

EVALUACION DEL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*) Y TILAPIA
(*Oreochromis sp*) BAJO CONDICIONES DE ACUAPONIA.

Diego Leonardo Ormaza Munévar, Miguel Ángel Ormaza Munévar.

Trabajo de Grado para Optar al Título de Zootecnista.

Director

MsC. Daniel Felipe Torres Ruda

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia

Programa de zootecnia

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios, por regalarnos su sabiduría, paciencia y éxito en la culminación de nuestro proyecto. A nuestros padres quienes han creído en nosotros siempre por sus consejos y con su valioso e incondicional apoyo en este capítulo de nuestras vidas. A cada uno de los profesores y compañeros de estudio que han contribuido a la consecución de este logro.

Agradecimientos

En primera instancia doy gracias a Dios, a la Universidad Industrial de Santander Sede Málaga por permitirnos crecer académicamente y a cada uno de los docentes que hicieron parte en todo el proceso de formación profesional. A nuestros padres que fueron los mayores promotores durante este proceso.

Tabla de contenido

Introducción.....	14
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. Marco Referencial	20
2.1 Marco Teórico.....	20
2.1.1 Agricultura sostenible.....	20
2.1.2 Hidroponía	21
2.1.2.1 Técnicas hidropónicas.	22
2.1.3 Acuicultura.....	24
2.1.3.1 Métodos de cultivo.	25
2.1.3.2 Sistemas de producción en la acuicultura.	26
2.1.3.3 Sistemas y técnicas productivas.	26
2.1.4 Acuaponía	27
2.1.4.1 Descripción de un sistema acuapónico.	28
2.1.5 Descripción de los Componentes de un Sistema acuapónico.	29
2.1.5.1 Tanque de cultivo.	29
2.1.5.2 Sistema de filtración.	29
2.1.5.3 Filtración por Gravedad.	30
2.1.5.4 Filtración Mecánica.	30
2.1.5.5 Filtración biológica.....	31

2.1.5.6 Bacterias nitrificantes.	31
2.1.5.7 Descripción de las especies de cultivo en acuaponía.	32
2.1.5.8 Descripción general de la Tilapia.	32
2.1.5.9 Descripción general del cultivo de lechuga.	34
2.1.6 Parámetros hídricos en sistemas acuapónicos según la especie de cultivo.	36
2.1.7 Ciclo del nitrógeno y proceso de nitrificación.	37
2.1.8 Clasificación de métodos siembra en sistemas acuapónicos.	40
2.2 Marco Histórico	42
2.3 Marco conceptual.	45
3 Metodología	46
3.1 Ubicación	46
3.2 Construcción y Montaje del Sistema Acuapónico	46
3.3 Filtración Mecánica	47
3.4 Filtro Biológico	47
3.5 Sistemas de Recirculación	48
3.6 Especie de Cultivo Piscícola	50
3.7 Alimentación	50
3.8 Muestreos Biométricos en Tilapia (<i>Oreochromis sp</i>).	51
3.9 Índices Productos de la Biomasa Animal	51
3.9.1 Peso Inicial y Final	51
3.9.2 Ganancia de Peso Diaria	51
3.9.3 Eficiencia Alimenticia	52
3.9.4 Factor de Conversión Alimenticia (FCA)	52

3.9.5 Mortalidad.....	52
3.9.6 Factor de Condición Fulton (k).....	53
3.9.7 Producción de Biomasa Neta.....	53
3.10 Evaluación de Muestras Biométricos en Lechuga (<i>Lactuca Sativa</i>).....	54
3.10.1 Índices de desarrollo.....	54
3.10.1.1 Altura máxima de las plantas.....	54
3.10.1.2 Numero de Hojas.....	54
3.10.1.3 Ancho y Largo de las Hojas.....	55
3.10.1.4 Largo de la raíz.....	55
3.10.1.5 Tasa de crecimiento (cm/día).....	55
3.10.1.6 Tasa específica de crecimiento (%/día). Se determinó la tasa de crecimiento específico de las lechugas para cada cultivo dadas por la siguiente ecuación:.....	55
3.11 Composición Química de la Especie <i>Lactuca Sativa</i>	56
3.12 Determinación de Materia Seca del Cultivo de <i>Lactuca Sativa</i> Producido de Forma Acuapónica.....	56
3.12.1 Pesaje de Muestras (P_{Is}).....	56
3.12.2 Pesaje Final de las Muestras (P_F).....	56
3.12.3 Calculo del Porcentaje de Materia Seca de las muestras de <i>Lactuca sativa</i> tomadas del cultivo 1 y 2.....	56
3.12.4 Rendimiento de biomasa kg/m ²	57
3.13 Evaluación de parámetros hídricos y ambientales.....	57
3.13.1 Índices Económicos.....	58
3.13.2 Análisis estadístico.....	58

4. Resultados y discusión.	59
4.1 Operación Sistema de Recirculación.....	59
4.2 Análisis de los Índices Productivos en Tilapia y Lechuga	59
4.3 Análisis de los Registros Biométricos	61
4.3.1 Análisis de Correlación entre las Variables Biométricas.	63
4.3.2 Modelo de Regresión Ajustado.....	64
4.4 Análisis de los Parámetros Hídricos.....	67
4.4.1 Concentraciones Amoniacó	67
4.4.2 Concentraciones Nitrito	68
4.4.3 Concentraciones Nitrato	69
4.4.4 Temperatura del Agua	70
4.4.5 Concentraciones de Oxígeno Disuelto	71
4.4.6 Ph del Agua.....	72
4.5 Composición Química de la especie (Lactuca Sativa).	73
4.5.1 Análisis de los Resultados de la Materia Vegetal (Lactuca Sativa).....	73
4.5.2 Número y largo de la hoja.....	74
4.5.3 Ancho de la hoja.....	76
4.5.4 Altura máxima.....	76
4.5.5 Longitud de raíz.	77
4.6 Análisis de variables climáticas bajo invernadero.	78
4.7 Costos de producción.	80
5. Conclusión	81
6. Recomendaciones.....	82

Referencias Bibliográficas.....83

Apéndices94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de calidad del agua, requerimientos en alimentación prevista para siete especies acuáticas de interés comercial utilizadas comúnmente en acuaponía.	36
Tabla 2. Ecuaciones químicas de la nitrificación.	39
Tabla 3. Tabla de alimentación para las diferentes etapas productivas en tilapia.	50
Tabla 4. Índices productos de tilapia y lechuga bajo un sistema acuapónico a pequeña escala. .	60
Tabla 5. Registros biométricos de tilapia (<i>Oreochromis</i> sp).	62
Tabla 6. Estimación de los valores predictivos a partir del modelo ajustado.	66
Tabla7. Composición química de la especie <i>Lactuca Sativa</i> producida bajo un sistema acuapónico.	73
Tabla8. Evaluación de los registros obtenidos de la materia vegetal bajo un sistema acuapónico.	74
Tabla9. Costos de Producción Bajo un Sistema Acuapónico.	80

Lista de Figuras

Figura 1.Métodos de cultivo en sistemas hidropónicos.22

Figura 2 Ilustración esquemática de acuaponía clásica acoplada y desacoplada.29

Figura 3.Ciclo del nitrógeno en un sistema acuapónico.39

Figura 4.Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo NFT.....41

Figura 5.Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo (DWC).41

Figura 6.Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo de sustrato.42

Figura 7 Diseño acuapónico establecido a pequeña escala.49

Figura 8. Gráficos de los registros biométricos del crecimiento en tilapia tomados cada 15 días.
.....63

Figura 9.Gráfico de dispersión modelo ajustado a escala de logaritmo neperiano.....65

Figura 10.Gráfico de dispersión modelo no ajustado en función potencial.65

figura11.Gráfico de las diferentes concentraciones de amoníaco (NH₃/ NH₄).67

Figura 12. Gráfico de las diferentes concentraciones de nitrito (NO₂).68

Figura 13. Gráfico de las diferentes concentraciones de nitrato (NO₃).....69

Figura 14. Evaluación de la temperatura en un ciclo de cultivo de 200días.70

Figura 15. Gráfico de las diferentes concentraciones de oxígeno disuelto.71

Figura 16. Gráfico de los diferentes rangos de Ph evaluados.....72

figura17. Gráfico de longitud de la hoja, Numero de hojas y Ancho de Hoja (cm) evaluados en dos ciclos de siembra bajo un sistema acuapónico.75

Figura 18.Gráfico de altura máxima y longitud de raíz en (cm/día) evaluados en dos ciclos de siembra bajo un sistema acuapónico.77

Lista de Apéndices

Apéndice A. Gráficos de los coeficientes de correlación entre las variables biométricas.	94
Apéndice B. Graficas de la distribución de los residuos estandarizados.....	94
Apéndice C. Montaje del filtro mecánico.....	95
Apéndice D. Etapa inicial de maduración del filtro biológico.....	95
Apéndice E. Ilustración del proceso de filtrado de solidos de menor y mayor densidad.....	96
Apéndice F. Evaluación de los parámetros hídricos kit API colorimétrico.	96
Apéndice G. Muestreos biométricos y pesaje.....	97
Apéndice H. Biomasa final obtenida en un periodo de 200 dias.	97
Apéndice I. Medición parámetros físicos y químicos (temperatura, oxígeno disuelto, PH y conductividad).	98
Apéndice J. Característica de la hoja del cultivo1 y 2.	98
Apéndice K Etapas fenológicas en cultivo de lechuga (Lactuca Sativa)	99
Apéndice L. modelo acuapónico a pequeña escala bajo invernadero.	99
Apéndice M. Deshidratación de materia fresca bajo invernadero.	100

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACION DEL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca Sativa*) Y TILAPIA (*Oreochromis sp*) BAJO CONDICIONES DE ACUAPONIA¹

AUTORES: DIEGO LEONARDO ORMAZA MUNEVAR
MIGUEL ANGEL ORMAZA MUNEVAR²

PALABRAS CLAVE: Acuaponia, NFT, Tecnicas de cultivo, Sistema de recirculacion (RAS), Hidroponia, Nitrificación, Filtracion mecanica, Filtracion biologica.

DESCRIPCIÓN:

La acuicultura ha adquirido un eslabón productivo importante para la industria alimentaria en el mundo, se ha intensificado y evolucionado a lo largo del tiempo ante la necesidad de desarrollar alternativas más productivas y sustentables con el medio ambiente que permitan el uso racional de los recursos naturales promoviendo desafíos como actividad sostenible. la acuaponía es una alternativa productiva sostenible de modo que permite mantener el control de los desechos en los cultivos acuícolas y uso del agua, esta tecnología integra la hidroponía como método de agricultura intensiva donde aplican técnicas de producción agrícola sin suelo, asimismo ha revolucionado los sistemas tradicionales en los últimos años, por lo tanto se pueden establecer de diversos tamaños desde pequeños a gran escala en entornos urbanos y periurbanos específicamente en zonas donde la disponibilidad de las reservas de agua y tierra cada día son más limitadas. Con la elaboración de esta investigación se implementó la acuaponía que consiste en la producción de alimento a partir de la interacción de estos sistemas de modo que permite la utilización de los desechos generados por los peces (*Oreochromis sp*) para luego ser conducidos a través del sistema de recirculación (RAS) para el proceso de nitrificación por medio de un sistema de filtración mecánica, biológica y posteriormente son dirigidos hacia los canales de cultivo hidropónico como solución nutritiva de forma disponible para las plantas (*Lactuca sativa*) y finalmente retorna directamente de manera filtrada hacia el cultivo de peces. Este proyecto se diseñó a pequeña escala en un área de 13 (m²), estructurado por dos tanques de producción (500L), un decantador(19L), un filtro mecánico(19L), un biofiltro(500L), un sistema de aireación (blower-1.5hp), asimismo se implementó canales horizontales utilizando la técnica (NFT) escalonados para establecer 55 plantas. El objetivo del presente estudio fue evaluar índices económicos y productivos bajo este sistema.

¹ Trabajo de Grado

² Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de zootecnia. Director TORRES RUDA, Daniel Felipe. MsC

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE LETTUCE CROP (*Lactuca Sativa*) AND TILAPIA (*Oreochromis sp*) UNDER AQUAPONIC CONDITIONS *

AUTHOR(S): DIEGO LEONARDO ORMAZA MUNEVAR
MIGUEL ANGEL ORMAZA MUNEVAR ³

KEY WORDS: Aquaponics, NFT, Growing techniques, Recirculation system, (RAS), Hydroponics, Mechanical filtration, Biological filtration.

DESCRIPTION:

Aquaculture has acquired an important productive link for the food industry in the world, it has intensified and evolved over time due to the need to develop more productive and environmentally friendly alternatives that allow the rational use of natural resources, promoting challenges as a sustainable activity. Aquaponics is a sustainable productive alternative that allows you to maintain control of waste in aquaculture crops and water use. This technology integrates hydroponics as a method of intensive agriculture where soilless agricultural production techniques are applied. It has also revolutionized the systems. traditional in recent years, therefore they can be established in various sizes from small to large scale in urban and peri-urban environments, specifically in areas where the availability of water and land reserves are increasingly limited. With the development of this research, aquaponics was implemented, which consists of the production of food from the interaction of these systems in a way that allows the use of waste generated by fish (*Oreochromis sp*) to then be conducted through the system. recirculation system (RAS) for the nitrification process through a mechanical and biological filtration system and are subsequently directed towards the hydroponic cultivation channels as a nutrient solution available for the plants (*Lactuca sativa*) and finally returns directly in a filtered manner. towards fish farming. This project was designed on a small scale in an area of 13 (m²), structured by two production tanks (500L), a decanter (19L), a mechanical filter (19L), a biofilter (500L), an aeration system (blower-1.5hp), horizontal channels were also implemented using the staggered technique (NFT) to establish 55 floors. The objective of this study was to evaluate economic and productive indices under this system.

* Degree Work

³Institute of Regional Projection and Distance Education. Zootechnics program. Director TORRES RUDA, Daniel Felipe. MsC

Introducción

La acuicultura es una práctica que favorece la seguridad alimentaria nacional y mundial. Sin embargo, esta actividad durante los últimos años va en aumento en el periodo 2020 incremento en 179.351 toneladas de carne de pescado producidas con respecto al año 2011 con una producción de 82.622 toneladas, el consumo per cápita aumento para el 2020 con 8,8kg con respecto al 2018 con 6,86kg de pescado al año, asimismo conduce hacia el fortalecimiento de esta actividad promoviendo el crecimiento económico nacional participando con el 3,3% en el PIB agropecuario (Minagricultura, 2021) .

La acuicultura ha adquirido una gran importancia para producir proteína animal de alta calidad se ha intensificado sea diversificado buscando nuevas tecnologías más productivas y sostenibles, en la actualidad se han desarrollado técnicas que integra métodos intensivos de cultivo de peces de interés comercial.

La problemática hoy día en la acuicultura tradicional es la falta de implementación de técnicas para el tratamiento de los desechos producidos por las especies acuícolas. Por lo cual la acuicultura controlada como la acuaponía ofrecen métodos de producción en ausencia de suelo, una eficiencia en el uso del recurso hídrico basándose en el reciclaje del agua y los desechos generados por los peces con el fin de obtener rendimientos altos en cultivos piscícolas y agrícolas en comparación con los sistemas tradicionales (Somerville et al., 2019).

Actualmente es un desafío para los acuicultores la búsqueda de prácticas sostenibles para tratar el agua utilizada en los sistemas tradicionales, de modo que al no realizar un correcto vertimiento de las aguas genera un impacto negativo al ambiente y en la biodiversidad acuática. Dado que desencadena la eutrofización de las cuencas hídricas generando el crecimiento

abundante de macroalgas ocasionando un desequilibrio en la fauna acuática debido a la liberación descontrolada de desechos producidos en estas prácticas tradicionales (Somerville et al., 2019). Además la escasez de agua hoy en día se está presentando en buena parte del mundo y a nivel nacional, dado que constituye un recurso amenazado y en peligro.

Según (Carrión, 2019) la distribución y disponibilidad del agua en el planeta tierra depende de la humanidad, dado que representa el 2,5% del agua dulce, una parte está incorporada en los casquetes polares, acuíferos, ríos, arroyos y el 97,5% es agua salada que está presente en los océanos y lagos. Además, solo el 0,007% de agua está disponible para el consumo humano. Los índices reportados nos ayudan a dimensionar la realidad que podemos usar y que tenemos que cuidar, de modo que parece creer que es abundante en el futuro podría ser muy escaso.

Por otro lado, la agricultura es la encargada de producir alimentos a una población creciente a partir de los recursos naturales tierra y agua, dado que al tener que producir mayor alimento es necesario disponer más de estos recursos naturales, muchos de estos recursos están siendo sometidos a un estado crítico de degradación y extracción. Según (FAO, 2021) actualmente se vierten desechos al medio ambiente alrededor de 2.250 km³/año, según como lo indica el informe actualmente la actividad agrícola es la principal que vierte desechos alrededor de 1.260 km³/año por lixiviación, asimismo las zonas urbanas e industriales vierten 330 km³/año y 660 km³/año como aguas residuales.

La agricultura actual ha venido innovando con otras prácticas de labranzas mecanizadas y el uso de insumos químicos inorgánicos como fertilizantes, fungicidas, herbicidas, con el fin de obtener mejores rendimientos en los ciclos de cada cosecha, estas prácticas innovadoras han

producido efectos adversos al estado de los recursos, a causa que han contribuido al deterioro por erosión y contaminación de las reservas hídricas.

El problema de la escasez de agua es el impacto que supone para la seguridad alimentaria, es imprescindible para la humanidad y la biodiversidad. Dado que para producir los alimentos diarios de cada uno se requieren de 2 mil a 5 mil litros de agua, en la actualidad la población mundial supera los 7,700 millones de personas al mismo tiempo la demanda de agua ascendería, el desafío se presenta al considerar de aquí al 2050 se predice aumentaría la densidad poblacional se espera que llegue a los 9.000 millones, de esta manera se tendrá que alimentar a más personas y por lo tanto aumentaría extremadamente la demanda del agua (Corporán, 2012).

Según (Montesinos, 2021) si se analiza la cadena alimentaria generalmente la humanidad consume productos de origen vegetal y animal, el proceso para su obtención está determinada por los recursos naturales como el agua y la tierra, en la actualidad el 70% de los recursos hídricos en el mundo se dispone para producir alimentos agrícolas.

De acuerdo con (Ministerio de ambiente, 2010) las actividades productivas ejercen una presión sobre el ciclo hidrobiológico debido a la demanda creciente, contaminación y el crecimiento demográfico. Es evidente que para abastecer de alimento a una población creciente aumentara la demanda en los sistemas productivos.

En relación si comparamos la huella hídrica que genera diferentes actividades como la ganadería la demanda de agua para producir un 1 Kg de carne de res se necesitarían 15.500 L y en la acuicultura cuando se implementan sistemas de recirculación se necesitan 400L (Godde, et al., 2019). A nivel nacional la demanda hídrica en los diferentes sectores productivos alcanzo en el 2018 una magnitud de 35.877 millones de m³, el sector productivo que más demanda por su uso es la agricultura con 19.386 Mm³ que representa un 54% con respecto a otros sectores de

producción de energía (6.976 Mm³), acuícola (2.584 Mm³), pecuaria (2.220 Mm³), industria (1.577 Mm³) y otros sectores para uso humano o doméstico (Carmenza Gonzalez, et al., 2010).

Según (MADS, 2021) las autoridades ambientales a través del plan de desarrollo a nivel nacional 2018-2022 establece una agenda para la sostenibilidad, la cual busca implementar acciones para optimizar la gestión ambiental a través de actividades productivas sostenibles con el objetivo instaurar medidas para la mitigación del cambio climático.

En relación con la Organización de las Naciones Unidas (ONU) establece una agenda universal para el desarrollo sostenible para el 2030, en la cual busca establecer un plan para un futuro mejor y sostenible a través de los objetivos de desarrollo para la sostenibilidad (ODS) ante la problemática que adopta la necesidad de abordar desafíos encaminados al cambio climático, reducir la pobreza y garantizar la disponibilidad de agua para la producción sostenible de alimentos como más alta prioridad (ONU, 2018). Estos objetivos buscan conducir a los sistemas de producción que sean más sostenibles en aspectos económicos y ambientales, de modo que los sistemas integrados buscan dar una parte de la solución al implementar nuevos procesos tecnológicos enfocados a producir más alimentos sin aumentar la demanda de los recursos y reducir la huella de carbono.

Las condiciones futuras parecen indicar que debemos tener un cuidado extremo para evitar pérdidas de las zonas de importancia donde están presentes las reservas hídricas de agua dulce, dado que son indispensables para la vida humana, animal y para los sistemas agroalimentarios. Actualmente muchos acuíferos se están acabando rápidamente debido a la contaminación, expansión y extracción intensiva para diferentes usos en la producción agrícola, industrial, pecuaria y acuícola. En el mundo en algunos continentes hay gran deterioro de sus ecosistemas principalmente por problemas de calidad del suelo y pérdida de la

biodiversidad(FAO, 2021). Si persisten estas prácticas tradicionales las repercusiones futuras para la seguridad alimentaria serán mayores, es evidente que es necesario alimentar a una población en crecimiento.

La acuicultura controlada y la agricultura intensiva ofrece gran parte de las soluciones para la seguridad alimentaria como es el caso de la acuaponía considerada como una alternativa de producción más limpia para la obtención de alimento vegetal y animal más saludables, asimismo al implementar esta tecnología integrada se puede llegar a reducir hasta un 90% del consumo de agua, del mismo modo estos sistemas ofrecen incrementos en la rentabilidad debido a que se producen peces y hortalizas de alto valor nutricional completamente natural sin trazas de residuos (FAO, 2018).

