



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

Sergio Alejandro Vaca Vargas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia
03 de marzo de 2023

Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

Sergio Alejandro Vaca Vargas

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Agrícola

Director (a):

Msc. Oscar Leonardo García Navarrete

Codirector (a):

Biólogo Marino. Mario Andrés Colorado Gómez

Línea de Investigación:

Automatización y control de sistemas biológicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C, Colombia

03 de marzo de 2023

Este trabajo lo dedico a mis padres, que siempre me han apoyado de forma incondicional a lo largo de mis estudios. A mi familia, que mediante sus ejemplos, trabajos y acciones me han ayudado a desarrollar un pensamiento crítico frente a la sociedad y a luchar por el bien común.

A mi pareja, quien me ha demostrado el valor de pensar en los demás y darlo todo por las personas que me importan.

Además, agradezco a mis asesores, profesores y compañeros de estudio que no solo me acompañaron a lo largo de este proceso, sino que también me ayudaron a ampliar mi visión de la agricultura y su importancia para el desarrollo regional.

Declaración de obra original

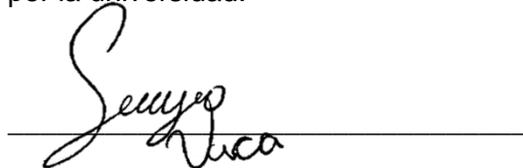
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sergio Vaca', is written over a horizontal line.

Sergio Alejandro Vaca Vargas

Fecha 18/03/2022

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores, al Ingeniero Oscar Leonardo García Navarrete de la Universidad Nacional de Colombia y al Biólogo Mario Andrés Colorado Gómez del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, por su constante acompañamiento a lo largo del proyecto.

A los laboratorios de Ingeniería Agrícola, quienes colaboraron con el préstamo de los sensores más importantes para el sistema acuapónico y además facilitaron los espacios para el desarrollo de actividades en el acercamiento a la tecnología aplicada a la agricultura.

A los aprendices del SENA, William, Cristian y Alejandra, quienes acompañaron el monitoreo y mantenimiento de los ensayos en la fase final del proyecto.

Y a las instituciones públicas, la Universidad Nacional de Colombia y el Centro de Biotecnología Agropecuaria del SENA regional Mosquera, que propiciaron la aproximación para el desarrollo de la propuesta mostrada a continuación y que además proporcionaron los equipos y espacios sobre los cuales se generó el proyecto.

¡Quiero expresar mi más sincero agradecimiento por todo su apoyo!

Resumen

Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

El presente proyecto de investigación muestra el desarrollo y evaluación de un sistema automatizado para el cultivo de diferentes especies sobre un esquema acuapónico NFT de recirculación simple. Partiendo de una revisión sistemática para la identificación del estado actual de los sistemas acuapónicos automatizados, tecnificados y tradicionales, se obtuvo un panorama de la orientación investigativa además de las variables críticas dentro del sistema y sus rangos óptimos, ratios pez-planta y manejos de caudales para un intercambio adecuado de nutrientes entre los bloques acuícola e hidropónico.

Teniendo en cuenta lo anterior y la principal preocupación del Centro de Biotecnología Agropecuaria CBA Mosquera, el levantamiento de datos del sistema para la estandarización de los ciclos productivos y el costo de los equipos, se planteó el diseño y modelamiento de un sistema automatizado que incluyera la medición de pH, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, nivel y flujo en el tanque acuícola, y la activación de válvulas y bombas bajo los modos de control manual y automático, aplicando tecnologías industriales de bajo y mediano costo.

Posteriormente se llevó a cabo la evaluación comparativa del rendimiento de biomasa de Lechuga cresspa (*Lactuca sativa*) cultivada en este medio. Como resultado se encontró que el rendimiento de biomasa fue mayor en un 52,82% en comparación con la siembra tradicional en suelo, además se establecieron estadísticas y rangos fiables de las variables medidas permitiendo dar recomendaciones sobre el manejo de oxigenación y recirculación. Cumpliendo con los objetivos planteados y llegando a una solución estandarizada de bajo-medio costo.

Palabras clave: acuaponía, automatización, diseño, proceso, evaluación, rendimiento.

Abstract

Automation, modeling and evaluation of an NFT aquaponic system for culture of Red Carp (*Cyprinus carpio*) and Cressa Lettuce (*Lactuca sativa*)

The present study shows the development and evaluation of an automated system for the growing of different species on a simple recirculation NFT aquaponic scheme. Based on a systematic review to identify the current status of automated, technified and traditional aquaponic systems, an overview of the research orientation was obtained, as well as the critical variables related to the system and their optimal ranges, fish-plant ratios and flow management for an adequate exchange of nutrients between the aquaculture and hydroponic blocks.

Taking into account the above and the main concern of the Centro de Biotecnología Agropecuaria CBA Mosquera, the system data collection for the standardization of the productive cycles and the equipment costs, it was proposed the design and modeling of an automated system that included the measurement of pH, dissolved oxygen, temperature, turbidity, level and flow in the aquaculture tank, and the activation of valves and pumps under manual and automatic control modes, applying low and medium cost industrial technologies.

Subsequently, the comparative evaluation of the biomass yield of *Lactuca sativa* (*Lactuca sativa*) grown in this medium was carried out. As a result, it was found that the biomass yield was higher in 52,82% compared to the traditional planting in soil, in addition, statistics and reliable ranges of the measured variables were established, allowing recommendations on the management of oxygenation and recirculation. Fulfilling the objectives set and reaching a standardized low-medium cost solution.

Keywords: aquaponics, automation, design, process, evaluation, performance.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVII
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
Referencias.....	5
1. Sistemas Acuapónicos Automatizados, Tecnificados y Tradicionales: Revisión sistemática	7
1.1 Resumen.....	7
1.2 Introducción.....	8
1.3 Materiales y métodos.....	11
1.3.1 Delimitación de la revisión.....	11
1.3.2 Marco de búsqueda.....	11
1.3.3 Claves de búsqueda.....	13
1.3.4 Criterios de inclusión/exclusión.....	13
1.3.5 Evaluación de calidad.....	14
1.3.6 Análisis de datos.....	14
1.4 Resultados y discusión.....	15
1.4.1 Resultados preliminares.....	15
1.4.2 Análisis bibliométrico.....	15
1.4.3 Hallazgos de las publicaciones.....	17
1.4.4 Sistemas hidropónicos NFT, raíz flotante y lecho de sustrato.....	18
1.4.5 Sistemas recirculantes.....	23
1.4.6 Rendimiento y uso de agua.....	28
1.4.7 Instrumentación y automatización en acuaponía.....	31
1.4.8 Orientación investigativa.....	36
1.5 Referencias.....	38

2.	Diseño y construcción de un sistema automatizado para cultivo acuapónico NFT de Carpa Roja (<i>Cyprinus carpio</i>) y Lechuga Crespa (<i>Lactuca sativa</i>)	45
2.1	Resumen	45
2.2	Introducción	46
2.3	Materiales y métodos	49
2.3.1	Dimensionamiento del sistema acuapónico	49
2.3.2	Características del cultivo de Carpa Roja (<i>Cyprinus carpio</i>)	50
2.3.3	Características del cultivo de Lechuga Crespa (<i>Lactuca sativa</i>)	51
2.3.4	Características de Biofloc	52
2.3.5	Instrumentación, sensores, actuadores y controladores	53
2.3.6	Diseño y construcción de los nodos	56
2.3.7	Ensayo, recolección y análisis de datos	56
2.4	Resultados y discusión	58
2.4.1	Características del sistema acuapónico	58
2.4.2	Diagrama P&ID	61
2.4.3	Diseño y construcción del nodo central	64
2.4.4	Diseño y construcción del nodo periférico	71
2.4.5	Adquisición de datos sistema automatizado	74
2.5	Conclusiones	84
2.6	Referencias.....	85
3.	Evaluación del rendimiento de biomasa de Lechuga crespa (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada en sistemas de producción acuapónica NFT automatizada y sistemas tradicionales de siembra en suelo.....	91
3.1	Resumen	91
3.2	Introducción	92
3.3	Materiales y métodos	93
3.3.1	Material biológico	93
3.3.2	Sistema acuapónico NFT automatizado	94
3.3.3	Ciclos de cultivo	95
3.3.4	Registro y análisis de datos.....	97
3.4	Resultados y discusión	98
3.4.1	Levantamiento y análisis de la información - Sensores	98
3.4.2	Levantamiento y análisis de la información – Biomasa plantas	114
3.5	Conclusiones	121
3.6	Referencias.....	122
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	125
4.1	Conclusiones	125
4.2	Recomendaciones	126
5.	Anexos	
5.1	Anexo a. Programación del Nodo Central (LADDER).....	127
5.2	Anexo b. Programación del Nodo Periférico (ARDUINO).....	137

Lista de figuras

	Pág.
Figure 1-1. Numero de publicaciones en hidroponía, acuicultura y acuaponía (de 1978 a 2015).....	9
Figure 1-2. Diagrama Ishikawa para revisión sistemática en acuaponía.....	12
Figure 1-3. Cantidad de publicaciones en cada estadio de la revisión.....	15
Figure 1-4. Cantidad de publicaciones por año	16
Figure 1-5. Publicaciones por área de estudio.....	16
Figure 1-6. Enfoque de las publicaciones seleccionadas para la revisión.....	17
Figure 1-7. Sistema hidropónico NFT	19
Figure 1-8. Sistema hidropónico de raíz flotante.....	19
Figure 1-9. Sistema hidropónico con lecho de sustrato	19
Figure 1-10. Sistemas hidropónicos en acuaponía	20
Figure 1-11. Especies de plantas en acuaponía	22
Figure 1-12. Distribución de las publicaciones que implementan una o más especies de plantas en acuaponía	23
Figure 1-13. Sistema SRAPS	25
Figure 1-14. Sistema DRAPS.....	25
Figure 1-15. Especies acuáticas en acuaponía	27
Figure 1-16. Sensores y parámetros encontrados en la literatura.....	32
Figure 1-17. Herramientas para mantener niveles óptimos de ambiente, calidad de agua, nutrientes y suplementos.....	33
Figure 1-18. Circuito electrónico para la medición de luz, flujo de agua y temperatura en sistemas acuapónicos	35
Figure 1-19. Diagrama Ishikawa actualizado	36
Figure 2-1. Distribución del lote de control de cultivo en suelo	56
Figure 2-2. Distribución del lote del sistema acuapónico	57
Figure 2-3. Sistema acuapónico SENA CBA.	59
Figure 2-4. Plano tanque acuícola.....	60
Figure 2-5. Sistema de tuberías hidropónicas NFT.....	61
Figure 2-6. Diagrama P&ID del sistema acuapónico del SENA CBA	62
Figure 2-7. Diagrama P&ID propuesto para el sistema acuapónico del SENA CBA	63
Figure 2-8. Diagrama eléctrico del nodo central	64
Figure 2-9. (a) Vista frontal del panel del nodo central; (b) Vista posterior de la puerta del panel del nodo central; (c) Vista interna del panel del nodo central	65
Figure 2-10. Graficet del programa de control	66
Figure 2-11. Bloque PID del controlador Xinje.....	68

Figure 2-12. (a) Pantalla principal; (b) Vista general; (c) Vista sensores; (d) Control manual; (e) Control ciclado; (f) Gráficos, (g) Guardar datos, (h) Alarmas.	69
Figure 2-13. Diagrama eléctrico del nodo periférico	71
Figure 2-14. Vista interna del gabinete del nodo periférico	72
Figure 2-15. Código para el registro MODBUS.	73
Figure 2-16. pH diario – ensayo 1	74
Figure 2-17. pH semanal – ensayo 1	74
Figure 2-18. Porcentaje de distribución en los rangos de pH	75
Figure 2-19. Oxígeno disuelto diario – ensayo 1	76
Figure 2-20. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 1	76
Figure 2-21. Porcentaje de distribución en los rangos de oxígeno disuelto	77
Figure 2-22. Temperatura diaria – ensayo 1	78
Figure 2-23. Temperatura semanal – ensayo 1	78
Figure 2-24. Porcentaje de distribución en los rangos de temperatura	79
Figure 2-25. Turbidez diaria – ensayo 1	80
Figure 2-26. Turbidez semanal – ensayo 1	80
Figure 2-27. Altura promedio – ensayo 1	82
Figure 2-28. Cantidad de hojas – ensayo 1	84
Figure 3-1. Sistema acuapónico SENA CBA.	94
Figure 3-2. Configuración del modo de control – HMI sistema automatizado	95
Figure 3-3. Distribución del lote de control de cultivo en suelo	96
Figure 3-4. Distribución del lote del sistema acuapónico	96
Figure 3-5. pH diario – ensayo 1	99
Figure 3-6. pH semanal – ensayo 1	99
Figure 3-7. pH diario – ensayo 2	100
Figure 3-8. pH semanal – ensayo 2	100
Figure 3-9. pH diario – ensayo 3	101
Figure 3-10. pH semanal – ensayo 3	101
Figure 3-11. Porcentaje de distribución en los rangos de pH	102
Figure 3-12. Oxígeno disuelto diario – ensayo 1	103
Figure 3-13. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 1	103
Figure 3-14. Oxígeno disuelto diario – ensayo 2	104
Figure 3-15. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 2	105
Figure 3-16. Oxígeno disuelto diario – ensayo 3	105
Figure 3-17. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 3	106
Figure 3-18. Porcentaje de distribución en los rangos de oxígeno disuelto	106
Figure 3-19. Temperatura diaria – ensayo 1	107
Figure 3-20. Temperatura semanal – ensayo 1	108
Figure 3-21. Temperatura diaria – ensayo 2	109
Figure 3-22. Temperatura semanal – ensayo 2	109
Figure 3-23. Temperatura diaria – ensayo 3	109
Figure 3-24. Temperatura semanal – ensayo 3	110
Figure 3-25. Porcentaje de distribución en los rangos de temperatura	111
Figure 3-26. Turbidez diaria – ensayo 1	112

Figure 3-27. Turbidez semanal – ensayo 1.....	112
Figure 3-28. Turbidez diaria – ensayo 2	113
Figure 3-29. Turbidez semanal – ensayo 2.....	114
Figure 3-30. Altura promedio – ensayo 1.....	117
Figure 3-31. Altura promedio – ensayo 2.....	117
Figure 3-32. Altura promedio – ensayo 3.....	118
Figure 3-33. Cantidad de hojas – ensayo 1	119
Figure 3-34. Cantidad de hojas – ensayo 2	120
Figure 3-35. Cantidad de hojas – ensayo 3	120

Lista de tablas

	Pág.
Table 1-1. Criterios de inclusión/exclusión	14
Table 1-2. Conversión de NO ₂ , NO ₃ y NH ₃ en diferentes tipos de sustrato	21
Table 1-3.....	26
Table 1-4. Parámetros en sistemas acuapónicos.....	29
Table 1-5. Flujo y consumo de agua, ratios y producción de peces y plantas	29
Table 2-1. Sensores seleccionados para el sistema acuapónico automatizado	53
Table 2-2. Actuadores seleccionados para el sistema acuapónico automatizado	54
Table 2-3. Controladores y HMI seleccionados para el sistema acuapónico automatizado	55
Table 2-4. Pesos promedio, ganancias y rendimientos de biomasa.....	81
Table 2-5. Altura promedio semanal	82
Table 2-6. Numero de hojas semanales.....	83
Table 3-1. Pesos promedio, ganancias y rendimientos de biomasa en tres ensayos	115
Table 3-2. Altura promedio semanal para los tres ensayos.....	116
Table 3-3. Numero de hojas semanales para los tres ensayos	119

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
<i>V</i>	Voltios	V
<i>mA</i>	Miliamperios	A
<i>Kg</i>	Kilogramos	g
<i>g</i>	Gramos	g
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius	$^{\circ}\text{C}$
<i>l/m</i>	Litros por minuto	l/m
<i>W</i>	Vatios	W
<i>NTU</i>	Nephelometric Turbidity Unit	NTU
<i>m²</i>	Metros cuadrados	m ²

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>CBA</i>	Centro de biotecnología agropecuaria
<i>SENA</i>	Servicio nacional de aprendizaje
<i>NFT</i>	Nutrient Film Technique
<i>SRAPS</i>	Simple recirculating aquaculture system
<i>DRAPS</i>	Double recirculating aquaculture system
<i>RAS</i>	Recirculating aquaculture system
<i>MMAT</i>	Mixed methods appraisal tool
<i>P&ID</i>	Piping and instrumentation diagram
<i>EC</i>	Electroconductividad
<i>IoT</i>	Internet of things
<i>PWM</i>	Pulse width modulation
<i>ppm</i>	Partes por millón
<i>HV</i>	Hand valve
<i>HC</i>	Hand controlled
<i>FC</i>	Flow controller
<i>FT</i>	Flow transmitter
<i>LT</i>	Level transmitter
<i>TT</i>	Temperature transmitter
<i>TK</i>	Tank
<i>UC</i>	Unit Control

Introducción

Actualmente y en consecuencia con la concientización sobre el uso de recursos como el agua y el sustrato, se están empezando a aplicar técnicas de producción agrícola alternativa con el fin de reducir el consumo hídrico y el agotamiento de suelos [1]; Es a partir de estos factores que surge la acuaponía, precisándose como la sinergia sistémica de la acuicultura recirculante, definida como el cultivo de animales acuáticos (peces, moluscos, crustáceos), junto con la hidroponía, establecida como el cultivo de plantas colocando las raíces en soluciones nutritivas [2]. Este sistema se basa en la coexistencia entre los organismos acuícolas, plantas y bacterias nitrificantes, propiciando una integración multitrófica.

