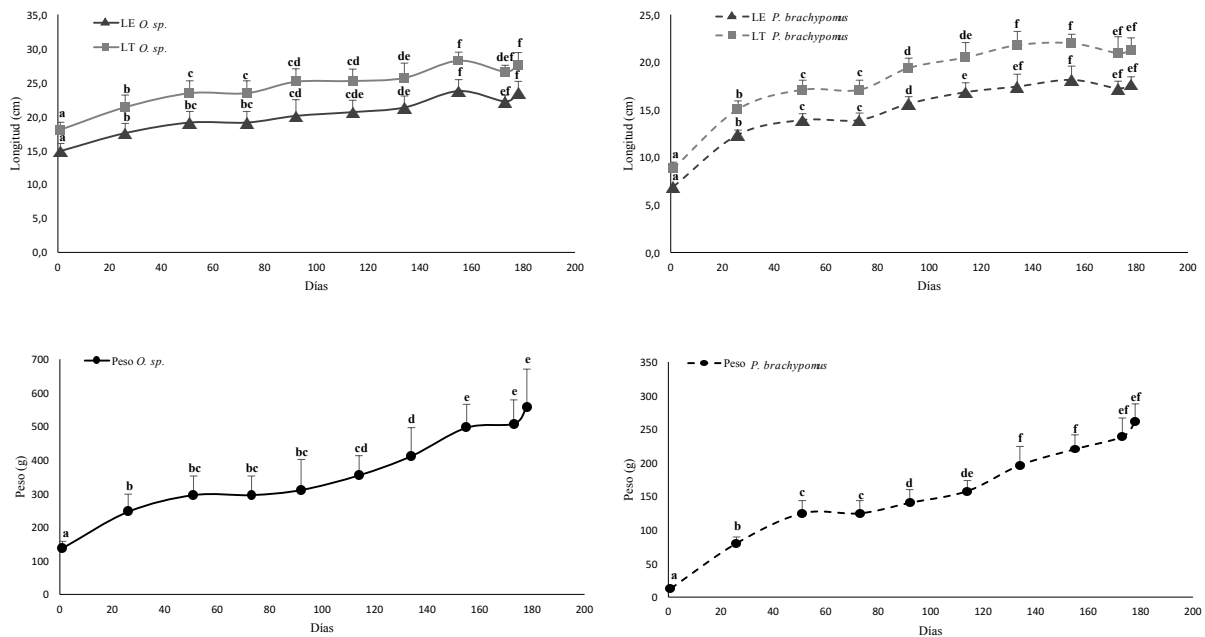


Figura 2. Parámetros de crecimiento del policultivo de *Oreochromis sp.* (*O. sp.*) y *Piaractus brachypomus* (*P. brachypomus*) en acuaponía. Donde LE corresponde a la longitud estándar y LT a la longitud total. Los valores presentados son el promedio por individuo ± la desviación estándar. Letras minúsculas diferentes, corresponden a diferencias estadísticamente significativas a través del tiempo.

Plantas

En el crecimiento de las plantas en referencia a la longitud de las hojas (Tabla 4), en la CBL que se hizo a los 22 días de cultivo para las tres réplicas y no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ellas, en cambio para la CF, los tiempos variaron de 43 a 50 días de cultivo (R3: 43días, R2: 44días, R1: 50 días), donde se encontró diferencias estadísticamente significativas, además la mayor longitud fue para la primera réplica con $15,95 \pm 1,2$ cm. A pesar de que en este trabajo no se reporta el PF y PS de la parte radicular de las plantas, si se denota que, para la CF en todas las réplicas, las raíces llegaron a medir poco más de un metro y generaron una red de raíces en las torres de los sistemas, siendo más evidente este hecho en la segunda réplica (R2).

Tabla 4. Longitud promedio de las hojas de rúgula acuapónica durante el cultivo. Valores promedio $\pm$ la desviación estándar por individuo, de la siembra (S), la cosecha tipo “Baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales. Letras minúsculas diferentes en las columnas, indican diferencias estadísticamente significativas entre las réplicas ($p < 0.05$).

Réplica	S (cm)	CBL (cm)	CF (cm)
1	$2,91 \pm 0,6$ a	$9,22 \pm 1,0$ a	$15,95 \pm 1,2$ a
2	$2,96 \pm 0,5$ a	$9,38 \pm 0,9$ a	$13,40 \pm 0,4$ b
3	$2,98 \pm 0,5$ a	$9,65 \pm 1,2$ a	$14,10 \pm 2,7$ b

Para el peso, se encontró que para la cosecha tipo “baby leaf” (CBL), la tercera réplica obtuvo mayor peso PF con $4,51 \pm 1,91$ g, y hubo diferencias estadísticamente significativas respecto a la primera y la segunda réplica, para el porcentaje de agua (% Agua) se encontró similitud entre la segunda réplica y la tercera, con diferencias estadísticamente significativas respecto

a la primera (Tabla 5). Aun así, para el peso seco (PS) se encontró que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las réplicas.

Tabla 5. Análisis de crecimiento de la rúgula acuapónica. Datos de peso fresco (PF), peso seco (PS) y porcentaje de agua (%Agua), de la parte aérea de la planta. Valores promedio $\pm$ la desviación estándar por individuo, de la siembra (S), la cosecha tipo “Baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales. Letras minúsculas diferentes en las columnas, indican diferencias estadísticamente significativas entre las réplicas ($p < 0.05$).

Tiempo	Réplica	PF (g.ind ⁻¹)	PS (g.ind ⁻¹)	%Agua
S	1	0,24 $\pm$ 0,07 a	0,032 $\pm$ 0,01 a	86,37 $\pm$ 0,61 a
	2	0,41 $\pm$ 0,19 b	0,033 $\pm$ 0,017 a	91,73 $\pm$ 0,47 b
	3	0,32 $\pm$ 0,11 c	0,024 $\pm$ 0,008 b	92,49 $\pm$ 1,16 b
CBL	1	2,84 $\pm$ 1,55 a	0,36 $\pm$ 0,19 a	84,15 $\pm$ 1,46 a
	2	2,46 $\pm$ 1,66 a	0,23 $\pm$ 0,16 a	89,53 $\pm$ 1,14 b
	3	4,51 $\pm$ 1,91 b	0,44 $\pm$ 0,31 a	88,73 $\pm$ 2,47 b
CF	1	12,32 $\pm$ 7,63 a	1,58 $\pm$ 0,81 a	83,99 $\pm$ 5,91 a
	2	18,75 $\pm$ 8,68 ab	1,74 $\pm$ 0,62 ab	89,99 $\pm$ 1,80 a
	3	20,82 $\pm$ 10,28 b	2,34 $\pm$ 0,97 b	86,73 $\pm$ 4,00 a

El mayor peso fresco (PF) en la cosecha final fue para la tercera réplica con 20,82 $\pm$ 10,28g, de esta forma hubo diferencias estadísticamente significativas entre las réplicas 1 y 3. En cuanto al %Agua, no se evidencio diferencias estadísticamente significativas (Tabla 5). Para el PS hubo diferencias estadísticamente significativas entre la primera y la tercera réplica, esta última obtuvo el mayor valor de PS con 2,34 $\pm$ 0,97 g. En cuanto al contenido de agua %Agua, no se observó diferencias estadísticamente significativas en la CF.

Para el rendimiento del cultivo, en términos de cosecha por metro cuadrado, se encontró que, para los dos tipos de cosecha, la tercera réplica obtuvo valores más altos con $827 \pm 331 \text{ g.m}^{-2}$ para la CBL y $3.8 \pm 1.9 \text{ kg.m}^{-2}$ para la CF (Tabla 6).

Tabla 6. Rendimiento del cultivo de rúgula acuapónica en g.m^{-2} . Valores promedio $\pm$ la desviación estándar de peso fresco del cultivo, de la cosecha tipo “baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales.

Réplica	CBL (g.m^{-2})	CF(g.m^{-2})
1	520,92 $\pm$ 105	2.262,62 $\pm$ 1402
2	451,97 $\pm$ 96	3.443,71 $\pm$ 1019
3	827,97 $\pm$ 331	3.823,33 $\pm$ 1887

Tabla 7. Parámetros productivos del cultivo de rúgula acuapónica. Tasa relativa de crecimiento (TRC), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y porcentaje de supervivencia (%S). Valores promedio $\pm$ la desviación estándar, de la cosecha tipo “Baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales.

Réplica	CBL			CF		
	TRC $\text{g.}(\text{g.día})^{-1}$	TCC g. $(\text{cm}^2.\text{día})^{-1}$	% S	TRC $\text{g.}(\text{g.día})^{-1}$	TCC g. $(\text{cm}^2.\text{día})^{-1}$	% S
1	0,113	$1,5 \times 10^{-6}$	100	0,079	$3,2 \times 10^{-6}$	100
2	0,093	$9,3 \times 10^{-7}$	100	0,092	$4,0 \times 10^{-6}$	75,4 $\pm$ 6,6
3	0,141	$1,9 \times 10^{-6}$	100	0,111	$5,5 \times 10^{-6}$	100

En la productividad del cultivo (Tabla 7), para la TRC, se encontró que para ambos cultivos la R3 fue la mejor (CBL: $0,113 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$ y CF: $0,111 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$). De igual forma, la TCC mostró que la mejor réplica fue la tercera (CBL: $1,9 \times 10^{-6} \text{ g.}(\text{cm}^2.\text{día})^{-1}$ y CF: $5,5 \times 10^{-6}$

$\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{día})^{-1}$). Al observar el %S de las plantas durante el desarrollo de las réplicas, se identificó que, a excepción de la cosecha final de la segunda réplica, que obtuvo un 75,4% de supervivencia, en el resto de las cosechas, la supervivencia fue equivalente al 100%.

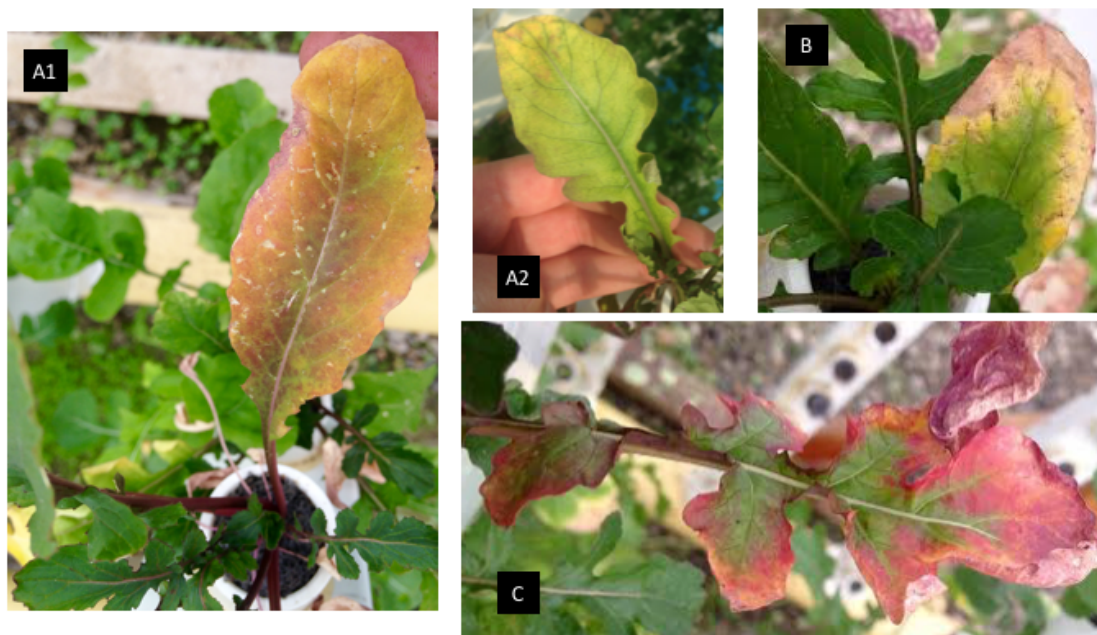


Figura 3. Deficiencias nutricionales de la rúgula durante el cultivo. A1 y A2: Síntoma de deficiencia de nitrógeno. B: Síntoma de deficiencia de potasio. C: Síntoma de deficiencia de fósforo (Mattson & Merrill, 2017).