El presente estudio de investigación es realizado bajo condiciones de acuaponía, utilizando semillas de lechuga (*Lactuca Sativa*) de variedad Simpson crespa y tilapia roja (*Oreochromis sp*) haciendo referencia a la implementación de nuevas tecnologías donde los rendimientos por unidad de área son mayores, permitiendo el crecimiento en la producción de alimentos orgánicos y económicamente rentables.

Finalmente surge la necesidad encaminada a dar soluciones de sostenibilidad ambiental mediante la adopción de implementar estas técnicas frente a las tradicionales, es importante reconocer que la protección de los recursos como el agua y la tierra son indispensable para abastecer la demanda agroalimentaria.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño productivo y económico del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) y tilapia (*Oreochromis sp*) bajo un sistema acuapónico.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento de los parámetros hídricos del sistema acuapónico (oxígeno disuelto, PH, CE, nitrito, nitrato, amoniac, temperatura).
- Evaluar índices productivos y biométricos del cultivo de tilapia (*Oreochromis sp*) y lechuga (*Lactuca sativa*).
- Realizar un análisis de los indicadores económicos y productivos del sistema acuapónico.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Agricultura sostenible

Es una actividad que participa en el desarrollo económico, reduce la pobreza y garantiza la seguridad alimentaria, es evidente que esta actividad es afectada por el cambio climático de manera que se originan periodos de sequías y lluvias prologadas, estos factores han contribuido al desequilibrio de los ciclos de cosecha y la baja producción. La modernización de la agricultura sostenible se encuentra en sistemas de producción controlados para mantener como prioridad el uso racional del agua y generar mejores rendimientos, de acuerdo con (Fernández & Camacho, 2005) la producción hortícola en modelos sostenibles garantiza el uso del recurso natural, cuando se pretende analizar la eficiencia del uso del agua(EUA) fisiológicamente en plantas se suele emplear como indicativo biomasa (B) por unidad de superficie(ET) y cuando se considera el uso del agua desde un punto de vista productivo y económico se especifica como rendimiento(Y) por unidad de superficie (EUA=B/ET ó EUA=Y/ET).

La agricultura moderna promueve la competitividad ante la necesidad de que los mercados demandan productos de calidad, de modo que para garantizar una producción de alta calidad implica el uso de nuevas tecnologías. Según (Bielinski M & Henner A, et al., 2010) la agricultura protegida se implementan estructuras cerradas como invernaderos, mallas, macro y micro túneles que permiten modificar el ambiente natural para crear condiciones artificiales para mantener parámetros óptimos como la humedad relativa, temperatura, radiación, entre otros para obtener mejores rendimientos y calidad en las cosechas. Además, unas de las ventajas principales que nos ofrece la agricultura protegida en comparación con la agricultura convencional es que

protege los cultivos de variaciones climáticas, plagas, enfermedades y regula el uso eficiente del agua a través de sistemas de riego automatizados.

En los últimos años se han desarrollado nuevos sistemas que ayudan a resolver problemas en el uso descontrolado del agua destinada para riego, agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, entre otros), que han ocasionado degradación en los suelos y en reservas hídricas, uno de los sistemas que ofrece la agricultura moderna es la hidroponía.

2.1.2 Hidroponía

según (Salazar molina, 2001) La hidroponía proviene de las palabras griegas Hydro que significa agua y Ponos trabajo, cuando hablamos de hidroponía se considera como una tecnología de agricultura moderna sin embargo es considerada como una técnica ancestral, existen referencias que esta técnica fue implementada en los jardines colgantes en la antigua babilonia por el Rey Nabucodonosor II y algunas culturas ancestrales implementaban esta técnica como medio de subsistencia, como por ejemplo los aztecas que implementaban jardines flotantes que se establecían en lagos las denominaban Chinampas, estas eran pequeñas islas construidas artificialmente con balsas y tierra soportadas por cañas en los bordes.

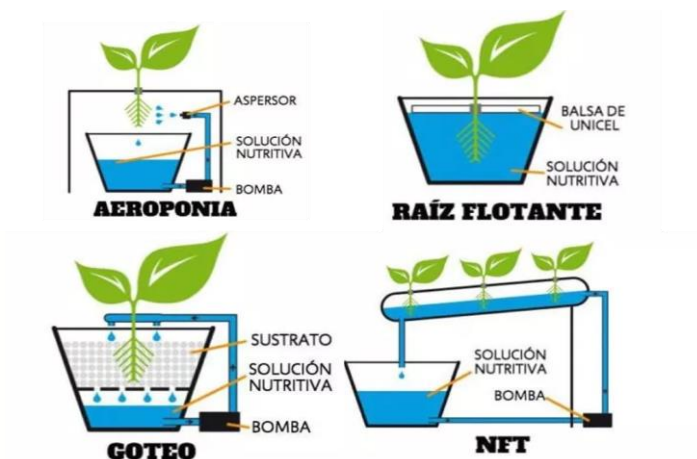
Según (Barbado, 2005) esta técnica de cultivo también se implementaba en la antigua China, India, Egipto y en culturas ancestrales como la cultura maya. En la actualidad se implementa comercialmente en algunos países asiáticos y de norte América, debido a que se presenta limitaciones en los recursos de agua y tierra.

según(Baixauli, et al., 2002) son cultivos que se desarrollan a partir de soluciones nutritivas y sustratos orgánicos o inertes donde no se emplea el suelo para su desarrollo, los sustratos para esta práctica más utilizados son de origen natural como la arena(turba), la grava(perlita, vermiculita, arcilla expandida), subproductos de la actividad agrícola como (fibra

de coco, viruta de madera, entre otros.) y polímeros no degradables (espuma de poliuretano y el poliestireno expandido). Existen diferentes técnicas de hidroponía como: técnica de película nutritiva (NFT), la técnica balsa de raíz flotante (DFT) y también existen técnicas aéreas como la aeropónica.

2.1.2.1 Técnicas hidropónicas. La hidroponía se puede emplear de diferentes técnicas (figura.1) algunas de las más usadas como: la técnica balsa de raíz flotante, en este sistema las raíces están sumergidas en una solución nutritiva y están sostenidas por una lámina de poliestireno perforada como soporte mecánico, por otra parte la técnica de película nutritiva (NFT) la raíz de las plantas están en contacto con una pequeña película de solución nutritiva que recircula de forma intermitente por canales horizontales de tubo PVC perforado y además otra técnica que se ha venido desarrollando en los últimos años como la aeropónica descrita como una técnica que consiste en que la solución nutritiva recirculante que pulveriza la raíz con agua en un entorno aéreo a través de un sistema de riego automático (Costa Rica, 2015,p5).

Figura 1.
Métodos de cultivo en sistemas hidropónicos.



*Nota: descripción grafica de los sistemas Hidropónicos.
Tomada de: blog generación vede, por (verdegen, 2017).*

Desacuerdo con (Sánchez Cortazzo, s.f.) Mediante esta tecnología de cultivo unas de las principales ventajas son:

- Puede ser aplicada en lugares donde no es común establecer cultivos agrícolas, por ejemplo, patios, terrazas, zonas urbanas, zonas áridas, entre otros.
- Permite obtener mejores rendimientos comparados con los cultivos tradicionales, por ejemplo, en cultivo de lechuga en tierra el rendimiento es de 6 a 8 plantas por m², con respecto a los cultivos hidropónicos puede alcanzar rendimientos alrededor de 28 a 30 plantas por m², igualmente ocurre en cultivos de tomate, acelga, entre otros.
- Permite uso eficiente de los espacios destinados para producir si comparamos con los cultivos de lechuga, es decir el cultivo en tierra solo puede llegar a 4 plantaciones por año, mientras que en los cultivos sin suelo se puede llegar a producir 10 cosechas al año.
- Reduce significativamente el consumo de agua. dado que, no hay perdidas por drenaje y escurrimiento interno, por ejemplo, según Alveal Concha & Campos González,(como se cito en C.BG del IPN 2004) una lechuga en cultivo hidropónico NFT consume aproximadamente 13,8 L por planta día, y en métodos de cultivo en tierra con sistema de goteo consume alrededor de 121 L por planta día, es decir reduce el consumo de agua hasta un 88,6% con respecto a los cultivos en tierra.
- No es necesaria la implementacion de rotación de cultivos por problemas de hongos, bacterias o baja fertilidad del suelo, dado que se puede establecer controles frente a nematodos o problemas por deficiencia de minerales (p.5).

Esta práctica de cultivo hidropónico busca principalmente sustituir la tierra por soluciones nutritivas para obtener mejores rendimientos en cada una de las cosechas, sin embargo, según (Gilsanz, 2007) presenta algunas desventajas como el alto costo inicial de inversión en quipos, infraestructura y se requiere conocimientos agronómicos.

2.1.3 Acuicultura

Según (Parrado Sanabria, 2012) la palabra acuicultura se entiende como una actividad productiva de especies hidrobiológicas (algas, peces, crustáceos, moluscos, entre otros) en ambientes naturales o artificiales. Esta actividad de cultivo desde tiempos antiguos o milenarios se ha venido desarrollando en todo el mundo, las referencias más antiguas datan entre el año 2000 A.C a 1000 D.C, principalmente en china con la producción de *Carpa* y en el antiguo Egipto con la *Tilapia*.

En la antigua china se consolidó como el primer país que desarrolló un estudio conocido sobre esta práctica de crianza de peces, fue publicada por *Fan-Lai* en el año 473 A.C, sin embargo, en el siglo XV esta práctica fue adoptada por Europa occidental donde se describen el uso de fuentes de agua para abastecer de alimento a los monasterios y a los imperios. Esta actividad tuvo gran relevancia por lo que fueron motivados por la necesidad de mantener vivos los animales capturados a partir de un medio natural, de manera que a mediados del siglo XIV en Francia se da a conocer los primeros pasos para llevar a cabo la fecundación artificial de huevos en trucha, a través de estos avances esta actividad se extendió hasta convertirse en sistemas de producción dado que tiene relación con los otros sistemas productivos como la ganadería, debido a que implica la cría y el manejo de los animales hasta su etapa comercial (Rueda Gonzalez, 2011).

Con el tiempo la acuicultura se distingue como una ciencia que incluye varias disciplinas como es la “piscicultura” es una rama de la acuicultura dedicada al cultivo de peces en condiciones controladas en ríos, lagos, lagunas, estanques artificiales (Fedeacua, 2018).

Según (Cuéllar Sáenz, 2021) la acuicultura comercial está dominado por el continente asiático, por otra parte en latino américa se ha desarrollado crecientemente en las últimas décadas principalmente en algunos países como Chile, Brasil, Ecuador y Colombia. Las especies ícticas de mayor interés comercial en Latinoamérica son el Salmon, trucha, camarón, tilapia y otras especies nativas como la cachama y el bagre.

La piscicultura en Colombia se ha desarrollado para la comercialización principalmente de tilapia y trucha, según el informe de la Federación Colombiana de Acuicultores para el 2021 las exportaciones del país incrementaron un 13% respecto al 2020. El sector piscícola está representado por estas dos especies de agua dulce para la exportación y demanda nacional, la tilapia alcanzo 67.622 Tn para 2021 con respecto al año anterior fue de 60.375 Tn, asimismo la trucha aumento el volumen de exportación con 11.633 Tn para 2021 con respecto al año anterior fue de 9.730 Tn , por lo cual según los indicadores se demuestra el fortalecimiento de la industria piscicola con mayor crecimiento en los últimos años(IPac, 2022).

2.1.3.1 Métodos de cultivo. La acuicultura describe diferentes métodos de cultivos extensivos, semi-intensivo e intensivo, ya que están relacionado con la densidad de siembra y grado de tecnificación. Los métodos de cultivo extensivo o tradicionales se implementan con fines de autoconsumo y de aprovechar los cuerpos de agua naturales por lo general se establecen en lagunas, embalses, ríos entre otros, las densidad de organismos que se establecen son bajas, se recomienda para este método de cultivo de 1 a 5 Kg/m². Por otro lado los métodos de cultivo orientados hacia la producción comercial como los métodos de cultivo semi-intensivo en cual se

implementan en estanques construidos con entradas y salidas, además está asociado a cierto grado de nivel tecnológico, ya que este método de cultivo requiere sistemas de bombeo y de aireación, se recomienda siembras 10 a 35 Kg/m³ de acuerdo a la eficiencia de los equipos, del mismo modo los cultivos intensivos implementan alto grado tecnológico cuya base está ligada con el control permanente de calidad de agua a través de recirculación continua de agua, filtración, aireación y personal técnico especializado que es necesario para poder llegar a densidades alrededor de 35 a 65Kg/m³, estas densidades se pueden llevar a cabo en sistemas RAS, IPRS ,técnicas de Biofloc y simbiótica(Gonzales, 2021,p5).

Según (Sáenz Jiménez, s.f.) La acuicultura cuando se implementa tradicionalmente requiere grandes cantidades de agua y grandes extensiones de tierra, al implementar sistemas cerrados como SRA o RAS ofrece ventajas como el uso racional del agua y permite tener control de los parámetros hídricos (temperatura, oxígeno disuelto, dióxido de carbono, pH, alcalinidad y metabolitos secundarios como nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos).

2.1.3.2 Sistemas de producción en la acuicultura. La acuicultura comprende tres tipos de sistemas abiertos, semicerrados y cerrados. Los cultivos en sistemas abiertos se llevan a cabo en lagunas, lagos y ríos, los sistemas semicerrados pueden ser desarrollados canaletas o estanques principalmente hacen referencia al control del flujo de entrada y salida de agua como por ejemplo cultivo en piletas o recetway. Por otra parte, los sistemas cerrados se caracterizan por implementar sistemas de recirculación de flujo continuo (RAS) para el proceso de filtración y reutilización del agua. Sánchez (como se cito Weathon,1993).

2.1.3.3 Sistemas y técnicas productivas. Los sistemas de cultivo se han intensificado y están estrechamente relacionados con el grado tecnológico implementado, generalmente estos sistemas fueron desarrollados principalmente para ser más productivos, es decir para aumentar la

densidad de siembra por unidad de volumen, como por ejemplo la técnica de Bioflog (BFT), sistema de recirculación (RAS), canales de flujo rápido dentro de un estanque (IPRS- In-Pond Raceways Systems) y Acuaponía (González, 2021).

2.1.4 Acuaponía

Es una conjunción simbiótica de técnicas hidropónicas (producción de plantas sin suelo) utilizando soluciones de nutrientes minerales proporcionado por técnicas acuícolas (producción de organismos acuáticos), esta se fundamenta en la relación biótica como un ecosistema natural entre peces, plantas y bacterias(Myers, 2014).

La acuaponía presenta un gran potencial como una tecnología sostenible, unas de las principales las ventajas y beneficios son: garantiza una mayor disponibilidad de nutrientes en un ambiente controlado para obtener mejores rendimientos comparado con los cultivos tradicionales, al ser un sistema cerrado se consume menos del 90% de agua comparado con la agricultura convencional, es ideal para zonas donde el agua es poco disponible, mayor productividad por unidad de área debido a que las plantas no compiten por nutrientes y por espacio para su desarrollo, es un sistema que auto recicla los desechos y el agua, reduce el ingreso de enfermedades o patógenos que puedan poner en riesgo los cultivos y además los productos obtenidos en estos sistemas no contine residuos químicos lo que hacen más saludables(Goddek et al., 2019).

La acuaponía presenta ciertas desventajas al igual que otros sistemas productivos, como por ejemplo la inversión inicial es relativamente alta requiere de equipos de bombeo, aireación filtración e infraestructura, falta más investigación y estandarización en los sistemas, la acuaponía es compleja si se compara con los demás sistemas productivos ya que se deben

mantener las condiciones ideales plantas y peces, además requiere de suministro de energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos.

2.1.4.1 Descripción de un sistema acuapónico. Los componentes esenciales para llevar a cabo en este sistema esta como prioridad el agua, oxígeno, bacterias, peces y plantas. La acuaponía integra la hidroponía con la acuicultura en un mismo sistema, además implementa mecanismos de recirculación (RAS) que facilita la remoción de sólidos permitiendo aprovechar los desechos excretados por los peces en forma de amónico y otros desechos generados por el metabolismo de las proteínas mediante la acción de las bacterias nitrificantes, asimismo las plantas y bacterias trabajan con la finalidad de limpiar el agua para los peces y los desechos son convertidos en nutrientes disponibles para las plantas en forma de nitritos o nitratos por la interacción de microorganismos, debido a que intervienen en procesos de nitrificación y mineralización basados en el ciclo del nitrógeno(Auwermeulen, 2007).

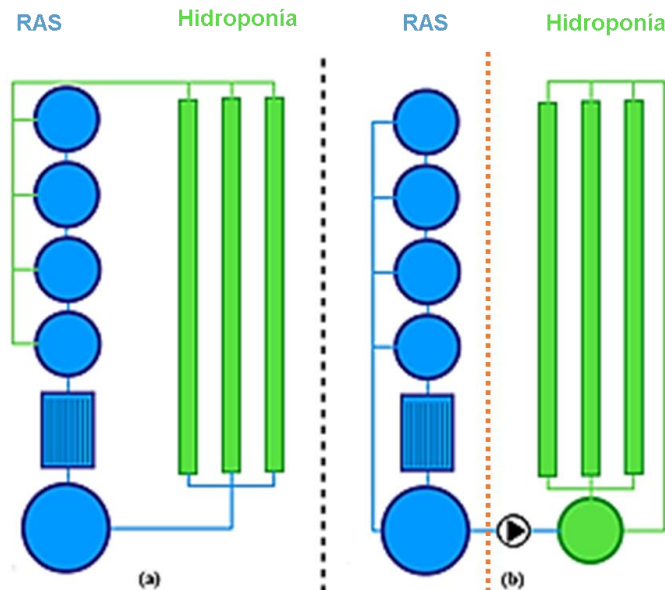
La acuaponía se puede implementar según el modo de ajuste de acoplamiento y tipo de tecnología que se implementa para cultivos hidropónicos, estos se pueden instaurar de dos formas: sistemas acoplados y desacoplados (figura.2). En los sistemas acoplados se caracterizan por un flujo continuo entre las unidades hidropónicas y acuícolas, es decir el agua con desechos que proviene de los tanques es recirculada hacia los filtros para el tratamiento de sólidos y lodos, luego es conducida hacia los módulos hidropónicos para facilitar la absorción de los nutrientes y finalmente el agua con menos partículas disueltas es devuelta hacia los tanques de cultivo de los peces(García, et al., 2021).

Por otro lado, los sistemas desacoplados el agua recircula aisladamente en cada una de las unidades acuícolas e hidropónicas, es decir el agua rica en nutrientes solo recircula una cantidad

determinada hacia los módulos hidropónicos y el agua no retorna hacia los tanques de cultivo de los peces (Flores Aguilar, et al., 2021).

Figura 2

Ilustración esquemática de acuaponía clásica acoplada y desacoplada.



Nota: (a): Sistema acuapónico acoplado consta de un (RAS) conectado directamente a la unidad hidropónica (b) Sistema acuapónico desacoplado que consta de un (RAS) conectado a la unidad hidropónica (con depósito adicional) a través de una válvula unidireccional). (azul: tanques de cría, clarificador y biofiltro) Tomada de: Decoupled systems on trial: Eliminación bottlenecks to improve aquaponic processes, por (Monsees, et al., 2017).

2.1.5 Descripción de los Componentes de un Sistema acuapónico.

2.1.5.1 Tanque de cultivo. Es el componente esencial para cualquier sistema acuícola debido a que es el medio donde se desarrollan los peces, el diseño de los tanques debe ser adecuado según la especie de cultivo, estos se clasifican en función de su geometría. Los tanques circulares permiten mantener uniformidad de las concentraciones de oxígeno evitando zonas muertas, además facilita la limpieza de los desechos generados por los peces debido a que permite mantener un flujo constante de recambio (Baradad Oca, et al., 2009).

2.1.5.2 Sistema de filtración. La filtración es uno de los componentes más importantes en la acuaponía debido a que permite mantener el control de los desechos tóxicos

para los peces, asimismo influye en procesos oxidación y remoción de sólidos, no obstante, estos mecanismos de filtración provienen de técnicas de recirculación (SRA). Existen diferentes métodos de filtración mecánica donde se incluyen tanques de sedimentación, clarificador, filtro de arena y filtros deflectores, sin embargo, para unidades acuapónicas a pequeña escala específicamente en técnicas NFT y DWC se recomienda implementar tanques clarificadores(sedimentadores) y filtros mecánicos (FAO, 2014).

2.1.5.3 Filtración por Gravedad. Es un mecanismo de filtración que implementa la fuerza de gravedad para separar y extraer solidos de una solución, se han desarrollado diferentes técnicas de separación gravitacional una de las implementadas es la técnica de sedimentación (Merino , et al., 2007).

Según (FAO, 2014) un clarificador o sedimentador es un recipiente que permite mantener un flujo entrada débil de agua para que las partículas se puedan sedimentar en el fondo y puedan ser removidas, sin embargo este mecanismo de filtrado requiere que este acoplado con otros filtros para remover partículas más finas.

2.1.5.4 Filtración Mecánica. Esta técnica de filtración permite separar todos los sólidos particulados en suspensión de diferentes tamaños que van desde micras(μm) a centímetros(Cm), principalmente compuestos de materia fecal o restos de alimentos que son menos densos que el agua lo que impide que se precipiten (Candarle, 2011).

Existen gran variedad de filtros mecánicos que implementan alto nivel tecnológico, son de alto costo y requiere de conocimiento para su operación, los filtros se clasifican de acuerdo a la eficiencia en el filtrado de partículas finas. Como ejemplo filtros que implementan cribas fijas o filtros de tambor con cribas rotatoria, estos filtros pueden retener partículas mayores a 1.5mm de diámetro (Merino,et al., 2007).Sin embargo, para modelos acuapónicos a pequeña escala

existen métodos más simples y económicos para atrapar sólidos dentro de un filtro biológico, este método de filtración mecánica consiste en insertar un recipiente cilíndrico perforado lleno con esponjas y grava dentro del biofiltro para que los sólidos puedan ser retenidos permitiendo el flujo de agua filtrada hacia el filtro biológico (FAO, 2014).