Para lograr suplir las necesidades en los puntos críticos de los sistemas acuapónicos es necesario considerar cada uno de los subsistemas que lo integran (filtrado mecánico y biológico, unidades de oxigenación, sedimentación y desinfección), teniendo en cuenta además la influencia del ambiente, el ciclo de los recursos hídricos y sus nutrientes; por lo tanto, para obtener un crecimiento óptimo tanto de peces como de plantas, es vital entender los balances de masa y energía y los intercambios nutricionales y químicos que se dan en el entorno.

Las investigaciones en acuaponía a nivel internacional se han relacionado por ejemplo con el aprovechamiento del agua y los desechos de los peces para mantener un flujo constante de nutrientes [3], es decir generar un sistema en el que los desechos orgánicos producidos por un organismo acuático sean transformados a través de la actuación bacteriana, en nitratos, siendo estos últimos la fuente de alimento para plantas, las cuales consumen, limpian el agua para los peces y actúan como filtro biológico [4]. Diversos trabajos como los presentados por [5] y [6] determinan la relación pez-planta mediante experimentos controlados a lo largo de diferentes ciclos de cultivo, mostrando que, aunque el sistema funciona aún hay deficiencias nutricionales, requiriendo entonces aditamentos

alimenticios. Por otra parte, se puede ver el enfoque hacia el aprovechamiento de los metabolitos nitrogenados [7], implementando mejoras en el sistema para hacerlo más rentable en estadios tempranos de plantas (plántulas), observando el rendimiento de estas al ser trasplantadas a suelo, obteniendo como resultado una mayor eficiencia en comparación con plantas que llevan todo su crecimiento únicamente en suelo.

Un complemento que ya se ha ido adecuando a los requerimientos de la agricultura es la instrumentación en la producción de los cultivos. En Sudamérica al año 2016 se habían desarrollado más de 1080 investigaciones, proyectos y artículos, de países como Perú [8], Ecuador [9] y Argentina [10]. Las instituciones universitarias abogan por hacer estudios para fortalecer sus potencialidades, con el desarrollo de sistemas automatizados capaces de interpretar señales, tanto al interior como en el exterior de los sistemas para lograr hacer un control óptimo en diferentes subsistemas, ya sean de riego, ventilación, dosificación, temperatura, entre otros.

Como ya se ha visto a lo largo de los antecedentes, e identificando las problemáticas en sistemas acuapónicos tradicionales como el encontrado en el Centro de Biotecnología Agropecuaria CBA del SENA Mosquera: la estandarización de los ciclos de cultivo y el levantamiento de datos con el fin de analizar de rangos óptimos para el manejo de pH, oxígeno disuelto, temperatura y turbidez, se empieza a identificar la necesidad de la modelación, instrumentación y control para entender y aprovechar al máximo la sinergia producida por cada uno de sus elementos.

Para dar solución a lo anteriormente nombrado, se plantea la identificación de las variables que intervienen en el proceso, continuando con las limitaciones de operación como lo son espacio y actuadores, y concluyendo en una integración de los diferentes modelos-bloques, logrando observar el comportamiento a lo largo del tiempo y así generar un reporte que en un futuro permita la generación de un estándar para operar el sistema, maximizando la producción, reduciendo costos hídricos, energéticos y de alimentación.

Con cada una de estas problemáticas, y siguiendo lo dicho al principio de la identificación del problema, se traza una ruta, en la cual se tienen en cuenta las proyecciones de las nuevas tecnologías aplicadas en los sistemas agrícolas, tecnificando los sistemas

acuapónicos y dando una alternativa para suplir de herramientas a los productores agrícolas.

Según lo anterior se plantea la pregunta:

¿En qué medida la automatización de un sistema acuapónico puede aumentar el rendimiento en biomasa de cultivos tanto de plantas como de peces?

A partir de la cual surgen las siguientes preguntas orientadoras:

¿Cómo puede ser modelado un sistema acuapónico?

¿En qué puntos debe ser aplicada la instrumentación en un sistema acuapónico?

¿Qué partes del sistema acuapónico son susceptibles para realizar control?

¿Es más eficiente un sistema acuapónico automatizado comparado con la producción convencional?

Objetivos

Objetivo general

Automatizar y evaluar el comportamiento de la producción de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*) en un sistema acuapónico NFT.

Objetivos específicos

- Generar los modelos biológicos y de control de la dinámica del sistema acuapónico NFT.
- Diseñar e implementar la instrumentación y el control para el sistema acuapónico automatizado.
- Comparar el rendimiento de la Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*) en los sistemas de producción acuapónico automatizado con el sistema tradicional de siembra en suelo.

Referencias

- [1] J. Van Rijn, "Waste treatment in recirculating aquaculture systems," *Aquac. Eng.*, 2013, doi: 10.1016/j.aquaeng.2012.11.010.
- [2] W. Kloas *et al.*, "A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts," *Aquac. Environ. Interact.*, 2015, doi: 10.3354/aei00146.
- [3] J. E. Rakocy, "Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture," in *Aquaculture Production Systems*, 2012.
- [4] C. Maucieri, C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo, and M. Borin, "Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review," *Italian Journal of Agronomy*. 2018, doi: 10.4081/ija.2017.1012.
- [5] S. R. Paudel, "Nitrogen transformation in engineered aquaponics with water celery (*Oenanthe javanica*) and koi carp (*Cyprinus carpio*): Effects of plant to fish biomass ratio," *Aquaculture*, 2020, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.734971.
- [6] A. Endut, A. Jusoh, N. Ali, W. B. Wan Nik, and A. Hassan, "A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 5, pp. 1511–1517, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.040.
- [7] W. A. Lennard and B. V. Leonard, "A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system," *Aquac. Int.*, 2006, doi: 10.1007/s10499-006-9053-2.
- [8] P. M. Cusqui Sandoval and A. J. Oswaldo Israel, "Implementación de un sistema electrónico automatizado para cultivos de invernadero," 2013.
- [9] L. A. López Vargas, "Diseño de un sistema de control de temperatura on/off para aplicaciones en invernadero utilizando energía solar y gas natural," 2011.
- [10] N. B. Iglesias, "Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte – Argentina," 2005.

1. Sistemas Acuapónicos Automatizados, Tecnificados y Tradicionales: Revisión sistemática

1.1 Resumen

La acuaponía es definida como la integración de cultivos hidropónicos en conjunto con sistemas acuícolas recirculantes y bacterias, logrando así una relación sinérgica en donde las aguas residuales producidas por peces son utilizadas para el crecimiento de plantas, luego, en asociación con bacterias nitrificantes se genera un filtro natural para remover nitrógeno, fósforo, amonio, entre otros, controlando la acumulación de desechos de peces. En la actualidad existen diversas áreas de investigación en acuaponía, desde las enfocadas a las técnicas de cultivo en los subsistemas acuícola e hidropónico; pasando por las ciencias aplicadas como el modelamiento en la parte física y química del sistema; llegando a los tipos de acuaponía calificados por su grado de tecnificación; finalizando con las especies cultivadas y los resultados de su interacción. En el presente capítulo se genera una revisión sistemática con el fin de observar el estado actual de los sistemas acuapónicos automatizados, tecnificados y tradicionales llegando a un panorama de la orientación investigativa en este campo. Esta revisión se basa en artículos científicos de cuatro bases de datos, tomados en marzo de 2020, obteniendo 1356 resultados filtrados. A partir de la revisión generó un análisis descriptivo de los artículos, encontrando que las áreas con mayor concentración de publicaciones corresponden a acuicultura, agricultura, ambiente, análisis de aguas, horticultura y electrónica, las especies más trabajadas son lechuga (*Lactuca sativa*) en sistemas hidropónicos NFT y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en sistemas de recirculación SRAPS. Con los resultados obtenidos se construyó un diagrama que consolida las ramas de investigación actuales en acuaponía.

Palabras clave: acuaponía, revisión, modelamiento, automatización, orientación investigativa

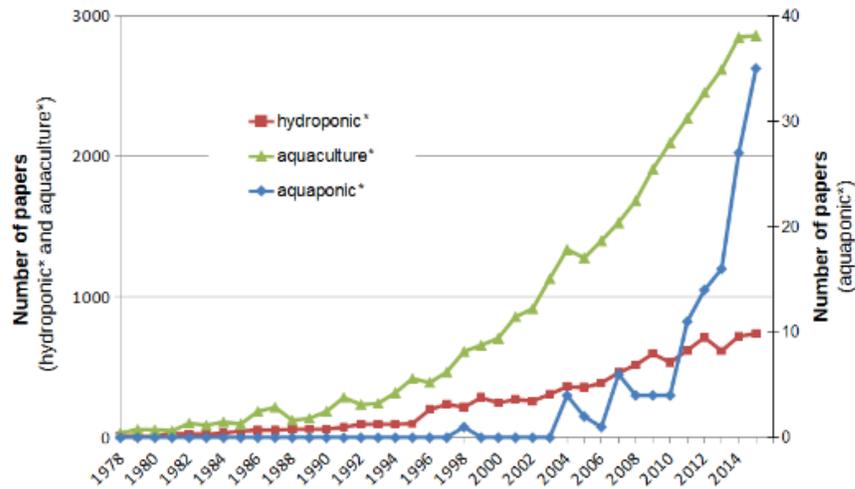
1.2 Introducción

Los sistemas acuapónicos son catalogados como la combinación de dos tecnologías principales: sistemas acuícolas recirculantes (RAS) e hidroponía (producción de plantas en agua, sin sustrato), integradas en un sistema de lazo cerrado [1], incluyendo sistemas secundarios opcionales de filtrado mecánico y biológico, unidades de oxigenación, sedimentación y desinfección [2]. A lo largo del tiempo estos sistemas se han desarrollado con el fin de ofrecer una alternativa innovadora y sostenible para la producción de alimentos [3]; para lograrlo es necesario incluir características que sean capaces de resolver uno de sus mayores retos: regular la concentración de nutrientes y la conversión de amonio a nitrato a través de nitrificación [4], superando a su vez inconvenientes en la sostenibilidad ambiental, y su rendimiento para suplir la demanda bioeconómica [5].

Los inicios de la acuaponía contemporánea se remontan a 1975 en donde un sistema hidropónico de diferentes especies de plantas fue dispuesto en el efluente de tanques de cultivo de bagre, diseñado sin etapa de biofiltrado y pensado como un sistema sin recirculación [6]; más adelante, entre 1977 y 1989, fueron combinados sistemas de producción de peces RAS junto con sistemas hidropónicos, los anteriores sin suplementos nutricionales; posteriormente se complementan los modelos iniciales para formar los primeros sistemas acuapónicos totalmente cerrados o acoplados, incluyendo etapas de biofiltración, sedimentación y nitrificación [1].

A pesar de haber iniciado en 1975, no fue sino hasta 2010 que este campo empezó a tomar mayor relevancia [5]; en la búsqueda de soluciones para contribuir a la producción, reducir desperdicios y renovar procesos productivos, la investigación en acuaponía empezó a diversificarse en aras de contribuir a la reducción de problemas de sustentabilidad en diferentes niveles, urbano/rural, pequeña/gran escala, países desarrollados/en vía de desarrollo [3]. Lo anterior se refleja en el número de publicaciones científicas en hidroponía, acuicultura y acuaponía (Figura 1-1). En la línea azul (acuaponía) se puede ver una tendencia exponencial de crecimiento que inicia en 2004 y tiene su punto de inflexión a partir de 2010.

Figure 1-1. Numero de publicaciones en hidroponía, acuicultura y acuaponía (de 1978 a 2015)



Fuente: [1]

Actualmente los sistemas acuapónicos consisten en el uso de desechos y alimento no consumido por parte de los peces, con el fin de descomponer el amonio y nitrógeno del agua a través de microorganismos [2]. Las bacterias nitrificantes son las encargadas de llevar a cabo la transformación anterior de forma tal que los cultivos de plantas puedan absorber estos y usarlos para su crecimiento [7]. Las plantas realizan un proceso de fijación de nitrógeno en el que producen unión de nitrógeno a compuestos orgánicos [8]. Una vez el agua ha pasado por este medio puede ser usada nuevamente mediante un sistema de circulación, cerrando así el ciclo del nitrógeno por medio de asimilación y absorción y por consiguiente formando un efecto de reciclado de agua que mejora el aprovechamiento de nutrientes.

Para lograr suplir las necesidades en los puntos críticos de los sistemas acuapónicos es necesario considerar no solo cada uno de sus subsistemas sino también la influencia del ambiente, el ciclo de los recursos hídricos y sus nutrientes; por lo tanto, para obtener un crecimiento óptimo tanto de peces como de plantas, es vital entender los balances de masa y energía [9] y los intercambios nutricionales y químicos que se dan en el entorno.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se han ido introduciendo campos investigativos en el área de la acuaponía, desde el estudio de técnicas en el subsistema hidropónico (cultivo de plantas), entre los que se incluyen: Film Nutritivo (NFT) [10], lecho de sustrato [11], raíz flotante (esponja y balsa) [12]; pasando por la evaluación y eficiencia

de los sistemas de recirculación (RAS) [13] y doble recirculación (DRAPS) [14]; llegando al manejo de aguas y residuos [8,14] junto con estudios en micro y macro nutrientes [15] y los efectos de las bacterias en el proceso de descomposición [16]; continuando con el modelamiento en cada uno de los subsistemas, ya sean las interacciones físicas y químicas entre peces, plantas y bacterias [17], los sistemas hídricos e hidráulicos [18], bioclimática [19] y climatología [20]; finalizando con la implementación de instrumentos de medición, actuadores y controladores para monitorear y/o optimizar el sistema acuapónico en alguno de sus puntos críticos [21].

La gran diversidad de líneas se ve reflejada en el crecimiento de artículos científicos, es por esta razón que el objetivo de la siguiente revisión sistemática es reunir información disponible sobre acuaponía y generar un panorama sobre su estado actual y su desarrollo a diferentes niveles tecnológicos.

La revisión sistemática sobre acuaponía fue generada a partir del esquema propuesto por Khan y Petticrew [22], [23], en donde inicialmente se genera una pregunta de investigación relacionada con el tema. A partir de la pregunta se produce un objetivo general en donde se plantea el alcance de la revisión. Posteriormente, se realiza una delimitación del marco de búsqueda en donde se definen los temas a incluir obteniendo una serie de claves de búsqueda que luego fueron introducidas en las bases de datos IEEE xplora, Scopus, Scielo y Science Direct en el mes de marzo de 2020.

Luego son descritos los criterios de inclusión/exclusión, los cuales servirán de filtro inicial para lograr aprovechar la información útil y descartar todos aquellos documentos que no sean relevantes para la revisión, adicionalmente se realiza un segundo filtro con una evaluación de calidad fundamentada en la guía de Mori [24] adaptada de Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT).

Finalmente es realizada una síntesis en donde se analiza estadísticamente la información obtenida, haciendo énfasis en las áreas investigativas actuales y las especies más trabajadas a nivel mundial.

1.3 Materiales y métodos

Metodológicamente, se implementa una revisión sistemática de literatura debido al gran volumen de publicaciones científicas, siendo útil para lograr integrar, evaluar y analizar información disponible sobre determinado tema [23].

Esta revisión se basa en las metodologías generadas por Khan [22] y MMAT, siguiendo la estructura descrita:

1.3.1 Delimitación de la revisión

Inicialmente se define una pregunta de investigación que será la encargada de orientar la búsqueda. A partir de la pregunta se genera un objetivo general en donde se plantea el alcance de la revisión.

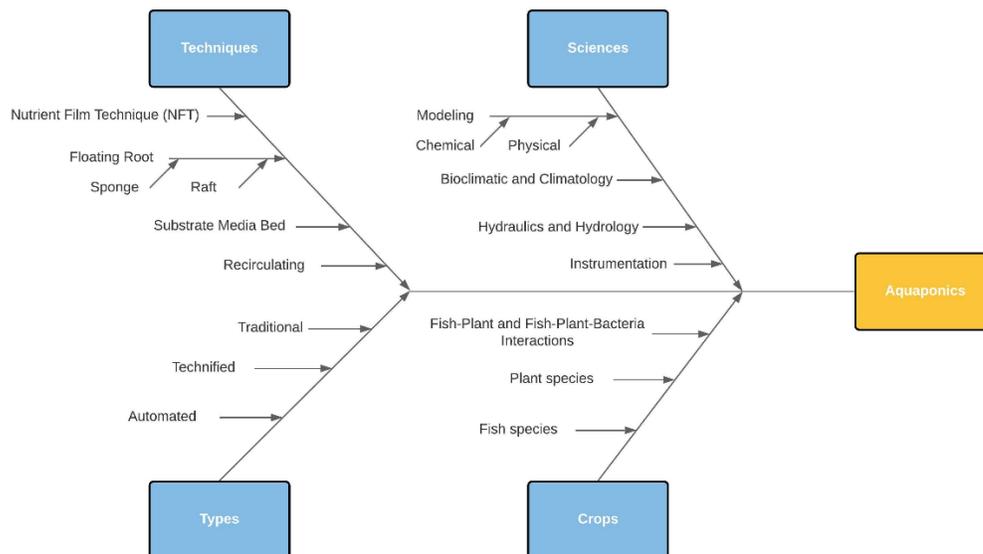
Para la presente revisión la pregunta orientadora es: ¿Cuál es el estado actual de los Sistemas Acuapónicos Automatizados, Tecnificados y Tradicionales y hacia donde están orientados? Permite derivar como principal objetivo reunir la información disponible sobre acuaponía y generar el estado actual sobre su desarrollo a diferentes niveles tecnológicos.

Las bases de datos consultadas corresponden a: IEEE xplora, Scopus, Science Direct y Scielo, además de la fecha de búsqueda, marzo de 2020.