En la segunda réplica, durante la cosecha final, se hicieron evidentes algunos síntomas en las plantas, provocados por deficiencias nutricionales que se pueden identificar en la figura 3. El primero se caracterizó por el desarrollo de venas y tallos de color morado (A1) y clorosis generalizada (A2) de las hojas viejas. El segundo, exhibió necrosis marginal en las hojas más viejas, junto con clorosis (B). El tercero mostró color rojo a púrpura a lo largo del margen y hacia el centro de la lámina foliar, adicional a esto, los bordes de las hojas se observaron necróticos (C).

Variables fisicoquímicas

El comportamiento de los parámetros fisicoquímicos se observa en la Tabla 8. En cuanto el pH se identificó una tendencia hacia la acidez, por ello la utilización de las enmiendas mencionadas con anterioridad y no hubo diferencias estadísticamente significativas. Para la concentración de OD se evidenció que la concentración de oxígeno fue superior a $4,5\text{mg.L}^{-1}$ para la primera y tercera réplica, aun así, en la segunda se identificó una concentración más baja, de este modo, en la CBL y en la CF hubo diferencias estadísticamente significativas entre la R2 y la R3.

Para la temperatura ambiental (TAmb) se observó que en la última réplica el rango de temperatura disminuyó, lo cual fue confirmado estadísticamente, puesto que hubo diferencias significativas de la R3 respecto a las R1 y R2. En la temperatura del agua (Tagua) se identificó que los menores valores de temperatura se presentaron en la tercera réplica, mientras que los valores de la primera y la segunda réplica se mantuvieron superiores a los 20°C , confirmando la diferencia estadísticamente significativa.

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el cultivo. Datos de pH, Oxígeno disuelto (OD), Temperatura ambiente (Tamb.), Temperatura del agua (Tagua), Flujo del agua en la entrada de la sección de plantas de los sistemas (FSH). Valores máximos (Máx.), mínimos (Mín.) y promedios $\bar{x} \pm \sigma$ la desviación estándar, de la siembra (S), la cosecha tipo “Baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales.

Parámetros	Tiempo	R1	R2	R3
		$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$
pH	S	6,17 $\pm$ 0,21 a	5,92 $\pm$ 0,37 a	6,00 $\pm$ 0,04 a
	CBL	6,14 $\pm$ 0,34 a	6,03 $\pm$ 0,63 a	6,27 $\pm$ 0,25 a
	CF	6,30 $\pm$ 0,16 a	6,14 $\pm$ 0,38 a	5,94 $\pm$ 0,33 a
OD (mg.L ⁻¹)	S	5,71 $\pm$ 0,06 a	5,57 $\pm$ 0,08 a	5,13 $\pm$ 0,55 b
	CBL	5,12 $\pm$ 0,05 ab	4,79 $\pm$ 0,55 a	5,37 $\pm$ 0,17 b
	CF	5,16 $\pm$ 0,15 a	3,98 $\pm$ 1,30 b	4,95 $\pm$ 0,42 a
TAmb (°C)	S	23,00 $\pm$ 17,00 ab	24,30 $\pm$ 13,80 a	21,40 $\pm$ 11,00 b
	CBL	24,60 $\pm$ 14,80 a	25,00 $\pm$ 15,60 a	19,50 $\pm$ 10,20 b
	CF	24,40 $\pm$ 14,40 a	24,10 $\pm$ 13,90 a	20,10 $\pm$ 9,90 b
Tagua (°C)	S	20,52 $\pm$ 0,64 ab	22,58 $\pm$ 0,58 a	20,50 $\pm$ 1,99 b
	CBL	21,16 $\pm$ 2,08 a	21,00 $\pm$ 0,81 a	20,85 $\pm$ 1,72 a
	CF	21,88 $\pm$ 1,56 a	22,04 $\pm$ 1,62 a	19,19 $\pm$ 1,50 b
FSH (L.h ⁻¹)	S	28,67 $\pm$ 1,53 a	32,00 $\pm$ 2,65 a	33,67 $\pm$ 3,21 a
	CBL	30,67 $\pm$ 1,15 a	32,33 $\pm$ 2,08 a	33,33 $\pm$ 1,15 a
	CF	34,00 $\pm$ 2,65 a	27,33 $\pm$ 0,58 b	34,33 $\pm$ 1,15 a

En cuanto FSH se evidenció que las menores fluctuaciones se encontraron en la tercera réplica. Los cambios en el flujo del agua estuvieron relacionados en las tres réplicas con evaporación del agua, labores de mantenimiento de tuberías y lavado de los filtros mecánicos de los sistemas. Aun así, solo se evidenció diferencias estadísticamente significativas durante

la CF de la R2 respecto a la R1 y la R3, donde se debe tener en cuenta que para la R2 se sumaron los cortes en el suministro de energía, previamente comentados.

En la Tabla 9, se observa el comportamiento de los diferentes nutrientes evaluados en los sistemas acuapónicos. El nitrógeno amoniacal total (NAT), presentó el mayor valor antes de la siembra de la segunda réplica aun así, para las réplicas 2 y 3 de cultivo no hubo concentraciones por encima de $1,07 \text{ mg.L}^{-1}$, posterior al periodo de siembra de la réplica 2. También se logró identificar un incremento en la concentración de NAT en la cosecha final de las réplicas 1 y 3. Para el nitrito (NO_2^-), se encontró que la concentración en general se mantuvo por debajo de $0,52 \text{ mg.L}^{-1}$, además se observó que en las réplicas 1 y 2 hubo un descenso en su concentración hacia la temporada de CF. En el caso del nitrato (NO_3^-), la mayor concentración registrada fue de $400,5 \text{ mg.L}^{-1}$ hacia la temporada de la CF en la R2 y se observó durante el proceso experimental una leve tendencia de disminución de la concentración de NO_3^- hacia el final de la CF.

Para el fosfato (PO_4^{3-}), en las tres réplicas mostró una tendencia general de incremento de la concentración, sin embargo, días previos a las cosechas se evidenció un descenso de la misma. En cuanto al hierro (Fe^{2+}), las mayores concentraciones registradas coincidieron con la semana previa a la CBL para las réplicas 2 y 3, constatando las aplicaciones de las enmiendas realizadas.

Para el caso del calcio (Ca^{2+}), las concentraciones más elevadas encontradas fueron acordes con las aplicaciones de hidróxido de calcio realizadas para incrementar el valor de pH, aun así, se evidenció una reducción en la concentración durante el cultivo hasta las cosechas. El manganeso (Mn^{2+}), no superó 1 mg.L^{-1} de concentración y se evidenció un valor mínimo de 0 mg.L^{-1} , además las mayores concentraciones fueron observadas en la R2. El potasio (K^+) obtuvo la mayor concentración en el lapso de CBL de la R2, sin superar los $44,7 \text{ mg.L}^{-1}$ durante todo el experimento (las tres réplicas).

Tabla 9. Comportamiento de nutrientes durante el cultivo. Nitrógeno amoniacal total (NAT), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}), hierro (Fe^{2+}), calcio (Ca^{2+}), manganeso (Mn^{2+}) y potasio (K^+). Valores promedio $\bar{x} \pm \sigma$ la desviación estándar, de la siembra (S), la cosecha tipo “Baby leaf” (CBL) y la cosecha final (CF), correspondientes a cada una de las tres réplicas experimentales. Letras minúsculas diferentes en las columnas, indican diferencias estadísticamente significativas entre las réplicas ($p < 0.05$).

Parámetros (mg/L)	Tiempo	R1 $\bar{x} \pm \sigma$	R2 $\bar{x} \pm \sigma$	R3 $\bar{x} \pm \sigma$
NAT	S	2,75± 0,54 a	5,83± 1,29 b	0,81± 0,26 a
	CBL	1,55± 0,84 a	0,34± 0,34 b	0,29± 0,24 b
	CF	2,36± 1,80 a	0,13± 0,10 b	0,42± 0,25 b
NO_2^-	S	0,30± 0,12 a	0,20± 0,12 a	0,07± 0,04 b
	CBL	0,32± 0,19 a	0,21± 0,21 ab	0,02± 0,01 b
	CF	0,10± 0,07 a	0,08± 0,01 a	0,05± 0,05 a
NO_3^-	S	137,10± 35,40 a	144,06± 36,00 a	183,55± 71,71 a
	CBL	94,30± 30,85 a	198,18± 33,50 b	191,07± 28,67 b
	CF	99,34± 30,65 a	297,03± 145,72 b	300,46± 77,32 b
PO_4^{3-}	S	4,97± 0,57 a	7,99± 3,10 a	6,65± 0,79 a
	CBL	8,28± 4,89 a	6,55± 2,11 a	5,77± 1,26 a
	CF	9,40± 6,58 a	6,56± 0,45 a	7,18± 3,10 a
Fe^{2+}	S	1,35± 0,03 a	0,10± 0,07 b	0,58± 0,46 c
	CBL	0,82± 0,39 a	1,12± 0,26 ab	1,46± 0,35 b
	CF	0,29± 0,14 a	0,92± 0,27 b	0,57± 0,14 c
Ca^{2+}	S	3,55± 0,03 a	5,57± 0,31 a	23,40± 2,11 b
	CBL	5,87± 0,89 a	7,32± 0,87 a	28,58± 8,38 b
	CF	5,94± 0,96 a	17,03± 7,87 b	21,83± 7,15 b
Mn^{2+}	S	0,12± 0,04 a	0,02± 0,04 b	0 b
	CBL	0 a	0,39± 0,50 b	0,01± 0,01 a
	CF	0,01± 0,03 a	0,02± 0,02 a	0 a
K^+	S	16,17± 0,55 a	24,50± 4,85 b	26,47± 2,90 b
	CBL	16,27± 3,91 a	42,27± 2,43 b	28,70± 4,16 c
	CF	22,03± 9,70 a	28,77± 3,40 a	27,03± 4,45 b

DISCUSIÓN

El presente estudio muestra el crecimiento y productividad de un policultivo de tilapia roja *O. sp.*, cachama blanca *P. brachypomus*, y rúgula *E. v. sativa* en una unidad acuapónica vertical con cultivo tipo NFT, además de la evaluación de los parámetros de calidad de agua y los principales nutrientes que se producen en estos sistemas. Este estudio es el primero en el país en combinar estas especies e híbrido, lo que permite ampliar el conocimiento a nivel productivo sobre los ejemplares evaluados, en sistemas acuapónicos de pequeña escala.