2.1.5.5 Filtración biológica. La biofiltración es el componente más importante de los sistemas acuapónicos, debido a que es el encargado de mantener las condiciones ideales de calidad de agua y eliminar compuestos tóxicos perjudiciales para los peces. Su diseño debe ser bien dimensionado específicamente en el área superficial de contacto, dado que permite alojar colonias de bacterias nitrificantes encargadas de mantener los procesos de oxidación de los desechos, sin embargo, la importancia del ciclado o maduración del filtro, se describe como un proceso de colonización de bacterias en el sistema, es un proceso lento desde su etapa inicial requiere un periodo de 3 a 5 semanas en condiciones normales, para mantener un biofiltro eficiente se debe tener en presente a mayor área de superficie, mayor será el área para albergar más colonias bacterianas y más rápido será el proceso de nitrificación. Existen gran variedad de materiales para implementar como sustrato de superficie en la biofiltración, puede estar compuesto por Biobolas, tapas de plástico, mallas de nailon, entre otras (FAO, 2014).

2.1.5.6 Bacterias nitrificantes. Son organismos aerobios que obtiene energía para su metabolismo a partir de la oxidación de compuestos nitrogenados reducidos en forma de amoníaco y nitrito, según (FAO, 2014) en sistemas acuapónicos existen específicamente grupos asociados al ciclo del nitrógeno donde incluye especies del género *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, estos organismos para poder oxidar o transformar el amoníaco en nitritos y nitratos se da a partir de la reparación celular, es decir usan el oxígeno molecular (O_2) como un oxidante para poder llevar a cabo la nitrificación (Castaño, et al., 2018).

Las bacterias nitrificantes estructuralmente tienen forma de bastón, su tamaño aproximadamente está entre 0.4 y 0.6 micras, son fotosensibles (sensibles a la luz), se reproducen por bipartición, las nitrosomonas se duplican en un periodo de 7 horas, mientras que las Nitrobacter requieren 13 horas debido a que su tasa de crecimiento es muy lenta. Los parámetros óptimos para su desarrollo en función a la temperatura del agua está en un rango de 25 a 30 °C por debajo de 18°C el crecimiento decrece hasta un 50%, el pH adecuado para su crecimiento y eficiencia para la nitrificación se da a partir 7.3 a 8.0 por otro lado el oxígeno disuelto es de gran importancia para su supervivencia debe ser mayores 2mg/l o ppm, por debajo la actividad bacteriana es ineficiente en proceso de nitrificación(Gedar, s.f.).

2.1.5.7 Descripción de las especies de cultivo en acuaponía. En la acuaponía se implementan especies de cultivo que toleran la alta densidad, debido a que se implementan sistemas de recirculación (SRA) cuya principal operación es mantener el agua limpia a través de procesos de limpieza y filtración, permitiendo mantener condiciones ideales para su crecimiento, se han registrado buenas tasas de crecimiento en Tilapia, Carpa, Salmon, trucha, Bacalao de murray y Lubina(FAO, 2014).

2.1.5.8 Descripción general de la Tilapia. Es una especie originaria de África y de oriente medio, pertenece a la familia de los Cíclidos por su gran capacidad de adaptación a diversos ambientes, sin embargo las especies más implementadas en la acuicultura, se clasifican según su género *Oreochromis*, principalmente se destacan la tilapia del Nilo(*O.niloticus*), la tilapia azul(*O. aureus*), la tilapia Mozambique(*O. mossambicus*) y algunas líneas parentales obtenidas a partir de la hibridación que originó la tilapia roja(*Oreochromis* sp), estas especies ofrecen ciertas ventajas, por ejemplos su gran habilidad para adaptarse a altas densidades, gran capacidad de desarrollo muscular con textura y coloración agradable en todas las presentaciones

con gran demanda en el mercado (Ácome, et al., 2019). Sin embargo, según (Baltazar, et al., 2015) en la actualidad la especie híbrida ha tenido mayor aceptación en el mercado con respecto a las otras especies debido a que presenta mejores características en la calidad de carne y su presentación es apetecible por su coloración.

Según (Castillo, 2002) en Colombia, el reporte de mayor producción de tilapia roja es en el departamento del Huila con un 70% de productividad, donde se implementan métodos de cultivo intensivo en jaulas flotantes desarrollado el embalse de Betania, el 50% corresponde a otros departamentos como Tolima, Valle del Cauca y Santander, asimismo la mayor producción proviene de sistemas intensivos que están representados con el 66% y el 43% proviene de sistemas de mediana a pequeña escala.

La Tilapia es una especie que se adapta bien a hábitos alimenticios basados en dietas balanceadas de alto contenido proteico y energético, dado que son requeridas para la formación de tejido muscular, formación de sustancias biológicas (anticuerpos). Los requerimientos proteicos para un óptimo desarrollo dependen de diferentes factores físicos o químicos del agua y está determinada por el porcentaje de proteína para cada una de las etapas productivas, en la etapa larval los requerimientos son de 40-45%, alevines entre 35-40%, juveniles entre un 30-35% y para la etapa de finalización (adulto) el rango es de 28 a 30% de proteína. Los tiempos de cosecha son variables debido a que las tilapias consumen menos alimento en ambientes fríos o las condiciones del agua y los periodos de cosechas suelen ser de 5 a 6 meses para obtener pesos comerciales entre 250-600 gramos (Ctaqua, 2017).

Según (Somerville et al., 2019) la tasa de alimentación se determina a partir de la tasa de crecimiento promedio y la biomasa total. Las diferentes especies cultivadas en sistemas acuapónicos las tasas de alimentación frecuentemente son entre el 1-2% de su peso vivo al día,

no se recomienda sobrealimentar debido a que se pueden alterar los parámetros hídricos generando un desequilibrio en el sistema.

Para sistemas acuapónicos se maneja una relación a partir de los requerimientos nutricionales de las plantas, densidad y la alimentación de los peces, es decir cuando hay mayor número de peces el alimento transformado en nutrientes va ser mayor, por otro lado, cuando hay menor número de peces la concentración de nutrientes no es suficiente para un óptimo desarrollo para las plantas. Sin embargo para mantener adecuadamente equilibrado un sistema acuapónico se debe tener la siguiente relación para 1 m² de cultivo de hoja verde (lechuga, acelga, espinaca, entre otras) requiere un suministro de 40-50 gr /día de alimento para los peces, asimismo para 1 m² de cultivo de fruto (tomate, pepino, fresa, entre otros) requiere un suministro de 50 -80 gr/día de alimento para peces (INTAGRI, 2017).

2.1.5.9 Descripción general del cultivo de lechuga.

Según (Saavedra et al., 2017) la lechuga se clasifica de acuerdo a su taxonomía: Familia: *Asteraceae*, Sub-familia: *Cichorioideae*, Tribu: *Lactuceae*, Nombre científico: *Lactuca Sativa*, Nombre común: Lechuga.

La hidroponía es una tecnología que al ser usada permite cultivar plantas sin suelo, cuyo desarrollo se debe al suministro adecuado de los requerimientos nutricionales a través del agua que contiene nutrientes. Esta técnica de cultivo es posible obtener hortalizas de buena calidad y con estándares sanitarios permitiendo un uso eficiente del recurso hídrico.

Según (Saavedra et al., 2017) Los cultivos de hortalizas como la lechuga es uno de los más importantes considerado como cultivo de ciclo corto de 45 a 50 días en invernadero a temperaturas entre 14 y 25 °C, así mismo su raíz nunca llega a sobrepasar los 25 cm de longitud es corta con ramificaciones, por otro lado las hojas son desplegadas en forma de roseta lo que

diferencia entre especies es su borde que pueden ser lisos, ondulados de manera cerrada, a su vez los requerimientos agroclimáticos como la temperatura óptima para que se lleve a cabo la germinación oscila entre 18 a 20 °C de igual forma en la fase de crecimiento requiere temperaturas en el día entre 14-18 °C y 5 – 8°C por la noche, sin embargo la lechuga requiere que haya diferencias de temperatura entre el transcurso del día y la noche es claro mencionar que este cultivo tolera temperaturas altas y no bajas.

Según (BASTERRECHEA, 2015) Las plantas en algún momento pueden agotar el oxígeno disuelto en la película de la solución por esta causa es importante el suministro continuo de aire a la solución implementando métodos de aireación como blower que ayuden a incorporar oxígeno a toda la columna de agua utilizada, de manera que los primeros trabajos implementados en sistemas NFT no tenían en cuenta el control de los factores medioambientales, ya que no tenían el control de temperatura y humedad presentándose variabilidad.

Según (Ávila, 2015) Las etapas fenológicas de la lechuga son: germinación, plántula, estado vegetativo, maduración- floración. Es decir en la fase germinativa la semilla de la lechuga tarda de 5- 7 días ,así mismo la fase de plántula es de mayor cuidado ya que empieza a desarrollarse el sistema radicular donde emergen las primeras hojas (cotiledones) en esta fase tiene una duración de 1 a 2 semanas, a su vez el estado vegetativo se desarrolla de 3- 4 semanas donde emergen las primeras hojas verdaderas por otro lado las raíces se expanden por completo creciendo profundamente ya que dura alrededor de 30 a 45 días, siendo así la fase de maduración es conocida como fase roseta ,es decir, cuando crece el tallo central y emergen nuevas hojas en forma de roseta alrededor de 12-14 hojas estas se desarrollan alrededor del tallo siendo que este proceso tiene una duración alrededor de 30 días.

2.1.6 Parámetros hídricos en sistemas acuapónicos según la especie de cultivo.

Los parámetros hídricos para diferentes especies de interés comercial son de gran importancia para mantener condiciones óptimas para su desarrollo, generalmente los peces comerciales toleran pH de 6.5 a 8.5, las concentraciones ideales de oxígeno disuelto (OD) suelen ser de 4-5 mg/l o superiores, por otro lado los compuestos nitrogenados específicamente el amoníaco y el nitrito en altas concentraciones son tóxicos para los peces, debido a que los niveles de amoníaco y nitrito superiores a 1 mg/l desencadenan efectos adversos que contribuyen al estrés, lesiones en el tejido branquial, cambios en el comportamiento, entre otras, además estos efectos pueden ser causados cuando no se hace una completa nitrificación. Las especies que se implementan en los sistemas acuapónicos requieren de condiciones y parámetros específicos, se deben realizar mediciones periódicas para garantizar los niveles ideales de amoníaco, nitrito, nitrato, oxígeno, entre otros, como se ilustra en tabla.1 (Somerville et al., 2019).

Tabla 1.

Parámetros de calidad del agua, requerimientos en alimentación prevista para siete especies acuáticas de interés comercial utilizadas comúnmente en acuaponía.

Especies	Temperatura (°C)		Nitrógeno amoniacal total (mg/litro)	Nitrito (mg/litro)	Nitrato (mg/litro)	Oxígeno disuelto (mg/litro)	Proteína cruda en alimento (%)
	Vital	Óptimo					
Carpa común <i>Cyprinus carpio</i>	4–34	25–30	< 1	< 1	< 400	> 4	30–38
Tilapia del Nilo <i>Oreochromis niloticus</i>	14–36	27–30	< 2	< 1	< 400	> 4	28–32
Bagre <i>Ictalurus punctatus</i>	5–34	24–30	< 1	< 1	< 400	> 3	25–36
Trucha arco iris <i>Oncorhynchus mykiss</i>	10–18	14–16	< 0.5	< 0.3	< 400	> 6	42
Liza <i>Mugil cephalus</i>	8–32	20–27	< 1	< 1	< 400	> 4	30–34
Langostino de río <i>Macrobrachium rosenbergii</i>	17–34	26–32	< 0.5	< 2	< 400	> 3	35

Perca gigante	18–34	26–29	< 1	< 1	< 400	> 4	38–45
<i>Lates calcarifer</i>							

Nota: La tabla muestra los parámetros hídricos ideales según la especie de cultivo en acuaponía. Tomado de(FAO, 2014).

2.1.7 Ciclo del nitrógeno y proceso de nitrificación.

Es un proceso biológico que ocurre en ecosistemas terrestres y acuáticos, el nitrógeno es una molécula que representa ese nutriente fundamental para la vida de los seres vivos, ya que está presente en todos los componentes para el desarrollo de las funciones vitales como los aminoácidos, proteínas, enzimas, entre otros, además es uno de los componentes más abundantes en la atmósfera ya que el 78% del aire está compuesto por nitrógeno en su forma molecular gaseosa más estable (N₂), sin embargo esta forma lo hace que no sea asimilable para las plantas y animales (Perdomo, 2016).

Las bacterias juegan un papel importante y son indispensables para el ciclo del nitrógeno debido intervienen en el proceso de fijación del nitrógeno, existen diferentes formas de fijación ya sea de tipo abiótico o biológico, en el tipo abiótico se presenta por eventos naturales (relámpagos, incendios forestales y flujos de lava) o por actividades antropogénicas (quema de combustible fósil, procesos industriales, cultivo de legumbres). Por otro lado fijación biológica se presenta por la acción de microorganismos principalmente por cianobacterias que se encuentran en el suelo o ambientes acuáticos, estos organismos son los únicos que pueden capturar y aprovechar el nitrógeno debido a que usan una enzima denominada nitrogenasa para poder llevar a cabo procesos de oxidación o descomposición de la materia orgánica(Herrera, et al., 2015).

El ciclo del nitrógeno en ecosistemas terrestre y acuáticos intervine procesos físicos, químicos y biológicos, estos se diferencian debido a que actúan bacterias específicas para cada

ecosistema, los procesos de transformación del nitrógeno que ocurren en un ecosistema natural para estar equilibrado son esencialmente cinco: amonificación, asimilación, fijación, mineralización, nitrificación, desnitrificación (Arthur Harrison, 2003).

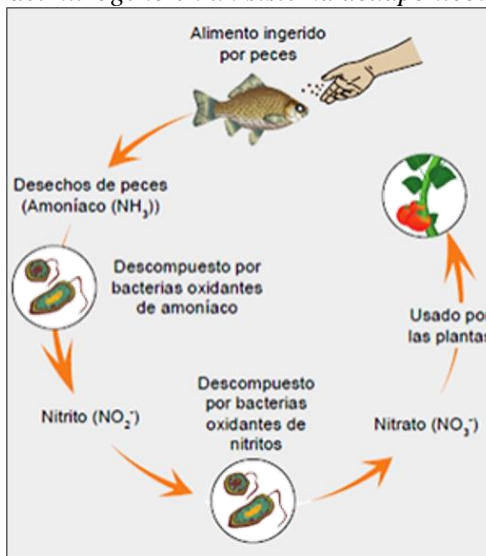
En sistemas acuapónicos de igual manera el ciclo del nitrógeno se presenta específicamente en procesos de nitrificación y mineralización, estos procesos son llevados a cabo por colonias estables de bacterias nitrificantes y otro grupo de bacterias heterótrofas encargadas de crear un ambiente sinérgico o antagónico entre peces y plantas, como se ilustra en la (figura.3). Inicialmente las bacterias nitrificantes son las encargadas de transformar el amoniaco (NH_3) en nitrito (NH_2), según su género como por ejemplo *Nitrosomonas* spp, *Nitrosococcus* spp, y *Nitrospira* spp, asimismo las bacterias encargadas de terminar el proceso de nitrificación y transformar los nitritos (NH_2) en nitratos (NO_3), como por ejemplo *Nitrospina* spp, *Nitrospira* spp, *Nitrobacter* spp y *Nitrococcus* spp, del mismo modo las bacterias heterotróficas han sido poco estudiadas, generalmente son colonias de bacterias que mineralizan el exceso de materia orgánica. a través de estos mecanismos de nitrificación y mineralización proporciona nutrientes biodisponibles de fácil absorción para las plantas (García Rivas, et al., 2021). Sin embargo la nitrificación es un proceso aeróbico donde interactúan diferentes grupos de colonias bacterianas nitrificantes como se observa en la tabla 2, el proceso de bioquímico de transformación del amoniaco a nitrito y nitrato suele ser en diferentes periodos parciales, debido a que las bacterias presentan diferente tasa de crecimiento (FAO, 2014).

Tabla 2.*Ecuaciones químicas de la nitrificación.*

Ecuación	Bacteria involucrada
$NH_4^+ + 1.5 O_2 \rightarrow NO_2^- + 2 H^+ + H_2O + \text{energía}$	<i>Nitrosomonas, Nitrospira, Nitrosovibrio sp., etc.)</i>
$NO_2^- + 0.5 O_2 \rightarrow NO_3^- + \text{energía}$	<i>Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, etc.)</i>
$NH_4^+ + 2.0 O_2 \rightarrow NO_3^- + 2 H^+ + H_2O + \text{energía}$	Nitrificantes

Nota: La nitrificación suele ser un proceso de dos pasos, realizado por un grupo especializado de bacterias nitrificantes datos tomados de (Junge et al., 2020).

Desacuerdo con Timmons (como se cito en Wongkiew, 2017) la principal fuente de nitrógeno es el alimento suministrado a los peces que ingresa a un sistemas acuapónico, para luego ser ingerido, metabolizado y excretado en forma de nitrógeno amoniacal. Sin embargo, según (FAO, 2014) los peces metabolizan entre un 30- 40% del alimento suministrado, es decir el 60- 70% es excretado en amoniaco y otros desechos orgánicos como proteínas, carbohidratos, minerales y vitaminas (figura.3).

Figura 3.*Ciclo del nitrógeno en un sistema acuapónico.*

Nota: descripción grafica de del ciclo del nitrógeno en acuaponía. Tomada de: Small-scale aquaponic food production, por ((FAO, 2014) .

2.1.8 Clasificación de métodos siembra en sistemas acuapónicos.

La acuaponía ha desarrollado diferentes métodos acuícolas recirculantes donde integra técnicas hidropónicas, principalmente se describen tres modelos para el crecimiento de las plantas como la técnica de película nutritiva (NFT), técnica cama flotante (DWC) y técnica cama de sustrato (Ramírez, et al., 2008).

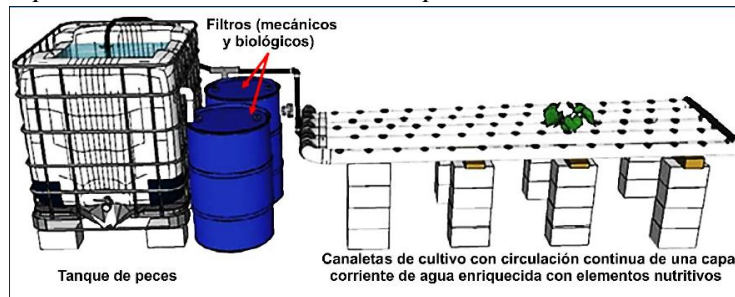
La técnica NFT por sus siglas (*Nutrient Film Technique*), es una de las más implementadas en sistemas acuapónicos e hidropónicos, para esta técnica emplean tubos de PVC perforados en la parte superior como base para cada planta, además permite que fluya por medio de un bombeo continuo en una fina película enriquecida de nutrientes hacia el sistema radicular de la planta permitiendo un constante flujo de nutrientes y oxígeno (Formo, 2012).

Para esta técnica se emplea cultivos de plantas de hoja verde como por ejemplo lechuga, acelga, col rizada, repollo y plantas aromáticas como cilantro, menta, albahaca, perejil, yerbabuena, entre otras. Este tipo plantas son ideales para esta técnica porque presentan un sistema radicular delgado y menos denso que evita la obstrucción de los canales donde recircula los nutrientes para las plantas (Junge et al., 2020).

Sin embargo según (TECA & FAO, 2015) esta técnica requiere filtros mecánicos y biológicos para que se pueda llevar a cabo procesos de oxidación y eliminación de materia o residuos tóxicos como amoníaco y sólidos en suspensión (figura.4).

Figura 4.

Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo NFT.

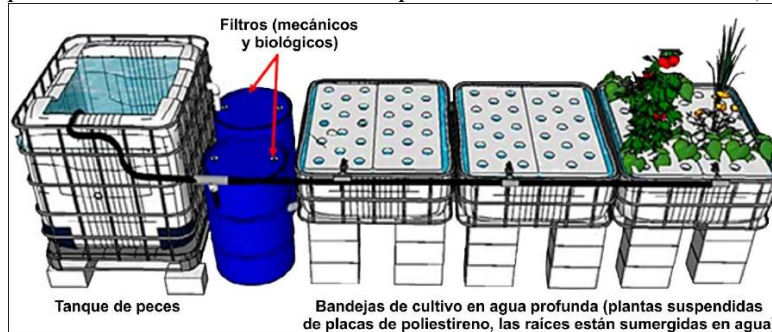


*Nota: descripción grafica de un sistema acuapónico método de cultivo solución nutritiva.
Tomado de: Technologies and Practices for Small Agricultura Producers, por(TECA&FAO, 2015).*

La técnica (DWC) por sus siglas (*Deep Water Culture*), es un método de cultivo también conocido como técnica de raíz flotante que consiste en que las plantas están suspendidas en una placa de poliestireno expandido con agujeros como soporte para que las plantas puedan mantener la flotabilidad con sus raíces sumergidas en una solución nutritiva (Flores Aguilar, et al., 2021). Según (TECA & FAO, 2015) el agua rica en nutrientes es conducida por gravedad a través de canales y camas con una profundidad de 20 cm, este método implementa métodos de bombeo automatizados y es uno de los modelos acuapónicos comerciales más implementados por su facilidad de instalación para cultivos de hortalizas, como se ilustra(figura.5).

Figura 5.

Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo (DWC).

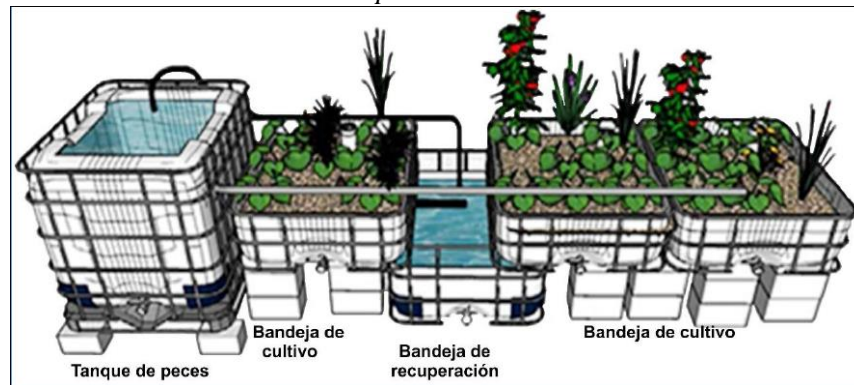


*Nota: descripción grafica de un sistema acuapónico con método de cultivo balsa flotante o camas flotantes.
Tomado de: Technologies and Practices for Small Agricultural Producers, por(TECA & FAO, 2015).*

La técnica de cama de sustrato es un método de cultivo que se implementan sustratos inertes como grava, perlita, vermiculita, arcilla expandida, entre otros (figura.6). Estos sustratos proporcionan múltiples funciones en los sistemas acuapónicos, uno de los más importantes es que permite albergar colonias de bacterias nitrificantes por su gran superficie de contacto, sirve como medio de soporte para las plantas e interviene en la retención de partículas sólidas facilitando mecanismo de filtración biológica y mecánica(Candarle, s.f.).

Figura 6.

Representación de una unidad acuapónica con método de cultivo de sustrato.



Nota: descripción grafica de un sistema acuapónico con cama de sustrato.

Tomado de: Technologies and Practices for Small Agricultural Producers, por(FI & FAO, 2015).

2.2 Marco Histórico

Principalmente la idea de usar excrementos de origen animal para fertilizar las plantas existe de hace tiempos atrás por las primeras civilizaciones de Asia y china. Unas de las primeras civilizaciones que implemento un modelo de acuaponía fueron los aztecas ellos construían islas de manera artificial conocidas como islas estacionarias o “chinampas” pantanos poco profundos, donde plantaban maíz entre otros cultivos. Los canales perimetrales que rodeaban las islas eran navegables y fueron usados para la crianza de especies acuáticas, de la misma forma los

desechos generados por estas especies eran retornados para fertilizar las plantas según (Goddek et al., 2015)

Según (Hernández, 2017) la acuaponía se viene implementando desde la antigua china debido a que los agricultores tenían el conocimiento tácito dado que los residuos generados a su vez podían ser aprovechados para los distintos cultivos, con el fin de aumentar la producción de hortalizas y plantaciones en frutales. Ahora bien, desde otro punto de vista Vietnam a finales de los años 60 se acostumbraba a cultivar arroz en áreas inundadas, siendo así toma fuerza la integración de la piscicultura a pequeña escala, así mismo este tipo de sistema se fue extendiendo a muchas regiones de Asia con el objetivo de incrementar la despensa de alimentos y estabilizar la seguridad alimentaria de los campesinos pobres que no tenían la manera de generar ingresos económicos.

Según (Bill McGraw, 2021) los primeros trabajos y publicaciones sobre acuaponía se vienen implementando desde los años 70 donde se demostró que los desechos generados a partir los peces a través del metabolismo se podrían usar como nutrientes para las plantas. Así mismo, cabe destacar que su uso corresponde a la década de los 80, además a su vez sigue siendo un nuevo método de producción que busca integrar la piscicultura e hidroponía.

Según (Hernández, 2017) Rackocy se consideró un investigador importante, ya que su investigación fue precursora para el desarrollo de la acuaponía ,se basó en establecer un cultivo de plantas y peces en un mismo sistema llamado sistema (UVI) de manera que tuvo gran relevancia por su productividad, dado que se sembraron alrededor de 154 peces /m³, asimismo la biomasa que llego a producir este sistema fue de 70.7 kg/m³ con peso de cosecha para tilapia roja fue 512,5g, con respecto a la tasa de supervivencia fue de 89,9% , una tasa de conversión de 1,8 y la producción proyectada fue de 4,78 toneladas de tilapia roja.

Por otro lado en los años 80 se inician con los primeros experimentos de ser así, se registran las primeras publicaciones acerca de los sistemas acuapónicos, en esa época surge la necesidad de establecer estrategias sustentables para la obtención de alimentos, de igual manera se viene impulsando en diferentes partes del mundo, cabe mencionar que se desarrolló según las necesidades o expectativas de los actores involucrados (micro- macro empresas, entes gubernamentales, asociaciones, educación e investigación) por esta razón ya con la información datada fueron implementándose estos métodos y técnicas que a través de las experiencias fueron publicados los resultados obtenidos con referencia para la implementación de estos modelos en el mundo según (Bill McGraw, 2021).

En Colombia se vienen desarrollando investigaciones en acuaponía a pequeña escala a su vez de método de cultivo intensivo y controlado, cabe destacar que algunas instituciones de formación como la Universidad Militar nueva granada, la Universidad Sur Colombia, Universidad Nacional de Colombia y la Universidad del Quindío son instituciones que se destacan en el desarrollo de trabajos en este ámbito de investigación, sin embargo en nuestro país la acuaponía a escala comercial no se ha podido establecer debido a los altos costos de inversión inicial en infraestructura y tecnología (Ramirez B, 2009).

En la actualidad se llevó a cabo un experimento en el corregimiento de santana verónica municipio de juan de acosta en el atlántico costa norte de Colombia, donde realizado un sistema acuapónico a pequeña escala donde se empleó tilapia roja (*Oreochromis spp*) bajo condiciones intensivas, cuya densidad fue de 305 en un tanque $2m^3$, el desempeño productivo se obtiene una biomasa total de 42,1 Kg/m³ con un peso promedio de 302g con un FCA de 1,48, supervivencia de 92,8% en un periodo de 150 días y un rendimiento 8,5 kg/m² en cada mes, con referente a

los índices productivos representa como uno de los sistemas que evidencia una mayor productividad reportada a nivel nacional (Martínez, 2019).

2.3 Marco conceptual.

Conductividad eléctrica: Es una medida que determina la concentración de iones o sales disueltas en el agua (Baixauli, et al., 2002).

Oxígeno disuelto (OD): Esta asociado como uno de los factores de toda la vida acuática, se define como la cantidad de oxígeno gaseoso (O₂) disuelto en el agua, esta medida se puede implementar como indicador del grado de contaminación o tasa de degradación de un recurso hídrico (DANE, 2017).

Solución nutritiva: Se entiende como una disolución de nutrientes minerales disueltos de forma inorgánica u orgánica procedente de los microelementos en forma de quelato (Baixauli, et al., 2002).

Sistemas de Recirculación (RAS): Sistema cerrado de flujo continuo que implementan componentes para procesos de filtrado del agua para la reutilización, además permite mantener el monitoreo y control de los parámetros físico-químicos para mantener producciones continuas (Sáenz, 2012).

Ph: Es una medida que determina el nivel de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa, se mide por la concentración de iones de hidrogeno presentes en una solución (Contreras, et al., 2016).

Eutrofización: Es un proceso de deterioro de la calidad del agua generado por el enriquecimiento de nutrientes como nitrógeno y fosforo a través de cambios biológicos, físicos y químicos. esto radica por el aumento descontrolado de fitoplancton, la actividad microbiana, la baja concentración oxígeno y acompañada por un olor maloliente debido a alta concentración de

bacterias anaerobias que general CH_4 y H_2S como producto de la descomposición de la materia orgánica (Abella, et al., 2012).

Aireación: Es un mecanismo que permite transferir oxígeno atmosférico al agua, esta dado por la relación del área de interfase aire-agua en el eje vertical y horizontal, su principal función es mantener una mayor solubilidad de oxígeno en una solución a través de medios mecánicos como difusores, turbinas, paletas, etc (Merino, 2007)

Estrés: Es una respuesta fisiológica causado por factores físicos o químicos estresantes que desencadena la pérdida de valor adaptativa frente a una amenaza o cambios fisiológicos (Goddek et al., 2019).

3 Metodología

3.1 Ubicación

El proyecto se llevó a cabo en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga, ubicada en el sur oriente del departamento de Santander, localizada a $6^{\circ}41'58''\text{N}$ $72^{\circ}43'58''\text{O}$, cuenta con temperatura media de 19°C y una altitud de 2235m.s.n.m. El proyecto se desarrolló en las instalaciones de la universidad.

3.2 Construcción y Montaje del Sistema Acuapónico

Para el diseño y el montaje se realizó bajo un invernadero, se tomó como referencia los modelos a pequeña escala propuestos por la FAO, el método de cultivo que se implemento es la técnica NFT acoplada con la unidad acuapónica en el cual su funcionamiento está dado por un sistema de recirculación (RAS).

Para su operación está conformado por: 2tanques de 500L para albergar los peces, un clarificador(19L) acoplado a un filtro mecánico(19L),1 tanque de 500L para procesos de biofiltración, 4 termostatos calefactores automáticos para evitar cambios drásticos de

temperatura, para la unidad hidropónica se implementó 5 canales de PVC (3in) con perforaciones de diámetro de 5 cm y separado por 15cm, una bomba periférica de 0,5hp para el sistema de recirculación, un blower de 1,5hp para el sistema de aireación, asimismo se usó componentes de fontanería (uniones) y un marco de madera para soporte de los canales hidropónicos, como se ilustra (figura 7).

3.3 Filtración Mecánica

Se implementó un clarificador o decantador para la primera etapa de filtración, donde interviene la gravedad para la separación o extracción de sólidos más densos, fue construido con una caneca de 19 litros y un acople de conexión para el filtro mecánico. La segunda etapa de filtrado se implementó un filtro mecánico para retener partículas más finas, fue construido con una caneca de 19 litros perforada, los materiales filtrantes usados son: grava de diferentes calibres, guata y espuma filtrante. (apéndice C).

3.4 Filtro Biológico

El componente para la biofiltración fue integrado con el filtro mecánico, el cual fue construido con un tanque de 500L con dimensiones de 50 cm de alto por 0,80 m de diámetro y con un volumen de llenado de 300 litros, el área de superficie de contacto para albergar las bacterias nitrificantes se usaron tapas plásticas recicladas. Por otra parte, el tiempo para la maduración del filtro y del agua fue 45 días para eliminar las concentraciones cloro y favorecer la colonización de las bacterias (apéndice D).

3.5 Sistemas de Recirculación

Para la distribución y circulación del agua se implementó tubos de PVC (1in) y una bomba periférica de un 0,5hp de marca Pedrollo, su operación fue programada 1 hora de trabajo y una de descanso por un temporizador programable. Asimismo, para determinar el caudal parcial del sistema se utilizó una caneca de 12 litros y se calculó el tipo de llenado para la entrada y salida de cada tanque, se llevó a cabo con las siguientes ecuaciones.

$$Q_p = \frac{L}{T_d}$$

Donde:

Q_p = caudal parcial de entra y salida

L = volumen de llenado(L)

T_d = tiempo de llenado en minutos; hora

Para determinar el recambio diario según el tiempo de bombeo de recirculación se empleó la siguiente ecuación.

$$R_e = Q_p * T_d$$

Donde:

R_e = recambio en litros al día en cada tanque

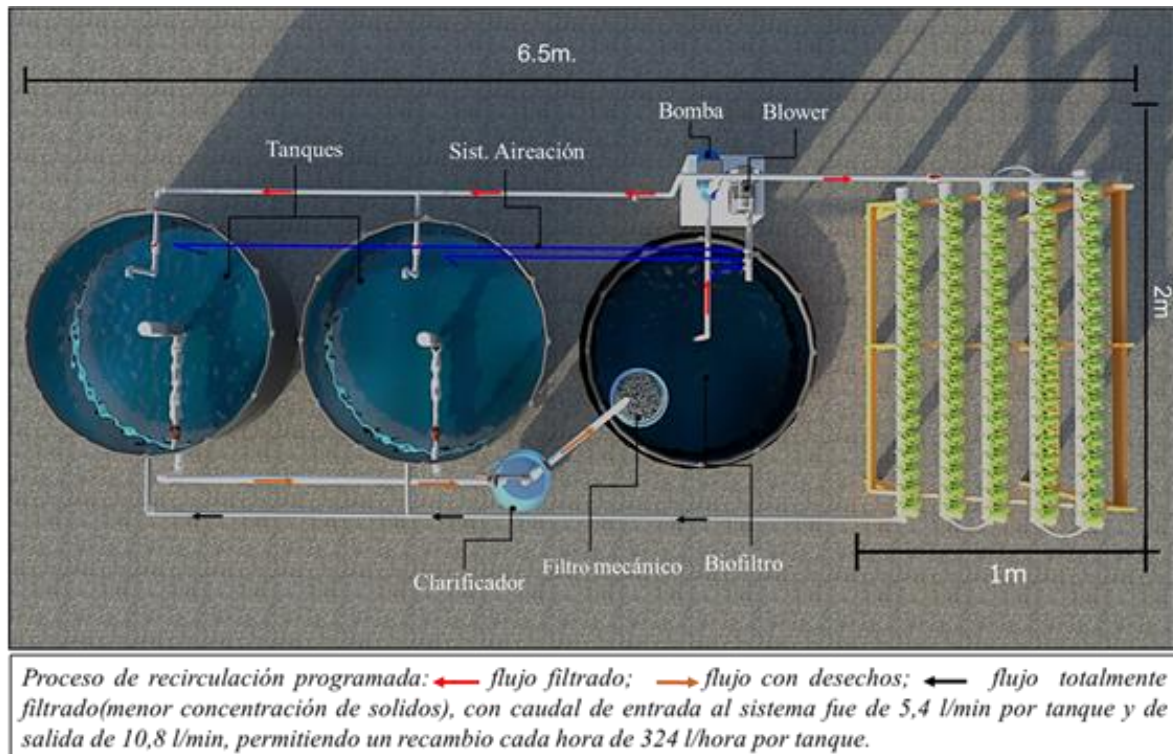
T_d = tiempo de trabajo diario de bombeo (horas)

Q_p = caudal parcial de entra y salida.

La dirección del flujo bombeado fue bidireccional hacia los canales hidropónicos y tanques del cultivo de los peces, la recirculación como se ilustra en la (figura 7). El efluente de los tanques pasa por la primera etapa para el tratamiento de filtrada llevada a cabo por el clarificador donde se separa los desechos y partículas más densas, luego el efluente es dirigido hacia el filtro mecánico para filtrar las partículas que no fueron sedimentadas. Finalmente, para completar la recirculación el efluente es conducido hacia el filtro biológico para el tratamiento biológico de nitrificación para luego ser bombeada como solución nutritiva hacia la unidad acuapónica y los tanques de peces. En el sistema se reutilizo el agua y para su reposición se incorporó entre 12- 24 litros al día por pérdidas por evaporación.

Figura 7

Diseño acuapónico establecido a pequeña escala.



Nota: Ilustración del diseño, montaje y funcionamiento de un sistema acuapónico acoplado en un área de 13m².

3.6 Especie de Cultivo Piscícola

Los peces se obtuvieron de la piscícola murillo ubicada en el departamento de Santander en el municipio capitanejo de la provincia García Rovira, se adquirieron 100 juveniles de tilapia roja con una talla aproximada de 6-7cm y un peso promedio 5g. En la recepción de los animales principalmente antes de establecer los peces en el sistema se realizó el proceso de aclimatación para evitar estrés causados por cambios drásticos de Ph y temperatura, los cuales fueron previamente evaluados para luego hacer el proceso de siembra en dos grupos de 50 peces por cada tanque.

3.7 Alimentación

Los peces fueron alimentados 4 veces al día, con una frecuencia de suministro de dos raciones en la mañana y dos en la tarde con concentrado balaceado extrusado de la tienda comercial Itacol, se implantaron las siguientes características del alimento con 34% y 24% de proteína para las etapas de levante, preceda y engorde, la tasa de alimentación se determinó con las tablas recomendada por el fabricante.

Tabla 3.

Tabla de alimentación para las diferentes etapas productivas en tilapia.

Producto	Peso del pez (g)	Temperatura del agua °C.					
		20	22	24	26	28	30
		Ración (% de biomasa/día)					
Mojarra iniciacion45% (harina)	0.1-0.5	4	5	6	7	7.5	8
Mojarra iniciacion45% (extruido)	0.5-5	3	4	4.5	5	5.5	6
Mojarra prelevante 40%	5-10	2	3	3.5	4	4.5	5
	10-20	1.8	2.7	3.1	3.6	4	4.4
Mojarra levante 34%	20-50	1.6	2.2	2.7	3.0	3.4	4
	50-75	1.4	1.9	2.2	2.4	2.9	3.1
Mojarra 30%	75-110	1.3	1.6	1.9	2.0	2.3	3.0
	110-150	1.1	1.4	1.6	1.8	2.0	2.3
Mojarra 30%	150-200	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Mojarra 24%	200-250	0.85	1.15	1.35	1.55	1.7	1.9
	250-325	0.8	1.1	1.3	1.5	1.65	1.8
	325-400	0.75	1.05	1.25	1.45	1.6	1.7
	>400	0.7	1	1.2	1.4	1.5	1.6

Nota: Plan de alimentación para las diferentes etapas de producción en tilapia (*Oreochromis sp*) Fuente: Itacol.

3.8 Muestras Biométricos en Tilapia (*Oreochromis sp*).

Se tomaron muestreos de toda la biomasa de cada tanque de cultivo cada 15 días para la toma de registros de medidas biométricas de las siguientes variables: longitud total, longitud estándar, aho del cuerpo, ancho de cabeza, largo de cabeza y el peso. Para realizar la primera toma biométrica se implementó un pie de rey y para la segunda toma de registros se realizó un cambio del equipo de medición por una cinta métrica para evitar daños físicos o estrés, además se estableció un ayuno de 24 horas y para este proceso de registro se llevó a cabo en la mañana para evitar cambios drásticos de temperatura y reducir el estrés.

3.9 Índices Productos de la Biomasa Animal

3.9.1 Peso Inicial y Final

Durante el desarrollo de los muestreos biométricos se registró el peso inicial y final de cada uno de los peces para determinar el promedio y ajustar la tasa de alimentación.

3.9.2 Ganancia de Peso Diaria

Para este índice se determinó a partir de la diferencia entre peso final y inicial dividido en tipo de cosecha, se llevó a cabo con la siguiente ecuación.

$$G_d = \frac{W_f - W_i}{T_c}$$

Donde:

W_f = promedio peso final (g)

W_i = promedio peso inicial (g)

T_c = tiempo de cosecha (días)

3.9.3 Eficiencia Alimenticia

Para el índice que determina la eficiencia del alimento para convertir proteína de alta calidad. Se llevó a cabo con la siguiente ecuación.

$$E_a = \frac{B_f}{A_i} * 100$$

Donde:

B_f = biomasa final (kg)

A_i = total de alimento suministrado (kg)

3.9.4 Factor de Conversión Alimenticia (FCA)

Para el indicador expresado en relación con la ganancia de peso de un organismo y el peso de alimento suministrado, es decir la cantidad de alimento utilizado para producir un kilo de carne. Se determinó con la siguiente ecuación.

$$F_{ca.} = \frac{A_t}{B_t}$$

Donde:

A_t = alimento total suministrado

B_t = biomasa total (kg)

$F_{ca.}$ = factor de conversión alimenticia.

3.9.5 Mortalidad

Para determinar la tasa de mortalidad causada por diferentes factores relacionados con malas prácticas acuícolas, Se llevó a cabo con la siguiente ecuación.

$$M_{\%} = \frac{n_f}{n_t} * 100$$

Donde:

$M_{\%}$ = tasa de mortalidad

n_f = número de peces fallecidos

n_t = número de peces cultivados.

3.9.6 Factor de Condición Fulton (k)

Para determinar el índice que permite evaluar el grado de bienestar o condiciones que puedan perjudicar su desarrollo, está relacionado generalmente con el estado de salud, grado de desarrollo muscular, estado nutricional y reproductivo. según (Gonzalez, 2022) los valores K inferiores 1 , indica que los peces están presentado un grado de estrés por diferentes situaciones que son expuestos a ambientes estresantes, cuando K es igual o mayor que 1 indica que los peces están bajo condiciones favorables para su crecimiento. Se determina a partir de la siguiente ecuación(Cifuentes et al., 2012).

$$K = 100 * \frac{W}{L^3}$$

Donde:

W = peso corporal (g)

L^3 = longitud (cm)

K = factor de condición de Fulton

3.9.7 Producción de Biomasa Neta

Determina el total de kilos de carne producidos por una unidad de volumen, está dado por la siguiente ecuación.

$$P_{bn} = \frac{W_{bt} - W_{bi}}{V_t}$$

Donde:

P_{bn} = producción de biomasa neta (kg/m³)

W_{bt} = peso total biomasa final(kg)

W_{bi} = peso total de biomasa inicial(kg).

V_t = volumen de los tanques

3.10 Evaluación de Muestras Biométricos en Lechuga (*Lactuca Sativa*)

La siembra se llevó a cabo el día 65 para la primera y la segunda siembra el día 129, para el método de siembra se implementó un vaso plástico y espuma de poliestireno expandido como sustrato inerte para el soporte mecánico en todas las etapas de desarrollo en cada una de las plantas, la germinación se llevó de forma directa en la unidad hidropónica hasta la etapa de cosecha, así mismo el sistema de riego fue sincronizado con el sistema de recirculación RAS. Para el desarrollo de los muestreos biométricos en las plantas se realizaron aleatoriamente con 20 plantas durante 15 días para determinar el desarrollo a partir de los siguientes índices de desarrollo.