1.3.2 Marco de búsqueda

Posteriormente se realiza una delimitación del marco de búsqueda en donde se definen los temas a incluir y el alcance de la revisión; existen diferentes herramientas para definir los temas, una de estas es el diagrama de Ishikawa (Figura 1-2).

Figure 1-2. Diagrama Ishikawa para revisión sistemática en acuaponía



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se tienen en cuenta las técnicas de acuaponía (usando como base el tipo de sistema hidropónico que lo acompaña, es decir la configuración estructural), en este caso se incluyen: Film Nutritivo (NFT), Lecho de Sustrato, Raíz Flotante y Recirculantes.

A partir de su configuración estructural surge la inclusión de ciencias en acuaponía, en esta sección se ven conceptos aplicados tales como el Modelamiento (relacionado a las interacciones físicas y químicas entre los peces y las plantas, además del sistema hidráulico y climatológico) y la Instrumentación (entendiéndose como todos aquellos sensores y actuadores que pueden ser aplicados a la acuaponía).

Luego son tenidos en cuenta los tipos de acuaponía, el primer bloque derivado de la aplicación de Modelamiento e Instrumentación (junto con controladores), dando como resultado un sistema Automatizado; por otra parte, se observan los sistemas que únicamente cuentan con Instrumentación, midiendo variables pero sin aplicar técnicas de control o también llamados Tecnificados; finalmente se encuentran los sistemas de producción basados en conocimientos y prácticas ancestrales, que han sido desarrollados a través de muchas generaciones, tratados en esta revisión como sistemas Tradicionales.

Finalmente se establecen los cultivos en la acuaponía, determinados por las especies de peces y plantas que han sido cultivadas en este tipo de sistemas, además las interacciones entre estos y las bacterias nitrificantes.

1.3.3 Claves de búsqueda

Las claves de búsqueda fueron generadas para cada una de las secciones, es decir que se plantearon como conceptos para la búsqueda los bloques contenidos el diagrama de Ishikawa, a continuación, se muestran por sección:

- Técnicas: (Aquaponic OR Aquaponics) AND (“Nutrient film technique” OR NFT OR Substrate OR “Substrate bed” OR Soil OR “Floating root” OR Recirculation)
- Ciencias: (Aquaponic OR Aquaponics) AND (Modeling OR Model OR “Mathematical model” OR Instrumentation OR Instrument OR Device OR Sensor OR Actuator OR Electronic OR Electronical)

Aquaponic AND (Model OR “Mathematical model” OR Instrumentation OR Instrument OR Device OR Sensor OR Actuator OR Electronic) *Modificado para Science Direct.

- Tipos: (Aquaponic OR Aquaponics) AND (Automated OR Automation OR Autonomous OR Automatic OR Control OR Smart OR Monitoring OR Technified OR Technical OR Traditional OR Rustic)

Aquaponic AND (Automated OR Automation OR Control OR Smart OR Monitoring OR Technified OR Traditional OR Rustic) *Modificado para Science Direct.

Las claves obtenidas son utilizadas en cada una de las bases de datos establecidas.

1.3.4 Criterios de inclusión/exclusión

Los resultados obtenidos son sometidos a una revisión con respecto al título y resumen teniendo en cuenta los siguientes criterios de inclusión/exclusión (Tabla 1-1).

14 Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

Table 1-1. Criterios de inclusión/exclusión

Inclusión	Exclusión
Artículos que especifiquen explícitamente el tipo de técnica implementada, incluyendo, pero no limitando NFT, Lecho de sustrato, Raíz flotante, Recirculante	Artículos narrativos
Revisiones sistemáticas	Estudios que únicamente tratan sobre hidroponía o acuicultura
Análisis comparativos entre acuaponía y otras técnicas de cultivo	Artículos sin DOI o ISBN
Artículos en inglés	Artículos de índole legislativa
	Estudios de impacto social o económico

Fuente: Elaboración propia

1.3.5 Evaluación de calidad

Mediante la aplicación de la Herramienta de evaluación de métodos mixtos (MMAT) se genera una evaluación aplicada a los artículos científicos que han pasado el filtro de inclusión/exclusión, para esto se califican los artículos siguiendo el esquema:

- ¿Es claro el objetivo?
- ¿Los datos obtenidos permiten resolver el objetivo?
- ¿Los datos obtenidos están completos?
- ¿Las mediciones son apropiadas (tamaño de muestra)?
- ¿La estrategia de muestreo es relevante para resolver el objetivo?
- ¿Las condiciones experimentales son suficientemente explícitas para ser replicadas?
- ¿La interpretación de los resultados está suficientemente sustentada por los datos?

Los artículos evaluados reciben una calificación de 0 a 7 según los criterios anteriores, 0 representa un artículo de calidad baja y 7 un artículo representativo para la revisión. Aquellos con un puntaje menor a 4 son excluidos automáticamente.

1.3.6 Análisis de datos

Con los artículos que han pasado cada uno de los filtros se realiza un análisis cuantitativo para determinar la cantidad de publicaciones por año en total y para cada una de las bases

de datos. Adicionalmente se evalúan las áreas de estudio de las revistas con el fin de obtener las más representativas en la actualidad.

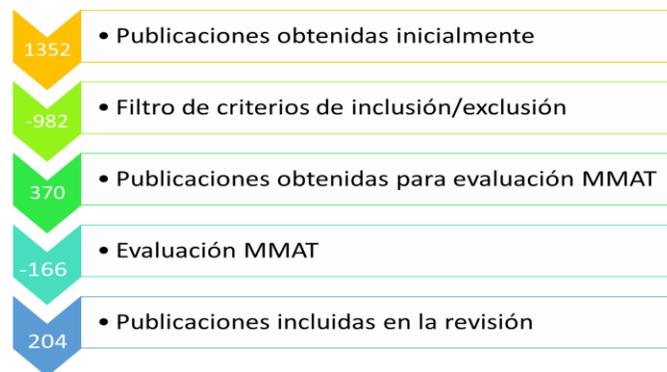
Por otro lado, se sintetizan las especies trabajadas actualmente y las líneas investigativas que no son registradas en el diagrama Ishikawa inicial, modificándolo para que represente la orientación investigativa en sistemas acuapónicos.

1.4 Resultados y discusión

1.4.1 Resultados preliminares

La búsqueda inicial usando cada una de las claves en las cuatro bases de datos, arrojó un total de 1356 documentos los cuales son sometidos a cada una de las etapas de filtrado (Figura 1-3), obteniendo finalmente 204 publicaciones que son utilizadas en la revisión sistemática.

Figure 1-3. Cantidad de publicaciones en cada estadio de la revisión

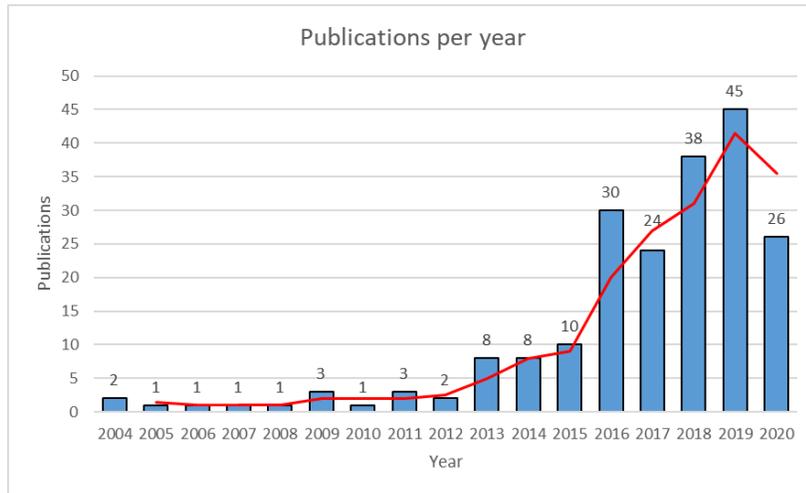


Fuente: Elaboración propia

1.4.2 Análisis bibliométrico

Teniendo en cuenta las publicaciones incluidas se genera una línea de tendencia (Figura 1-4), en esta se observa un crecimiento, similar a lo reportado por [1].

Figure 1-4. Cantidad de publicaciones por año

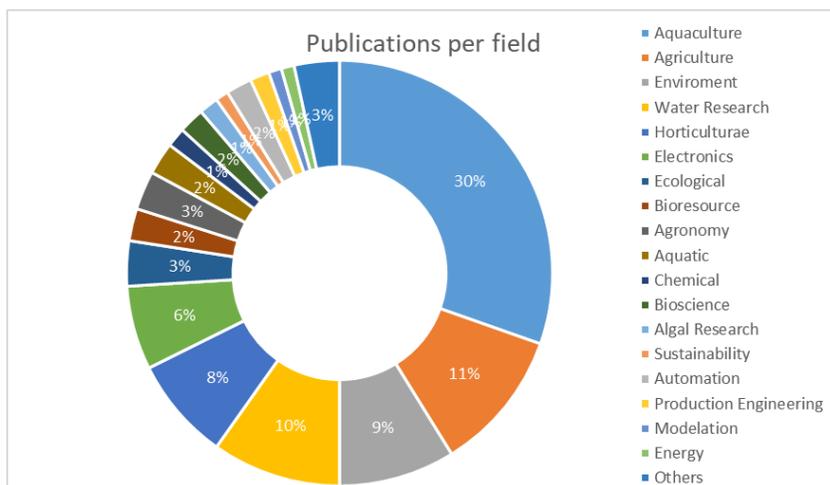


Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la Figura 1-4, el número de publicaciones en acuaponía no fue considerable en las bases de datos hasta el 2012, a partir de este punto se observa un crecimiento sostenido, evidenciando el interés de los investigadores en profundizar y desarrollar diferentes ramas de la acuaponía,

De las publicaciones obtenidas, se organizan según las áreas de estudio (Figura 1-5).

Figure 1-5. Publicaciones por área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Las principales áreas de publicación corresponden a acuicultura, agricultura, ambiente, análisis de aguas, horticultura y electrónica.

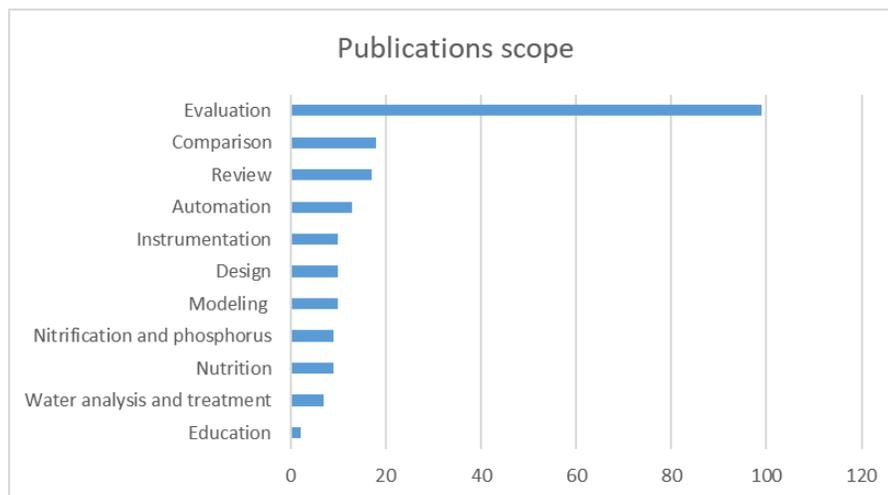
1.4.3 Hallazgos de las publicaciones

A partir de las publicaciones se encontró que 161 (78,92%) corresponden a artículos experimentales, 16 (7,84%) a artículos descriptivos, 13 (6,37%) a artículos con énfasis en simulación, 12 (5,88%) a revisiones y los restantes 2 (0,98%) a capítulos de libro.

Por otra parte, fue posible identificar el enfoque de las publicaciones (Figura 1-6), destacando que 99 de estas corresponden a procedimientos evaluativos en donde se miden: rendimientos de cultivo tanto de peces como de plantas, variaciones de las cargas de agua, oxígeno disuelto, luz y sus efectos en el crecimiento de los cultivos y el ciclo de nutrientes.

De las publicaciones seleccionadas 18 equivalen a estudios comparativos, en estos se confrontan: dos o más tipos de plantas para analizar la transformación de nitrógeno en el agua, diferentes sistemas hidropónicos analizando sus rendimientos, incluyendo también análisis comparativos entre sustratos para el caso de la técnica de lecho de sustrato, finalizando con distintas especies de peces con el fin de analizar sus efluentes y las cargas de potasio, fósforo y nitrógeno.

Figure 1-6. Enfoque de las publicaciones seleccionadas para la revisión



Fuente: Elaboración propia

De otro lado, se tienen 17 publicaciones referentes a revisiones (incluyendo capítulos de libros y artículos descriptivos), en donde se produjeron búsquedas de información generales en cuanto a literatura en acuaponía, también se incluyen temas como la

acuaponía industrial, manejo de agua en sistemas recirculantes, sistemas de nitrificación y su evolución a lo largo del tiempo, además de la introducción del policultivo de peces y plantas, finalizando con la transformación de la acuaponía tradicional hacia la automatización.

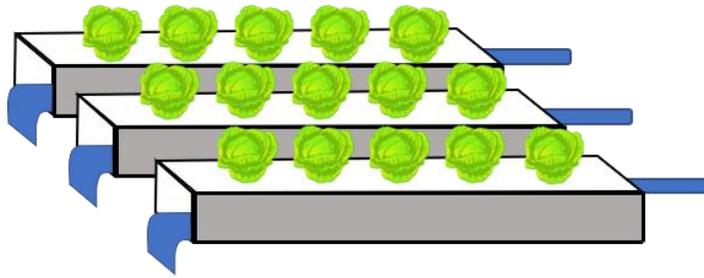
Adicionalmente, se observan 13 publicaciones de automatización y 10 de instrumentación, en donde el principal enfoque se da hacia la implementación de sistemas de medición, notificación y control, ya sea *in situ* o mediante el *Internet de las Cosas (IoT)*; en las publicaciones estos sistemas abarcan la medición de las variables críticas del sistema acuapónico: pH, oxígeno disuelto, conductividad, turbidez, temperatura, amonio y nitrato.

Finalmente, se incluyen otros enfoques investigativos como lo son el diseño de sistemas (en donde se implementan nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia de los sistemas de filtrado, nitrificación y recirculación), el modelamiento (en donde mediante herramientas matemáticas se generan balances de masa y predicciones en los sistemas de nutrientes, nitrificación, ciclo de fósforo, hidrológicos, rendimientos de peces y plantas), nutrición (incluyendo sistemas y ciclos de alimentación para peces y suplementos para plantas), tratamiento de aguas (comprendiéndolo como la adecuación de los efluentes hídricos del sistema con el fin de reducir los impactos ambientales), concluyendo con los sistemas enfocados al ámbito educativo (produciendo sistemas de enseñanza que giran en torno a la acuaponía y la integración multitrófica de especies en un mismo sistema).

1.4.4 Sistemas hidropónicos NFT, raíz flotante y lecho de sustrato

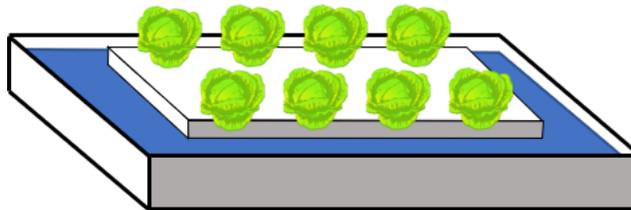
Actualmente los sistemas hidropónicos que acompañan a la acuaponía se dividen en tres grandes grupos:

- Técnica de film nutritivo (NFT) (Figura 1-7), basa su funcionamiento en sistemas de tuberías (comúnmente PVC) que permiten adaptar diferentes especies de plantas con el fin de que sus raíces puedan estar en contacto con el flujo de agua, el cual puede ser constante o intermitente según sea la técnica de control aplicada [25].

Figure 1-7. Sistema hidropónico NFT

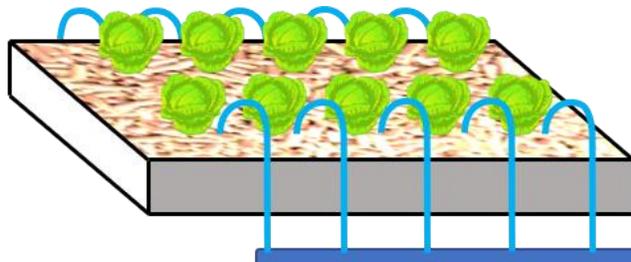
Fuente: Elaboración propia

- Raíz flotante, también conocida como balsa flotante [26], implementa una plataforma sobre la cual son dispuestas las plantas a cultivar (Figura 1-8), normalmente la plataforma se encuentra sobre el agua proveniente de acuaponía en tanques separados o puede estar directamente sobre el cultivo de peces [27].

Figure 1-8. Sistema hidropónico de raíz flotante

Fuente: Elaboración propia

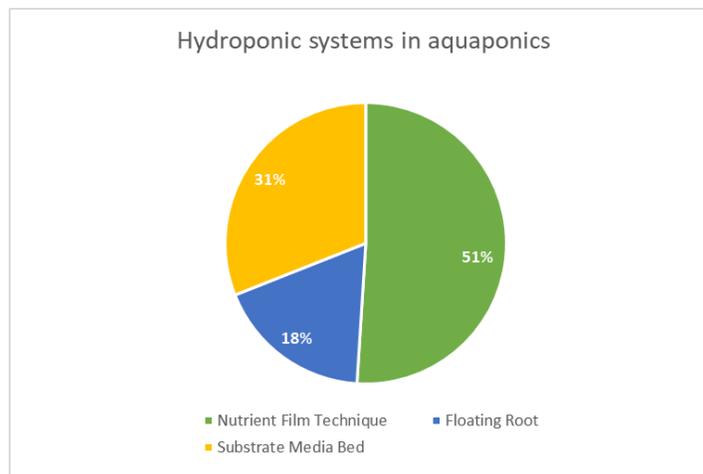
- Lecho de sustrato, en los cuales se maneja cierto volumen de sustrato, asegurando un anclaje por parte de las raíces (Figura 1-9), actuando también como medio de cultivo para microorganismos nitrificantes, el sustrato puede ser sintético, orgánico e inorgánico dependiendo de las necesidades del cultivo [28].