Parámetros productivos y de crecimiento

Peces

Se sembraron 85 peces.m⁻³ del policultivo entre *O. sp.* (25 ind.) y *P. brachypomus* (60 ind.) de donde se obtuvo una biomasa final total de 29 Kg.m⁻³, es decir, hubo una ganancia total de 24,8 Kg.m⁻³. En comparación con un cultivo de *Oreochromis niloticus* en sistema acuapónico con cama de sustrato (piedras de río), en el cual implementaron 80 peces por cada estanque de 1,5 m³, con peso promedio inicial de 126,19 ± 30,37 g.ind⁻¹, con un rango de temperatura del agua de 20,4-25,6 °C, el cual desarrollaron por 50 días y obtuvieron una biomasa promedio de 2,5 kg por estanque (Espinosa *et al.*, 2018), fue mejor en el presente trabajo con 7,1 Kg.m⁻³ para *Oreochromis sp.* y 14,6 Kg.m⁻³ para el policultivo, en tiempos de cultivo similar. De acuerdo con Poleo *et al.*, (2011), quienes implementaron un cultivo tipo SCR (sistemas de recirculación cerrados) para la producción de *P. brachypomus*, alcanzó una biomasa de 12,9 kg.m⁻³ la cual fue menor respecto a este trabajo (15,6 Kg.m⁻³), con un tiempo de superior de cultivo de 192 días, con una densidad de siembra de 31 ind.m⁻³ y con un peso promedio inicial de 44,28±26,21 g.ind⁻¹.

Por su parte Torres-Mesa (2017), evaluó la dinámica de nutrientes en SCR en el cultivo de *Oreochromis sp.* (40 peces. m⁻³) con peso inicial promedio de 19,05± 2,73 g.ind⁻¹, *Piaractus brachypomus* (40 peces. m⁻³) con peso inicial promedio de 10.65 ± 2.61 g.ind⁻¹ y *Cyprinus carpio*, en cultivos separados, con un rango de temperatura del agua de 25-27 °C, en donde

encontró para 6 meses de cultivo una biomasa de 19,5 Kg.m⁻³ para *O. sp.* y de 4,3 Kg.m⁻³ para *P. brachypomus* en contraste para el presente estudio se obtuvo 13,4 Kg.m⁻³ para *O. sp.* y 15,6 Kg.m⁻³ para *P. brachypomus* para lapsos de cultivo similares y en policultivo. Si bien es cierto que Torres-Mesa (2017) inició con un peso por individuo menor respecto a *O. sp.*, asimismo empezó con una mayor cantidad de individuos de esta especie, por lo que en relación es probable que con la misma cantidad de individuos se esperaba obtener una mayor biomasa final para *O. sp.*, por su parte para *P. brachypomus* el presente trabajo inició con una mayor cantidad de individuos, por lo que al compararlo con la misma cantidad evaluada por Torres-Mesa (2017), da evidencia de una mayor biomasa final en este trabajo. Con lo anterior se demuestra que el cultivo de múltiples especies de peces, bajo sistema acuapónico puede incrementar la productividad del sistema en comparación con sistemas acuapónicos de monocultivo de peces y SCR.

Somerville *et al.*, (2014), mencionan que para unidades acuapónicas de pequeña escala, se deben tener entre 10-20 kg de biomasa de peces, para tener por ejemplo una producción semanal de 25 cabezas de lechuga.m⁻², sin requerir un sistema de aireación tan sofisticado que mantenga buenos niveles de oxígeno disuelto (OD) y un sistema de biofiltración que permita el correcto tratamiento y conversión de nitrógeno. Bajo las anteriores condiciones y al considerar niveles de OD superiores a 4,5 mg.L⁻¹ durante casi todo el experimento lo cual refleja un buen sistema de aireación, además de elevadas concentraciones de NO₃⁻ y bajas de NAT y NO₂⁻, lo que sugiere que este estudio pudo haber cultivado una mayor cantidad de plantas partiendo de la biomasa total de peces obtenida (29 Kg.m⁻³).

En tanto el factor de condición-K, permite un acercamiento a las estrategias de alimentación, el crecimiento y el estado de nutrición de los organismos evaluados frente a las condiciones ambientales en las que se desenvuelven, donde valores <1 indican problemas en las condiciones del medio en el que se desarrollan, que afectan el crecimiento de los peces y valores ≥1 indica unas condiciones favorables para el buen desarrollo de los peces y sin dificultades en su crecimiento, que superan los valores para el mantenimiento de los peces,

es decir, permite el engorde y por lo tanto mejor producción de los organismos de cultivo (Nash, Valencia, & Geffen, 2006; Cifuentes *et al.*, 2012; Leyton *et al.*, 2015). Bajo la premisa anterior, se puede decir que en promedio el K de ambas especies indicó condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de las mismas durante todo el cultivo.

Crecimiento de *O. sp.*

Para *O. sp.* a los 178 días de cultivo ya se había superado el peso comercial de 500 gr (Castro & Salamanca, 2015), tiempo similar e inclusive menor al tiempo reportado para cultivos tradicionales en jaulas o estanques de 6 a 9 meses (Saavedra, 2006). Asimismo, alcanzó el peso en un tiempo similar para un cultivo de tilapia roja (*O. sp.*) en sistemas acuapónicos comerciales tipo UVI, con evaluación de cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum*) y quimbombó (*Abelmoschus esculentus*) (Rakocy *et al.*, 2004).

Wang *et al.*, (2016), observaron el efecto de la implementación de filtrado por membrana de acoplamiento en un sistema acuapónico, en ese estudio usaron espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y ejemplares de tilapia roja (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis mossambicus*) en estado juvenil, con un rango de temperatura del agua entre 22 y 29°C, para el cual obtuvieron un peso final de 259.5 g.ind⁻¹ y una ganancia de peso de 94,3 g.ind⁻¹ para la semana 12 del experimento, al comparar los resultados de *O. sp.* con el estudio realizado por Wang *et al.*, (2016), se encontró que los valores de peso final y ganancia de peso fueron menores al obtenido en este trabajo durante el mismo tiempo de evaluación para *O. sp.* (295,55 ± 56,91 g.ind⁻¹ y 158,22 ± 69,30 g.ind⁻¹, respectivamente).

En el trabajo llevado a cabo por Bermúdez, Muñoz-Ramírez, & Wills (2012), evaluaron un sistema de producción, donde utilizaron dos tratamientos de fertilización orgánica en sistemas de estanques para cultivo de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*), con organismos iniciales juveniles en etapa de levante, con una temperatura media de 26°C y en un lapso de

180 días, estos obtuvieron un PF $540,1 \pm 37,6$ g con adición de abono intensivo y un PF de $519,7 \pm 21,3$ g con adición de abono periódico, los cuales fueron similares al valor obtenido para *O. sp.* en este trabajo (Figura 2), con un rango de temperatura de 17-24°C, en un lapso de 178 días, asimismo en ese trabajo obtuvieron una GP aproximada de 378,2 g con adición de abono intensivo y 357,8g con adición de abono periódico, lo que indica que para lapsos de tiempo y condiciones de temperatura similares, los valores de GP fueron inferiores al descrito en este trabajo (Tabla 3).

En adición a lo anterior, en el trabajo de Bermúdez, Muñoz-Ramírez, & Wills (2012), obtuvieron una TCD de $2,13 \pm 0,19$ g.día⁻¹ y un %S $92,3 \pm 1,9$ % con adición de abono intensivo, una TCD de $2,00 \pm 0,63$ g.día⁻¹ y un %S de $89,4 \pm 14,9$ % con adición de abono periódico, asimismo, en el reporte de García *et al.*, (2012) determinaron una TCD de 1,09 g.día⁻¹ durante un cultivo de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), con una densidad de 5 peces.m⁻³ en un lapso de 154 días para un sistema de estanque con flujo abierto, por lo que esos valores resultaron ser menores al valor encontrado para la presente investigación (Tabla 3). Rakocy *et al.*, (2004) encontraron para un sistema acuapónico con cultivo de tilapia roja que el %S fue de 89.9 %, demostrando que fue mejor en el presente trabajo ($94,7 \pm 2,3$ %), por el contrario, la TCD fue inferior ($2,36 \pm 0,19$ g.día⁻¹) al valor reportado por Rakocy *et al.*, (2004), donde obtuvieron una TCD de 2.69 g.día⁻¹.

Las diferencias presentadas en cuanto a TCD entre este trabajo y el de Rakocy *et al.*, (2004) pueden estar relacionadas con las variaciones en la temperatura del agua, este obtuvo un rango de temperatura inferior a la reportada como óptima para el cultivo de *O. sp* (Saavedra, 2006). Temperaturas bajas restringen el crecimiento en esta especie, generando estrés térmico que afecta el rendimiento fisiológico de los peces en específico el crecimiento y la supervivencia, ya que a pesar de que los procesos de regulación del metabolismo tienen efectos adaptativos, cada especie posee un rango de tolerancia específico (Boltaña *et al.*, 2017).

Wang *et al.*, (2016) reportaron una TCE $0,54 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$, la cual fue menor respecto a la reportada en el presente estudio ($0,79 \pm 0,04 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$), en ese trabajo se implementó una membrana de filtración, un rango de temperatura entre 22 y 29 °C y los ejemplares de tilapia roja (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis mossambicus*) fueron alimentados con 23% de proteína cruda (PC), la diferencia puede ser explicada por Jauncey (1982), quien comenta que la TCE posee una relación directa con la calidad de alimento suministrado, así, a mayor contenido proteico mayor TCE. Asimismo, la TCE del presente trabajo fue similar a la TCE de *Oreochromis niloticus* reportada por Knaus & Palm (2017), en un sistema acuapónico con temperatura media de 25°C en el agua, con una TCE de $0.70 \pm 0.01 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$ y con 37% de PC en su alimentación.

Por otro lado, Jauncey (1982) quien evaluó la relación del contenido de PC del alimento en comparación con el crecimiento de tilapia (*Oreochromis mossambicus*), obtuvo una mayor TCE ($1,96 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$) respecto a la TCE ($0,79 \pm 0,04 \text{ \%} \cdot \text{día}^{-1}$) de *O. sp.* del presente trabajo, con valores de PC en la alimentación similares. Lo anterior pudo estar relacionado con distintos factores, el primero tiene que ver con el porcentaje de PC del alimento inicial implementado en el presente trabajo (43%), Jauncey (1982) especifica que valores de proteína cruda superiores a 40%, restringen el crecimiento debido al gasto de energía involucrado en el procesamiento y excreción del alimento con mayores porcentajes de PC, sin embargo, al tener en cuenta que posteriormente se trabajó con 32% de PC, el segundo factor pudo relacionarse con los valores de temperatura inferiores y concentraciones reducidas de oxígeno disuelto (OD) mencionados con anterioridad.