3.10.1 Índices de desarrollo

3.10.1.1 Altura máxima de las plantas. La altura máxima fue medida desde el inicio del tallo hasta la hoja más distante, con la ayuda del pie de rey en milímetros (mm) esta variable fue medida cada 3 días empezando desde que emerge la germinación y finalizando con el día de cosecha.

3.10.1.2 Numero de Hojas. Se contabilizaron todas las hojas que conformaban la plántula sin tener en cuenta su tamaño, esta se midió cada 15 días empezando desde que emerge la germinación y finalizando con el día de la cosecha.

3.10.1.3 Ancho y Largo de las Hojas. Se tomaron muestreos aleatorios de diferentes plantas, para realizar la medición del ancho y largo de las hojas se midió con la ayuda de un calibrador (pie de rey).

3.10.1.4 Largo de la raíz. En el sistema las raíces fueron envueltas con la espuma de poliestireno expandido dejándolas expuestas de modo que el agua filtrada la mantenga con una humedad constante así mismo la longitud de la raíz fue medida usando una cinta métrica.

3.10.1.5 Tasa de crecimiento (cm/día). Se determinó la tasa de crecimiento de las lechugas para cada cultivo dada por la siguiente ecuación:

$$TC = \frac{(X_F) - (X_0)}{t_f - t_0}$$

Donde:

TC = Tasa de crecimiento (cm/día).

X_F = Longitud final de la planta.

X_0 = Longitud inicial.

t_f =Tiempo final.

t_0 = Tiempo inicial.

3.10.1.6 Tasa específica de crecimiento (%/día). Se determinó la tasa de crecimiento específico de las lechugas para cada cultivo dadas por la siguiente ecuación:

$$TEC = \frac{(\ln(\text{Longitud final}) - \ln(\text{Longitud inicial}))}{\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial}}$$

Donde:

\ln = logaritmo natural.

TEC = Tasa específica de crecimiento.

X_F = Longitud Final

X_i = Longitud inicial

T_F = Tiempo final

T_i = Tiempo inicial

3.11 Composición Química de la Especie *Lactuca Sativa*

La composición química se obtuvo por medio del laboratorio de Análisis de tejido vegetal completo se midieron elementos mayores y menores, realizado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Para el análisis se envió una (1) muestra de un (1) kg de materia seca, estas fueron tomadas aleatoriamente entre las plantas producidas en un sistema acuapónico acoplado.

3.12 Determinación de Materia Seca del Cultivo de *Lactuca Sativa* Producido de Forma Acuapónica

3.12.1 Pesaje de Muestras (P_s)

Se tomó al azar del cultivo 1 y 2 cincuenta y cinco (55) muestras pesadas en una balanza de precisión electrónica SF-400.

3.12.2 Pesaje Final de las Muestras (P_F)

Se pesaron para obtener el valor de materia seca presente en la planta con ayuda de la balanza de precisión electrónica SF-400.

3.12.3 Calculo del Porcentaje de Materia Seca de las muestras de *Lactuca sativa* tomadas del cultivo 1 y 2

Se calculó aplicando la siguiente ecuación para cada muestra del cultivo 1 y 2.

$$\% MS = \frac{(\text{Peso fresco PLS} - \text{Peso seco}) \times 100}{\text{Peso fresco PLS}}$$

3.12.4 Rendimiento de biomasa kg/m²

Los rendimientos fueron obtenidos a partir de la toma total del peso final de la biomasa por la unidad del área hidropónica.

3.13 Evaluación de parámetros hídricos y ambientales

Para mantener las condiciones y los rangos óptimos de calidad del agua se evaluó el comportamiento diariamente de los siguientes parámetros:

- Oxígeno disuelto (OD): se implementó un oxímetro para evaluar la concentración de oxígeno expresado en (mg/l).
- PH: Se implementó un probador de pH digital que tiene la función ATC, para evaluar el comportamiento en los tanques de cultivo y biofiltro.
- Temperatura: para su evaluación se implementó un termómetro digital, se midió la temperatura en los tanques de cultivo y el biofiltro.
- Amoniac (NH₃⁺/NH₄), Nitrito (NO₂⁻), Nitrato (NO₃⁻): se evaluó las diferentes concentraciones de compuestos nitrogenados disueltos en los tanques de cultivo y el biofiltro, para determinar su comportamiento y grado de toxicidad en (ppm) se implementó un KIT colorimétrico Api Freshwater.
- Conductividad (CE): se midió la conductividad eléctrica por medio de un conductímetro Digital (TDS) medidor de calidad del agua, para evaluar las concentraciones de iones o solidos totales disueltos expresado en μS/cm.
- Humedad y temperatura ambiente: se midió a tiempo real los cambios por medio de un termohigrómetro digital con sensor de precisión de temperatura y humedad relativa.

3.13.1 Índices Económicos

Se evaluaron los indicadores económicos para determinar un estudio de los costos de producción de tilapia y lechuga a través las siguientes ecuaciones.

- La utilidad está determinada por la siguiente formula.

$$U = I_t - C_p$$

Donde I_t son los ingresos totales y C_p son los costos de producción del cultivo.

- La relación costo beneficio se determinada con la siguiente formula

$$C/B = \frac{I_t}{C_p}$$

Donde I_t son los ingresos totales y C_p son los costos de producción del cultivo.

- Los ingresos se calcularon con la siguiente formula

$$I_t = B_t * P_c$$

Donde B_t es la biomasa cultivada (peces y plantas) y P_c es el precio comercial.

- Los costos de producción son variables, dependen de los fijos y variables, se determinó con la siguiente formula.

$$C_p = C_f + C_v$$

Donde C_f son los costos fijos y C_v son los costos variables.

3.13.2 Análisis estadístico.

Los datos obtenidos de los muestreos biométricos y índices productivos de la biomasa animal y vegetal, se realizó un análisis descriptivo en cada variable expresadas en promedios, \pm desviación estándar y se efectuó un análisis exploratorio por medio de diagramas de dispersión. Para determinar el crecimiento, se relacionó la longitud total con el peso y fueron analizados en función talla-peso para determinar el factor de condición de Fulton (K).

El análisis estadístico entre las variables correlacionadas se implementó un modelo ajustado de regresión lineal simple para predecir el peso con base a la longitud, asimismo se determinó los intervalos de confianza con un nivel de significancia ($p < 0.05$). se estimaron los coeficientes correlación por método Spearman, coeficiente de determinación (R^2), (R^2) ajustado y los supuestos de regresión lineal como criterios para validar el modelo predictivo, por otro lado implementó la prueba de isometría a partir de la ecuación $t=(b-3)/Sb$ donde, t = valor t-student, b =pendiente, Sb =error estándar de la pendiente, para verificar el tipo de crecimiento con referente al tipo de crecimiento isométrico ($b=3$, $p<0.05$)(Sokal & Rohlf, 1996).El análisis estadístico se evaluó con ayuda del programa RStudio versión 4.1.2.

4. Resultados y discusión.

4.1 Operación Sistema de Recirculación

En la determinación de la recirculación expresada en el caudal de entrada al sistema fue de 5,4 L/min y de salida de 10,8 L/min, permitiendo un recambio cada hora de 324 l/hora por tanque, es decir un recambio del 64% con respecto al volumen total de cada tanque de cultivo en un periodo de 1 hora y diario 3,888 litros en 12 horas. Por lo cual el sistema de recirculación fue óptimo, debido a que los parámetros fueron estables, asimismo se logró controlar la proliferación de microalga y se evitó la acumulación de sólidos disueltos en los tanques de cultivo como se ilustra (apéndice E).

4.2 Análisis de los Índices Productivos en Tilapia y Lechuga

La biomasa inicial sembrada fue de 684g considerando una densidad de cultivo de 100 peces /m³, los índices estimados como indica (tabla 4.) durante la fase de crecimiento obtuvieron una ganancia de peso diaria de 1.41 g, una eficiencia alimenticia del 67,8% y un FCA de 1.47, si

bien los indicadores revelan que los peces obtuvieron una buena asimilación del alimento suministrado para convertirlo en biomasa, por otro lado el factor de condición de Fulton (K) fue de 1.64 evidenciado que los peces están bajo condiciones óptimas para su desarrollo, sin embargo no todos los individuos sembrados sobrevivieron a todas las etapas del estudio, debido a que en la primera etapa para el registro biométrico los peces fueron sometidos a un alto grado de estrés generado por todo el proceso de manejo y manipulación desencadenando una alta mortalidad, para realizar esta práctica debe implementar anestésicos para facilitar el manejo para evitar una situación de estrés y llegar causarles un daño físico previo a la toma de registros biométricos. Con respecto, al desempeño del sistema para la producción de tilapia fue de 9,52 kg/m³ considerado que el rendimiento no fue el esperado, dado que según (FAO, 2014) para sistemas a pequeña escala los rangos de producción están alrededor entre 10 a 20 kg/m³. Por otra parte el rendimiento promedio obtenido en la unidad hidropónica para los dos ciclos de cultivo de un periodo de 48 días fue de 8,67 Kg/m² de peso fresco y 7,03 % de peso seco.

Tabla 4.

Índices productos de tilapia y lechuga bajo un sistema acuapónico a pequeña escala.

Índices en Tilapia.	Valor estimado
Peso promedio inicial(g)	7.05 ±2.28
Peso promedio final (g)	288.33 ±114.5
Ganancia diaria de peso (g/día-')	1.41±0.26
Eficiencia Alimenticia %	67.80
F.C.A	1.47
Producción de biomasa neta(kg/m ³)	9.52
Mortalidad (%)	67
Factor condición (FultonK)	1.64±0.61
Índices en Lechuga	
Rendimiento neto de biomasa vegetal (Kg/m ²)	8.6
Materia seca (%)	7.03

Nota: Índices productivos estimados en un periodo 200 días de cultivo de tilapia (*Oreochromis sp*) y lechuga (*Lactuca sativa*)

4.3 Análisis de los Registros Biométricos

La toma de registros biométricos se realizó el día 14 considerado el periodo transcurrido de acondicionamiento para los organismos en el sistema, para el muestreo (M1) se evidencia una tasa de supervivencia del 97% en la etapa inicial, lo cual muestra una buena adaptación de los organismos en el sistema. Con referente al peso de la biomasa inicial 684g y la desviación es de $\pm 2.28g$ no es tan variada, dado que hay más organismos y están agrupados cerca a la media, asimismo se observa en las siguientes biometrías M2-M6 la desviación es muy variable de $\pm 10.78g$ hasta $\pm 114.51g$ con respecto al tiempo, esto se presenta debido a que hay menos registros a partir del muestreo (M2) y los organismos presentan pesos que no son homogéneos. Asimismo, en el día 200 (etapa final para la cosecha) se evidencia que 4 peces que representa (12.1%) de los 33 organismos totales no llegaron a obtener pesos comerciales, debido que están por debajo del rango de 200g como se muestra en el gráfico 8(A). En cuanto a las biometrías de longitud total y estándar como se muestra en el gráfico 8 (B,C), las tallas van aumentando con respecto a cada registro biométrico inicial y final obteniendo rangos de longitud total (Lg.T) que van desde 7.14 cm hasta 24.76cm con una desviación variable de 1.06 cm hasta 3.51 cm, longitud estándar (Lg.std) que van desde 5.72 hasta 20.58 con una desviación inicial de 0.98 cm y final de 3.00 cm. Por otro lado, la biometría del acho del cuerpo (A.cu), largo de cabeza (Lg.cab) y acho de cabeza (A.cab) son directamente proporcional al peso, es decir a mayor peso mayor serán las medidas biométricas observando una curva de crecimiento en relación talla y peso como se muestra en el gráfico 8 (D,E,F) y tabla 5.

Tabla 5.*Registros biométricos de tilapia (Oreochromis sp).*

Muestreos	N	Valor estimado.					
		Peso(g)	Lg.T(cm)	Lg.std(cm)	A.cu(cm)	Lg.cab(cm)	A.cab(cm)
M1	97	7.05±2.28	7.14±1.06	5.72±0.98	2.19±0.55	1.86±0.39	1.46±0.43
M2	33	26.64±10.78	11.17±2.48	9.32±2.09	3.96±1.13	2.73±0.63	3.10±0.85
M3	33	42.91±19.31	13.70±2.13	11.48±1.82	4.84±0.86	3.38±1.20	4.11±0.59
M4	33	53.76±27.55	14.56±3.07	12.02±2.57	5.44±1.23	4.41±0.75	4.49±0.83
M5	33	77.67±36.61	16.62±2.44	13.80±2.07	6.27±1.08	5.10±0.65	5.10±0.76
M6	33	102.27±46.07	17.97±2.96	15.08±2.20	6.58±1.11	5.26±0.65	5.24±0.74
M7	33	125.85±56.01	19.60±2.83	16.33±2.42	7.06±1.21	4.43±0.74	5.71±0.80
M8	33	163.45±67.83	20.89±2.88	17.37±2.47	7.61±1.26	5.76±0.68	6.08±0.88
M9	33	191.48±79.51	22.30±2.97	18.45±2.52	8.04±1.36	6.28±0.77	6.52±0.91
M10	33	232.03±93.78	23.49±3.26	19.47±2.79	8.54±1.52	6.55±0.80	6.74±0.92
M11	33	246.33±99.93	23.98±3.35	20.05±2.82	8.56±1.49	6.71±0.69	6.81±0.91
M12	33	288.33±114.51	24.76±3.51	20.58±3.00	8.81±1.48	7.75±0.70	6.91±0.97

Lg.T: Longitud total

Lg.std: Longitud estándar

A.cu: Ancho del cuerpo

Lg.cab: Largo de cabeza

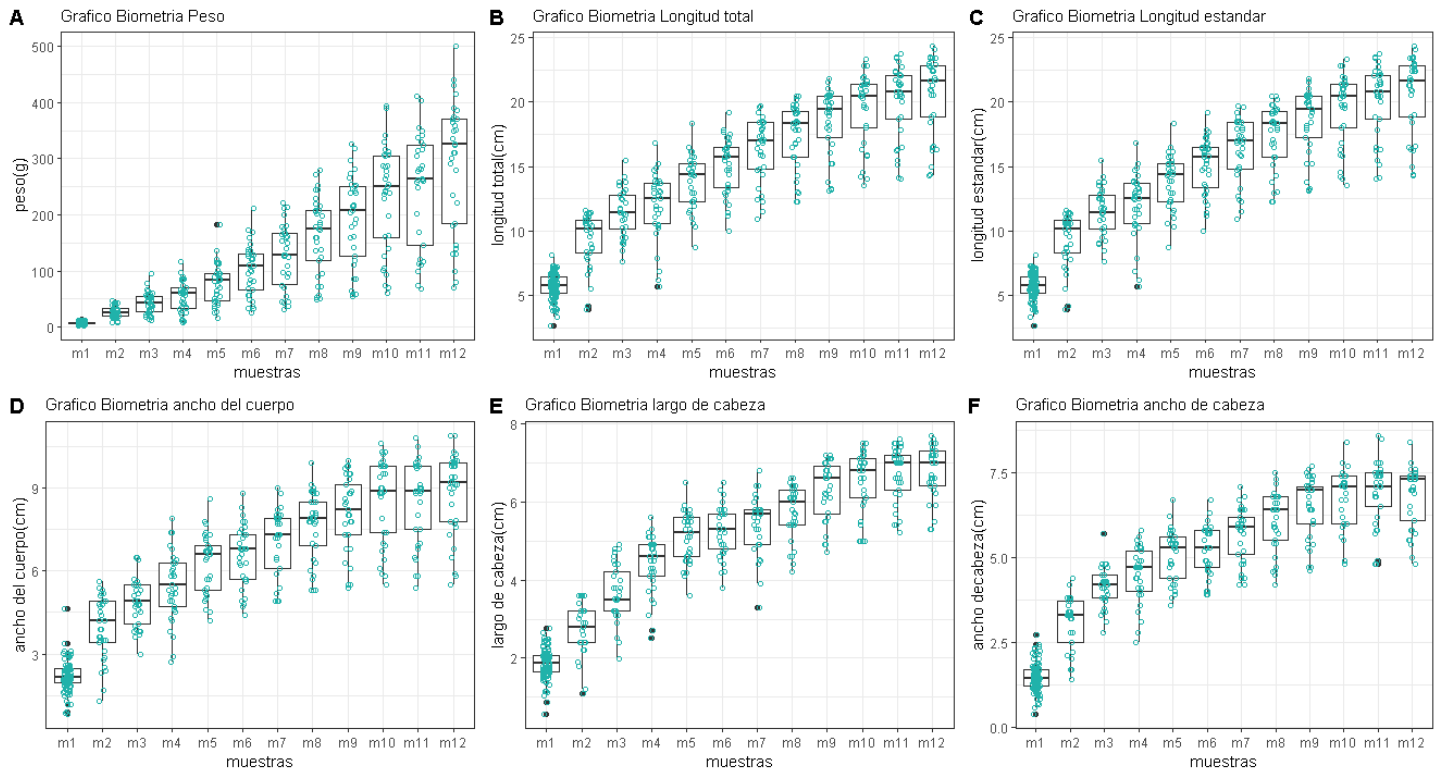
A.cab: Ancho de cabeza

Nota: Datos del crecimiento y el desempeño productivo. Valores mostrados como media ±SD.

El crecimiento de los peces como se ilustra en los diagramas de cajas permite evidenciar que cada muestreo realizado de las diferentes medidas biométricas los valores van en aumento, es decir se observa algunos valores atípicos y las medias con una clara tendencia de crecimiento con respecto al tiempo, de manera que cada registro determina la talla y proporciona cierta información de cómo varía las dimensiones anatómicas del cuerpo de cada organismo.

Figura 8.

Gráficos de los registros biométricos del crecimiento en tilapia tomados cada 15 días.



Nota: diagramas para el análisis descriptivo de las diferentes medidas biométricas evaluadas en un periodo de 200 días.

4.3.1 Análisis de Correlación entre las Variables Biométricas.

Considerando los datos obtenidos de las medidas biométricas el análisis de correlación indica relaciones positivas significativas entre las variables como se ilustra en (apéndice A), con respecto al estudio las variables de interés para el modelo ajustado en referencia al peso (Pt) y la longitud (Lt), indica que existe una relación fuerte no lineal positiva encontrando un coeficiente de correlación de $r=0.990$, con intervalos de confianza (Ic) de 0.987 y 0.992 con un nivel de confianza del 95%, con el análisis correspondiente permite definir un modelo ajustado.

4.3.2 Modelo de Regresión Ajustado.

La relación entre las variables longitud y peso se estima partir del peso correspondiente con una determinada longitud, igualmente estos factores biométricos se implementan para comparar la condición, gordura y bienestar, si bien gran parte de las especies piscícolas las variables longitud - peso se ajusta a una ecuación de tipo potencial (figura10).

$$y=b_0*x^{b^1}$$

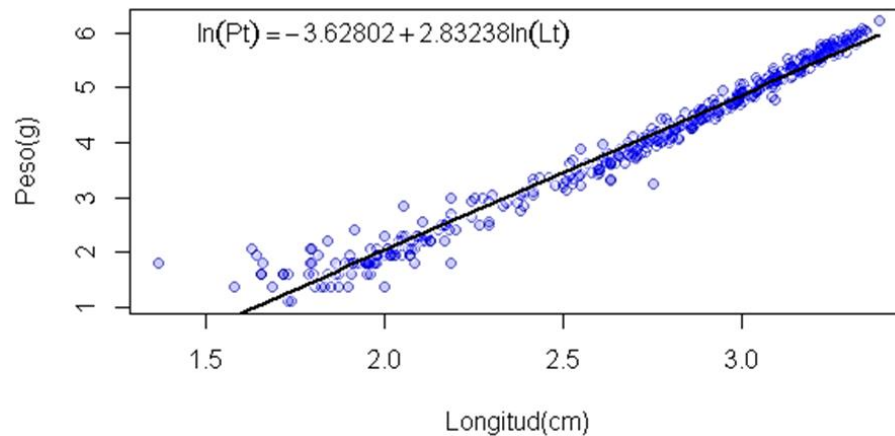
donde(y) es la variable dependiente expresada en el peso total (Pt), b_0 es el intercepto, x es la variable independiente expresada en la longitud total en cm y b^1 es la pendiente(Froese, 2006).para aplicar las técnicas de regresión lineal fue necesario transformar los datos para que se asemejen a un recta, de esta manera para ajustar la ecuación se implementó logaritmo neperiano en ambos lados de la igualdad , el ajuste está determinado por la siguiente ecuación.

$$\ln(y)= \ln(b_0*e^{b^1*x}) =\ln(b_0) +\ln(eb^1*x) =\ln(b_0) +b^1*x$$

Donde (y) es el peso total pez en gramos (Pt), b_0 es el intercepto, x es la variable independiente expresada en la longitud total en (cm) y b^1 es la pendiente. La ecuación ajustada para el modelo lineal describe la relación positiva entre peso total (Pt) y longitud total (Lt).El modelo se ajusta adecuadamente a los datos y se puede implementar para predecir el peso, dado que el análisis de regresión la varianza ajustada del peso (Pt) es explicada con ($r^2 =0.9718$) por la longitud total, la relación es directamente proporcional cuando la longitud aumenta al igual el peso, asimismo es estadísticamente significativa (F-statistic = $1.579e+04$, p-valor <0.001),la pendiente y en el intercepto con un (t – valor -58.67 y 125.67 , p-valor <0.001) son estadísticamente diferentes de cero. La ecuación de regresión ajustada $\ln(Pt)=-362802+2.8323*\ln(Lt)$ fue determinado a partir del modelo no ajustado a escala potencial $Pt=0.02656*Lt^{2.83238}$ como se muestra (figura9 y10) .