Figure 1-9. Sistema hidropónico con lecho de sustrato

Fuente: Elaboración propia

A partir de las publicaciones de la revisión se encontró que 140 de estas reporta explícitamente el tipo de sistema hidropónico, distribuidas como lo ilustra la Figura 1-10, en donde se muestra que el sistema NFT es el más usado actualmente, seguido de lecho de sustrato y raíz flotante.

Figure 1-10. Sistemas hidropónicos en acuaponía



Fuente: Elaboración propia

La selección del sistema hidropónico se basa en las ventajas conferidas por cada componente y por su impacto en el ciclo de vida del sistema acuapónico, por ende la selección del sistema hidropónico afecta el diseño completo en acuaponía; con un sistema de lecho de sustrato como el reportado por [28], es posible adecuar un sistema de biofiltrado simple ya que el sustrato implementado provee suficiente superficie para el crecimiento de bacterias y a su vez genera filtración mecánica; por otro lado, si se implementa un sistema NFT como el diseñado en [29], los canales o tuberías no permiten una adhesión suficiente para el crecimiento bacteriano, razón por la cual es necesaria una etapa de biofiltro completa.

Diferencias como las mencionadas anteriormente son enunciadas por [10], llevando a cabo análisis comparativos entre NFT, raíz flotante y lecho de sustrato, en las que se destaca el consumo de agua diario, siendo mucho más alto en sistemas de raíz flotante y lecho de sustrato, mientras que se obtienen valores de remoción de nitratos mucho mayores debido al área inundada de sus raíces, lo cual permite una mejor asimilación de nitrato.

Actualmente, se han empezado a implementar sistemas hidropónicos múltiples, [12] evaluó un conjunto de subunidades en las que alterna el uso de sistemas de raíz flotante en conjunto con lecho de sustrato, permitiendo dar una oxigenación mediante aireadores en la base del tanque en el que se encuentran las balsas, mientras en serie camas de lecho de sustrato permiten biofiltrar y a su vez cultivar otras especies de plantas, aprovechando de forma óptima el espacio y mejorando el rendimiento de biomasa en el sistema.

▪ Tipos de sustrato

Los diferentes sustratos implementados en el sistema hidropónico han sido ampliamente evaluados, midiendo el rendimiento de diferentes parámetros físico-químicos. En la Tabla 1-2 se observa la efectividad de algunos sustratos para aumentar o reducir pH, NO₂, NO₃ y NH₃ con respecto al agua efluente de peces:

Table 1-2. Conversión de NO₂, NO₃ y NH₃ en diferentes tipos de sustrato

Sustrato	Amonio	Nitrito	Nitrato	pH	Ref.
Cascarilla de coco	Reducción alta	Sin cambio	Aumento bajo	Aumento bajo	[30]
Fibra de palma	Reducción alta	Reducción baja	Reducción baja	Sin cambio	[31]
Fibra de bígaro	Reducción alta	Reducción baja	Aumento bajo	Aumento bajo	[31]
Grava	Reducción media	Reducción baja	Reducción baja	Aumento bajo	[31]
MIX (Palma, bígaro, grava)	Reducción alta	Reducción baja	Reducción media	Aumento bajo	[31]
Arena	Reducción baja	Reducción baja	Sin cambio	Aumento bajo	[30]
Espuma de poliuretano flexible	Reducción alta	Reducción media	Aumento bajo	No reporta	[32]
Roca triturada	Reducción media	Reducción media	Aumento bajo	No reporta	[32]

Fuente: Elaboración propia

La conversión de compuestos en el lecho de sustrato varía según la especie cultivada, el estado fisiológico de la planta y las bacterias nitrificantes, [33] generó un estudio en donde logró comprobar que las proteínas y aminoácidos liberados durante la germinación son convertidos en amonio, adicionalmente, los solutos generados por las semillas pueden

estimular el crecimiento de organismos fijadores de nitrógeno, aumentando el amonio al inicio del cultivo. Gracias a los efectos de aireación es posible convertir el amonio en nitrito y posteriormente a nitrato para ser consumidos por las plantas, en estadios más avanzados las mediciones en el efluente del lecho de sustrato muestran cantidades menores de nitratos, nitritos y amonio.

▪ **Especies de plantas en acuaponía**

Según las publicaciones evaluadas, se generó un cuadro con las especies de plantas implementadas en sistemas acuapónicos (Figura 1-11):

Figure 1-11. Especies de plantas en acuaponía

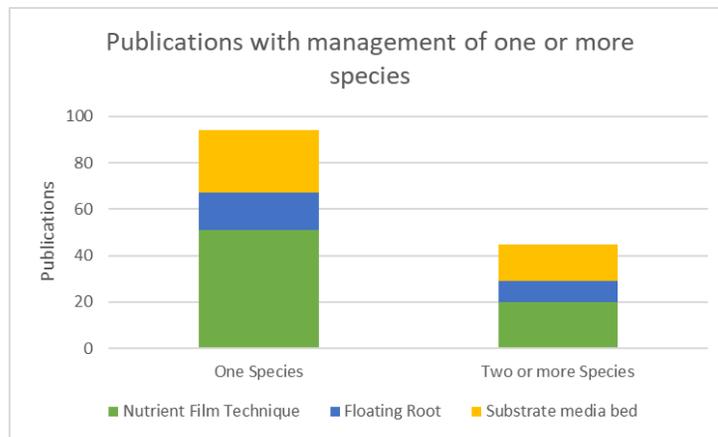


Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de los estudios se implementa lechuga (*Lactuca sativa*), seguida de tomate (*Lycopersicum esculentum*), espinaca de agua (*Ipomea aquatica*) y pak choi (*Brassica chinensis*).

Adicionalmente, se observa la implementación de dos o más especies de plantas ya sea con el fin de generar análisis comparativos o para complementar el proceso de cultivo de plantas en hidroponía usando múltiples técnicas (Figura 1-12).

Figure 1-12. Distribución de las publicaciones que implementan una o más especies de plantas en acuaponía



Fuente: Elaboración propia

1.4.5 Sistemas recirculantes

El flujo de agua en los sistemas acuícolas es una variable que afecta directamente las concentraciones de desechos producidos por peces, además de la saturación de oxígeno, turbidez, pH, alcalinidad y temperatura [34]. En acuaponía el flujo tiene una influencia sobre el tiempo de contacto que logran alcanzar los microorganismos o bacterias nitrificantes y las raíces de las plantas, jugando un papel fundamental en el aprovechamiento y transformación de nutrientes.

En estudios realizados por [35] se demuestra que la variación de la carga de agua afecta no solo los costos energéticos, sino también los rendimientos de peces y plantas, así como la remoción de nutrientes como fósforo, nitratos, potasio y el balance de oxígeno disuelto a niveles óptimos para el sistema. Estos estudios encontraron que a una tasa constante

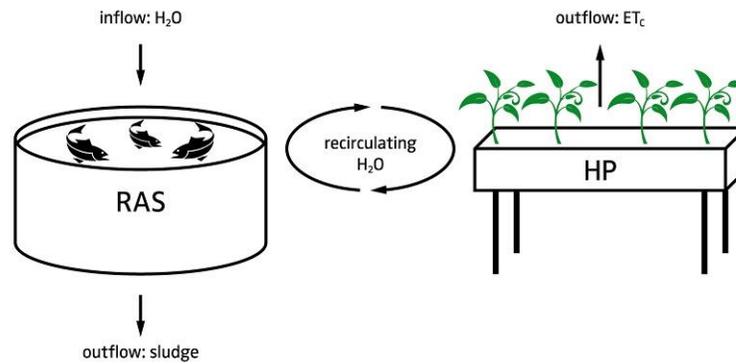
de 1,5 l/min cultivos de carpa (*Cyprinus carpio*) y espinaca (*Beta vulgaris*) presentaron mejor crecimiento y aumento de peso respectivamente; por otra parte [36] encontró tasas similares de flujo de agua, reportando que a 1,6 l/min cultivos de bagre africano (*Clarias glariepinus*) y espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) dan mejor rendimiento que a flujos más bajos, demostrado en [26], enunciando que entre más bajas las tasas de flujo, existe menos capacidad por parte de las plantas para asimilar nitrógeno, fósforo y potasio.

Por otra parte, es importante destacar los tiempos de ciclado de agua, lo anterior teniendo en cuenta ciclos de flujo continuos e intermitentes, según lo comprueba [35] en un estudio comparativo, se utilizan tiempos de recirculación continuos de 11, 13 y 24 horas, tomando muestras de agua en los efluentes de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) (entrada al sistema hidropónico) y de Lechuga (*Lactuca sativa*) (a lo largo del sistema hidropónico), midiendo temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, pH, nitratos, nitritos y amonio, incluyendo crecimiento de plantas. Se encontró que es posible obtener una asimilación de nutrientes parecida en periodos de 11 y 13 horas sin importar si se realizan durante el día o la noche, en contraste, el estudio realizado por [37] muestra que ciclos intermitentes de 10min de encendido y 50min de apagado en cultivos de carpa y menta (*Mentha arvensis*) pueden mantener el equilibrio de temperatura y oxígeno disuelto en el agua, a costa de sufrir interrupciones en el proceso de nitrificación y por ende rendimientos bajos en los cultivos.

Actualmente, en los sistemas recirculantes existen dos clasificaciones generales:

- Sistemas acuapónicos de recirculación simple (SRAPS), las aguas residuales de la producción de peces pasan a través de un filtro mecánico y luego al sistema hidropónico [38], el agua es limpiada por plantas y bacterias que viven en la zona de raíces (o en algunos casos en sub sistemas separados) para luego ser recirculada al tanque de peces (Figura 1-13).

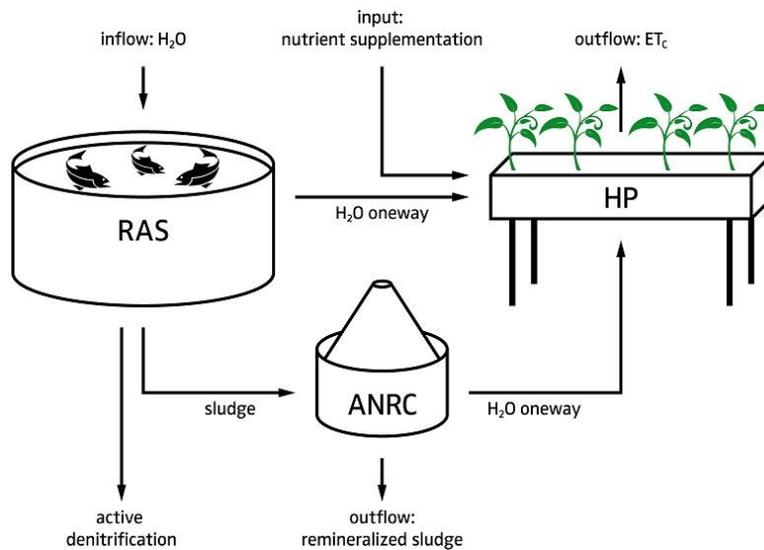
Figure 1-13. Sistema SRAPS



Fuente: [39]

- Sistemas acuapónicos de doble recirculación (DRAPS), también conocidos como sistemas RAS desacoplados, las aguas residuales de la producción de peces y plantas se mantienen en ciclos diferentes (Figura 1-14), permitiendo operar de forma independiente, ajustando parámetros individuales en cada sistema [34].

Figure 1-14. Sistema DRAPS



Fuente: [39]

En la Tabla 1-3 se puede encontrar una síntesis tomada de [38] en donde se evalúan ventajas y desventajas de cada técnica de recirculación:

Table 1-3.

	SRAPS	DRAPS
Ventajas	<p>Documentación completa de la producción combinada de lechuga y tilapia</p> <p>Adaptada para espacios, reducidos, pequeños productores, hobby y educación</p>	<p>Separación de producción de peces y plantas, permitiendo producción en óptimas condiciones (pH, nutrientes, calidad de agua independientes en cada sistema)</p> <p>Medidas optimizadas en los ciclos de las plantas no afecta el ciclo de peces</p> <p>Permite cultivo intensivo a gran escala</p>
Desventajas	<p>Condiciones bajas para los requerimientos de pH, nutrientes y en general la calidad de agua de las especies integradas (peces, plantas y bacterias)</p> <p>Baja producción en el sub sistema hidropónico</p> <p>Falta de investigación para comportamientos a largo plazo</p>	<p>No posee una construcción optimizada para la relación de plantas con respecto al efluente de peces</p> <p>Poca investigación</p>

Fuente: [38]

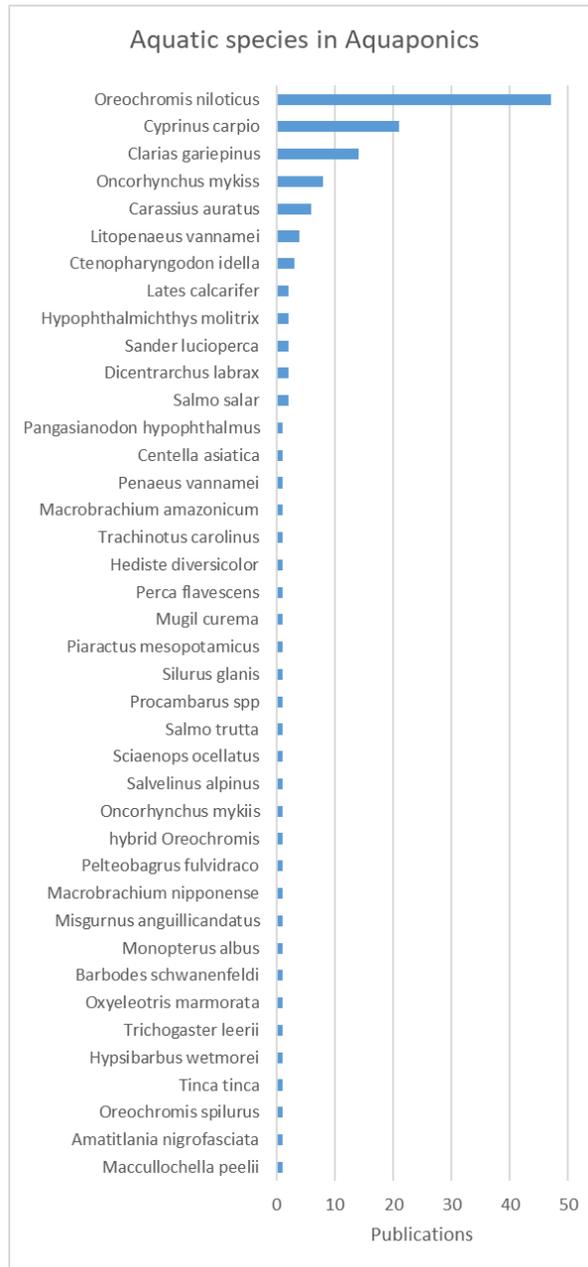
De los estudios evaluados en la revisión se obtuvo que 159 (92%) implementan sistemas RAS/SRAPS mientras que apenas 14 (8%) corresponden a DRAPS/RAS desacoplado, aunque es importante recalcar que de los estudios con sistemas de recirculación simple en su mayoría corresponden a publicaciones con más de 5 años de antigüedad mientras que los de doble recirculación en su totalidad están a partir del 2015, mostrándose como una tecnología en auge.

[40] en su investigación sobre sistemas desacoplados genera un análisis comparativo a lo largo de 5 meses con un sistema RAS y otro DRAPS con cuatro tanques de peces (*Oreochromis niloticus*) y tres tuberías NFT con tomate (*Solanum lycopersicum*), encontrando que existe un mejor rendimiento en sistemas DRAPS (produciendo 8,2 kg de tomate) debido a la regulación independiente de pH y a la adaptación dinámica de nutrientes haciendo uso de suplementos; adicionalmente, muestra pruebas de otras investigaciones con sistemas desacoplados en los que obtienen producciones de 8,89 kg de tomate a comparación de 6,1 kg producidos en hidroponía.

▪ **Especies acuáticas en acuaponía**

Teniendo en cuenta las especies acuáticas reportadas en las publicaciones, se construyó la Figura 1-15:

Figure 1-15. Especies acuáticas en acuaponía



Fuente: Elaboración propia

Dentro de las especies más trabajadas en acuaponía se encuentran la tilapia (*Oreochromis niloticus*), carpa (*Cyprinus carpio*), bagre africano (*Clarias gariepinus*) y trucha arcoíris

(*Oncorhynchus mykiss*), se destaca la implementación de crustáceos de agua dulce y salada como el camarón patiblanco (*Litopenaeus vannamei*) y también especies ornamentales como el pez dorado (*Carassius auratus*).

Es importante resaltar la creciente significancia del estudio de interacciones multi tróficas generadas en los cultivos acuapónicos. [41] Presenta un análisis del balance de carbón de los sistemas integrados multi tróficos (IMTA) en estanques de tierra con cultivos de langostino del río Amazonas (*Macrobrachium amazonicum*) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), donde establecieron un secuestro de carbono dentro de los estanques del agua de entrada que fue similar a 1 tonelada por hectárea y con una atmósfera similar a 0.1-0.3 toneladas por hectárea. El carbono acumulado en el sedimento fue de 3,5 toneladas por hectárea. Por lo tanto, concluyeron que la acuicultura integrada en estanques de tierra estancados atrapa grandes cantidades de carbono del agua rica en nutrientes y de la atmósfera.