Por su parte el FCA que relaciona la cantidad de alimento requerido para aumentar la biomasa en peces, suele ser mejor en peces jóvenes y va aumentando conforme aumenta la edad de los peces (Saavedra, 2006), así pues en un cultivo acuapónico, Pinho *et al.*, (2018), reportaron un FCA superior de $2.00 \pm 0.28 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ para cultivo de juveniles de tilapia roja (*Oreochromis sp*), en el cual utilizaron alimento comercial con 32% de proteína cruda, con un PI de $31.56 \pm 1.50 \text{ g}$ por pez, poco menos de la mitad del PI de *O. sp.* en el presente estudio. Rakocy *et*

al., (2004), reportaron un FCA de 1.8 g.g^{-1} comparable para cultivo de tilapia roja, con un alimento comercial con 32% de PC, con un PI de menos de la mitad (58,8 g) del presente trabajo, así mismo, Knaus & Palm (2017), reportaron un FCA de $1.31 \pm 0.02 \text{ g.g}^{-1}$, para un cultivo de *Oreochromis niloticus*, alimentados con un concentrado comercial de 37% de proteína cruda, con PI inferior (33.5 g) al del presente trabajo.

Adicional a esto el FCA se relaciona con el porcentaje de proteína cruda del alimento, en consecuencia, Jauncey (1982) encontró que en tilapia *Oreochromis mossambicus*, a razón de mayor porcentaje proteico en el alimento, mejor el FCA, lo que explicaría que los resultados de FCA para *O. sp.* fueran superiores al trabajo con menores porcentajes de proteína cruda antes comentado Pinho, Fitzsimmons, & Emerenciano (2018), en cambio, con respecto al trabajo de Knaus & Palm (2017), donde fue mejor el FCA respecto a este trabajo, se pudo deber al PI inicial teniendo en cuenta que peces más jóvenes presentan un FCA mejor (Saavedra, 2006).

Crecimiento de *P. brachypomus*

Para *P. brachypomus*, no se alcanzó el peso comercial de 500gr (González en Rodríguez *et al.*, 2001) para el tiempo de cultivo de 178 días, en el mismo tiempo se cumplió la etapa de juvenil inicial de engorde (Castro & Salamanca, 2015). Asimismo, el peso final fue inferior respecto al reportado en Lemus, Andrade, & Quintero (2018) para cultivo de “cachamoto” (*Colossoma macroponum* x *Piaractus brachypomus*) bajo la técnica de manejo de crecimiento compensatorio, en laguna para tiempos similares de cultivo. Lo anterior pudo estar relacionado con que la productividad primaria y zooplancton que se produce en los estanques sirven como alimento no calculable para la producción de peces, lo cual puede influir en su crecimiento (Santis, Sepulveda, & Betancur, 2012), asimismo, las temperaturas del agua implementadas por Lemus, Andrade, & Quintero (2018) fueron superiores a los 28 °C, mientras que este trabajo alcanzó un máximo de 23,6 °C, que también pudo relacionarse con el reducido crecimiento de *P. brachypomus*.

En contraste con *P. brachypomus*, Ortíz *et al.*, 2007, reportaron que mediante un sistema de jaulas flotantes, donde evaluaron diferentes porcentajes de amaranto como alternativa de alimento frente al cultivo de cachama negra (*Colossoma macropomum*), encontraron que los mejores resultados obtenidos fueron un valor de PF de $231.34 \pm 13.27\text{g}$ y una GP $144,86 \text{ g.ind}^{-1}$ para el tratamiento de alimento balanceado con 50% de amaranto, un PF de $258.55 \pm 17.23 \text{ g.ind}^{-1}$ y una GP de $250,17 \text{ g.ind}^{-1}$ para el control, que era el alimento balanceado sin sustitución de amaranto, con 114 días de cultivo, con una temperatura de agua de $24,65 \pm 1.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados de PF fueron superiores con respecto a los reportado para *P. brachypomus* en este trabajo, bajo días de cultivo similares (Figura 2), sin embargo, la GP para el tratamiento de 50% amaranto, fue similar al valor de este trabajo. Asimismo, la longitud de *P. brachypomus* (figura 2), no corresponde con los valores de peso reportados por Guevara, Gerdel, & Osto (2016) para “cachamote” (*Colossoma macropomun x Piaractus brachypomus*) por lo que el híbrido presenta un mayor valor respecto a *P. brachypomus* para tiempos similares de cultivo.

Las diferencias de PF, GP y longitud pudieron relacionarse con tres factores, el primero con el PI de los organismos, teniendo en cuenta que en el trabajo de Ortíz *et al.*, (2007) y Guevara, Gerdel, & Osto (2016), utilizaron individuos más grandes a los evaluados en este trabajo. El segundo está relacionado con la calidad del alimento, puesto que en este trabajo se implementó alimento comercial para cultivo de *O. sp*, una especie de hábito alimenticio omnívoro, mientras que Ortíz *et al.*, (2007), elaboraron las dietas a partir de los requerimientos de cachama, que es una especie omnívora con tendencia a la frugivoría aportando los elementos necesarios para la buena nutrición de la especie *P. brachypomus* (Cruz-Casallas, Medina-Robles, & Velasco-Santamaría, 2011). El tercero, quizás se debió a la temperatura del agua, teniendo en cuenta que Guevara *et al.*, (2016), trabajaron con una temperatura media de $30,2^{\circ}\text{C}$, mientras que en este trabajo se manejó un rango de temperatura entre $17,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $23,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que pudo afectar el crecimiento en *P. brachypomus*.

Respecto al trabajo de Poleo *et al.*, (2011) quienes compararon la producción de *P. brachypomus*, en sistemas cerrados de recirculación y un segundo sistema sin recirculación, este estudio obtuvo un porcentaje de supervivencia mayor (100 %) al obtenido en ambos tipos de sistemas ($92 \pm 7\%$ y $87 \pm 6\%$, respectivamente), en cambio obtuvieron una mayor TCD ($2,34 \pm 0,05$ g.día⁻¹ y $2,33 \pm 0,03$ g.día⁻¹, respectivamente) respecto a la reportada en este trabajo ($1,39 \pm 0,02$ g.día⁻¹), aun cuando Poleo *et al.*, (2011) obtuvo una mayor TCD, en SCR, la supervivencia en este trabajo es total, por lo que es recomendable el cultivo en acuaponía sobre SCR, lo cual no supondría perdidas sobre la inversión inicial de los ejemplares a cultivar. Por su parte Tafur-Gonzales *et al.*, (2009) obtuvo para *P. brachypomus* una TCD de 2.5 ± 0.3 g.día⁻¹ y un %S de 100% en policultivo con cachama negra (*Colossoma macropomum*) y bujurqui-tucunará (*Chaetobranchius semifasciatus*) en estanque, para 160 días de cultivo, que comparado con los datos reportados en este trabajo (tabla 3), el %S fue igual aunque la TCD fue menor.

Se encontró que la TCE del presente trabajo fue comparable con el reporte de Tafur-Gonzales *et al.*, (2009), en el cual obtuvieron una TCE de 1.75 ± 0.04 %.día⁻¹ para *P. brachypomus*, con PI de 25.6 ± 5.7 g en policultivo, para 160 días de cultivo, con un alimento comercial con 25% de PC de contenido, a una temperatura media de 29.7 ± 0.9 °C. En contraste, en el trabajo de Cruz-Velásquez *et al.*, (2014) encontraron menores valores de TCE con respecto al obtenido en este trabajo ($1,70 \pm 0,02$ %.día⁻¹), a pesar de presentar una menor temperatura del agua, allí compararon dietas alternativas para el policultivo de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*) en estanque de tierra, con un PI para *P. brachypomus* juvenil de 86.7 ± 4.5 g, en un lapso de 120 días, con un alimento comercial con 24% de PC, a una temperatura media de $28,5 \pm 0,98$ °C, concluyeron que las mejores dietas fueron el control (alimento comercial 24 % de PC) que presentó una TCE de $1,49 \pm 0,03$ %.día⁻¹ y el tratamiento con 15% de sustitución con lenteja de agua fermentada que presentó una TCE de $1,40 \pm 0,04$ %.día⁻¹, para *P. brachypomus*.

En cuanto al FCA se encontró una buena conversión de alimento para incrementar la biomasa de *P. brachypomus* con un valor de 1,74 g por gramo de biomasa incrementado, no obstante, el valor es mayor a los reportados por Poleo *et al.*, (2011), en cultivos tradicionales ($1,5 \pm 0,06$) y en sistemas cerrados ($1,6 \pm 0,07$). De igual manera, Deza *et al.*, (2002) obtuvieron un mejor valor (1.09-1.33) al evaluar diferentes densidades de *P. brachypomus* en estanque, siendo la menor densidad ($0,5 \text{ ind.m}^{-2}$) la que obtuvo el mejor FCA. Por otro lado, Cruz-Velásquez *et al.*, (2014), obtuvieron FCA superiores entre 2,7-3,0, a los reportados en este trabajo, los autores atribuyen este hecho a la densidad de cultivo trabajada ($3,3 \text{ ind.m}^{-3}$), sin embargo, en este trabajo se implementó una densidad mayor de cultivo (85 ind.m^{-3} , 60 ind de *P. brachypomus*), por lo que el FCA podría estar relacionado con el porcentaje de PC del alimento (24%), teniendo en cuenta que en el trabajo desarrollado por Vásquez-Torres *et al.*, (2011), determinaron que el alimento con 32% de proteína cruda permite mejores valores de FCA respecto a alimentos con menores o mayores contenidos de PC. Aunque en este trabajo se utilizó alimento comercial con 32% de PC, este alimento estaba formulado para los requerimientos de *O. sp.*, por lo que podría no contener los elementos necesarios para una adecuada nutrición de *P. brachypomus*.

Plantas

Crecimiento de *E. v. sativa*

El crecimiento en longitud de *E. v. sativa*, cumplió con el termino de cosecha tipo “baby leaf” a los 22 días de cultivo en las tres réplicas (Fernández *et al.*, 2015) (Tabla 4), tiempo similar reportado para cultivos en tierra en términos de tiempo de cosecha de 20 a 22 días, siendo mucho menor al tipo silvestre que tarda entre 30 a 35 días para alcanzar esta longitud de cosecha tipo “baby leaf” (Harder, 2015; Shamrock, 1015-2016).

En el caso de la CF la primera réplica alcanzó el parámetro de primer brote floral a los 50 días de cultivo (Fernández, 2010; Buchholz, 2015), tiempo mayor respecto a la réplica 2 y a

la réplica 3 (44 y 43 días respectivamente). Aun así, presentó un tiempo menor al reportado por Silva *et al.*, (2019) (55 días el menor tiempo), en donde evaluaron el desempeño de la viabilidad de semillas en diferentes cultivares de rúgula bajo sistema de cultivo orgánico en suelo, aunque el tiempo de floración depende del cultivar evaluado. Específicamente para el cultivar “Cultivada” que es correspondiente al evaluado en este trabajo Silva *et al.*, (2019), no obtuvieron floración, pero mencionan que algunos cultivares necesitan que la inducción de la floración se dé bajo condiciones de temperaturas bajas, seguidas de días largos y altas temperaturas, lo que describiría el ciclo de temperatura ambiente obtenido en el presente estudio (Tabla 8).