Figura 9.

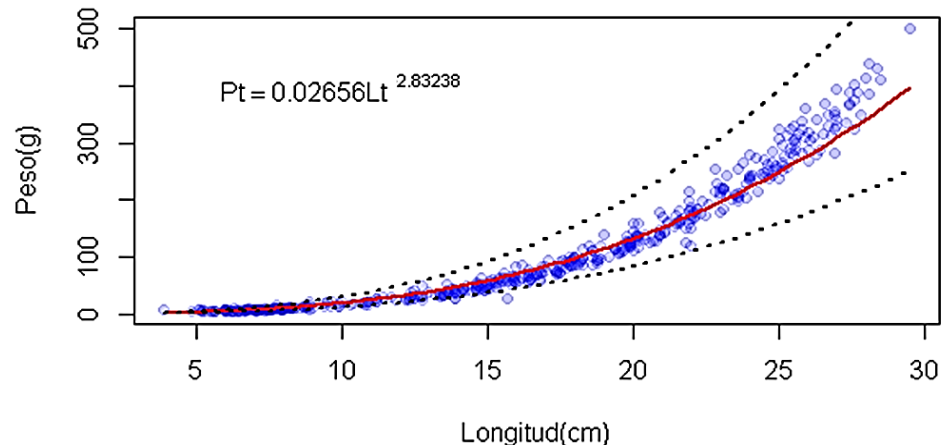
Gráfico de dispersión modelo ajustado a escala de logaritmo neperiano.



Nota. Relación ajustada entre la longitud total(Lt) y peso total en cultivo de tilapia (*Oreochromis sp*), $r^2 = 0.9718$.

Figura 10.

Gráfico de dispersión modelo no ajustado en función potencial.



Nota. Relación del modelo no ajustado entre la longitud total(Lt) y peso en cultivo de tilapia (*Oreochromis sp*), $r^2 = 0.9743$.

Para evaluar la predicción con mejor ajuste los valores de la variable respuesta peso total (Pt) se determinó a partir del modelo ajustado con las siguientes medidas 10,15,25 de longitud expresada en Lt (cm), como se presenta la (tabla6).

Tabla 6.*Estimación de los valores predictivos a partir del modelo ajustado.*

variable (Lt)	IP de 95%	IC de 95%	EE de ajuste	predictivo ajustado	Valor predictivo Pt(g)
2.30	(2,43071;3,34222)	(2,85879.2,91414)	0,0140850	2,88646	17,93
2.71	(3,59234;4,50315)	(4,02653;4,06896)	0,0107949	4,04774	57,27
3.22	(5,03627;5,94824)	(5,46100;5,52352)	0,0159075	5,49226	242,81

Nota: En la tabla se muestra la estimación predictiva en cultivo de tilapia (*Oreochromis sp*) entre los valores de 10,15,25 (cm) a partir de modelo ajustado con su error estándar (EE), intervalos de confianza (IC) y el intervalo de predicción (IP).

Para la prueba de isometría se obtuvo un ($t\text{-cal}=-7.436957 < t\text{-tab}=\pm 1.645$, $p\text{-valué}=5.118345e-13$, df 458), por lo cual se concluye que el tipo de crecimiento en tilapia (*Oreochromis sp*) se describe como un organismo que crece de manera desproporcional en sus dimensiones corporales, lo cual indica que el tipo de crecimiento es alométrico ($b^1 \neq 3$), ya que la pendiente se encuentra entre 2.788093 ; 2.876675 y el intercepto 3.749538; -3.506501 con un nivel confianza del 95%.

La evaluación de los supuesto de regresión la linealidad para el modelo ajustado se observa un patrón lineal entre la variable dependiente (Pt) con la variable independiente (Lt), asimismo para evaluar la distribución de los residuales estandarizados presentan una tendencia a estar distribuidos en forma línea evidenciado que los residuos tiene una distribución normal, sin embargo al realizar el Test de Shapiro-Wilk de normalidad se obtuvo $p\text{-valué} < 2.2e-16$, $\alpha=0.05$ por lo que se concluye que los residuos no presentan una distribución normal, por otro lado el supuesto homocedasticidad de la varianza de los residuos se observa que no presentan muchas variaciones, es decir son constante en el transcurso del tiempo como se muestra en (apéndice B).

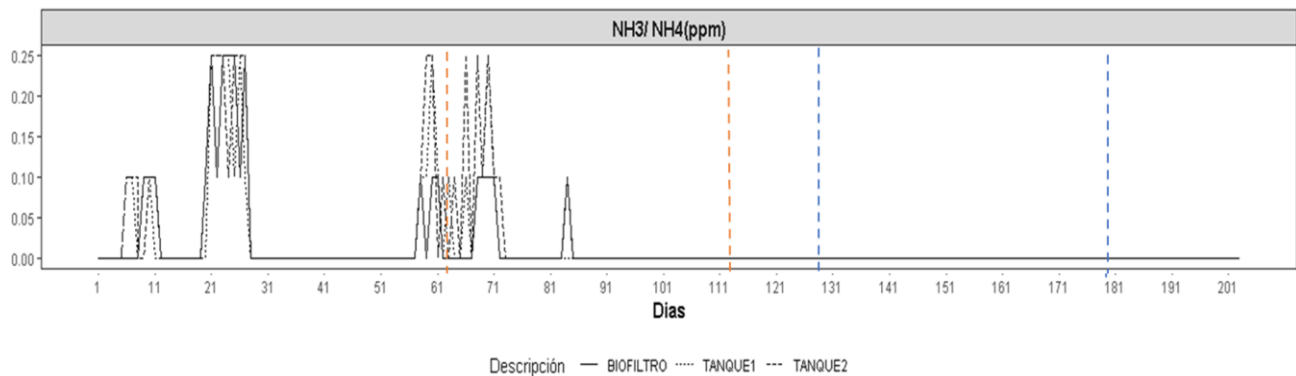
4.4 Análisis de los Parámetros Hídricos

4.4.1 Concentraciones Amoniaco

Para su evaluación se registraron variaciones de los compuestos nitrogenados durante los 200 días de cultivo (figura11), el test colorimétrico determino la presencia 0,10 ppm de amónico (NH_3/NH_4) en las primeras semanas en los tanques de cultivo y el biofiltro relacionado en la primera etapa de ionización del amoniaco y colonización de las bacterias en el sistema. Finalizado la segunda semana a partir del día 14 se realizó un recambio de agua de los tanques de cultivo para controlar las concentraciones de microalgas desencadenado una baja concentración de los compuestos nitrogenados en los primeros días la semana 3, asimismo iniciado la semana 4 se registran concentraciones de 0,25 ppm siendo la mayor registrada.

figura11.

Gráfico de las diferentes concentraciones de amoniaco (NH_3/NH_4).



Nota. Registro de las concentraciones de amónico en tanque de cultivo y biofiltro en un periodo de 200 días.

Finalizando la semana 4 (día 27) se realizó un tratamiento con sal en cada tanque de cultivo para controlar las mortalidades, sin embargo no se recomienda implementarla, ya que según (Bassin, et al., 2012) la salinidad afecta la actividad metabólica de las bacterias nitrificantes, reduciendo su crecimiento y la tasa de oxidación del amónico. Con base a lo señalado anteriormente en los días 28 hasta el día 56 como se observa en la (figura11) no hay la

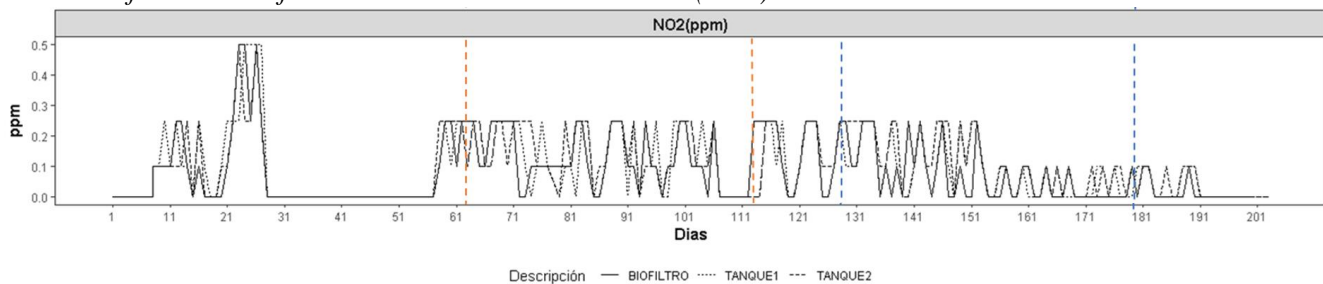
presencia de compuestos nitrogenados demostrado poca actividad bacteriana para los procesos de nitrificación. Los días 58 hasta 70 se presenta cierto aumento que van desde 0,10 ppm hasta 0,25 ppm disminuyendo gradualmente hasta llegar a cero, durante el estudio se mantuvo estable los rangos de concentración tolerables para tilapia debido a que fueron menores <1 ppm hasta finalizar el estudio.

4.4.2 Concentraciones Nitrito

Los datos obtenidos para la prueba de nitrito (NO_2) en los primeros días las concentración fueron de 0, a partir de los últimos días de la semana se obtuvieron concentraciones de 0,25 ppm inicialmente en los tanques de cultivo y en el biofiltro concentraciones de 0,10 ppm evidenciado el proceso de nitrificación por parte las bacterias *Nitrosomonas sp* encargadas de convertir el amoniaco ionizado en nitrito, el día 27 se observa un crecimiento 0,50 ppm siendo la mayor concentración de nitrito registrada. Entre los días 28 -57 se re registra una baja concentración de nitrito debido a la poca actividad bacteriana desencadenada por el tratamiento con sal, desde el día 58 hasta terminar el estudio se presenta rangos de concentración que van desde 0,25 -0,10 ppm hasta llegar 0 ppm, para este estudio los rangos de nitrito (NO_2) fueron estables menores a <1 ppm por lo indiac a que el filtro fue eficiente en los procesos de nitrificación.

Figura 12

Gráfico de las diferentes concentraciones de nitrito (NO_2).



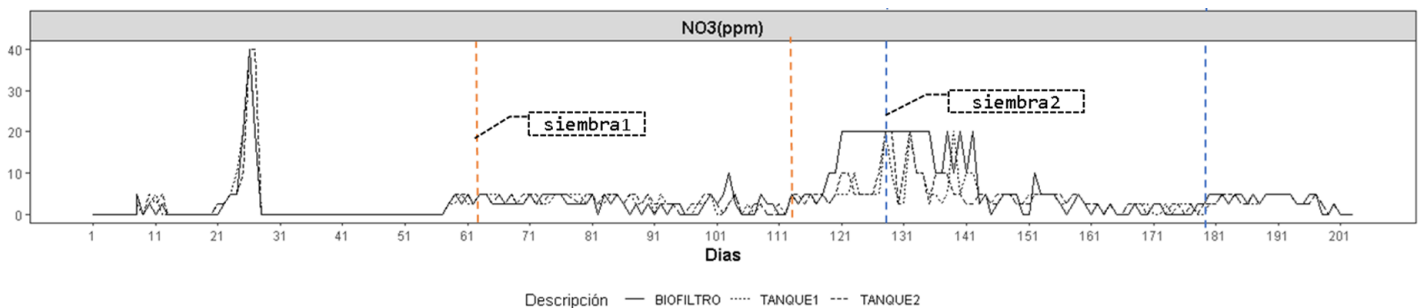
Nota. Registro de las concentraciones de nitrito en tanque de cultivo y biofiltro en un periodo de 200 días.

4.4.3 Concentraciones Nitrato

La concentración de nitrato (NO_3) Como se observa en la (figura13) fue aumentado en el tiempo, asimismo es evidencia que el ciclado del amoniaco fue completo, ya que se determina la presencia de las bacterias Nitrobacter encargadas de transformar el nitrito (NO_2) en nitrato (NO_3). Las concentraciones iniciales en primeros días fueron de 5,0 ppm y fue amentado progresivita durante los días 22 y 27 hasta llegar a 40 ppm siendo la concentración más alta registrada, entre los días 28 – 57 se observa una baja concentración debido a la baja actividad de las bacterias. Por otro lado, en la semana 9 (día 57) se registra un aumento progresivo hasta llegar a 5,0ppm en cual se establece la concentración ideal para llevar a cabo en el día 65 la primera siembra y el día 129 la segunda siembra. Durante la siembra se observa que las concentraciones se mantienen constantes debido a que las plantas lo están absorbiendo. En cuanto al biofiltro se puede inferir que la nitrificación de los compuestos nitrogenados fue optimo debido a que el área superficial total de contacto del material plástico flotante (tapas plásticas) fue 0.70 m, por lo cual facilito la proliferación de las bacterias nitrificantes permitido el ciclado completo de los compuestos nitrogenados y evitando su acumulación (Apéndice F).

Figura 13.

Gráfico de las diferentes concentraciones de nitrato (NO_3).

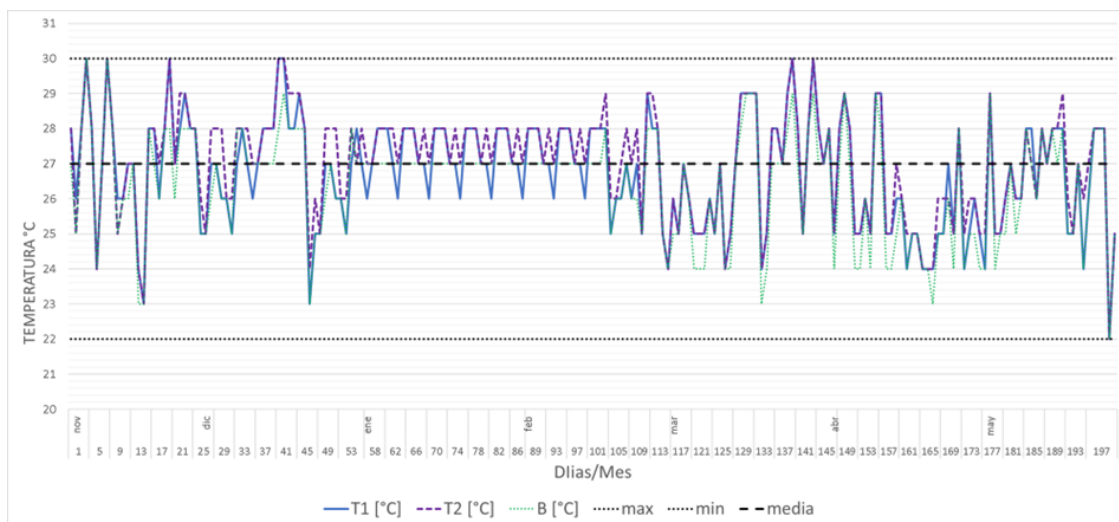


Nota. Registro de las concentraciones de nitrato en tanque de cultivo y biofiltro en un periodo de 200 días.

4.4.4 Temperatura del Agua

Los rangos de temperatura que se registraron durante el desarrollo del estudio como se observar en la (figura14), se obtuvieron promedios de 26.8 ± 1.5 para el tanque 1, para el tanque 2 un promedio de 27.1 ± 1.5 y el biofiltro un promedio de 26.4 ± 1.5 . El rango máximo de temperatura fue de 30°C y un mínimo de 23°C , es efecto los rangos óptimos de temperatura fueron ideales para el cultivo de tilapia. dado que según(Somerville et al., 2019) los peces de aguas tropicales los rangos están entre 22 a 32°C , asimismo no se registraron cambios drásticos de temperatura, debido a que se implementó termostatos para garantizar temperaturas optimas en los tanques de cultivo para evitar problemas de estrés que afecten la tasa metabólica y la tasa de crecimiento, por otro lado el biofiltro se mantuvo entre los rangos ideales para las bacterias nitrificante que fluctúan desde los 30°C a 23°C . asimismo según(Somerville et al., 2019) las bacterias prosperan en aguas con temperaturas mayores a 20°C , por encima de este rango estimula el crecimiento y los procesos de oxidación de los compuestos nitrogenados.

Figura 14.
Evaluación de la temperatura en un ciclo de cultivo de 200 días.

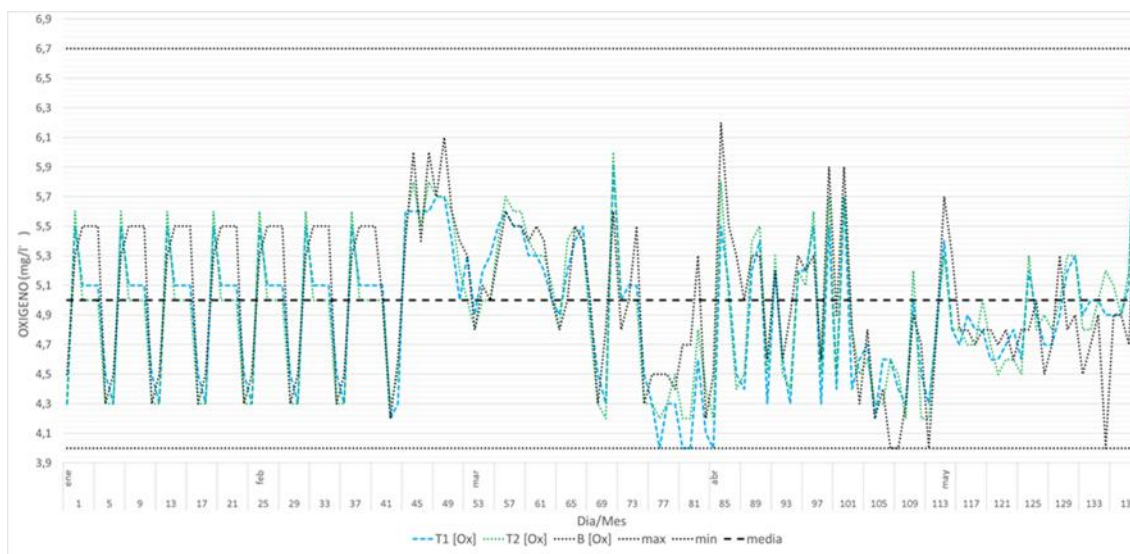


Nota. Registro de los cambios de temperatura en los tanques de cultivo y biofiltro en un periodo de 200 días.

4.4.5 Concentraciones de Oxígeno Disuelto

Los resultados obtenidos en la medición del oxígeno disuelto (OD) el valor máximo promedio de concentración que se registró fue en el biofiltro con un $5,0\text{mg/L}\pm 0,51$, asimismo para el tanque 1 y 2 se obtuvieron concentraciones similares en cuanto al promedio de $4,9\text{mg/L}\pm 0,48$ y $4,9\text{mg/L}\pm 0,49$. Se puede inferir que los niveles de la concentración para el cultivo de tilapia fueron mayores a $4,0\text{ mg/L}$ durante el estudio como se muestra en la (figura15), según (FAO, 2014) algunas especies como el bagre y la tilapia pueden tolerar concentraciones bajas de 2 a 3 mg/L , asimismo las concentración varían de acuerdo a diferentes factores como la concentración de sales disueltas y la temperatura, el efecto que relaciona estos factores se describe cuando se presentan altas concentración de sales y altas temperatura disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua.

Figura 15.
Gráfico de las diferentes concentraciones de oxígeno disuelto.

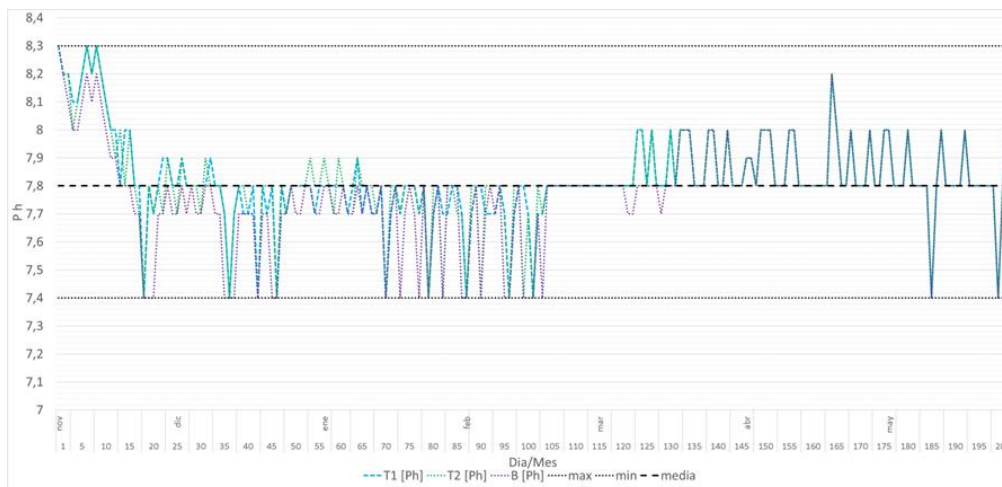


Nota. Registro de los cambios de las concentraciones de oxígeno disuelto en tanques de cultivo y biofiltro en un periodo de 140 días.

4.4.6 Ph del Agua

El Ph durante las dos primeras semanas se obtuvo un registro de variaciones moderadamente alcalinas que van desde 8.2 a 8.3 en los tanques de cultivo y el biofiltro, a partir de la semana 3 como se observa (figura16) una tendencia decreciente llegando a rangos de 8.0 y más bajos hasta 7.4, mantenido las mismas variaciones durante el desarrollo del estudio. Con respecto a los valores promedios para los tanques de cultivo 1 y 2 se obtuvo (7.8 ± 0.16) , (7.8 ± 0.17) y para el biofiltro (7.8 ± 0.18) . Con referencia a niveles óptimos para sistemas acuapónicos, según (Rakocy, et al., 2006) se debe mantener entre 7.0 a 7.5 para promover procesos de nitrificación y permitir que los nutrientes estén más biodisponibles para las plantas. Sin embargo en el sistema no se logra mantener constante el Ph debido a la incorporación de agua por perdida por evaporación, lo que hace que ocurran variaciones oscilan entre los 0,3 a 0,2. Con respecto a estas variaciones los peces obtuvieron un buen desarrollo durante el estudio.