Así mismo, [42] estudio el rendimiento de la producción de Tilapia genéticamente mejorada (GIFT, *Oreochromis niloticus*) y camarones de agua dulce (*Macrobrachium rosenbergii*) en sistemas basados en perifitón en estanques de agricultores en Mymensingh, Bangladesh. Esta combinación también dio el mayor rendimiento económico. Por lo tanto, se demostró que una proporción de población del 75% de peces más el 25% de camarones con una densidad total de 20000 unidades por hectárea es la mejor opción en proporción de población en términos de producción y economía de peces para un sistema de policultivo basado en perifitón.

1.4.6 Rendimiento y uso de agua

Teniendo en cuenta la cantidad de especies acuáticas y de plantas existe una gran variedad de combinaciones para sistemas acuapónicos, es por la razón anterior que se pueden encontrar variaciones en cuanto a las condiciones óptimas de rendimiento [43].

Generalmente, en acuaponía el rendimiento depende de la capacidad que tienen cada uno de los sistemas para producir, transformar y consumir nutrientes [44], incluyendo el ajuste de variables como pH, oxígeno disuelto y temperatura. [26] en su revisión sobre sistemas

acuapónicos encontró un rango de valores que sirven para el sistema multitrófico pez-planta-bacteria (Tabla 1-4); manteniendo estos valores en cada una de las etapas del sistema acuapónico es posible producir rendimientos óptimos.

Table 1-4. Parámetros en sistemas acuapónicos

Parámetro	Peces	Plantas	Bacterias
pH	6-8	6-7	5,5-7
Oxígeno disuelto (ppm)	3-9	3-5	4-7
Temperatura (°C)	15-30	17-25	15-25
Electro conductividad (uS/cm)	100-2000	-	-
Intensidad de luz (PPFD)	-	600-900	-

Fuente: Adaptado de [21,26]

A partir de las publicaciones revisadas se construyó la Tabla 1-5, en donde se observan las combinaciones de especies más utilizadas junto con el tipo de sistema hidropónico, los rendimientos reportados y las proporciones pez-planta recomendadas por los autores.

Table 1-5. Flujo y consumo de agua, ratios y producción de peces y plantas

Sistema hidropónico	Especie acuática	Especie plante	Flujo de agua	Consumo de agua (%)	Ratio (Planta por kg de pez)	Producción acuícola (kg/m ³)	Producción peces (kg/m ²)	Ref
Raíz flotante	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	<i>Lactuca sativa</i>	Continuo 180 l/h	NR	10,3	9,5	0,45	[28]
Raíz flotante	<i>Cyprinus carpio</i>	<i>Lactuca sativa</i>	Continuo (por 12h) 120 l/h	1,37	4,8	6,88	3,88	[43]
Raíz flotante	<i>Cyprinus carpio</i>	<i>Cichorium intybus</i>	Continuo (por 12h) 120 l/h	1,37	3,6	6,88	0,91	[43]
Raíz flotante	<i>Cyprinus carpio</i>	<i>Beta vulgaris</i>	Continuo (por 12h) 120 l/h	1,37	4	6,88	5,33	[43]
Raíz flotante	<i>Monopterus albus</i>	<i>Nasturtium officinale</i>	Continuo (por 24h) 180 l/h	14	5,3	53,57	15	[45]
Raíz flotante	<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Lactuca sativa</i>	Continuo (por 24 h)	3,6	3,6	30	2,4	[46]
Raíz flotante	<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	Continuo (por 24 h)	3,6	2,8	30	1,3	[46]
NFT	<i>Salmo trutta</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	DNR	DNR	30	1,58	3,56	[47]
NFT	<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Origanum majorana</i>	DNR	DNR	12	4,31	3,7	[48]
NFT	<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	DNR	DNR	12	4,31	5,2	[48]

30 Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

NFT	<i>Oreochromis mossambicus</i>	<i>Oenanthe javanica</i>	Continuo (por 24h) 50 l/h	DNR	3	35,56	2,38	[49]
NFT	<i>Carassius auratus</i>	<i>Myriophyllum Spicatum</i>	Continuo (por 24h) 50 l/h	DNR	24	4,49	7,04	[49]
Lecho de sustrato	<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Amaranthus hybridus</i>	Intermitente (por 1,5 h) 300 l/h	DNR	0,76	5,62	2,58	[50]
Lecho de sustrato	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	<i>Lactuca sativa</i>	Continuo 180l/h	DNR	10,3	9,5	0,45	[28]
Lecho de sustrato	<i>Carassius auratus</i>	<i>Ocimum basilicum</i>	DNR	DNR	0,15	5,36	DNR	[51]
Lecho de sustrato	<i>Oreochromis mossambicus</i>	<i>Oenanthe javanica</i>	Continuo (por 24h) 50 l/h	DNR	3	35,56	2,65	[49]
Lecho de sustrato	<i>Carassius auratus</i>	<i>Myriophyllum Spicatum</i>	Continuo (por 24h) 50 l/h	DNR	24	4,49	7,87	[49]
Lecho de sustrato	<i>Macrobrachium amazonicum</i>	<i>Lactuca sativa</i>	DNR	DNR	1,6	4,68	3,8	[52]

Fuente: Adaptado de [28,41,43,44,45,46,47,48,49,50]

El flujo de agua generalmente es continuo, aunque la velocidad de circulación varía dependiendo de las dimensiones específicas de cada sistema [50], ya que según estas el consumo de alimento y la producción de deshechos pueden cambiar.

Dependiendo el dimensionamiento del sistema acuapónico, se eligen diferentes proporciones planta-pece [49], como ocurre en muchos casos los sistemas acuapónicos surgen de proyectos que buscan aprovechar sistemas acuícolas ya establecidos, es por esto que el subsistema hidropónico en ocasiones no sigue las recomendaciones para implementar la cantidad adecuada de plantas por kilogramo de pez. Es importante tener en cuenta que al manejar ciclos de cultivo diferentes una sola siembra de especies acuícolas puede representar un número diferente para cosechas de plantas, [48] reportó que para el cultivo de albahaca se lograron generar 3 recolecciones a lo largo del ciclo de tilapia.

Otro factor que genera diferencias entre las producciones tanto de peces como de plantas, reside en la densidad de siembra, [52] en su evaluación sobre el uso de diferentes densidades de camarón, encontró que existe una correlación entre esta con respecto a la ganancia de masa y la nutrición de lechugas, lo anterior debido a las bajas concentraciones de nutrientes en el efluente del tanque acuícola, para lograr compensarlo, los autores proponen el uso de suplementos a bajas densidades.

El consumo de agua, aunque en muchas de las publicaciones no se mide, juega un papel fundamental ya que en acuaponía se requieren cantidades de agua de buena calidad y se producen efluentes con descargas de nutrientes que afectan la degradación ambiental, según [26], el intercambio de agua es un método efectivo para mantener buena calidad de agua en granjas acuapónicas, la tasa de intercambio puede llevar a variar de 250% hasta 10% de agua al día; las pérdidas de agua son causadas por remoción de desechos, evaporación, evapotranspiración, salpicaduras de peces durante la alimentación, entre otros [53].

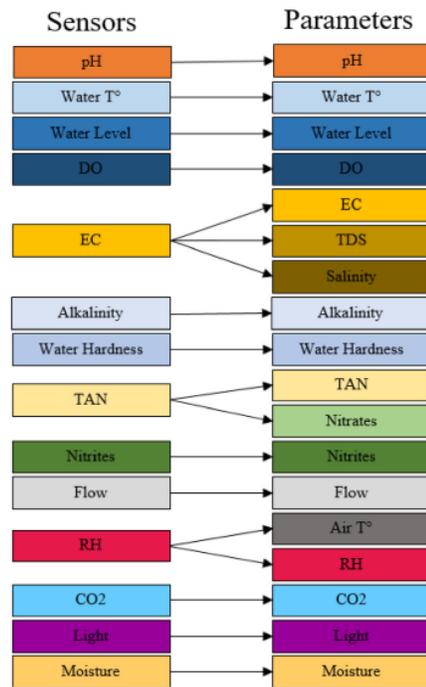
Para llevar al máximo el rendimiento en sistemas acuapónicos, debe producirse un flujo constante de desechos diariamente [35]. Como lo recomiendan en la mayoría de las publicaciones, la recirculación es sugerida en un rango de 0.8 l/min a 8 l/min, haciendo de 2,3 a 18 ciclados en el tanque de peces, dando la posibilidad de maximizar el rendimiento en términos de crecimiento de peces, plantas y remoción de nutrientes.

1.4.7 Instrumentación y automatización en acuaponía

El diseño y manejo de sistemas acuapónicos resulta ser un reto complejo cuando se trata de alcanzar cultivos de alto rendimiento y calidad. Gracias a la introducción de herramientas tecnológicas existe la posibilidad de elaborar un control de procesos con parámetros de accesibilidad y conectividad.

Desde hace aproximadamente 3 años, ha incrementado la investigación sobre sensores, actuadores, controladores y sistemas del *Internet de las Cosas (IoT)* [54], la principal característica de esta orientación investigativa es monitorear y controlar parámetros en puntos críticos del sistema, por ejemplo, la implementación de diferentes técnicas para detectar niveles de pH, ya sea con medidores colorimétricos, sensores digitales con pantallas LCD o sensores análogos con transmisión de datos.

Figure 1-16. Sensores y parámetros encontrados en la literatura

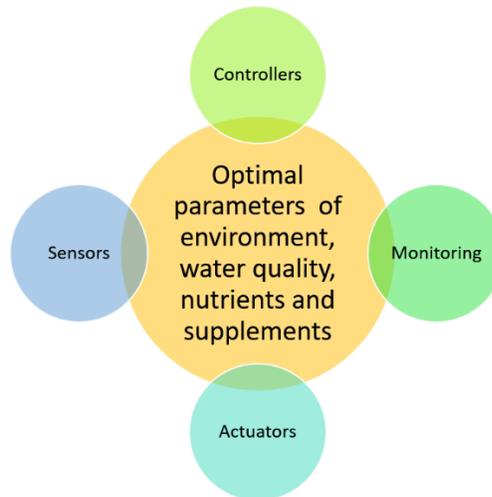


Fuente: [21]

[21] realizó un cuadro en el cual se pueden ver los tipos de sensores implementados en acuaponía y sus funciones en cada subsistema (Figura 1-16).

Actualmente existen cuatro puntos clave que aplican para los subsistemas de peces, plantas y bacterias (Figura 1-17), en conjunto con el modelamiento de sistemas, entendiendo cada una de sus partes, el intercambio de nutrientes y los requerimientos para un crecimiento balanceado entre las especies, es posible realizar un acercamiento en automatización y control:

Figure 1-17. Herramientas para mantener niveles óptimos de ambiente, calidad de agua, nutrientes y suplementos.



Fuente: Elaboración propia

Considerada como la matriz más importante en los procesos acuapónicos, el agua resulta ser uno de los puntos determinantes a la hora de producir alimentos de calidad. Para asegurar estándares que cumplan con los requerimientos de la industria alimenticia es necesario mantener los niveles correctos de nutrientes, pH, temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, conductividad eléctrica, turbidez.

Trabajos como [55], implementan sensores de nivel de agua con el fin de monitorear el tanque de peces y emitir alertas en caso de que haga falta abrir o cerrar válvulas para realizar labores de recirculación; sensores de temperatura DS18B20 sumergibles con la capacidad de medir hasta 125°C, recubiertos con acero inoxidable que mediante programación leen y envían datos a controladores como Arduino comparando con referencias o set points, enviando señales a calefactores de agua para aumentar o disminuir la temperatura; sondas de pH encargadas de medir iones de hidrogeno para determinar la acidez o alcalinidad del agua, alertando al usuario sobre la calidad del entorno de los peces y plantas.

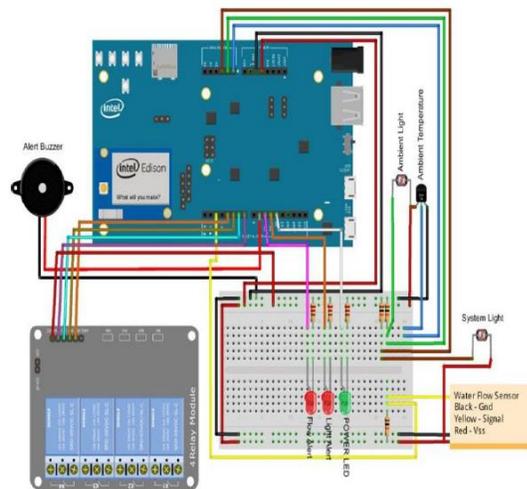
Hay una gran relación entre temperatura y oxígeno disuelto, a medida que el agua se calienta esta tiende a retener menos oxígeno, por otro lado, mientras los peces se alimentan esta puede reducirse, surgiendo la necesidad de compensarlo mediante métodos de oxigenación como caídas de agua o aireadores. Aunque el OD es una variable muy importante es poco reportada en investigaciones debido al alto costo de sensores, en

el caso de [56] se presenta la utilización de sondas Atlas DO distribuidas en nodos (comunicando diferentes estaciones) con conexión TCP/IP a un controlador Raspberry Pi el cual lee e interpreta la señal para controlar aireadores según sea requerido.

La electro conductividad en acuaponía se encuentra relacionada con la salinidad en el agua, para el caso de los peces representa un elemento importante ya que dependiendo de sus valores esta puede encontrarse más limpia o con polución [21]. Valores de electro conductividad estables y en rangos óptimos (entre 100uS a 2000uS) permiten a los peces mantener el balance osmótico; en el sistema de plantas, según lo reportado por [57] en sus mediciones con sensores EC/pH de HANNA Instruments, altos niveles de electro conductividad en soluciones nutrientes para albahaca (*Ocimum basilicum L.*), col (*Brassica oleracea L.*), chile (*Capsicum annuum L.*), y tomate cherry (*Solanum lycopersicum L.*) permiten obtener hojas más verdes y con alturas mayores a comparación de fertilizantes con bajos niveles.

En sistemas acuapónicos industriales conocer el flujo de agua permite estimar la capacidad de filtrado mecánico y la biofiltración, así como determinar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Para lograr lo anterior, mediante modelos matemáticos computacionales como los enunciados por [58] y [59], se genera un algoritmo en el que se establece el mejor ambiente de cultivo para determinadas especies de peces y plantas, luego se adecuan sensores y actuadores en conjunto con un controlador (Figura 1-18) que estará evaluando el modelo y realizando ajustes según sean los niveles medidos por cada sensor.

Figure 1-18. Circuito electrónico para la medición de luz, flujo de agua y temperatura en sistemas acuapónicos



Fuente: [58]

Aunque la medición y el control son fundamentales, el acceso a la información resulta ser un factor crítico para poder entender que está sucediendo en el sistema, es por esto que las tecnologías *IoT* están tomando fuerza en el campo de la acuaponía, [60] y [61] han implementado un sistema de adquisición de datos y control en conjunto con aplicaciones web y móviles mediante la integración de servidores web, recibiendo la información ya sea por *GSM*, *WiFi* o redes cableadas y mostrándola en aplicativos que permiten al usuario conocer el estado del sistema en cualquier momento.

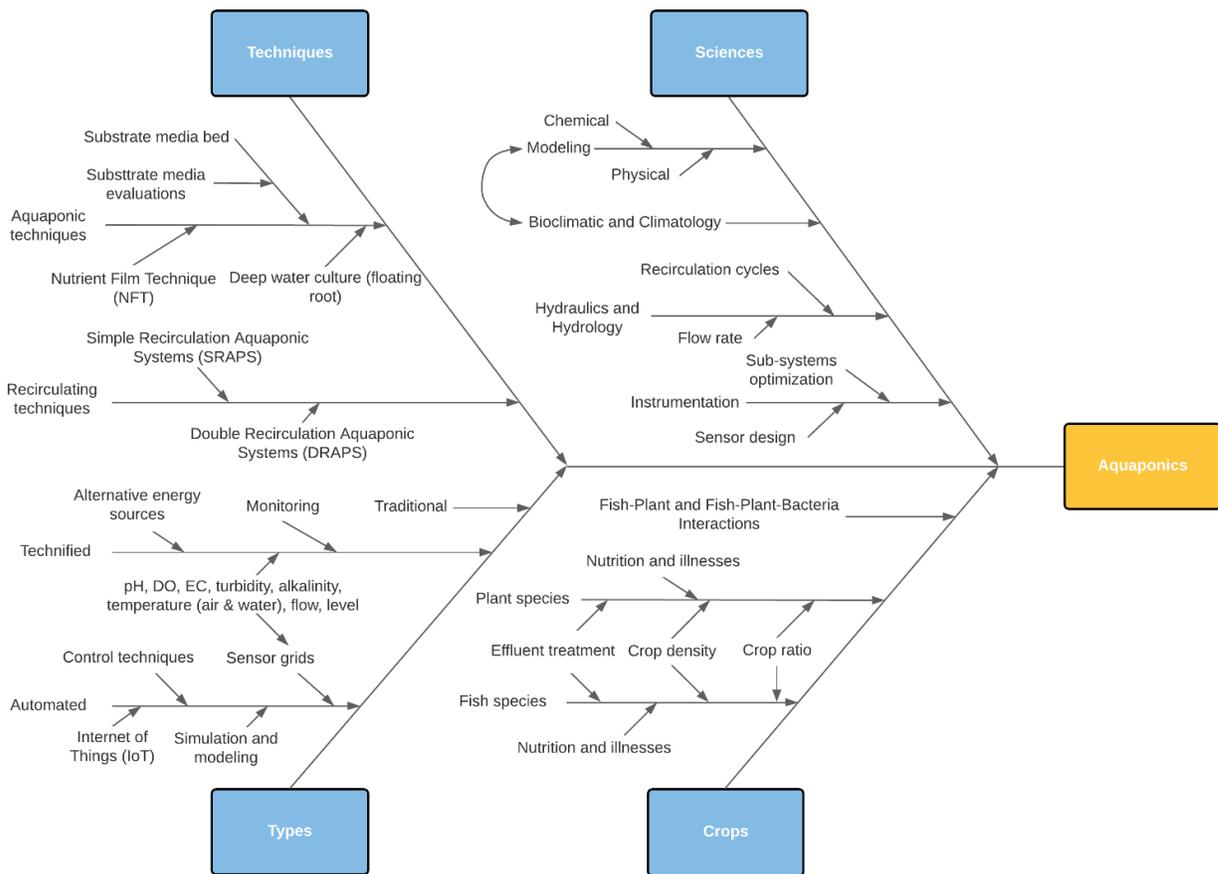
De otro lado, las innovaciones tecnológicas no solo dependen de la instrumentación, automatización y control, el uso de energías alternativas en sistemas acuapónicos que comúnmente se encuentran en zonas no interconectadas son igual de importantes, estudios como el de [62] muestran el uso de un sistema acuapónico automatizado alimentado con paneles solares; partiendo de un sistema de monitoreo de temperatura de aire y agua, humedad relativa, luz, pH, sensores de nivel, oxígeno disuelto, electroconductividad y turbidez, pasando a través de circuitos de acondicionamiento para ingresar a un microcontrolador que mediante programación en *LabVIEW* analiza y controla actuadores como bombas de agua, aireación, calefactores, dispensadores y ventiladores, finalizando con una integración mediante *GSM* que envía datos a plataformas móviles.