La diferencia en los tiempos de floración entre réplicas, pudo estar relacionado con dos factores, el primero involucra la temperatura del medio, Silva *et al.*, (2019) mencionan que hay cultivares de rúgula que pueden requerir temperaturas de ambiente más bajas para inducir la floración, lo que explicaría la diferencia de días de floración entre la tercera y la primera réplica, teniendo en cuenta que para la CF de la R3 se obtuvo una menor temperatura media respecto a la R1, (Tabla 8) en cuanto a la R2 la inducción de la floración temprana pudo estar más bien vinculada con las deficiencias nutricionales, puesto que en algunas plantas se acelera el proceso de floración incluso puede llegar a una producción excesiva de las mismas (Riley, Williamson, & Maloy, 2002). El segundo factor está relacionado con condiciones de estrés de las plantas, puesto que, frente a periodos de estrés hídrico, como se reflejó en este trabajo, se puede presentar una floración prematura (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015), lo que explicaría la diferencia de floración entre la R2 donde hubo cortes en el flujo del agua de los sistemas y la R1, a pesar de que las condiciones de temperatura fueron similares, incluso mayores en la R2.

La longitud para CBL fue alcanzada en menor tiempo (22 días) respecto al trabajo de Varga *et al.*, (2012), en donde evaluaron la respuesta de cultivo de tres cultivares de rúgula en suelo, bajo dos densidades de cultivo, así describieron para el cultivo de *Eruca sativa*, 25 días de cultivo con una longitud de 8,60 cm para alta densidad (300 plantas.lm⁻¹) y 9,45 cm para baja

densidad ($150 \text{ plantas.lm}^{-1}$). Asimismo, los valores del presente trabajo mostraron similitud, con la longitud descrita por da Costa *et al.*, (2011) para cultivo de rúgula en campo abierto (9,7 cm) en un lapso de 23 días, en contraste este autor encontró una longitud mayor a la del presente trabajo, bajo campo abierto con diferentes condiciones de pantalla de sombreado (30%= 11,8 cm, 40%=13,1 cm, 50%=13,9 cm) para tiempos similares de cultivo.

Para CF se encontraron valores similares de longitud (12,79 - 16,25 cm), respecto al tratamiento de mayor cantidad de nitrógeno adicionado en un lapso de 40 días, en el trabajo de Matos *et al.*, (2019), donde evaluaron diferentes fuentes de nitrógeno para el mejoramiento de la productividad en el cultivo de rúgula en suelo. Asimismo, correspondió con los valores obtenidos en un cultivo hidropónico donde determinaron el rendimiento de cultivo de diferentes cultivares de rúgula con una altura media de 16,6 cm para el cultivar Coltivata, en un lapso de 42 días (Fernández *et al.*, 2006). Por el contrario, los valores fueron inferiores a los reportados en da Costa *et al.*, (2011), en donde obtuvieron una longitud de 27,8 cm en campo abierto y de 32,6 -32,7 cm bajo invernadero en un lapso de 44 días.

Las diferencias presentadas entre valores de longitud del presente trabajo respecto a los autores ya mencionados pudieron deberse a tres componentes. El primero, es respecto a la temperatura manejada durante el cultivo, puesto que da Costa *et al.*, (2011), menciona que los rangos amplios de temperatura pueden influenciar negativamente el crecimiento de las plantas, ya que estas variaciones interfieren en los procesos de respiración y fotosíntesis. El segundo se puede relacionar con el periodo de estrés hídrico, puesto que, la planta debe invertir mayor energía en el crecimiento de raíces para aumentar la capacidad de absorción de agua, en vez de aumentar la biomasa foliar (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015). Lo anterior explicaría la menor longitud de CF en R2 frente a las otras réplicas (Tabla 4). El tercero obedece al método de medición teniendo en cuenta que en el presente trabajo se realizó un promedio de las hojas para determinar la longitud, mientras que, en el trabajo de da Costa *et al.*, (2011), solo tuvieron en cuenta la longitud de la hoja más larga.

Para el PF se evidenció que los mejores resultados se obtuvieron en R3, para ambos tipos de cosecha (CBL y CF). La diferencia frente a R2 puede atribuirse a los problemas de electricidad que se mencionaron con anterioridad, los cuales causaron modificaciones en las condiciones de los fisicoquímicos en los sistemas, afectando así el crecimiento de las plantas durante la R2. Respecto a R1, pudo estar relacionado con la maduración de los sistemas (Somerville, 2014), puesto que se evidencia que en R3 hubo mayores concentraciones de nitrato (NO_3^-) y menores concentraciones de nitrógeno amoniacal total (NAT) y nitrito (NO_2^-) respecto a R1 (Tabla 9), de esta forma se debe tener en cuenta que las plantas terrestres tienen preferencia por el NO_3^- como fuente de nitrógeno (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015), como se discutirá más adelante en la sección de variables fisicoquímicas.

El PF de la CBL fue similar a los valores obtenidos por Varga *et al.*, (2012), en el cultivar “Rukkola” con baja densidad de cultivo, con una media de $5,77 \text{ g.ind}^{-1}$, a los 25 días de cultivo, pero respecto a *E. sativa* obtuvo un peso medio de $6,25 \text{ g.ind}^{-1}$ y $7,15 \text{ g.ind}^{-1}$ para alta ($300 \text{ plantas.m}^{-2}$) y baja ($150 \text{ plantas.m}^{-2}$) densidad respectivamente. Asimismo, se encontró que los valores de PF de la CF de este trabajo ($R1=12,32 \pm 7,63 \text{ g.ind}^{-1}$ $R2= 18,75 \pm 8,68 \text{ g.ind}^{-1}$ $R3= 20,82 \pm 10,28 \text{ g.ind}^{-1}$) fueron superiores respecto al trabajo de Varga *et al.*, (2012), donde reportaron 8.25 g.ind^{-1} ($300 \text{ plantas.lm}^{-1}$) y 9.12 g.ind^{-1} ($150 \text{ plantas.lm}^{-1}$) para cultivo de *E. sativa*.

Los valores de PS para la CBL (Tabla 5) en las tres réplicas fueron similares a los valores de PS obtenidos por Lopes *et al.*, (2017) donde evaluaron la aplicación de diferentes diluciones del residuo de un biodigestor sobre el cultivo rúgula bajo diferentes sustratos. De esta forma, a los 21 días de cultivo, reportaron los mayores resultados de PS bajo la mayor dilución de residuo de un biodigestor con $0,48 \text{ g.ind}^{-1}$ y bajo el uso del sustrato Tri mix 50-25-25 (fibra de coco, vermiculita y cascarilla de arroz con carbón) con $0,44 \text{ g.ind}^{-1}$. Se encontró también que los valores de PS para la CF de este trabajo, comparados con los reportados por Matos *et al.*, (2019) para un cultivo de rúgula cultivar “Leaf Broad”, bajo diferentes cantidades y

bajo diferentes tratamientos de abonos orgánicos fueron menores, de hecho, fueron cercanos al tratamiento de control ($3,49 \text{ g.ind}^{-1}$), donde no aplicaron ningún abono o fertilizante.

En la tabla 5, se puede evidenciar que las plantas durante las réplicas mantuvieron el porcentaje de agua en un rango de 84-92%, además de esto, como se mencionó anteriormente, se vio un crecimiento $\geq 1\text{m}$ de las raíces de las plantas, hacia la CF en la R2. Esto se puede explicar bajo las inconsistencias en el flujo de agua por los cortes de energía mencionados, los cuales provocaron el estrés de los peces, lo que a su vez incrementó los niveles de NAT, además de dejar a las plantas sin agua por lapsos de tiempo prolongados y repetitivos, por lo que las plantas tendieron a aumentar la longitud de las raíces (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015).

En el rendimiento de cultivo de la rúgula (Tabla 6), la CBL de la R1 ($520,92 \pm 105 \text{ g.m}^{-2}$) y la R2 ($451,97 \pm 96 \text{ g.m}^{-2}$) fueron comparables con el obtenido por Takahama *et al.*, (2019) para *E. sativa* con un rendimiento de cultivo de 517 g.m^{-2} , bajo una densidad de siembra de $1.000 \text{ semillas.m}^{-2}$ en suelo a los 25 días de cultivo con longitud media final de 8 cm, asimismo el rendimiento de la R3 fue mayor ($827,97 \pm 331 \text{ g.m}^{-2}$), bajo una densidad de siembra de $184 \text{ plantas.m}^{-2}$. Por otro lado, fue menor al rendimiento reportado Nicola *et al.*, (2015) bajo una densidad de siembra de $1.961 \text{ plantas.m}^{-2}$ con un rendimiento de 1.236 g.m^{-2} , en un sistema de cultivo hidropónico a los 16 días de cultivo, pero al tener en cuenta que la densidad de siembra del trabajo mencionado es superior se esperaría que al aumentar la densidad de cultivo bajo el tipo de sistema acuapónico manejado en este trabajo, el cual posee una sencilla infraestructura modificable y es de pequeña escala se obtuviera un mayor rendimiento. m^{-2} de cultivo tipo “baby leaf” de *E.v. sativa*, en comparación con cultivos tradicionales en suelo y bajo sistemas de cultivo hidropónico.

Para el rendimiento de cultivo en la CF se encontraron rendimientos similares e inclusive mayores ($R1= 2,3 \pm 1,4 \text{ kg. m}^{-2}$, 50 días, $R2= 3,4 \pm 1,0 \text{ kg. m}^{-2}$, 44 días, $R3= 3,8 \pm 1,9 \text{ kg. m}^{-2}$, 43 días) a los reportados en el trabajo de Varga *et al.*, (2012), para el cultivo de *E. sativa* en suelo con alta densidad de siembra ($300 \text{ plantas.m}^{-2}$), reportaron así rendimientos de

cultivo de 2,01 kg. m⁻² y 2,47 kg. m⁻² a los 55 días de cultivo. También se encontraron valores similares de la R3 (3,8± 1,9 kg. m⁻², 43 días) respecto al trabajo realizado por Fernández *et al.*, (2006), donde en un cultivo hidropónico con técnica de camas flotantes obtuvieron rendimientos de 3,4 kg. m⁻² para 42 días de cultivo. De lo anterior se puede demostrar que el cultivo de *E.v. sativa* de hoja larga puede generar mejores rendimientos de cultivo bajo sistemas acuapónicos en comparación con cultivos tradicionales en suelo y cultivos hidropónicos.

Por su parte Buzby *et al.*, (2016), encontraron mayor rendimiento de cultivo (869 g) para el cultivo de *E. sativa* que implementaron en un sistema acuapónico con alto flujo (75,7 L.min⁻¹) de agua en la sección de las plantas en comparación con el rendimiento (89 g) de uno de bajo flujo de agua (18.9 L.min⁻¹). En el presente trabajo no se vio tan marcada la diferencia en el flujo del sistema en la sección de plantas (Tabla 8) como si lo marcaron en el trabajo de Buzby *et al.*, (2016), pese a ello, el flujo de la R3 fue ligeramente superior a las otras réplicas y más estable, esto también pudo influir en que el rendimiento de cultivo tanto para la CBL como para la CF fuera mejor en la R3, ya que Buzby *et al.*, (2016), lo vinculan con mayor disponibilidad de nutrientes cuando el flujo en la sección de plantas es mayor. De igual modo, ese mayor rendimiento podría estar relacionado con la biomasa de peces encontrada en el sistema durante la R3 de la rúgula, puesto que se puede llegar a asociar una mayor biomasa de peces, con mayores concentraciones de nutrientes en el medio disponibles para las plantas (Somerville *et al.*, 2014), lo que respondería a la diferencia de crecimiento entre las réplicas del cultivo de rúgula.