Figura 16.
Gráfico de los diferentes rangos de Ph evaluados.



Nota. Registro de los rangos de Ph en los tanques de cultivo y biofiltro en un periodo de 200 días.

4.5 Composición Química de la especie (*Lactuca Sativa*).

La composición de los minerales asimilados por la especie (*Lactuca Sativa*) bajo condiciones de acuaponía acoplada los desechos generados por la especie *Oreochromis sp* algunos de los nutrientes fueron limitados, durante el desarrollo del trabajo debido a que se registraron valores inferiores de Fe, P, Ca, Mg como se muestran en la (tabla.7). Según (Kasozi et al.,2019) el hierro cumple un papel fundamental para los procesos de fotosíntesis y es un precursor en la síntesis de proteínas en las plantas incluso una baja absorción de hierro puede desencadenar hojas con parches amarillos, es decir el hierro, fosforo, calcio y magnesio. Debido a que no estaba biodisponibles, con respecto a la absorción del hierro en los peces la información aun es limitada.

Tabla7.

Composición química de la especie Lactuca Sativa producida bajo un sistema acuapónico.

Mineral	Unidad	Valor
N	%	2,411
P	%	0,456
K	%	3,862
Ca	%	0,968
Mg	%	0,199
Na	%	1,763
S	%	0,238
Fe	mg*kg-1	47,051
Cu	mg*kg-1	3,745
Mn	mg*kg-1	107,647
Zn	mg*kg-1	52,982
B	mg*kg-1	20,374

4.5.1 Análisis de los Resultados de la Materia Vegetal (*Lactuca Sativa*).

Durante el desarrollo del estudio se obtuvieron un total de 110 plantas en un sistema acuapónico acoplado, es decir en dos metros cuadrados se produjeron 55 plantas.

Tabla8.*Evaluación de los registros obtenidos de la materia vegetal bajo un sistema acuapónico.*

Muestra	Estimación para el cultivo 1				
	L.h	Ach.h	Al.max	N.h	Log.R
1	1,04 ±0,25	0,72 ±0,17	1,90 ± 0,57	2,67 ±0,50	3,29 ± 0,96
2	2,79 ±0,63	1,70 ± 0,32	6,32 ±1,28	4,60 ±0,68	6,91 ±2,06
3	5,38 ± 1,63	2,70 ± 0,74	17,00 ± 0,99	6,55 ±1,10	11,71 ±2,66
4	22,21±2,16	10,49±1,23	32,94±5,40	16,73 ±5,23	14,00 ± 5,83
Estimación para el cultivo 2					
1	1,82± 1,10	1,27± 0,55	3,26 ±1,76	3,95 ± 1,19	6,58 ± 8,47
2	6,91 ± 1,96	4,97± 1,43	9,75± 2,37	5,75 ± 1,12	13,44± 2,26
3	9,01 ± 1,17	12,70 ±1,79	12,70± 0,17	12,15±2,74	14,81± 1,28
4	16,38 ±1,56	13,31 ±1,29	26,71± 5,53	19,67±4,67	14,88±3,46

Nota. Registro de las diferentes mediciones de altura máxima (Al.max), ancho (Ach.h), largo (Lh), número de hojas (N.h) y largo de raíz (Long.R) expresadas en promedios y desviaciones estándar en un periodo de cultivo 48 días.

4.5.2 Numero y largo de la hoja.

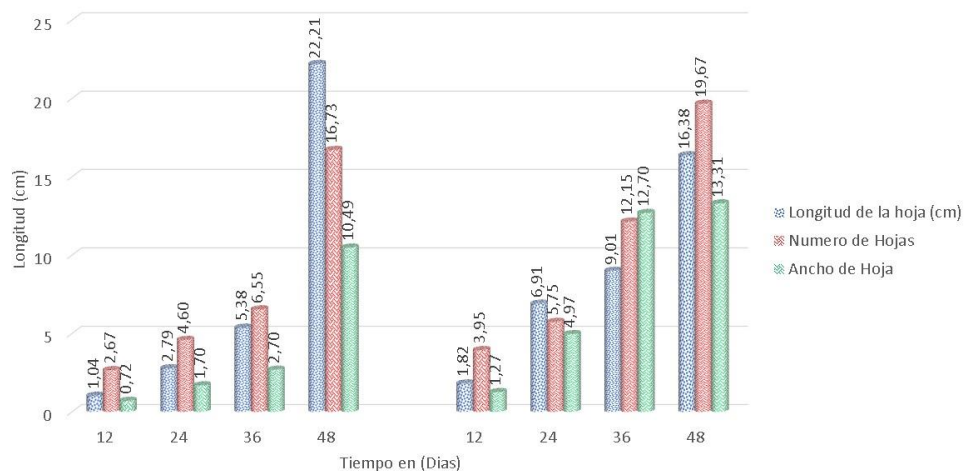
El largo y numero de la hoja que registraron durante la etapa de crecimiento en un periodo de 48 días se obtuvieron promedios de cada cultivo como se muestra en la (tabla .8), los valores promedios registrados fueron de 22,21±2,16 cm para el cultivo 1 y para el cultivo 2 un promedio de 16,38 ±1,56 cm por esta razón durante la tercera semana se adiciono sal marina al cuerpo de agua donde estaban alojados los peces debido a que la mortalidad aumento a raíz de un manejo inadecuado, según (Cepeda et al., 2018) la causa principal de la sal incorporada desencadena una competencia en los elementos como el calcio, magnesio y potasio mientras que el cloro compite con el nitrato como se puede observar en el (apéndice J).

Como se muestra en la (figura.13) el día 22 inicio registrando 5.0ppm(N03) y el día 28 registro un pico de 40ppm considerando una concentración adecuada para el establecimiento del cultivo porque se está asegurando una dispensa de nutrientes para las plantas ,la causa principal fue que en los días 27 hasta el 59 se agregó sal generando una competencia con el cloro y el

nitrito llegando a registrar 0 ppm en ese periodo de tiempo, es decir, el cultivo 1 tiene una diferencia significativa en comparación al segundo cultivo debido a la incorporación de (NaCl) al sistema desencadenando la obtención de un cultivo heterogéneo. Otra de las causas fue porque se utilizó para el establecimiento del cultivo 1 una cubierta de poli sombra que reducía la incidencia de luz solar lo que permitió el desarrollo de hojas lanceoladas no característica de la lechuga crespa y con un menor número de hojas registrando valores promedios $16,73 \pm 5,23$ para el cultivo 1, para el cultivo 2 un promedio $19,67 \pm 4,67$ lo que permitió un desarrollo hoja tallo más homogéneo en comparación al cultivo 1 como se muestra en la (figura17).

Figura17.

Gráfico de longitud de la hoja, Numero de hojas y Ancho de Hoja (cm) evaluados en dos ciclos de siembra bajo un sistema acuapónico.



4.5.3 Ancho de la hoja.

Para la evaluación del crecimiento del ancho de la hoja bajo condiciones de acuaponía hay diferencias significativas debido a los niveles de salinidad que fue sometido el cultivo 1 de modo que al comparar el desarrollo promedio del ancho de la hoja siendo de $10,49 \pm 1,23$ cm y para el cultivo 2 fue $13,31 \pm 1,29$ cm. Según (Niñirola et al ., 2013) cultivos hidropónicos bajo salinidad limitan el desarrollo de los mismos es decir las plantas sometidas a estas condiciones su crecimiento es lento lo que desencadena rendimientos inferiores. La causa directa del desarrollo de las hojas de manera lanceolada para el cultivo 1 es debido a la salinidad del agua incidiendo en el desarrollo lento de la planta debido a que no hay concentraciones de nutrientes biodisponibles para las plantas.

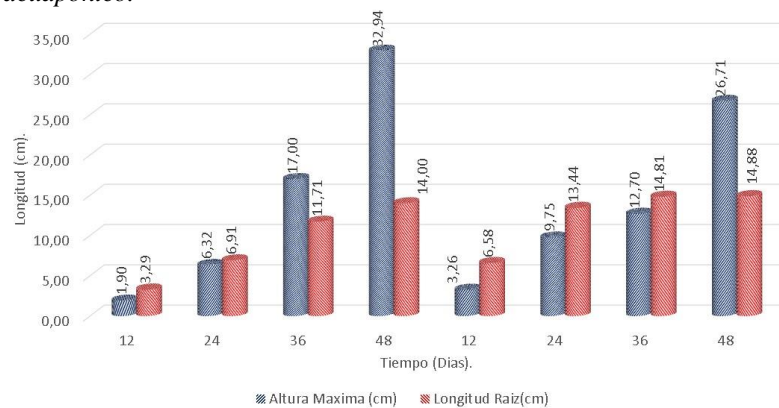
4.5.4 Altura máxima.

Inicialmente el cultivo no presenta diferencias significativas, al pasar el tiempo en los días 12 y 24 las plantas registran en promedio durante ese periodo de tiempo una altura de 4,42 cm dado que el efecto de la respuesta a la incidencia de luz fue variable para el cultivo 1 en vista que los valores promedios correspondientes a la altura de la planta fueron de $32,94 \pm 5,40$ cm como se muestra en la (figura.18) , teniendo en cuenta que se usó una poli sombra y estuvo sometido a concentraciones salinas durante el establecimiento del cultivo afectando el desarrollo homogéneo de las plantas lo que influye en la tasa de crecimiento diario para el cultivo 1 siendo 0,86 cm/día, respecto el cultivo 2 registro una altura promedio $26,71 \pm 5,53$ cm ,teniendo en cuenta que la tasa de crecimiento diario fue de 0,65 cm /día considerando que el cultivo obtuvo una tasa especifica de crecimiento de 6,10% /día con respecto al primero fue de 8,50%/día siendo mayor .

4.5.5 Longitud de raíz.

Al comparar el crecimiento promedio de longitud de raíz entre los cultivos en un periodo de 48 días como se muestra en la (figura .18) se obtuvieron valores de desarrollo promedios de cada cultivo siendo de $14,00 \pm 5,83$ cm para el cultivo 1 y para el cultivo 2 de $14,88 \pm 3,46$ cm se refleja la diferencia significativa en la tasa de crecimiento para la longitud de raíz en el cultivo 1 fue de 0,29 cm/día de manera que la tasa de crecimiento para el cultivo 2 fue de 0,23cm/día observamos que es mayor la tasa de crecimiento en el cultivo 1 debido a las concentraciones de salinidad que fue sometido el cultivo 1 por que los niveles de los nutrientes fueron insuficientes y desencadenando una competencia por los niveles inferiores de nutrientes presentes en la película nutritiva lo que radica la elongación de las raíces de las plantas.

Figura 18. Gráfico de altura máxima y longitud de raíz en (cm/día) evaluados en dos ciclos de siembra bajo un sistema acuapónico.

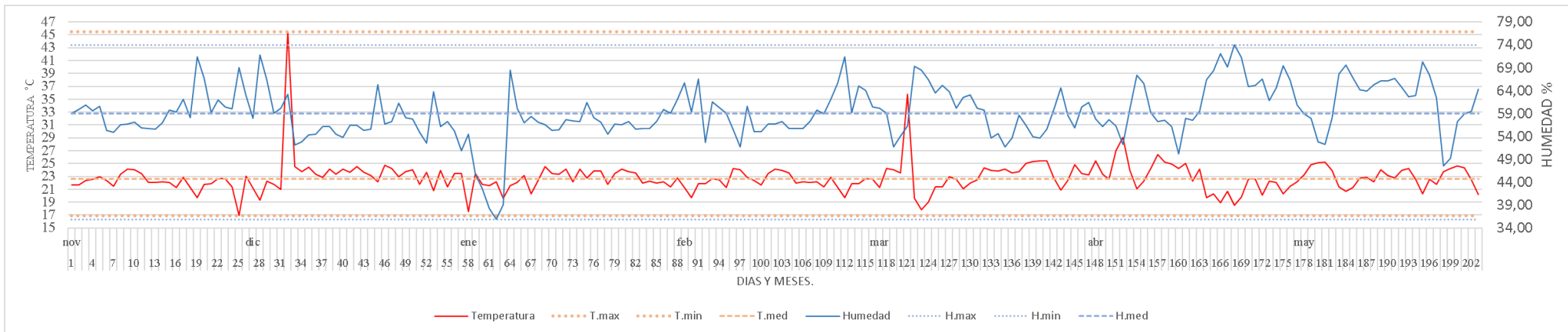


4.6 Análisis de variables climáticas bajo invernadero.

Según (Brenes Peralta et al., 2014) los parámetros recomendados para producir hortalizas de hojas verdes como la lechuga la temperatura requerida es de 15 – 30 °c y la humedad relativa de 80% - 95% . La temperatura ambiente promedio bajo invernadero fue 23°C como máxima 46°C, mientras que la temperatura mínima fue 17°C, respecto a la humedad promedio registrada fue de 58.6% y como máxima fue de 46.0% y como mínima fue 35.9% el control de la temperatura y humedad bajo invernadero no era adecuada debido a que presentaba salidas debido a que no era un lugar controlado.

Figura 18.

Gráfico de variables climáticas de temperatura y humedad bajo invernadero registrada por día evaluadas bajo condiciones de acuaponía en un periodo de 200 días.



El peso promedio comercial de la lechuga fue de 109.4 g para el cultivo 1 y para el cultivo 2 siendo de 139.3g. De modo que en el cultivo 1 se evidencio poco desarrollo y menor peso, dado que en la etapa inicial para la maduración del sistema se realizaron

recambios de agua y la incorporación de sal como tratamiento para reducir la mortalidad, por lo tanto, se reduce el suministro de alimento diario a causa de la reducción del número de peces ocasionando niveles bajos de nutrientes para el cultivo de lechuga.

4.7 Costos de producción.**Tabla9.***Costos de Producción Bajo un Sistema Acuapónico.*

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo Unitario(\$)	Costo total
1.1 Costos fijos de operación				
1.1.1 Energía eléctrica	(Kwh-1)		622	
blower(1.5hp)		2376		\$1.477.872
bomba(0.5hp)		1117		\$694.600
calentadores		432		\$268.704
1.2 Costos variables de producción				
1.2.1 Materia prima				
Semilla lechugas	Gr	5	540	\$2.700
Juveniles(7gr)	Unidad	100	700	\$70.000
1.2.2 Alimento balanceado				
Mojarra 45% proteína	Kg	11	3600	\$39.600
Mojarra 24% proteína		3	3400	\$10.200
Agua	m3	4,5	2200	\$9.900
1.3 costos totales de producción				
1.3.1 Costo fijos				\$2.441.176
1.3.2 Costo variables				\$132.400
Total, de egresos				\$2.573.576
1.4 Indicador económico cálculo de utilidad en un sistema acuapónico				
Biomasa(tilapia)	Kg	9,5	14250	\$135.375
lechuga fresca	Unidad	110	3400	\$374.000
Ingreso total				\$509.375
1.5 Indicador económico / costo beneficio				
Ingreso total				\$509.375
Costo de Producción				\$2.573.576
				\$0,20

Con base a los indicadores económicos se puede afirmar que los costos de producción superan las utilidades netas, debido a que los equipos implementados eran sobredimensionados y en las primeras semanas se generaron mortalidades masivas desencadenando un desequilibrio en el sistema, ya que el costo beneficio fue de \$ 0.20 incidiendo directamente en los costos de producción y en los costos operativos siendo superiores debido a los equipos usados demandaban alta energía para este sistema a pequeña escala.

5. Conclusión

La acuaponía es una tecnología prometedora que ofrece muchos beneficios como la conservación del agua, la conservación del suelo, el aumento de la producción de alimentos más saludables y asequibles para poblaciones rurales y urbanas. Existen algunos desafíos que enfrenta esta técnica entre estos esta la falta de recursos, falta conocimiento, competencia frente a las prácticas tradicionales. Con los recursos y el apoyo adecuado la acuaponía puede ser una herramienta eficaz para dar soluciones sostenibles y eficaces para transformar los métodos tradicionales en que producimos alimentos.

El consumo hídrico del sistema fue de 4.600 L para una producción de 9.8 kg de tilapia y 110 lechugas, de acuerdo con los indicadores anteriormente mencionados según (Jiménez Sáenz, 2018) en la acuicultura tradicional para producir un 1 kg de pescado se necesitan aproximadamente 400 a 4000 L de agua , es decir en este sistema se ahorra 34.600 L por ciclo de cosecha, lo que traduce una reducción sobre la presión del recurso hídrico a un 88.3%.

Los efectos en la concentración de minerales en la solución nutritiva determino que el cultivo con mejores rendimientos productivos fue el número 2 ,debido a que los niveles de nutrientes eran inferiores para el cultivo 1 determinando una deficiencia mineral en la solución nutritiva alterando los ciclos de cosecha debido a las concentraciones de salinidad lo que radica en la incapacidad de aprovechar directamente los minerales presentes en la solución nutritiva desencadenando niveles bajos de nitrato asimilable para el cultivo.

- El desempeño del sistema para la producción de tilapia fue de 9,52 kg/m³ considerado que el rendimiento no fue el esperado, debido a la alta mortalidad a causa de una mala práctica en la primera toma de registros biométricos, por lo cual según (FAO, 2014) para sistemas a pequeña escala los rangos de producción están alrededor entre 10 a 20 kg/m³

6. Recomendaciones

En la toma de los registros biométricos es necesario implementar buenas prácticas de manejo y equipos de medición para evitar causarles estrés o daños físicos, ya que una mala práctica puede causar grandes pérdidas económicas como se presentó en este estudio.

Bajo condiciones del sistema se recomienda usar equipos que sean ideales para un sistema a pequeña escala ya que los implementados requieren mayor demanda energética causando un aumento en los costos productivos.

Referencias Bibliográficas

- Abella, G., Johanna, P., Martínez, C., & María, J. (2012). Contribución de un afluente tributario a la eutrofización del lago de tota (boyacá, colombia). *Revista Colombiana de Química*. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042012000200006&lng=en&tlng=es.
- Ácome, J., Quezada Abad, C., Sánchez Romero, O., Pérez, J. E., & Nirchio, M. (2019). Tilapia en Ecuador: paradoja entre la producción acuícola y la protección de la biodiversidad ecuatoriana. *Peruana de Biología*. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i4.16343>
- Alveal Concha, M. A., & Campos González, K. del C. (2014). *Estudio comparativo de sistemas de riego hidropónico y por goteo*. Recuperado de: http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/797/1/Alveal_Concha_Miguel_Angel.pdf
- ARTHUR HARRISON, J. (2003). Los ciclos de la tierra- el ciclo del nitrógeno: de microbios y de hombres. *visionlearning*. Recuperado de: <https://www.visionlearning.com/es/library/Ciencias-de-la-Tierra/6/El-Ciclo-del-Nitrgeno/98#:~:text=Los procesos principales que componen,la nitrificación y la denitrificación.>
- Auwermeulen, E. Van der. (2007). Agricultura Sustentable y Alternativa (ACUAPONIA), 16. Recuperado de: <http://www.vidaequilibrium.com/acuaponia.pdf>
- Ávila, E. P. (2015). Manual Lechuga. *Cámara de Comercio de Bogotá*, 2–54. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11520/14316>

- Baixauli, C., & Aguilar, J. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias*. Valencia (España), Generalitat Valenciana. Recuperado de: https://redivia.gva.es/bitstream/handle/20.500.11939/7948/2002_Baixauli_Cultivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Baltazar guerrero, paul martin, Uribe alzamora, roberto alfonso, Flores, M., Rodenas, P., & Gonzales, J. (2015). Manual de cultivo de tilapia en estanque. *Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/282366317_Manual_del_cultivo_de_tilapias_en_estanques_Oreochromis_niloticus
- Baradad Oca, J., & Llorà Masaló, I. (2009). Diseño de tanques en acuicultura intensiva. *Fundación Observatorio Español de Acuicultura (Fundación OESA) y La Sociedad Española de Acuicultura (SEA)*. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/114534/ingrid.pdf;jsessionid=00DE62651383E1D85ADC61F5CE22DDB4?sequence=1>
- Barbado, J. L. (2005). *Hidriponia*. (C. Repetti, Ed.) (1st ed.). buenos aire. Recuperado de: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60948296/H1-convertido20191018-30355-1v399sr-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1667605232&Signature=VbuJLKXsv7OcnzhnoSULHWXK2nsitzfEKN2J75hb6aafx5-~1TL9ebjvAhj341LsOVDQY0hwCxdaPiOqrFepwYQ0U5pGGcr1xaFYN8oYGT53zZLxxhTIy1B9>
- Bassin, J., Kleerebezem, R., Muyzer, G., Rosado, S., & van Loosdrecht, C Dezotti, M. (2012). Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling

of nitrifying sludge in sequencing batch reactors. *Applied Microbiology and Biotechnology*.

Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3428-7>

BASTERRECHEA, M. (2015). No Title. *Los 3 Métodos de Aireación Principales En Hidroponía*. Retrieved from <https://www.hidroponiacasera.net/los-3-metodos-de-aireacion-principales-en-hidroponia/>

Bielinski M, S., & Henner A, Obregón Olivas Teresa P, S. D. (2010). Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida. Recuperado de: <https://journals.flvc.org/edis/article/view/118770/116696>

Bill McGraw. (2021). Sistemas de producción acuaponia pescado de agua dulce américa del norte islas vírgenes británicas. Rcuperado de: <https://thefishsite.com/articles/the-godfather-of-aquaponics-james-rakocy-creating-ecosystems>

Brenes Peralta, L., & Jimenez Morales, M. F. (2014). Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT (Nutrient Film Technique). *Tecnologico de Costa Rica*, 26.