1.4.8 Orientación investigativa

A partir de los hallazgos de la revisión sistemática, teniendo en cuenta el análisis de calidad de los artículos y su posterior lectura se realizaron adecuaciones (Figura 1-19) en el diagrama Ishikawa inicial con el fin de integrarlo con la orientación investigativa actual, aunque se consideran algunas limitantes como el hecho de ajustar la búsqueda a cuatro bases de datos y el uso del idioma inglés como predefinido.

Actualmente los sistemas acuapónicos tienen una gran variedad de campos de estudio, como se pudo observar a lo largo de la revisión, surgen nuevos temas de interés con el fin de optimizar rendimientos, ya sea en sistemas hidropónicos o acuícolas, entendiendo cada uno de sus componentes y evaluándolos comparativamente con el fin de elegir los componentes que mejor se adecuan a las condiciones del entorno.

Figure 1-19. Diagrama Ishikawa actualizado



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se observan configuraciones estructurales en el sistema hidropónico que tienden a orientarse hacia la técnica del film nutritivo y lecho de sustrato, la primera por su amplia investigación y la segunda por la posibilidad de adecuar diferentes tipos de sustrato que sean capaces de albergar especies de plantas y bacterias, añadiendo la posibilidad de aumentar el proceso de nitrificación y conversión de nutrientes, la integración de diferentes técnicas es una posibilidad que ya se ha empezado a implementar en condiciones industriales.

En cuanto a técnicas de recirculación, se encuentra ya establecida una tendencia al uso de sistemas SRAPS en pequeños productores, por otro lado, estudios recientes se ha demostrado que la doble recirculación DRAPS logra ser más eficiente, aunque sus costos pueden llegar a ser elevados debido al grado de tecnificación, razón por la cual son implementados en mayor medida por medianos y grandes productores.

Las especies más trabajadas corresponden a tilapia y lechuga gracias a sus tolerancias de pH, temperatura, y capacidades para llevar a cabo el ciclo de nitrógeno y amonio, cabe destacar que se ha empezado a estudiar la combinación de otras especies más sensibles a cambios en el ambiente, ya que con la aplicación de sensores, actuadores y controladores es posible mantener rangos más estables en las variables críticas del sistema.

Derivado de las especies trabajadas se encuentra la proporcionalidad en sistemas acuapónicos, es por esto que actualmente se generan evaluaciones comparativas entre cantidad de plantas por kilogramo de peces, con el fin de encontrar proporciones que se adecuen a la generación, transformación y consumo de micro y macronutrientes al interior del sistema.

Por otro lado, y consistente con la proporcionalidad se observan también análisis de densidades de siembra, ya que estas afectan directamente la variación de pH y los ciclos de consumo de oxígeno, nitrógeno y amonio, normalmente los estudios acuícolas e hidropónicos se hacen por separado, pero actualmente se han ido integrando con el fin de

obtener densidades que sean capaces de suplir las demandas nutricionales entre especies de peces y plantas.

Finalmente, se hace énfasis en los sistemas de instrumentación y automatización, una vez hechos los análisis de diagnóstico y se entiende el sistema multitrófico planta-pez-bacteria, sus flujos de nutrientes, capacidades de carga y requerimientos ambientales, mediante herramientas computacionales se logran modelar los subsistemas y generar controladores capaces de mantener en niveles óptimos las variables más importantes en acuaponía. Muchos de los estudios enfocados a la electrónica aplicada se generan luego de entender lo mencionado anteriormente, es por esto que se logran identificar los sensores adecuados para medir las variables más importantes, luego se diseñan controladores de distintos tipos (ya sean on/off, control clásico, lógica difusa) y finalmente se adecuan actuadores que son capaces de mantener el sistema en el rango deseado. Anteriormente, los sistemas automatizados se enfocaban en los recambios de agua para controlar los nutrientes en acuaponía, hoy en día gracias a los avances tecnológicos es posible centrar el control en la dosificación de nutrientes, los ciclos de nitrógeno, amonio y fosforo.

De las publicaciones revisadas, aunque apenas el 6% corresponde al área de la electrónica se observa que en las otras áreas de estudio ya se implementan unidades de monitoreo sobre sistemas acuapónicos tradicionales, es por esto que la cifra dada podría variar en función del tipo de herramientas que ya se están usando para análisis de aguas, rendimientos, control de flujo, recirculación en acuaponía, entre otros.

Aunque actualmente hay un crecimiento exponencial en las publicaciones sobre acuaponía, en Colombia aun hacen falta estudios para demostrar su rendimiento, capacidad para suplir las necesidades y reducir el uso de suelos y agua en el sector agrícola, esto se demuestra en la cantidad de artículos encontrados específicamente para esta región.

1.5 Referencias

- [1] R. Junge, B. König, M. Villarroel, T. Komives, and M. H. Jijakli, "Strategic points in

- aquaponics,” *Water (Switzerland)*. 2017, doi: 10.3390/w9030182.
- [2] C. Maucieri *et al.*, “Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered material,” *J. Clean. Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.097.
- [3] B. König, J. Janker, T. Reinhardt, M. Villarroel, and R. Junge, “Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system,” *J. Clean. Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.037.
- [4] Z. Hu, J. W. Lee, K. Chandran, S. Kim, A. C. Brotto, and S. K. Khanal, “Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics,” *Bioresour. Technol.*, vol. 188, pp. 92–98, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>.
- [5] W. Kloas *et al.*, “A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts,” *Aquac. Environ. Interact.*, 2015, doi: 10.3354/aei00146.
- [6] H. W. Palm *et al.*, “Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature,” *Aquaculture International*. 2018, doi: 10.1007/s10499-018-0249-z.
- [7] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, and Q. Wei, “Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review,” *IEEE Access*. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953491.
- [8] Z. M. Gichana, D. Liti, H. Waidbacher, W. Zollitsch, S. Drexler, and J. Waikibia, “Waste management in recirculating aquaculture system through bacteria dissimilation and plant assimilation,” *Aquaculture International*. 2018, doi: 10.1007/s10499-018-0303-x.
- [9] R. Ghamkhar, C. Hartleb, F. Wu, and A. Hicks, “Life cycle assessment of a cold weather aquaponic food production system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118767, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118767>.
- [10] W. A. Lennard and B. V. Leonard, “A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system,” *Aquac. Int.*, 2006, doi: 10.1007/s10499-006-9053-2.
- [11] I. Pinheiro *et al.*, “Aquaponic production of *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in biofloc system at different salinities,” *Aquaculture*, vol. 519, p. 734918, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734918>.
- [12] Z. Schmutz *et al.*, “Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods,” *Water (Switzerland)*, 2016, doi: 10.3390/w8110533.

- [13] J. Dalsgaard, I. Lund, R. Thorarinsdottir, A. Drengstig, K. Arvonen, and P. B. Pedersen, "Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives," *Aquac. Eng.*, 2013, doi: 10.1016/j.aquaeng.2012.11.008.
- [14] J. Suhl *et al.*, *Prospects and challenges of double recirculating aquaponic systems (DRAPS) for intensive plant production*, vol. 1227. 2018.
- [15] H. R. Roosta and M. Hamidpour, "Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 129, no. 3, pp. 396–402, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>.
- [16] Y. Fang *et al.*, "Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal-bacterial consortia," *Bioresour. Technol.*, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.116.
- [17] B. S. Cerozi and K. Fitzsimmons, "Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system," *Agric. Syst.*, 2017, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.020.
- [18] D. Karimanzira, K. J. Keesman, W. Kloas, D. Baganz, and T. Rauschenbach, "Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system," *Aquac. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/j.aquaeng.2016.10.004.
- [19] C. Lee and Y. J. Wang, "Development of a cloud-based IoT monitoring system for Fish metabolism and activity in aquaponics," *Aquac. Eng.*, 2020, doi: 10.1016/j.aquaeng.2020.102067.
- [20] T. I. Conference and S. T. Engineering, "Real Time Monitoring of the Environmental parameters of an Aquaponic System Based on Internet of Things," pp. 943–948, 2017.
- [21] A. R. Yanes, P. Martinez, and R. Ahmad, "Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems," *Journal of Cleaner Production*. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121571.
- [22] K. S. Khan, R. Kunz, J. Kleijnen, and G. Antes, "Five steps to conducting a systematic review," *J. R. Soc. Med.*, vol. 96, no. 3, pp. 118–121, 2003, doi: 10.1258/jrsm.96.3.118.
- [23] M. Petticrew, "Petticrew_2001_Myths_Misconceptions," vol. 322, no. January, 2001.
- [24] J. Mori and R. Smith, "Transmission of waterborne fish and plant pathogens in aquaponics and their control with physical disinfection and filtration: A systematized

- review,” *Aquaculture*. 2019, doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.02.009.
- [25] C. Nicoletto *et al.*, “Extension of Aquaponic Water Use for NFT Baby-Leaf Production: Mizuna and Rocket Salad,” *Agronomy*, 2018, doi: 10.3390/agronomy8050075.
- [26] C. Maucieri, C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo, and M. Borin, “Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review,” *Italian Journal of Agronomy*. 2018, doi: 10.4081/ija.2017.1012.
- [27] L. Silva, D. Valdés-Lozano, E. Escalante, and E. Gasca-Leyva, “Dynamic root floating technique: An option to reduce electric power consumption in aquaponic systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 183, pp. 132–142, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.086.
- [28] K. Velichkova, I. Sirakov, S. Stoyanova, and Y. Staykov, “Cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and rainbow trout (*oncorhynchus mykiss* w.) in the aquaponic recirculation system,” *J. Cent. Eur. Agric.*, 2019, doi: 10.5513/JCEA01/20.3.2223.
- [29] W. Lennard and J. Ward, “A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system,” *Horticulturae*, 2019, doi: 10.3390/horticulturae5020027.
- [30] R. A. Jordan, E. F. Ribeiro, F. C. de Oliveira, L. O. Geisenhoff, and E. A. S. Martins, “Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates,” *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, 2018, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p525-529.
- [31] A. S. Oladimeji, S. O. Olufeagba, V. O. Ayuba, S. G. Sololmon, and V. T. Okomoda, “Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system,” *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 32, no. 1, pp. 60–66, 2020, doi: 10.1016/j.jksus.2018.02.001.
- [32] L. O. Geisenhoff, R. A. Jordan, R. C. Santos, F. C. De Oliveira, and E. P. Gomes, “Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems,” *Eng. Agric.*, 2016, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p291-299/2016.
- [33] A. C. P. Cani, R. V. de Azevedo, R. N. Pereira, M. A. de Oliveira, M. A. Chaves, and L. G. T. Braga, “Phytodepuration of the effluents in a closed system of fish production,” *Rev. Bras. Saude e Prod. Anim.*, 2013, doi: 10.1590/S1519-99402013000200012.
- [34] J. Suhl *et al.*, “The potential of double recirculating aquaponic systems for intensive

- tomato production,” *Acta Hortic.*, 2019, doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1242.100.
- [35] P. Sreejariya, T. Raynaud, L. Dabbadie, and A. Yakupitiyage, “Effect of water recirculation duration and shading on lettuce (*Lactuca sativa*) growth and leaf nitrate content in a commercial aquaponic system,” *Turkish J. Fish. Aquat. Sci.*, 2016, doi: 10.4194/1303-2712-v16_2_11.
- [36] A. Endut, A. Jusoh, N. Ali, W. B. Wan Nik, and A. Hassan, “A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system,” *Bioresour. Technol.*, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.040.
- [37] A. P. Shete *et al.*, “Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with Common carp (*Cyprinus carpio*) and Mint (*Mentha arvensis*),” *Aquac. Eng.*, vol. 72–73, pp. 53–57, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.004>.
- [38] J. Suhl *et al.*, “Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics,” *Agric. Water Manag.*, vol. 178, pp. 335–344, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>.
- [39] Developonics, “One-Loop vs Multi-Loop Aquaponics,” 2020. <http://www.developonics.com/aquaponics/%0A> (accessed Feb. 14, 2020).
- [40] H. Monsees, W. Kloas, and S. Wuertz, “Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes,” *PLoS One*, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0183056.
- [41] F. S. David, D. C. Proença, D. L. Flickinger, G. W. Bueno, and W. C. Valenti, “Carbon budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Amazon river prawn (*Macrobrachium amazonicum*),” *Scopus*, 2021, doi: 10.1111/are.15384.
- [42] S. Udin, M. Ekram-UI-Azim, A. Wahab, and M. C. Verdegem, “The potential of mixed culture of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) and freshwater giant prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in periphyton-based systems,” *Aquac. Res.*, vol. 37, no. 3, pp. 241–247, 2006, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01424.x>.
- [43] C. Maucieri *et al.*, “Effect of stocking density of fish on water quality and growth performance of European Carp and leafy vegetables in a low-tech aquaponic system,” *PLoS One*, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0217561.
- [44] A. Graber and R. Junge, “Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production,” *Desalination*, 2009, doi:

- 10.1016/j.desal.2008.03.048.
- [45] H. T. Nhan, N. T. Tai, P. T. Liem, V. N. Ut, and H. Ako, "Effects of different stocking densities on growth performance of Asian swamp eel *Monopterus albus*, water quality and plant growth of watercress *Nasturtium officinale* in an aquaponic recirculating system," *Aquaculture*, 2019, doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.12.067.
- [46] B. Delaide, G. Delhaye, M. Dermience, J. Gott, H. Soyeurt, and M. H. Jijakli, "Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system," *Aquac. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.06.002.
- [47] S. Khalil, "Growth performance, nutrients and microbial dynamic in aquaponics systems as affected by water temperature," *Eur. J. Hortic. Sci.*, 2018, doi: 10.17660/eJHS.2018/83.6.7.
- [48] G. C. Hundley, F. K. S. P. Navarro, O. P. R. Filho, and R. D. Navarro, "Integration of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) production, *Origanum majorana* L. and *Ocimum basilicum* L. using aquaponics technology," *Acta Sci. - Technol.*, 2018, doi: 10.4025/actascitechnol.v40i1.35460.
- [49] S. R. Paudel, "Nitrogen transformation in engineered aquaponics with water celery (*Oenanthe javanica*) and koi carp (*Cyprinus carpio*): Effects of plant to fish biomass ratio," *Aquaculture*, 2020, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.734971.
- [50] T. A. Babatunde, K. Ibrahim, B. Abdulkarim, N. H. Wagini, and S. A. Usman, "Co-production and biomass yield of amaranthus (*Amaranthus hybridus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in gravel-based substrate filter aquaponic," *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, 2019, doi: 10.1007/s40093-019-00297-5.
- [51] P. A. Patil, K. Dube, A. K. Verma, N. K. Chadha, J. K. Sundaray, and P. Jayasankar, "Growth performance of goldfish, *Carassius auratus* and basil, *Ocimum basilicum* in media bed aquaponics," *Indian Journal of Fisheries*. 2019, doi: 10.21077/ijf.2019.66.1.78353-15.
- [52] J. de F. Lima, S. S. Duarte, A. M. Bastos, and T. Carvalho, "Performance of an aquaponics system using constructed semi-dry wetland with lettuce (*Lactuca sativa* L.) on treating wastewater of culture of Amazon river shrimp (*Macrobrachium amazonicum*)," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2019, doi: 10.1007/s11356-019-04496-5.
- [53] R. Calone *et al.*, "Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics," *Sci. Total Environ.*, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.167.