En cuanto a la TRC, Varga *et al.*, (2012), mencionan que a medida que el cultivo se acerca al estado fenológico de floración, las plantas pierden peso e invierten mayor energía en la formación del tallo floral, de igual manera, el sabor característico de la rúgula se ve más acentuado y tiende a perder su valor comercial. Esto explicaría que la TRC de la CF sea menor a la TRC de la CBL. A igual conclusión llegaron Colorado, Rodríguez, & Cortés (2010), quienes mencionan que es probable que las hojas se conviertan en ese punto, en un

suministro de nutrientes o sumidero para la formación de las flores. Frezza *et al.*, (2009) reportan valores de TRC por debajo de $0,04 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$ durante un cultivo hidropónico tipo NFT de *E. sativa*, por un lapso de cultivo de 19 días, los cuales fueron menores a los obtenidos en este trabajo para tiempos similares de cultivo (R1: $0,113 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$, R2: $0,093 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$ y R3: $0,141 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$). Por su parte Colorado, Rodríguez, & Cortés (2010) lograron para cultivo de *E. sativa* en tierra a libre exposición, una TRC de $1,0 \text{ g.g semana}^{-1}$, este valor fue similar al obtenido en la CBL de la R3 ($0,98 \text{ g.g semana}^{-1}$) y superior respecto a la R1 y R2 ($0,79 \text{ g.g semana}^{-1}$ y $0,65 \text{ g.g semana}^{-1}$, respectivamente). En adición, Calvo (2015) reporta bajo un sistema hidropónico para cultivo de rúgula de hoja ancha, cv. “Cuartana”, valores de TRC por debajo de $0,1 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$, para un lapso de 42 días, con un rango de temperatura de $10\text{-}24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, valores que coinciden con los encontrados para este trabajo en la CF para las R1 y R2 ($0,079 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$ y $0,092 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$, respectivamente). En comparación la R3, fue ligeramente mejor en este trabajo ($0,111 \text{ g.}(\text{g.día})^{-1}$), lo que puede indicar que al disminuir los rangos de temperatura ambiente para un cultivo acuapónico de este tipo, se podría obtener mejores TRC respecto a cultivos hidropónicos, en tiempos similares de cultivo.

En cuanto a la TCC se observó una tendencia de forma creciente, donde la mejor TCC fue para la CF de la R3, esto corresponde a lo descrito por Colorado, Rodríguez, & Cortés (2010), donde indican que valores más altos de TCC corresponden con una mayor producción de hojas (sea en cantidad o en volumen), de igual modo comenta que la mayor TCC que obtuvo fue en el cultivo bajo invernadero y lo asocia con un medio más controlado para la producción de *E. sativa*, en comparación con el cultivo a libre exposición. Por otro lado, al tener en cuenta que la TCC depende de la densidad de cultivo en cada estudio, no se encontraron trabajos relacionados para densidades similares de cultivo que hubieran evaluado la TCC, por lo que este trabajo queda como precedente para próximos estudios similares.

Los trabajos anteriormente discutidos respecto al resultado del presente trabajo describen la variabilidad de cultivo de rúgula a nivel de crecimiento y rendimiento de cultivo, los cuales dependerán del cultivar evaluado, y los rangos de temperatura implementados, se podría considerar entonces que *E. v. sativa*, presenta una buena adaptación como cultivo tipo “baby leaf” y como cultivo de hoja larga bajo las condiciones de este cultivo acuapónico.

Variables fisicoquímicas

En acuaponía se debe considerar diferentes factores fisicoquímicos los cuales influyen en la simbiosis de los organismos cultivados, la estabilidad del sistema y, en consecuencia, la producción y la calidad del producto. En la Anexo 1 se muestran las condiciones y nutrientes generales que Nelson & Pade (2008) y Somerville (2014), consideran favorables para el buen desarrollo de los sistemas acuapónicos, en este caso se presentan los valores para peces de climas cálidos y la temperatura de la planta corresponde específicamente para la rúgula (Del Pino, 2012) (Anexo 1).

Al comparar las condiciones del Anexo 1 con los resultados obtenidos en este trabajo, se pudo discernir que el comportamiento de varios de los parámetros fisicoquímicos se encontró por fuera del rango ideal de un sistema acuapónico convencional, inclusive fuera del rango de tolerancia de algunos de los componentes biológicos de los sistemas, en especial en la segunda réplica.

Si bien es cierto, que en R1 y R3 el contenido de oxígeno se mantuvo en una concentración de OD por encima de 4,5 mg.L⁻¹, cercano al contenido ideal para sistemas acuapónicos (Anexo 1), en la segunda réplica se encontraron varios valores por debajo de éste, inclusive se llegó a obtener un valor de 2,48 mg.L⁻¹, así, al cotejar con la información de referencia (Anexo 1) se evidenció que este valor estaba por fuera del rango de tolerancia de todos los organismos del sistema. Una baja concentración de OD en el agua, afecta principalmente a los peces y los distintos grupos de bacterias del sistema, en especial las nitrificantes

(Candarles, 2016). EL OD en los peces es indispensable para llevar a cabo el proceso de respiración y otros procesos biológicos, entre ellos la excreción de Amonio (Ruales, Arturo, & Vásquez, 2010). Se ha demostrado que el OD del medio y la excreción de amonio tienen una relación inversamente proporcional, por lo que, al disminuir la concentración de oxígeno en el medio, la concentración de amonio incrementa, debido a la condición de estrés presentada por los peces, a su vez, el incremento de amonio genera una disminución de pH del medio (Waarde, 1983; Ruales, Arturo, & Vásquez, 2010). En adición, las bajas concentraciones de OD pueden afectar el proceso de nitrificación, por parte de las bacterias, y puede llegar al punto de detener este proceso, acumulándose el amonio, o el nitrito y transformándose poco nitrato (Candarales, 2016).

De acuerdo a lo anterior, en los resultados de pH, se identificó una tendencia a la acidez dentro de los sistemas, no obstante, en la R2, fue donde se llegó a obtener el valor mínimo de pH de 5,54, el cual se acercó al rango inferior de tolerancia para las plantas (Anexo 1). En este punto se debe tener en cuenta que la capacidad de absorción de los nutrientes por parte de las raíces, está estrechamente relacionado con el valor de pH del medio, por lo que al alcanzar ese nivel se afecta la absorción y asimilación de varios nutrientes como: calcio, manganeso, nitrógeno, fósforo y potasio (Osorio, 2012). De igual modo, aumenta la incidencia de enfermedades provocadas por hongos, bacterias o insectos (Munévar, 2004).

En este trabajo, no hubo evidencia de alguna enfermedad o afectación en las plantas por algún organismo patógeno (hongo, bacteria o insecto), pese a ello, sí se identificaron deficiencias nutricionales relacionadas con nitrógeno (A1 y A2), potasio (B) y fósforo (C) (Figura 2), en la R2, en donde se evidencio el nivel de pH más bajo, por lo que se hizo necesario el uso de hidróxido de calcio, hidróxido de potasio y bicarbonato de sodio, para incrementar los valores de pH en los sistemas y regular la absorción de nutrientes por parte de las plantas.

Teniendo en cuenta que el nitrógeno es un elemento a partir del cual se conforman aminoácidos, ácidos nucleicos y la clorofila en las plantas, la deficiencia de este, genera un

retraso en el crecimiento de las mismas y provoca una clorosis generalizada de las hojas (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015) como se pudo observar en la figura 2 (A1 y A2).

Las plantas terrestres suelen absorber y asimilar el nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-), aun así, pueden llegar a asimilar nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) pero en una pequeña proporción (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015). La preferencia por el nitrato se debe a que, las plantas al absorber amonio pueden llegar a superar la capacidad de asimilación, por lo que se almacenan en los tejidos de las plantas, llegando a ser tóxico al impedir el transporte de electrones y nutrientes, en cuanto a la bioacumulación de nitrato, las plantas pueden almacenar altos niveles de este compuesto sin presentar toxicidad para la misma (Taiz, Zeiger, & Moller, 2015).

Los valores más altos de nitrógeno en forma de NAT y de NO_3^- coincidieron con R2, esto pudo estar relacionado con tres factores, el primero se relaciona con la condición de estrés en los peces provocada por hipoxia del medio. La segunda, tiene que ver con el NAT, pudo ocurrir entonces que la conversión de amonio a nitrato no se efectuara, o solo se diera parcialmente, como consecuencia de la hipoxia del medio, de esta forma se pudo reducir las tasas de nitrificación por parte de las bacterias nitrificantes (Candarale, 2016). El tercero, está relacionado con el bajo pH, este pudo impedir la biodisponibilidad de NO_3^- , y afectar la absorción de este nutriente por parte de las plantas (Osorio, 2012). Aun así, se evidenció altas concentraciones de NO_3^- , durante las tres replicas, lo que sugiere que el sistema pudo sostener una mayor densidad de plantas hasta las cosechas tipo “baby leaf” (Somerville *et al.*, 2014). En ese orden de ideas, Nurzyńska *et al.* (2012), encontraron que, bajo mayores concentraciones de N en el medio, se reduce la cantidad de materia seca acumulada en las hojas de *E. sativa.*, por lo que apoya la idea anterior para aumentar las densidades de cultivo.

En adición, la ligera reducción de NO_3^- hacia el final de las CF, se puede relacionar con la producción de glucosianatos específicos para la etapa fenológica de floración en *E. sativa*, puesto que se componen principalmente de nitrógeno (N) y azufre (S), los cuales aportan su

sabor picante y pungente, tan característico, que si no se maneja adecuadamente puede generar pérdida de calidad comercial de las plantas (Cavauiolo & Ferrante, 2014).

En cuanto al Fe^{2+} y al Mn^{2+} se encontró un descenso constante desde la siembra hasta las cosechas, esto corresponde a las altas concentraciones de estos elementos encontrados en hojas de rúgula por Acikgoz (2011), encontrando mayores concentraciones de Fe^{2+} en las hojas, para la temporada de otoño (con menores temperaturas), mientras que las mayores concentraciones de Mn^{2+} fueron registradas en la temporada de primavera (mayores temperaturas). Nurzyńska *et al.* (2012) determinaron que la acumulación de Fe^{2+} y de Mn^{2+} dependen de la concentración de N en el medio, donde se ve mayor acumulación de Fe^{2+} en plantas con aplicación de N y una reducción en la acumulación de Mn^{2+} , lo que explicaría que en las épocas de mayores concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- , se evidencien mayores concentraciones de Mn^{2+} , en el medio.

Nurzyńska *et al.* (2012), mencionan que las deficiencias de K^+ en el medio, llevan a la bioacumulación de compuestos tóxicos para la planta, como lo es el NH_4^+ . Además, describen que las plantas fertilizadas con la mayor concentración de K^+ tienden a acumular mayor cantidad de Fe^{2+} , lo que explicaría el incremento de este en el medio al final de la R2, puesto que al existir una deficiencia de K^+ se deja de absorber Fe^{2+} .