Candarle, P. (2011). Técnicas de Acuaponia. *Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Dirección de Acuicultura.*, p. 47. Recuperado de: <https://docplayer.es/27897149-Tecnicas-de-acuaponia.html>

Carmenza Gonzalez, M., Saldarriaga, G. de Jesus, & Jaramillo, O. (2010). Estimación de la demanda de agua. *ideam*, 421. Recuperado de: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2010.compressed.pdf

Carrión, M. (2019). el Ágora diario del agua. Recuperado de: <https://www.elagoradiario.com/open-data/infografias/agua-planeta/>

Castaño domene, maria del mar, & Rodrigez Medina, maria teresa. (2018). Nitrificación

- importancia medio ambiental. Recuperado de: <https://www.ugr.es/~cjl/nitrificacion.pdf>
- Castillo Campo, L. F. (2002). La importancia de la tilapia roja en el desarrollo de la piscicultura en Colombia. *Asociación Red Cauca, Alevinos Del Valle*.
- Cepeda, A., Valdez, L., Castillo, A., Ruiz, N., Robledo, V., & Mendoza, R. (2018). Lettuce response to electrical conductivity with surface irrigation and sub-irrigation systems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1233.
- Cifuentes, R., Gonzalez, J., Germán, M., Alfonso, J., 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). Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382012000100009%0A>
- Contreras Vázquez, E., & Guadalupe Rojas Pérez, T. (2016). *Ph:teoria y 232 problemas*. (U. A. METROPOLITANA, Ed.) (Primera ed). Recuperado de: <https://www.cua.uam.mx/pdfs/conoce/libroselec/17pHTeoriayproblemas.pdf>
- Corporán, R. (2012). Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe. Recuperado de: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/509530/>
- Costa Rica, S. J. (2015). *Módulo: Hidroponía* (2a Edición). Recuperado de: [https://www.inapidte.ac.cr/pluginfile.php/38057/mod_resource/content/1/Folleto hidroponía 2016.pdf](https://www.inapidte.ac.cr/pluginfile.php/38057/mod_resource/content/1/Folleto%20hidroponia%202016.pdf)
- Ctaqua. (2017). Alimentación optimizada para tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) de Senegal. *Centro Tecnológico Para La Acuicultura*, 48. Recuperado de: <https://www.ong-aida.org/wp-content/uploads/2017/06/Informe-Alimentación-Tilapia-v2.pdf>
- Cuéllar Sáenz, J. A. (2021). Acuicultura en Latinoamérica: ¿Cuál es el panorama? Recuperado de: <https://www.veterinariadigital.com/articulos/acuicultura-en-latinoamerica-cual-es-el-panorama/>

- DANE. (2017). *Sistema de Información del Medio Ambient*. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Odisuelto.pdf>
- FAO. (2014). *Small-scale aquaponic food production*. Recuperado de: <https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf>
- FAO. (2018). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. (p. 250). <https://doi.org/CC BY-NC-SA 3.0 IGO>
- FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite*. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Fedeacua. (2018). *Cartilla Didáctica 1 Formalización de la Piscicultura en el departamento de Huila*. Recuperado de: <https://www.colombiaproductiva.com/CMSPages/GetFile.aspx?guid=af44e015-a904-489b-ab99-59e5dce66696>
- Fernández, E. J., & Camacho, F. (2005). Eficiencia uso agua, p. 4. Recuperado de: http://www.horticom.com/revistasonline/extras/2005/E_Fernandez_F_Camacho.pdf
- Fisheries and Aquaculture Department (FI), & FAO. (2015). Diseño de un sistema acuapónico. Recuperado de: <https://www.fao.org/teca/en/technologies/8725>
- Flores Aguilar, P., García, T. J. F., & Martínez, S. I. (2021). Acuaponía: una alternativa versátil e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. Recuperado de: <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/download/101/96/86>
- Formo. (2012). Acuaponia indoor. Recuperado de: <https://acuaponia-argentina.blogspot.com/2012/02/camas-de-cultivo.html>
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: History, meta-

analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241–253.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>

García Rivas, T., Ramón González, R., & Bernardo Murillo, A. (2021). De la nitrificación al control de enfermedades. Recuperado de: https://www.cibnor.gob.mx/revistas-rns/pdfs/vol1num3EE/2_NITRIFICACION.pdf

Gedar. (n.d.). Recomendaciones en mantenimientos de acuarios. Recuperado de: https://www.gedar.com/PDF/BIOGEDAR/GEDAR-Recomendaciones_Mantenimiento_AQUARIOS.pdf

Gilsanz, J. c. (2007). *HIDROPONIA*. (INIA, Ed.). Uruguay. Recuperado de: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/520/1/11788121007155745.pdf>

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability (Switzerland)*, 7(4), 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>

Goddek, S., Kotzen, B., & Burnell, G. (2019). *Aquaponics Food Production Systems - Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/333968055_Aquaponics_Food_Production_Systems_-_Combined_Aquaculture_and_Hydroponic_Production_Technologies_for_the_Future

Gonzales, F. (2021). Indicadores de Produccion. *Piscicultura Global*.

Gonzalez, F. (2021). Guia de contenido de indicadores de produccion.

Gonzalez, F. (2022). el factor de condicion k de fulton para manejar el estres en tu cultivo de tilapias. *Piscicultura Global*. Retrieved from <https://www.pisciculturaglobal.com/utiliza-el-factor-de-condicion-k-de-fulton-para-manejar-el-estres-en-tu-cultivo-de-tilapias/?fbclid=IwAR0ay0ecnF49NE3GYAVkyMs5WRft-W1Z3SnY8FzykviM->

HF0xnuZOoPSDxs

Hernández, L. F. (2017). Diseño, construcción y evaluación de un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en el cultivo de Tilapia Roja (*Oreochromis Mossambicus*) y Lechuga Crespa (*Lactuca Sativa*), 127. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/62310/1/1057592154.2018.pdf>

Herrera, N. A., Buitrago, J. M., RAMirez, Y. A., & Lamprea, A. M. (2015). El Nitrógeno, Ciclo Biogeoquímico. Recuperado de: https://www.academia.edu/37164150/El_Nitrógeno_Ciclo_Biogeoquímico

INTAGRI. (2017). Acuaponia para la Producción de Plantas y Peces. *Serie Horticultura Protegida*, 32. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/acuaponia-produccion-de-plantas-y-peces>

IPac. (2022). Colombia incrementa sus exportaciones de acuicultura en 2021 en un 13%. Recuperado de: http://www.ipacuicultura.com/noticias/ultima_hora/80484/colombia_incrementa_sus_exportaciones_de_acuicultura_en_2021_en_un_13.html

Jiménez Sáenz, J. (2018). Instructivo para el Diseño, Construcción y Manejo de Sistemas de Recirculación en el Cultivo de Paco. Retrieved from <https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/RAS-2018.pdf>

Junge, R., Antenen, N., Villarroel, M., Griessler Bulc, T., Ovca, A., & Milliken, S. (2020). Acuaponía: Libro de Texto para la Enseñanza Superior.

Kasozi, N., Tandlich, R., Fick, M., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2019). Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Reports*, 15(February), 100221. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100221>

- MADS. (2021). *ADMINISTRACION DEL RECURSO HIDRICO*. Recuperado de:
<https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/demanda/#tabs-1>
- Martínez, A. F. (2019). Acuaponía Intensiva En La Región Caribe Colombiana , (2), 2–5.
 Recuperado de: https://agrotechbma.org/docs/Articulo_científico_AFM.pdf
- Merino Galli, O., & Sal Miguel, F. (2007). Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua.
*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC (Santa Ana-
 Corrientes)*. Recuperado de:
https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/_archivos/000000_Otros sistemas/000003-Sistemas de recirculación y tratamiento de agua.pdf
- Minagricultura. (2021). Acuicultura en Colombia. Recuperado de:
<https://www.aunap.gov.co/images/convenio/presentacion-tecnica-acuicultura-en-colombia.pdf>
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Recuperado de:
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>
- Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *Plos One*.
- Montesinos, P. (2021). CÓMO ALIMENTAR AL MUNDO SIN AGOTAR EL AGUA DULCE DEL PLANETA. *Ethic*. Retrieved from <https://ethic.es/2021/09/como-alimentar-al-mundo-sin-agotar-el-agua-dulce-del-planeta/>
- Myers, K. (2014). *The Aquaponic Cycle*. Grand Valley State University. Recuperado de:
<https://scholarworks.gvsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1334&context=honorsprojects>

- Niñirola, D., Conesa, E., Fernández, C., & Egea, J. (2013). Influencia de la salinidad de la solución nutritiva en la calidad y producción de dos cultivares de lechuga babyleaf. *Ciencia y Tecnología Agraria*, 2, 191–196.
- ONU. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Recuperado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Parrado Sanabria, Y. A. (2012). Historia de la Acuicultura en Colombia. Recuperado de: file:///C:/Users/Jairo_Pc/Downloads/146-272-1-SM.pdf
- Perdomo, C. (2016). Área de suelos y aguas cátedra de fertilidad. Recuperado de: <https://docplayer.es/8305803-Nitrogeno-area-de-suelos-y-aguas-catedra-de-fertilidad.html>
- Rakocy, J., Bailey, D., Shultz, R., & Thoman, E. (2006). UPDATE ON TILAPIA AND VEGETABLE PRODUCTION IN THE UVI AQUAPONIC SYSTEM. *Agricultural Experiment Station*. Recuperado de: <https://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ista6/ista6web/pdf/676.pdf>
- Ramirez B, D. (2009). Assembly and Preliminary Evaluation of a Goldfish-Lettuce Aquaponic System, 154–170.
- Ramirez, D., Sabogal, D., Jiménez, P., & Hurtado, H. (2008). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible, 32–51. Recuperado de: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/download/2230/1937>
- Rueda Gonzalez, F. M. (2011). Breve historia de una gran desconocida: la acuicultura. Recuperado de: <https://www.um.es/eubacteria/acuicultura.pdf>
- Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). Manual de producción de Lechuga. *Manual de Producción de Lechuga Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias Boletín*, 153. Recuperado de:

<https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6703>

Sáenz Jiménez, A. J. (2012). Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para Latinoamérica. Recuperado de: http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf

salazar molina, G. (2001). Historia de la hidroponia y de la nutricion vegetal. Recuperado de: http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Historia_de_la_Hidroponia/Historia_de_la_Hidroponia.htm

Sánchez Cortazzo, A. M. (n.d.). Hidroponía, una gota viva de esperanza. Recuperado de: http://www2.mgap.gub.uy/BibliotecasdelMGAP/BibliotecaCentral/Boletines/B6Publicaciones/Articulo_AlvaroSanchez.pdf

Sánchez Ortiz, I. (2014). Sistemas de Recirculación Intensivos y con bajo Recambio: Factores Limitantes y Opciones de Solución. Recuperado de: [file:///C:/Users/Jairo_Pc/Downloads/1560-Texto del artículo-6028-2-10-20140313 \(1\).pdf](file:///C:/Users/Jairo_Pc/Downloads/1560-Texto%20del%20articulo-6028-2-10-20140313%20(1).pdf)

Sokal, R., & Rohlf, F. (1996). *Biometry* (13th ed.). San Francisco, New York: Freeman and Company. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/390978290/Sokal-Rohlf-Biometry-3d-1995>

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2019). *Small-scale aquaponic food production. Journal of Experimental Biology* (Vol. 589). <https://doi.org/10.1242/jeb.208595>

TECA(Technologies and Practices for Small Agricultural Producers), & FAO. (2015a). Deep water culture aquaponic unit: step by step description. Recuperado de: <https://teca.apps.fao.org/teca/en/technologies/8397>

TECA(Technologies and Practices for Small Agricultural Producers), & FAO. (2015b). Title:

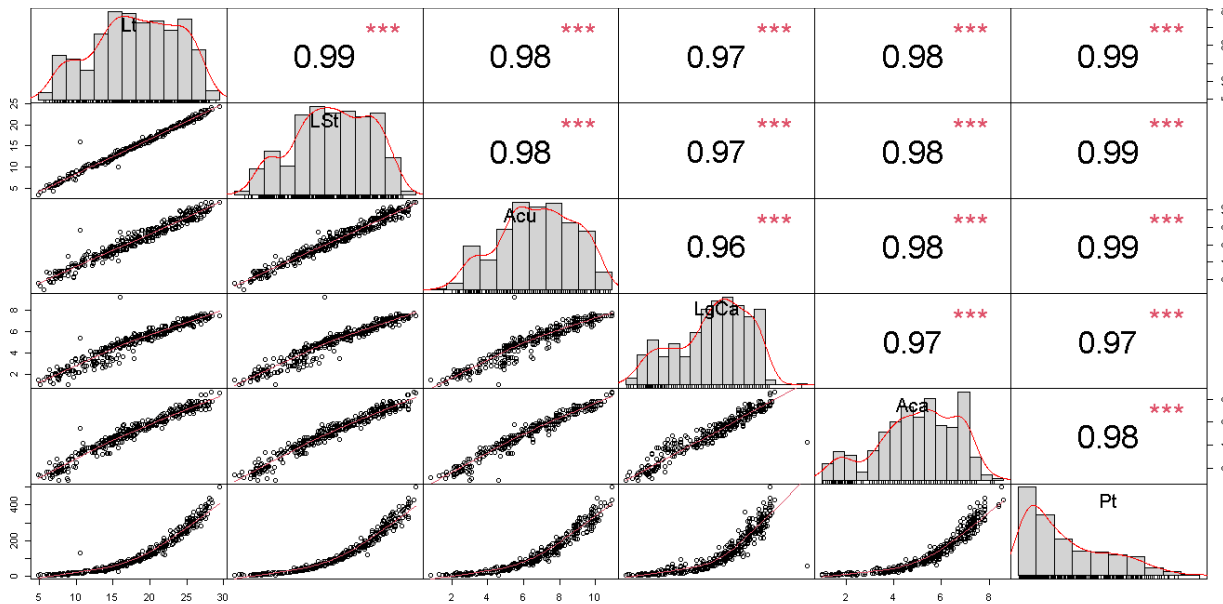
Nutrient film aquaponics unit: step by step description. Recuperado de: <https://teca.apps.fao.org/teca/en/technologies/8396>

verdegen. (2017). Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar. Recuperado de: <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>

Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., & Lee, J. W. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems, 19. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>.

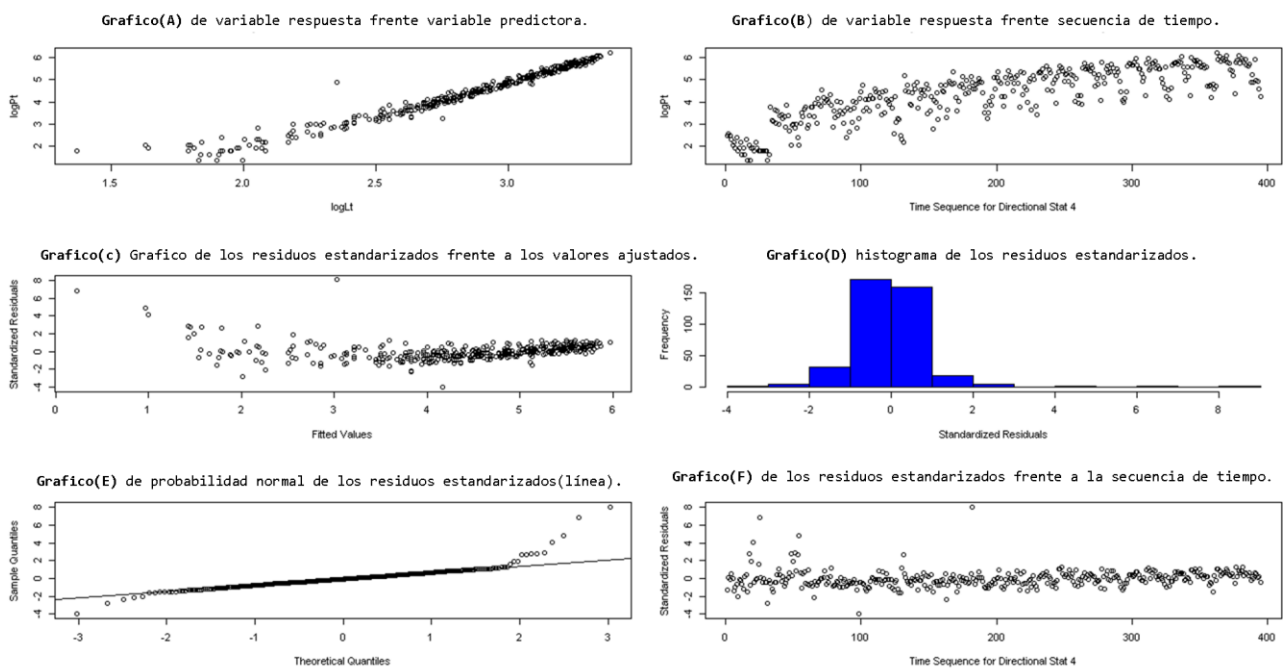
Apéndices

Apéndice A. Gráficos de los coeficientes de correlación entre las variables biométricas.



Nota. El grafico representa la distribución de cada variables longitud total (L.t), longitud estándar(L.St), ancho del cuerpo(A.cu), largo de cabeza(Lg.Ca), ancho de cabeza(A.ca), peso total(Pt) y las correlaciones por el método de Spearman a un nivel de confianza del 95%, los * indica la correlación es significativa al nivel $< 0,05$. ***. La correlación es significativa al nivel $p < 0,01$.

Apéndice B. Graficas de la distribución de los residuos estandarizados.



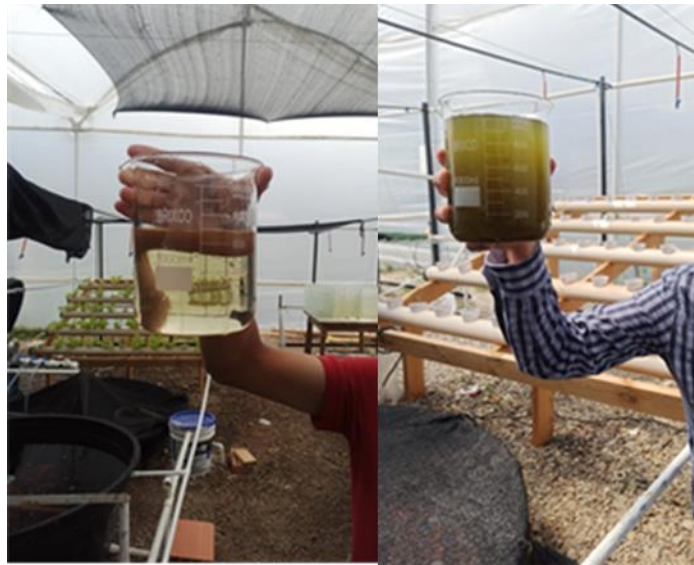
Apéndice C. Montaje del filtro mecánico.



Apéndice D. Etapa inicial de maduración del filtro biológico.



Apéndice E. Ilustración del proceso de filtrado de solidos de menor y mayor densidad.



Apéndice F. Evaluación de los parámetros hídricos kit API colorimétrico.



Apéndice G. Muestras biométricos y pesaje.



Apéndice H. Biomasa final obtenida en un periodo de 200 días.



Apéndice I. Medición parámetros físicos y químicos (temperatura, oxígeno disuelto, PH y conductividad).



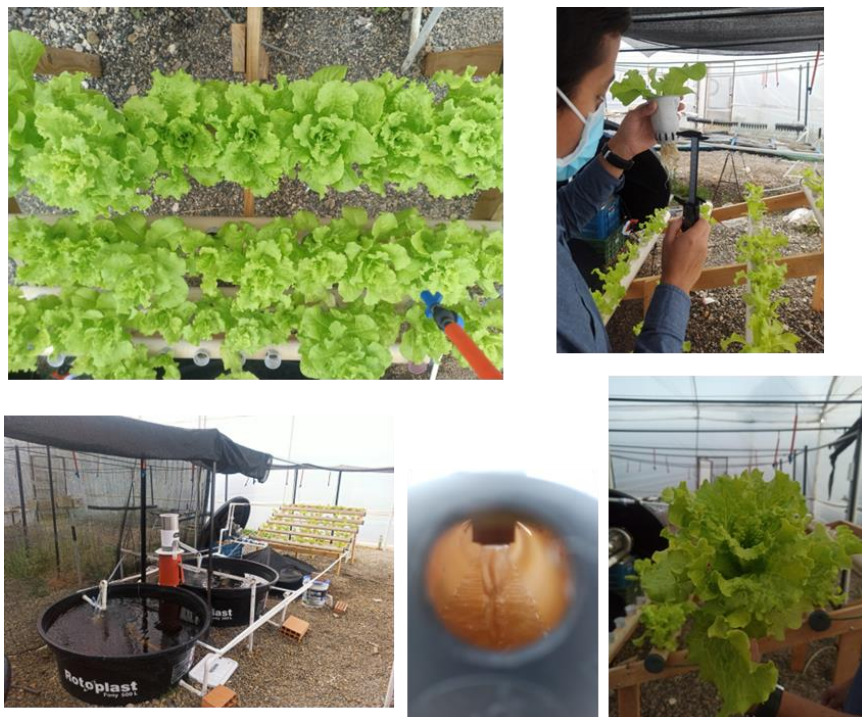
Apéndice J. Característica de la hoja del cultivo 1 y 2.



Apéndice K Etapas fenológicas en cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa*)



Apéndice L. modelo acuapónico a pequeña escala bajo invernadero.



Apéndice M. Deshidratación de materia fresca bajo invernadero.