- [54] P. Boonrawd, S. Nuchitprasitchai, and Y. Nilsiam, "Aquaponics Systems Using Internet of Things," 2020, doi: 10.1007/978-3-030-44044-2_5.
- [55] M. N. Mamatha and S. N. Namratha, "Design & implementation of indoor farming using automated aquaponics system," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Technol. Manag. Comput. Commun. Control. Energy Mater. ICSTM 2017 - Proc.*, vol. 2, no. August, pp. 396–401, 2017, doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089192.
- [56] J. P. Mandap *et al.*, "Oxygen Monitoring and Control System Using Raspberry Pi as Network Backbone," *TENCON 2018 - 2018 IEEE Reg. 10 Conf.*, no. October, pp. 1381–1386, 2018.
- [57] S. E. Wortman, "Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 194, pp. 34–42, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.045>.
- [58] S. Y. Choi and A. M. Kim, "Development of indoor aquaponics control system using a computational thinking-based convergence instructional model," *Univers. J. Educ. Res.*, 2019, doi: 10.13189/ujer.2019.071509.
- [59] S. Goddek and O. Körner, "A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments," *Agric. Syst.*, vol. 171, pp. 143–154, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.010>.
- [60] W. Vernandhes, N. S. Salahuddin, A. Kowanda, and S. P. Sari, "Smart aquaponic with monitoring and control system based on IoT," *Proc. 2nd Int. Conf. Informatics Comput. ICIC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IAC.2017.8280590.
- [61] D. Karimanzira and T. Rauschenbach, "Enhancing aquaponics management with IoT-based Predictive Analytics for efficient information utilization," *Inf. Process. Agric.*, vol. 6, no. 3, pp. 375–385, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.12.003>.
- [62] A. M. Nagayo, C. Mendoza, E. Vega, R. K. S. Al Izki, and R. S. Jamisola, "An automated solar-powered aquaponics system towards agricultural sustainability in the Sultanate of Oman," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Grid Smart Cities, ICSGSC 2017*, pp. 42–49, 2017, doi: 10.1109/ICSGSC.2017.8038547.

2. Diseño y construcción de un sistema automatizado para cultivo acuapónico NFT de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

2.1 Resumen

La implementación de herramientas tecnológicas para automatizar y monitorear cultivos animales y vegetales, se ha convertido en un apoyo fundamental para el crecimiento cuantitativo y cualitativo de la producción sostenible de alimentos. Por ello, la optimización de dichos procesos desarrollados en instalaciones tradicionales garantiza su eficiencia, así como la de los insumos y productos. En este sentido, esta alternativa consiste en el diseño y construcción de un sistema acuapónico automatizado ubicado en el Centro de Biotecnología Agropecuaria (CBA) del SENA, mediante la automatización del proceso de cultivo acuapónico NFT para producir Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*), aplicando tecnologías industriales de bajo y mediano costo. Como resultado, se establecen estadísticas fiables en tiempo real para evaluar el crecimiento de la biomasa de los peces y las plantas en un tiempo determinado, añadiendo eficiencia al proceso en comparación con la siembra tradicional en suelo.

Palabras clave: acuaponía, automatización, diseño, proceso, sostenible

2.2 Introducción

La acuaponía es entendida como un proceso multitrófico en el que hay una interacción entre un sistema de producción acuícola bajo un esquema de recirculación (RAS) [1]; un sistema hidropónico para cultivo de plantas, en cualquiera de sus diferentes configuraciones (con o sin sustratos) [2]; y un sistema nitrificante compuesto por bacterias que ayudan a descomponer los nutrientes encontrados en el agua [3]. Para lograr su correcto funcionamiento se han ido desarrollando técnicas en las que se adaptan sub sistemas de filtración, oxigenación y sedimentación [4], permitiendo evolucionar este esquema de cultivo y llevándolo a ser una alternativa innovadora para la producción sostenible de alimentos [5].

Esta técnica de cultivo se basa en el uso de los desechos y el alimento que no es consumido por parte de las especies acuáticas, llevándolos a través de un proceso de descomposición en el que elementos como el amonio y el nitrógeno son transformados por bacterias nitrificantes [3]. El efluente de agua resultante de este proceso, es llevado hacia las plantas, quienes absorben y fijan compuestos orgánicos. Al finalizar el proceso, el agua que sale del sistema hidropónico, puede volver a ser usada con un sistema de recirculación que la distribuye hacia el tanque de peces [6].

Actualmente, los sistemas acuapónicos tienen varios retos a ser superados con el fin de alcanzar la rentabilidad y seguridad de otros métodos de cultivo [7]. Según [8], la regulación de nutrientes, conversión de amonio, los recambios de agua y por ende la estandarización de estos procesos, son los principales objetivos para lograr tal meta.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se han llevado a cabo diferentes trabajos para investigar el comportamiento del sistema y entenderlo desde diferentes puntos de vista, desde el estudio del manejo de agua y desechos [6], el modelamiento físico químico de las interacciones (pez, planta, bacteria) [9]–[12], los flujos hidráulicos dados a través de las tuberías [13], hasta el monitoreo de la bioclimática y climatología [14], [15]. Para esto, según la revisión llevada a cabo por [16], enuncia que se implementan instrumentos de medición, actuadores y controladores programables con el fin de monitorear y controlar los sistemas acuapónicos en ensayos controlados para diferentes especies acuáticas y vegetales.

Trabajos como [17], implementan sensores de nivel de agua con el fin de monitorear el tanque de peces y emitir alertas en caso de que haga falta abrir o cerrar válvulas para realizar labores de recirculación; sensores de temperatura DS18B20 sumergibles con la capacidad de medir hasta 125°C, recubiertos con acero inoxidable que mediante programación leen y envían datos a controladores como Arduino comparando con referencias o set points, enviando señales a calefactores de agua para aumentar o disminuir la temperatura; sondas de pH encargadas de medir iones de hidrogeno para determinar la acidez o alcalinidad del agua, alertando al usuario sobre la calidad del entorno de los peces y plantas.

Hay una gran relación entre temperatura y oxígeno disuelto, a medida que el agua se calienta esta tiende a retener menos oxígeno, por otro lado, mientras los peces se alimentan esta puede reducirse, surgiendo la necesidad de compensarlo mediante métodos de oxigenación como caídas de agua o aireadores. Aunque el oxígeno disuelto OD es una variable muy importante es poco reportada en investigaciones debido al alto costo de sensores, en el caso de [18], se presenta la utilización de sondas Atlas DO distribuidas en nodos (comunicando diferentes estaciones) con conexión TCP/IP a un controlador Raspberry Pi el cual lee e interpreta la señal para controlar aireadores según sea requerido.

La electro conductividad en acuaponía se encuentra relacionada con la salinidad en el agua, para el caso de los peces representa un elemento importante ya que dependiendo de sus valores esta puede encontrarse más limpia o con polución [5]. Según lo reportado por [19] en sus mediciones con sensores EC/pH de HANNA Instruments, altos niveles de electro conductividad en soluciones nutrientes para albahaca (*Ocimum basilicum L.*), col (*Brassica oleracea L.*), chile (*Capsicum annuum L.*), y tomate cherry (*Solanum lycopersicum L.*) permiten obtener hojas más verdes y con alturas mayores a comparación de fertilizantes con bajos niveles.

En sistemas acuapónicos industriales conocer el flujo de agua permite estimar la capacidad de filtrado mecánico y la biofiltración, así como determinar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Para lograr lo anterior, mediante modelos matemáticos computacionales como los enunciados por [10], [20], se genera un algoritmo en el que se establece el mejor ambiente de cultivo para determinadas especies de peces y plantas, luego se adecuan

sensores y actuadores en conjunto con un controlador que estará evaluando el modelo y realizando ajustes según sean los niveles medidos por cada sensor.

Aunque la medición y el control son fundamentales, el acceso a la información resulta ser un factor crítico para poder entender que está sucediendo en el sistema, es por esto que las tecnologías *IoT* están tomando fuerza en el campo de la acuaponía. [21], [22] Han implementado un sistema de adquisición de datos y control en conjunto con aplicaciones web y móviles mediante la integración de servidores web, recibiendo la información ya sea por *GSM*, *WiFi* o redes cableadas y mostrándola en aplicativos que permiten al usuario conocer el estado del sistema en cualquier momento.

De otro lado, las innovaciones tecnológicas no solo dependen de la instrumentación, automatización y control, el uso de energías alternativas en sistemas acuapónicos que comúnmente se encuentran en zonas no interconectadas son igual de importantes, estudios como el de [23] muestran el uso de un sistema acuapónico automatizado alimentado con paneles solares. Partiendo de un sistema de monitoreo de temperatura de aire y agua, humedad relativa, luz, pH, sensores de nivel, oxígeno disuelto, electroconductividad y turbidez, pasando a través de circuitos de acondicionamiento para ingresar a un microcontrolador que mediante programación en LabVIEW analiza y controla actuadores como bombas de agua, aireación, calefactores, dispensadores y ventiladores, finalizando con una integración mediante GSM que envía datos a plataformas móviles.

Como ya se ha visto a lo largo de los antecedentes, además de los desarrollos previos en cuanto a sistemas acuapónicos y los problemas que se han identificado para mantener un balance óptimo en el intercambio de nutrientes entre especies acuáticas y vegetales, se empieza a identificar la tendencia hacia la modelación, instrumentación y control para entender y aprovechar al máximo la sinergia producida por cada uno de sus elementos.

En su gran mayoría los sistemas acuapónicos desarrollados en Colombia son fabricados de forma artesanal, razón por la cual son controlados de forma empírica, limitando la estabilidad del sistema y por consiguiente haciéndolo poco eficiente [24], incluso elevando la mortandad de peces y plantas en casos en los que no se tiene conocimiento sobre el estado actual del ambiente acuapónico.

Según lo anterior, el presente proyecto se plantea como una alternativa para optimizar los procesos tradicionales, diseñando y construyendo un sistema automatizado que introduzca tecnologías industriales de bajo y medio costo mediante una red modular compuesta de un nodo central y uno periférico con el fin de monitorear, visualizar y controlar el estado de las variables definidas (pH, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura y nivel) además de la frecuencia y duración de los ciclos de recirculación de agua. Permitiendo a su vez establecer estadísticas confiables en tiempo real (y almacenables) para futuras evaluaciones del crecimiento de biomasa de especies acuáticas y vegetales en determinado tiempo cuando se compara con la siembra tradicional en suelo.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Dimensionamiento del sistema acuapónico

El proyecto inicia con la identificación del prototipo de sistema acuapónico manejado en las instalaciones del SENA CBA, Mosquera - Cundinamarca, Colombia. Ejecutando un levantamiento de datos sobre las dimensiones físicas de los sistemas acuícola, en donde son incluidos los equipos ya instalados como tanques y bombas que lo componen; e hidropónico NFT, considerando los diámetros de agujero para plantas y su distanciamiento entre centros, además de la disposición de las tuberías a lo largo de toda la estructura incluyendo el sistema de recirculación.

Teniendo en cuenta el levantamiento de datos y la definición del manejo de los cultivos, se establecen las variables medidas y las variables controladas con el fin de seleccionar los instrumentos utilizados para la automatización, ubicándolos en los puntos críticos del proceso, todo lo anterior en conjunto con el diseño del sistema de control.

Para llevar a cabo el dimensionamiento en 3D se hace uso del software Solid Works, agregando cada uno de los componentes del sistema, esto incluye los conectores para tuberías y las estructuras-soporte que mantienen en su posición la red de tuberías hidropónicas.

Adicionalmente se genera un diagrama P&ID en el software P&ID Designer, siendo la base para la selección de instrumentación y posterior identificación de los lazos de control que se tendrán en cuenta para el diseño final de la solución.

2.3.2 Características del cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*)

▪ Producción

Debido a su naturaleza, esta especie posee la capacidad para adaptarse a un amplio rango de zonas tropicales, logrando un desarrollo óptimo en ambientes lénticos como lo son los reservorios utilizados en acuaponía [25]. Por sus capacidades y requerimientos esta especie se puede adaptar para su cultivo en el sistema del SENA CBA. A continuación, se definen e identifican los parámetros fisicoquímicos y ambientales críticos, tenidos en cuenta para el desarrollo del prototipo automatizado.

▪ Densidad de siembra

El sistema acuapónico encontrado en el SENA CBA fue diseñado con el fin de realizar cultivo superintensivo, capaz de albergar una cantidad de hasta 150 peces/ m³ con periodos de recirculación continuos para asegurar la debida oxigenación y remoción de deshecho. Según análisis previos sobre el sistema [26], para lograrlo se establece una tasa de aireación de 0.62 m³ de aire por tonelada de biomasa y un flujo de 0.002 m³/min en recirculación.

▪ Oxígeno disuelto

En el manejo de parámetros fisicoquímicos en peces, uno de los más importantes es el oxígeno, siendo el grado de saturación directamente proporcional a la temperatura y pH [26]. De este modo y basados en varios ciclos de cultivo, en [27] se reporta que el rango óptimo para el crecimiento de los peces en el sistema debe ser mayor a 4.5 ppm.

Adicionalmente, para evitar reducciones en la concentración de oxígeno en el agua (en condiciones de densidades de siembra superintensiva), se debe realizar un manejo adecuado para la remoción de materia orgánica en descomposición, alimento no consumido, heces y solidos en suspensión en general. Para lo cual se realiza un mantenimiento diario sobre el tanque [28].

▪ Temperatura

Los peces, al ser animales poiquilotermos (su temperatura corporal varía según la temperatura del medio en el que se encuentran), requieren de un adecuado manejo de la temperatura para mantener el bienestar, evitar conductas de estrés, deficiencias en su alimentación y por consiguiente muerte en la población [29].

Según reportes de [25], para el cultivo de carpa el rango adecuado puede variar entre 28°C y 32°C, soportando por breves periodos de tiempo hasta 5°C por debajo de los valores recomendados. Según sea la temperatura se pueden ver efectos relacionados directamente con el metabolismo de los peces, por ejemplo, a temperaturas altas la tasa metabólica es mayor, produciendo un aumento en el consumo de oxígeno; mientras que a temperaturas bajas una tasa metabólica menor puede representar una caída en el consumo de alimento [26].

- **Potencial de hidrógeno (pH)**

Siendo la concentración de iones de hidrogeno en el agua, el potencial de hidrogeno en el agua representa otro factor crítico a observar y mantener en niveles adecuados para los peces. Según [5], [30], el rango óptimo para el crecimiento y reproducción de peces es de 6.5 a 9.0, valores por encima o por debajo pueden llegar a producir conductas como letargia que a su vez causa falta de apetito y retraso tanto en crecimiento como reproducción [26].

2.3.3 Características del cultivo de Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*)

Normalmente, en sistemas acuapónicos NFT es conveniente utilizar hortalizas o hierbas, haciendo énfasis en el producto que se comercializa (en este caso sus hojas) y su ciclo de cultivo (ciclo corto) [31]. Según lo anterior, en el sistema del SENA CBA se hace uso de Lechuga Crespa por su amplia documentación y uso en ensayos experimentales en acuaponía.

Su ciclo de cultivo es de corta duración, de 25 a 45 días, y se inicia a partir de semillas certificadas dispuestas sobre semilleros con turba como sustrato. En este primer periodo de crecimiento se les suministra la mayor cantidad de luz posible, manteniendo condiciones estables de temperatura, humedad e irrigación [2].

Una vez estas semillas alcanzan su estado de germinación y adicionalmente han llegado a los 10 cm de altura, son llevadas a las espumas del sistema acuapónico NFT. Tomando en consideración las dimensiones de las tuberías, las plántulas son introducidas en

esponjas cubicas de 60mm x 60mm x 20mm (al interior de un corte longitudinal en el centro).

Ya en las tuberías del sistema las Lechugas son ceñidas al ciclo de producción de las Carpas en conjunto con Biofloc, esto haciendo referencia al flujo de recirculación, sus respectivos ciclos, los recambios de agua, las condiciones de alcalinidad y las concentraciones de los elementos derivados del nitrógeno.

2.3.4 Características de Biofloc

Normalmente, en acuaponía, los sistemas de nitrificación se encuentran acoplados en sub sistemas independientes al acuícola e hidropónico [32]. A pesar de lo anteriormente nombrado, existen casos documentados como [33], en donde se ha comprobado su eficacia para mantener los derivados del nitrógeno en niveles bajos (menos de 1.5 ppm de amonio nitrogenado y 0.2 ppm de nitritos) al interior del tanque acuícola.

Sin embargo, el uso de esta tecnología afecta negativamente a las plantas. Parámetros como el pH, al encontrarse en niveles más altos a los recomendados para lechuga (entre 5.5 y 7), producen una reducción en la absorción de nutrientes [34]. Por las razones descritas, en la industria se recomienda un monitoreo y corrección constante de pH antes de pasar el agua recirculada al sistema de tuberías NFT [35].

Para la generación de bacterias nitrosomonas y nitrobacter se prepara el tanque previo al inicio ciclo de cultivo con una relación C:N (carbono-nitrógeno) de 10:1, manteniendo unas condiciones fisicoquímicas de la siguiente manera:

- Rango de pH de 7-8
- Concentración de oxígeno disuelto mayor a 4ppm
- Temperatura inferior a 30 °C
- Sin recambios de agua

Una vez se ha alcanzado el tiempo para generación de bio-flóculos (alrededor de 15 días), se inicia con la producción de peces y plantas.

2.3.5 Instrumentación, sensores, actuadores y controladores

Teniendo en cuenta el dimensionamiento del sistema y su manejo para el crecimiento de peces y plantas, es producida la selección y estructuración de la instrumentación para la automatización del proceso, eligiendo sensores para la medición de diferentes magnitudes, actuadores con el fin de regular el ciclo de recirculación, oxigenación y temperaturas y finalmente los controladores necesarios para automatizar el proceso de acuerdo a los parámetros deseados. Todo lo anterior sustentado en la revisión sistemática realizada previamente.

▪ Sensores

Fueron seleccionados sensores para la medición de las siguientes variables: pH, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, flujo y nivel, los anteriores son mostrados a continuación junto con una imagen ilustrativa y sus características principales (Tabla 2-1).