Por último, Taiz, Zeiger, & Moller (2015) comentan que algunas especies de plantas frente a la deficiencia de P, pueden producir grandes cantidades de antocianinas, las cuales provocan una coloración purpura en la planta y un adelgazamiento de los tallos, como se observó en la figura 3 (C), igualmente, asocian el crecimiento de raíces laterales y pelos radiculares con la deficiencia de P, al igual que se ven afectadas las membranas celulares y la composición de moléculas como el ATP, que a su vez afecta la fotosíntesis.

CONCLUSIÓN

El crecimiento y los parámetros productivos de *O. sp.* fueron mejores respecto a los encontrados para *P. brachypomus*. Del mismo modo, el crecimiento y los parámetros productivos de *O. sp.* fueron similares a cultivos tradicionales (en estanque y en jaulas). En el caso de *P. brachypomus* obtuvo un 100% de sobrevivencia y una mayor densidad de cultivo respecto a cultivos tradicionales, aun así, los parámetros productivos y de crecimiento fueron inferiores a los cultivos tradicionales. Por otro lado, el incremento de la biomasa de peces en el sistema puede permitir una mayor concentración de nutrientes en el mismo.

El tiempo de cultivo de *E.v. sativa* fue similar a los tiempos reportados para cultivos tradicionales, también presentó una buena adaptación para cultivo tipo “baby leaf”, y para cultivo comercial de hoja larga, aun así, el cultivo tipo “baby leaf” presentó un mejor desempeño respecto al cultivo comercial de hoja larga. En cuanto a productividad y crecimiento de cultivo, se encontró similaridad con algunos estudios discutidos y fue superior e inferior a otros, por lo que se consideró que esos factores dependen del cultivar implementado durante el cultivo.

Basado en los niveles de físicoquímicos durante el cultivo, en especial los valores de NO_3^- , se considera que la densidad de cultivo de plantas pudo haber sido mayor para cultivo tipo “baby leaf” durante la tercera réplica. El crecimiento de *O. sp.*, *P. brachypomus* y *E.v. sativa*, fueron afectados por la temperatura del medio en el que se desarrollaron y las concentraciones de oxígeno disuelto. Se encontraron deficiencias de nutrientes como el nitrógeno, el potasio y el fósforo, para el cultivo comercial de hoja larga de la segunda réplica de rúgula.

De acuerdo a lo anterior el cultivo acuapónico de pequeña escala para la producción limpia de tilapia roja (*Oreochromis sp.*), cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y rúgula (*Eruca vesicaria sativa*), se considera viable para promover la seguridad alimentaria.

RECOMENDACIÓN

Con el fin de mejorar los rendimientos de cultivo tipo “baby leaf” de *E.v. sativa*, se recomienda implementar mayores densidades de cultivo. Asimismo, evaluar el crecimiento y productividad de diferentes cultivares de rúgula bajo sistemas acuapónicos. También se recomienda evaluar para el cultivo de *E.v. sativa* diferentes rangos de temperatura ambiente.

Para mejorar los rendimientos de cultivo de *O. sp.* y *P. brachypomus*, se recomienda manejar una mayor temperatura, que evite condiciones de estrés en los organismos de estudio, así como implementar alimentos suplementarios naturales para *P. brachypomus*.

Para próximas investigaciones se recomienda también tener un plan de contingencia claro, en caso de cortes de electricidad, para que el proceso de investigación no se vea afectado por esta causa. A partir de esto también se pueden hacer estudios implementado energías renovables.

BIBLIOGRAFÍA

- Acikgoz, F. E. (2011). The effects of different sowing time practices on vitamin C and mineral material content for rocket (*Eruca vesicaria* subsp. *sativa* Mill). Scientific Research and Essays, 6(15), 3127-3131.
- Aguilera, M., Hernández, F., Mendieta, E., & Herrera, C. (2012). Producción integral sustentable de alimentos. Ra Ximhai (Revista de sociedad cultura y desarrollo sustentable), 8(3), 71-74.
- Asohofrucol –(Asociación Hortifrutícola de Colombia). (2018). Informe de gestión 2018. Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola.
- AUNAP -(Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca). (2014). Plan nacional para el desarrollo de la acuicultura sostenible en Colombia. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), Bogotá D.C.
- Baker, T., & Miller, S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. Journal of hydrology, 486, 100-111.
- Bermúdez, A., Muñoz-Ramírez, A., & Wills, G. A. (2012). Evaluación de un sistema de alimentación orgánico sobre el desempeño productivo de la tilapia nilótica (*Oreochromis Niloticus*) cultivada en estanques de tierra. Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, 59(3), 165-175.
- Bocek, A. (2000). Introducción al policultivo de peces. . Internacional Center For Aquaculture and Acuatric Enviroments, Asburn University , Alabama USA.
- Boltaña, S., Sanhueza, N., Aguilar, A., Gallardo-Escarate, C., Arriagada, G., Valdes, J., . . . Quiñones, R. (2017). Influences of thermal environment on fish growth. Ecology and evolution, 7(17), 6814–6825.
- Bosseti, C., Filomeno, M., Riso, P., Polesel, J., Levi, F., Talamini, R., & Vecchia, C. L. (2012). Cruciferous vegetables and cancer risk in a network of case–control studies. Annals of oncology, 23(8), 2198-2203.

- Buchholz, H. (2015). Growing greens to feed both cows and people. Crop production. Wisconsin Agriculturist. .
- Buzby, K., Waterland, N., Semmens, K., & Lin, L. (2016). Evaluating aquaponic crops in a freshwater flow-through fish culture system. Aquaculture, 460, 15-24.
- Calvo, Í. (2015). Influencia de la concentración de amonio de la solución nutritiva sobre el comportamiento agronómico del cultivo de la escarola. Disertación doctoral.
- Candarles, P. (2016). Técnicas de acuaponía. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola CENADAC), Dirección de acuicultura. Ministerio de Agroindustria Presidencia de la nación., Argentina.
- Carter, C. D., Doneen, L. V., Kylin, A., Peck, A., Quatrano, S., & Thomson, W. (2012). Plants in saline environments. (A. Poljakoff-Mayber, & J. Gale, Edits.) Springer Science & Business Media, 15, 199.
- Castro, M., & Salamanca, A. (2015). Manejo de policultivo de cachama y mojarra en el municipio del Socorro, Santander. Cartilla, Universidad Libre, Colombia, Programa de responsabilidad universitaria. Programa de Zootecnia.
- Cavauiolo, M., & Ferrante, A. (2014). Nitrates and glucosinolates as strong determinants of the nutritional quality in rocket leafy salads. Nutrients, 6(4), 1519-1538.
- Cifuentes, M., & Torres, A. (2012). Evaluación del crecimiento de goldfish (*Carassius auratus*), carpa (*Cyprinus carpio*) y orégano (*Origanum vulgare*) en un sistemas acuapónico. . Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de ciencias básicas y aplicadas- Programa de Biología Aplicada.
- Cifuentes, R., González, J., Montoya, G., Jara, A., Ortiz, N., Piedra, P., & Habit, E. (2012). Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). Gayana (Concepción). 76, 86-100.
- CIID; Inderena; INPA; Colciencias. (1993). El policultivo, la mejor alternativa de producción. Bogotá, Colombia.: Guadalupe.
- Colorado, F., Rodríguez, D., & Cortés, J. (2010). Análisis de crecimiento de rúgula (*Eruca sativa* Mill.) En la sabana de Bogotá, bajo dos condiciones ambientales. UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 13(1), 105-113.

- Costa, C., Seabra-Junior, S., Arruda, G., & Souza, S. (2011). Desempenho de cultivares de rúcula sob telas de sombreamento e campo aberto. *Semina. Ciencias agrarias*, 32(1), 93-102.
- Cruz-Velásquez, Y., Kijora, C., Vergara-Hernández, W., & Schulz, C. (2014). On-farm evaluation of Cachama blanca and Nile tilapia fed fermented aquatic plants in a polyculture . *Orinoquía suplemento*, 18, 269-277.
- Cruz-Casallas, P., Medina-Robles, V., & Velasco-Santamaría, Y. (2011). Fish farming of native species in Colombia: current situation and perspectives. *Aquaculture Research*, 42(6), 823-831.
- DANE –(Departamento administrativo nacional de estadística). (2020). Pobreza monetaria en Colombia 2019. Boletín técnico.
- Del Pino, M. (2012). El cultivo de Rúcula. Curso Introducción a las Ciencias Agrarias y Forestales. Boletín informativo, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Deza, S., Quiroz, S., Rebaza, M., & Rebaza, C. (2002). Efecto de la densidad de siembra en el crecimiento de *Piaractus brachipomus* (Cuvier, 1818) “paco” en estanques seminaturales de Pucallpa. *Folia Amazónica*, 13(1-2), 49-64.
- Espinosa-Moya, A., Álvarez-González, A., Albertos-Alpuche, P., Guzmán-Mendoza, R., & Martínez-Yáñez, R. (2018). Growth and development of herbaceous plants in aquaponic systems. *Acta Universitaria*, 28(2), 1-8.
- FAO -(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Fedeacua -(Federación Colombiana de Acuicultores). (2015). Plan de negocios sectorial de la piscicultura de Colombia. AUNAP -(Autoridad Nacional de Agricultura y Pesca).
- Fernández, A. (2010). ¿Cómo alimentaremos el ganado en la próxima década? Universidad de Río Cuarto, Departamento de producción animal. Facultad de agronomía y veterinaria., Argentina.

- Fernández, J., Nicola, S., Egea-Gilabert, C., Niñirola, D., & Conesa, E. (2015). Producción de hortalizas de hoja baby leaf en bandejas flotantes. Universidad Politécnica de Cartagena, España., Departamento de Producción Vegetal.
- Fernández, J., Peñapareja, D., Signore, A., López, J., & González, A. (2006). Producción de rúcula “baby leaf” en bandejas flotantes. *Actas de horticultura*, 46, 56-61.
- Frezza, D., Logegaray, V., León, A., Harris, M., & Chiesa, A. (2009). Rocket (*Eruca sativa* Mill.) quality affected by preharvest and postharvest factors. In *Southeast Asia Symposium on Quality and Safety of Fresh and Fresh-Cut Produce*, 875, 357-364.
- Gamba, Y., Barrientos, J., & Cuervo, J. (2007). Manejo agronómico y poscosecha de hierbas aromáticas culinarias.
- Gómez, C., Franco, G., & Gallego, J. (2004). Análisis de crecimiento de lulo “La Selva” (*Solanum quitoense* Lamb), en condiciones del departamento de Caldas . *Revista Comalfi*, 32, 44-46.
- González, R. (2001). El cultivo de la cachama. En I. N. Ministerio de Agricultura, H. Rodríguez, P. Daza, & M. Carrillo (Edits.), *Fundamentos de acuicultura continental*.
- Guevara, L., Gerdel, A., & Osto, A. (2016). Evaluación del crecimiento de híbrido de peces "Cachamoto"(*Colossoma macropomun* x *Piaractus brachipomus*) con alimento comercial y alternativo. *Novum Scientiarum*, 2, 10-24.
- Harder, L. (2015). *Grower’s guide*. Banff Community Greenhouse. Guía.
- Hennecke, A., & Rettenmaier, N. (2015). Sustainable Land Use: Food Production or Fuels. En S. Hartard, & W. L. (Edits.), *Competition and Conflicts on Resource Use. Natural Resource Management and Policy* (Vol. 46, págs. 245-258). Springer, Cham.
- Igua, S. (2019). Comparación del crecimiento de albahaca (*Ocimum basilicum*) en un sistema acuapónico con trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) vs cama contenida. Pasantía, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de ciencias básicas y aplicadas.
- IPCC (Intergovernmental Panel on climate Change). (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad* . Resumen para responsables de políticas, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.

- Jauncey, K. (1982). The effects of varying dietary protein level on the growth, food conversion, protein utilization and body composition of juvenile tilapias (*Sarotherodon mossambicus*) . *Aquaculture*, 27(1), 43-54.
- Knaus, U., & Palm, H. (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.
- Lemus, N., Andrade, H., & Quintero, H. (2018). Crecimiento Compensatorio de Cachamote (*Colossoma macropomum* x *Piaractus brachipomus*). *Novum Scientiarum*, 3(7), 10-20.
- Leyton, S. A., Muñoz, E., S., M. G., Sánchez, G. C., L. A., & A. S. (2015). Estimación del factor de condición de Fulton (K) y la relación longitud-peso en tres especies ícticas presentes en un sector sometido a factores de estrés ambiental en la cuenca alta del río Cauca. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(27), 24-31.
- Lopes, M., Cardoso, S., Lucas, F., & Melo, V. (2017). Efeito da aplicação foliar de biofertilizante na produção de mudas de rúcula sob diferentes substratos. *Nucleus*, 1 (14), 177-188.
- MADR –(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). (2019). Cadena de las hortalizas. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales.
- MADR –(Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). (2020). Cadena de la acuicultura. Informe, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección de cadenas pecuarias, pesqueras y acuícolas.
- Manchali, S., Murthy, K., & Patil, B. (2012). Crucial facts about health benefits of popular cruciferous vegetables . *Journal of Functional Foods*, 4(1), 94-106.
- Markham, V. D. (2008). U.S. Population, energy & climate change. Reporte, Center for Environment & Population.
- Matos, E., Rodolfo, A., Costa, P., Silva, F., Costa, A., & Marques, V. (2019). Agro industrial waste as source of n for the production of *Eruca sativa*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(1), 17-22.

- Mattson, N., & Merrill, T. (2017). Symptoms of Common Nutrient Deficiencies in Hydroponic Arugula. Research update, e-Gro.
- Merino-Archila, M. C., Salazar-Ariza, G., & Gomez-Leon, D. (2006). Guía práctica de piscicultura en Colombia. Guía práctica, Instituto Colombiano de Desarrollo Rural - INCODER, Bogotá D.C.
- Merino, M. (2018). Acuicultura en Colombia. AUNAP -(Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca) , Dirección técnica de administración y fomento.
- Munévar, F. (2004). Relación entre la nutrición y las enfermedades de las plantas. Palmas, 25(4), 171-178.
- Nash, R., Valencia, A. H., & Geffen, A. J. (2006). The Origin of Fulton's Condition Factor—Setting the Record Straight. Fisheries, 31(5), 236-238.
- Navarro, A. (2002). Ensayo de dos modelos de policultivo empleando bragre (*Ictalurus punctatus*) tilapia híbrida (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis mossambicus*) y langostino (*Macrobrachium tenellum*) en estanques semi-rusticos caso jocotepec, Jalisco. Tesis de grado, Universidad de Colima, Facultad de ciencias marinas.
- Nelson, R., & Pade, J. (2008). Aquaponic food production: Raising fish and vegetables for food and profit. Montello, United States of America: Nelson & Pade, Inc.
- Nicola, S., Pignata, G., Casale, M., Turco, P., & Gaino, W. (2015). Overview of a lab-scale pilot plant for studying baby leaf vegetables grown in soilless culture . The Horticulture Journal MI-R01.
- Nurzyńska-Wierdak, R., Dzida, K., Rożek, E., & Jarosz, Z. (2012). The effect of nitrogen and potassium on N-NH₄ and n-NO₃ accumulation and nutrient contents in rocket (*Eruca sativa* Mill.) leaves. Acta Sci Pol-Hortoru, 11, 211-221.
- Ortiz, J., Saltos, N., Giacometti, J., Arrobo, A., Peñafiel, C., & Falconi, R. (2007). Alternativas alimenticias para el cultivo de *Colossoma macropomum* en jaulas flotantes. Boletín Técnico, Serie Zoológica, 7(3), 72-81.
- Osorio, N. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal, 1(4), 1-4.

- Palm, H., Seidemann, R., Wehofsky, S., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. *AACL Bioflux. Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 7(1), 20-32.
- Pinho, S., Fitzsimmons, K. G., & Emerenciano, M. (2018). Integrated production of fish (pacu *Piaractus mesopotamicus* and red tilapia *Oreochromis* sp.) with two varieties of garnish (scallion and parsley) in aquaponics system. *Aquaculture international*, 26(1), 99-112.
- Poleo, G., Aranbarrio, J., Mendoza, L., & Romero, O. (2011). Cultivo de cachama blanca en altas densidades y en dos sistemas cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(4), 429-437.
- Rakocy, J., Bailey, D., Shultz, R., & Thoman, E. (2004). Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. .
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center*, 454, 16.
- Riley, M. B., Williamson, M. R., & Maloy, O. (2002). Plant Disease Diagnosis. *The Plant Health Instructor.*, 10.
- Rincón, N. (2012). Contexto y perspectiva de la red de suministro: Plantas aromáticas en Colombia. *Dialnet, Económicas CUC*, 33(1), 135-156.
- Rodriguez, A., & Vial, C. (2020). Índice de desarrollo regional- Latinoamérica. Resumen ejecutivo, Universidades e Institutos de latinoamérica.
- Ruales, D., Arturo, C., & Vásquez, W. (2010). Transporte iónico en el epitelio branquial de peces de agua dulce . *Revista Lasallista de Investigación*, 7(1), 85-99.
- Saavedra, M. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. *Centro de Investigaciones de Ecosistemas Acuáticos (CIDEA-UCA)*, Managua.
- Santis, H. R., Sepulveda, C. A., & Betancur, D. A. (2012). Evaluación de la morfometría y el hábito alimenticio en la tilapia roja *Oreochromis* sp. y la tilapia nilotica

- Oreochromis niloticus* var. *Chitralada* bajo diferentes condiciones de manejo en dos granjas piscícolas del occidente antioqueño . *Politécnica*, 8(14), 97-104.
- Shamrock. (1015-2016). Product guide for Coastal California. productive guide, Shamrock seed company, INC.
- Silva, P., Kinjo, S., Melo, M., & Sala, F. (2019). Evaluation of arugula cultivars and seed production in the organic system. *Journal of Seed Science*,. 41(4), 423-430.
- Smith, P., Dong, H., Elsiddig, E., Haberl, H., Harper, R., House, J., & Jafari, M. (2014). Chapter 11 - Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). En C. U. Press, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change PCC Working Group III Contribution to AR5*. Press, Cambridge University.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Technical Paper, FAO Fisheries and Aquaculture, Integrated fish and plant farming, Rome.
- Tafur-Gonzales, J., Alcántara-Bocanegra, F., Águila-Pizarro, M. D., Cubas-Guerra, R., Mori-Pinedo, L., & F Chu-Koo. (2009). Paco *Piaractus brachypomus* y gamitana *Colossoma macropomum* criados en policultivo con el bujurqui-tucunaré, *Chaetobranchius semifasciatus* (Cichlidae). *Folia Amazónica*, 18(1-2), 97-104.
- Taiz, L., Zeiger, E., & I Moller, A. M. (2015). *Plant Physiology and Development*. Sinauer Associates.
- Takahama, M., Kawagishi, K., Sugawara, A., Araki, K., Munekata, S., Nicola, S., & Araki, H. (2019). Classification and screening of baby-leaf vegetables on the basis of their yield, external appearance and internal quality. *The Horticulture Journal*, 88(3), 387-400.
- Thorarinsdottir, R., Kledal, P., Skar, L., Sustaeta, F., Ragnarsdottir, K., Mankasingh, U., . . . Shultz, C. (2015). *Aquaponics Guidelines*. technical report, Lifelong Learning Programme.
- Tolleson, D., & Meiman, P. (2015). Global effects of changing land-use on animal agriculture. *Animal Frontiers*, 5(4), 14-23.

- Torres-Mesa, A. C. (2017). Dinámica de nutrientes en sistemas cerrados de recirculación en el cultivo de *Piaractus brachypomus*, *Oreochromis sp* y *Cyprinus carpio*, para su aplicación en la acuaponía. Tesis de maestría, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas- Maestría en Biología Aplicada.
- Varga, J., Apahidean, A., Laczi, E., & Apahidean, A. (2012). Studies concerning the sowing period in the arugula (*Eruca sativa* Mill.) plants development. *Acta universitatis sapientiae, Agriculture and environment*, 4, 5-10.
- Vásquez-Torres, W., Pereira-Filho, M., & Arias-Castellanos, J. (2011). Optimum dietary crude protein requirement for juvenile cachama *Piaractus brachypomus*. *Ciência Rural*, 41(12), 2183-2189.
- Velasco Matveev, L. A. (2008). Comportamiento productivo de la *Piaractus brachypomus* (cachama blanca) bajo diferentes densidades de siembra. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. , Facultad de Ciencias Pecuarias- Escuela de Ingeniería Zootécnica.
- Waarde, A. V. (1983). Aerobic and anaerobic ammonia production by fish. *Comp-Biochem-Physiol.*, 74, 675-684.
- Wang, C., Chang, C., Chien, Y., & Lai, H. (2016). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 21-30.
- Zurrita, A., M. B., A. G., Serrato, O. L., & Garnica, J. A. (2015). Factores Causantes de Degradación Ambiental. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1-9.

Anexo 1. Condiciones fisicoquímicas generales para el buen desarrollo de un sistema acuapónico (Tomado y modificado de Nelson & Pade, 2008; Del Pino, 2012; Somerville, 2014).

Parámetros	Rango de tolerancia				Rango ideal
	UM	Peces	Plantas	BN	SA
pH		6 - 8,5	5,5 - 7,5	6 - 8,5	6 - 7
OD	(mg / L)	4 - 6	> 3	4 - 8	> 5
TAm	°C	---	---	---	25 - 27
TA_g	°C	22 - 32	16 - 30	14 - 34	18 - 30
NAT	(mg / L)	< 3	< 30	< 3	< 1
NO₂⁻	(mg / L)	< 1	< 1	< 1	<1
NO₃⁻	(mg / L)	< 400	70 - 300	---	5 - 150
PO₄³⁻	(mg / L)	---	---	---	30 - 90
Fe²⁺	(mg / L)	---	---	---	0,5 - 5
Ca²⁺	(mg / L)	---	---	---	150 - 400
Mn²⁺	(mg / L)	---	---	---	0,1 - 1
K⁺	(mg / L)	---	---	---	200 - 400

--- Valores que dependen de la especie evaluada.