Table 2-1. Sensores seleccionados para el sistema acuapónico automatizado

Sensor	Característica	Valor
 <p>Sensor de pH SZ1150</p>	Rango de medición	0 – 14 pH
	Temperatura de operación	0 – 100 °C
	Presión	10 bar
	Conector	4 Polos
	Conexión a proceso	Unión ¼" NPT
	Alimentación	9 – 36 VDC
 <p>Transmisor de pH PH3630</p>	Temperatura de operación	-10 – 120 °C
	Salida analógica	4 – 20 mA
	Conexión a proceso	Riel DIN
	Alimentación	10 – 30 VDC
 <p>Sonda óptica de Oxígeno Disuelto OD8525</p>	Rango de medición	0 – 20 ppm
	Temperatura de operación	-5 – 50 °C
	Presión	6 bar
	Salida analógica	4 – 20 mA
	Salida digital	RS485
 <p>Sensor de Temperatura DS18B20</p>	Alimentación	9 – 36 VDC
	Rango de medición	-55 – 125 °C
	Temperatura de operación	-5 – 50 °C
	Salida digital	1 Wire
	Alimentación	3 – 5.5 VDC
	Rango de medición	0 – 3000 NTU
	Temperatura de operación	5 – 90 °C
	Tiempo de respuesta	<500 ms

 <p>Sensor de Turbidez SEN0189</p>	Salida analógica	0 – 4.5 V
	Salida digital	High/Low
	Alimentación	5 VDC
 <p>Sensor de Flujo YFS201</p>	Rango de medición	0.001 – 0.03 m ³ /min
	Temperatura de operación	-25 – 80 °C
	Presión	17.5 bar
	Conexión a proceso	Unión ½"
	Alimentación	5 VDC
 <p>Sensor Ultrasónico JSNSR04T</p>	Rango de medición	20 – 600 cm
	Temperatura de operación	-20 – 70 °C
	Tiempo de respuesta	20 ms
	Salida	Trig/Echo
	Alimentación	3 – 5.5 VDC

Fuente: Elaboración propia

▪ Actuadores

A partir de la caracterización del sistema encontrado, fueron seleccionados los siguientes actuadores (Tabla 2-2) con el fin de mantener una recirculación de agua constante para los ciclos establecidos en el dimensionamiento del proceso.

Table 2-2. Actuadores seleccionados para el sistema acuapónico automatizado

Actuador	Característica	Valor
 <p>Bomba sumergible</p>	Potencia	750 W
	Caudal máximo	300 l/h
	Salida	1½"
	Altura máxima	9 m
	Alimentación	110– 220 VAC
 <p>Electrovalvula SENYA 2W-160-15</p>	Presión de operación	0 ~ 10 kg/cm ³
	Temperatura de operación	-10 – 100 °C
	Conexión a proceso	½"
	Alimentación	24 VDC

Fuente: Elaboración propia

▪ **Controladores y HMI**

Finalmente son evaluados y seleccionados los controladores (Table 2-3) para mantener las variables seleccionadas dentro de los rangos establecidos.

Table 2-3. Controladores y HMI seleccionados para el sistema acuapónico automatizado

Sensor	Característica	Valor
 <p>PLC Xinje XC3 24T</p>	Voltaje de operación	24 VDC
	Entradas digitales	14
	Salidas digitales	10
	Corriente de entrada	120 mA
	Consumo máximo	12 W
	Tiempo de respuesta (entradas)	10 ms
	Tiempo de respuesta (salidas)	0.2 ms
	Aislamiento de las salidas	Óptico
	Módulos de expansión	Sí
	Puertos COM 1,2 y 3	RS232 y RS485
 <p>Módulo de expansión Xinje XC E4AD H</p>	Voltaje de operación	24 VDC
	Entradas digitales/análogas	4
	Voltaje de entrada	0 – 5 V, 0 – 10 V
	Corriente de entrada	0 – 20 mA, 4 – 20 mA
 <p>HMI Touchwin TG765ET</p>	Voltaje de operación	24 VDC
	Método de entrada	Táctil
	Memoria	128 MB
	Puertos USB	Tipo A y B
	Puertos de comunicación	RS232 y Ethernet RJ45
	Temperatura de operación	0 – 50 °C
 <p>Arduino MEGA2560</p>	Microcontrolador	ATmega2560
	Voltaje de alimentación	7 – 12 V
	Voltaje de operación	5 V
	Entradas/Salidas digitales	54 (15 de PWM)
	Entradas analógicas	16
	Memoria flash	256 KB
	EEPROM	4 KB

Fuente: Elaboración propia

2.3.6 Diseño y construcción de los nodos

Con la instrumentación seleccionada se diseña y construye un nodo central (de medio costo) para adquisición de datos y accionamiento de los actuadores involucrados en el sistema, encargado de controlar el proceso de recirculación y oxigenación. De forma paralela se plantea un nodo periférico (red de sensores de bajo costo) que será dispuesto directamente sobre el proceso, permitiendo la escalabilidad de la solución y dando versatilidad a la hora de ubicar nuevos nodos sobre el sistema acuapónico.

En esta fase del proyecto son generados los esquemas eléctricos y electrónicos de cada uno de los módulos (nodo central y periférico) junto con los componentes requeridos en la etapa de potencia; aislamiento; conexiones eléctricas y de datos; sensores; actuadores y controladores.

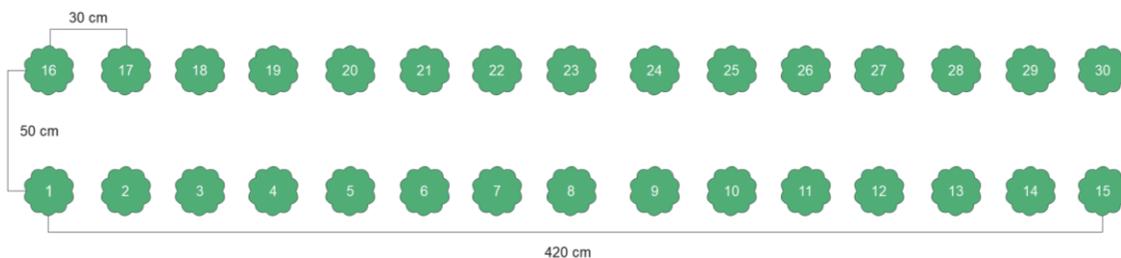
Luego, se lleva a cabo la construcción y programación de un nodo central y uno periférico para su posterior calibración y puesta en marcha sobre el sistema acuapónico.

2.3.7 Ensayo, recolección y análisis de datos

Se siembran 10 carpas rojas adultas, seleccionadas en este estado de madurez debido a que su etapa de crecimiento es más reducida y el consumo de alimento, generación de excretas y nutrientes es estable, permitiendo que sean mantenidos en el tiempo que duran los ciclos de cultivo de la lechuga.

Adicionalmente se prepara un lote de control de 2,1 m² de plántulas de lechuga en un sistema de siembra en suelo tradicional (Figura 2-1), con sustrato de suelo mineral y patrones de riego por goteo dos veces al día.

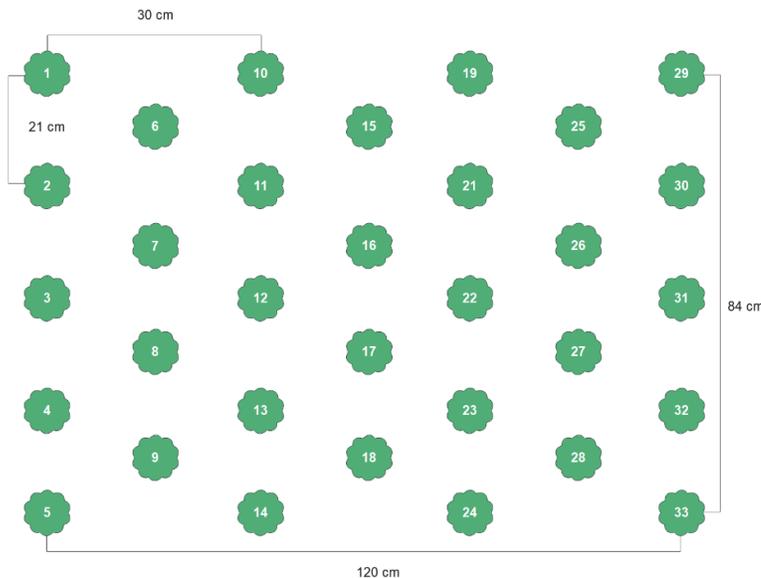
Figure 2-1. Distribución del lote de control de cultivo en suelo



Fuente: Elaboración propia

Para el lote de cultivo de 1 m² lechugas en las tuberías NFT, se siembran 30 plántulas con espuma agrícola de marca Germinar (Figura 2-2).

Figure 2-2. Distribución del lote del sistema acuapónico



Fuente: Elaboración propia

El manejo del sistema automatizado es realizado mediante la HMI, configurando los ciclos y frecuencias de recirculación con una tasa de recirculación a tiempo completo de 280 l/h. Se realiza un mantenimiento semanal para cada ciclo de cultivo para la remoción de materia orgánica acumulada en las tuberías, asegurando el correcto funcionamiento del sistema.

Cada 30 segundos se registran y almacenan los datos tomados para las variables de pH, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez y flujo. Una vez a la semana se descargan y grafican los datos para su posterior análisis.

Adicionalmente se realizan tomas de datos de peso (al inicio y final del ensayo), altura, y número de hojas (una vez por semana a lo largo de 42 días).

▪ **Registro de datos biomasa de lechuga:**

- Peso: En primera instancia las plántulas de lechuga seleccionadas son pesadas momentos previos a la siembra inicial, lavándolas y dejándolas en remojo para que

la tierra y el agua no interfieran en la medición, posteriormente haciendo uso de una balanza digital se pesan y registran los valores obtenidos. Para la segunda toma de datos, al final del ciclo de cultivo, se repite el procedimiento anterior, para reducir el agua contenida en las raíces.

- Altura: Una vez por semana, las lechugas seleccionadas aleatoriamente son medidas desde el cepellón hasta la corona de la planta utilizando un calibrador Vernier.
- Numero de hojas: Una vez a la semana son contadas de forma manual, teniendo en cuenta las hojas verdaderas y excluyendo todos los cotiledones.

- **Análisis de datos biomasa de lechuga:**

Para el procesamiento de los datos se consideraron las ganancias que relacionan los valores al inicio del cultivo y los valores tomados en la cosecha (1) y (2).

$$\text{ganancia dimensional} = X_f - X_i \quad (1)$$

$$\text{ganancia porcentual} = \frac{X_f - X_i}{X_f} \times 100 \quad (2)$$

Donde X_i corresponde al valor inicial de la variable (tomada al inicio del cultivo) y X_f al valor final (tomada en cosecha).

Estos valores son calculados para ganancia en peso (gr), altura (cm) y diámetro de cuello (cm).

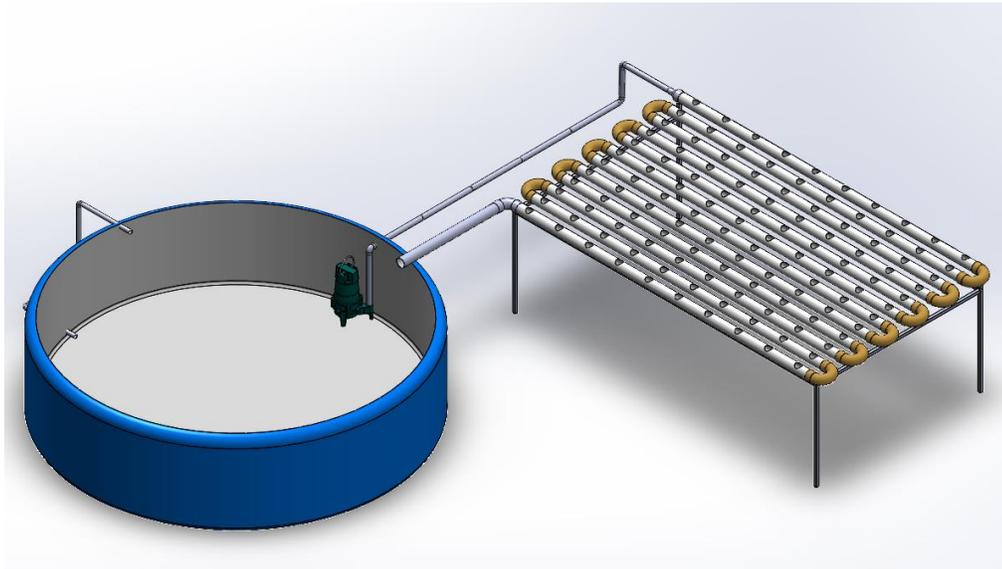
2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Características del sistema acuapónico

Se levantó un plano del sistema acuapónico, diferenciando las partes que lo componen:

- **Sistema acuapónico:**

Teniendo en cuenta las características de los subsistemas acuícola e hidropónico NFT, se obtuvo el plano final que representa el dimensionamiento del sistema acuapónico.

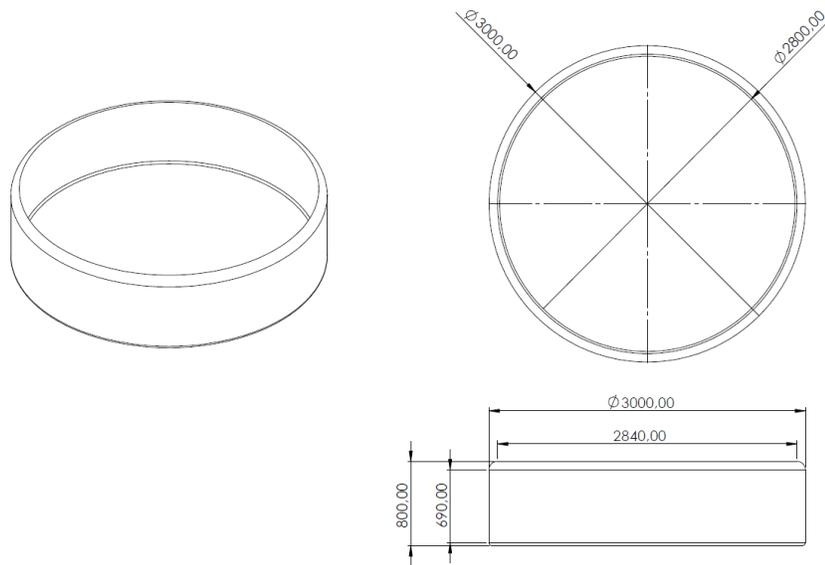
Figure 2-3. Sistema acuapónico SENA CBA.

Fuente: Elaboración propia

En el plano se observa el sistema de recirculación accionado por una bomba sumergible encargada de llevar el agua desde el tanque acuícola hacia la red de tuberías hidropónicas NFT. El tanque cuenta con un mecanismo de oxigenación propio (en la parte posterior), haciendo uso de una bomba externa que por acción de la gravedad inyecta agua a presión, generando burbujas al caer nuevamente en el tanque (descrito en materiales y métodos). Por otro lado, y como un complemento al sistema de oxigenación propio, sobre el tanque se encuentra una torre de aireación en la que el agua proveniente de una bifurcación en las tuberías de recirculación entra por la parte superior de la torre y pasa a través de unas bandejas perforadas. Dentro de las bandejas se usan materiales aglutinantes como el carbón coque, o elementos filtrantes de relleno plásticos de un índice alto de área por volumen.

- **Sistema acuícola:**

Sistema acuícola, en el que se desarrolla la crianza de peces, cuenta con un tanque cilíndrico de 9 m³ (Radio externo 1.5 m y Altura interna 0.72m) Figura 2-4:

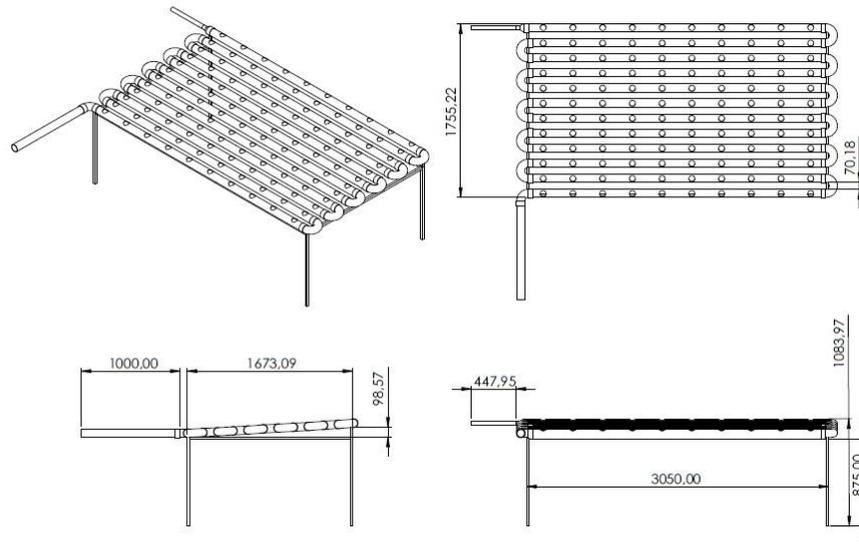
Figure 2-4. Plano tanque acuícola

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente hace uso de una bomba de agua que recircula el agua dentro del tanque, y una bomba sumergible (0.005 m³/min) que distribuye el agua hacia el sistema hidropónico mediante una red de tuberías. Dependiendo de la especie de pez que se trabaje en el sistema se tendrá un régimen de densidad de siembra, alimentación, recambio de agua, oxigenación, pH acorde a los requerimientos establecidos.

- **Sistema hidropónico:**

Sistema hidropónico, compuesto por una serie de tuberías de 3" perforadas con agujeros de 50 mm de diámetro y espaciados a 30 cm entre centros, que son capaces de albergar hasta 120 plantas, Figura 2-5.

Figure 2-5. Sistema de tuberías hidropónicas NFT

Fuente: Elaboración propia

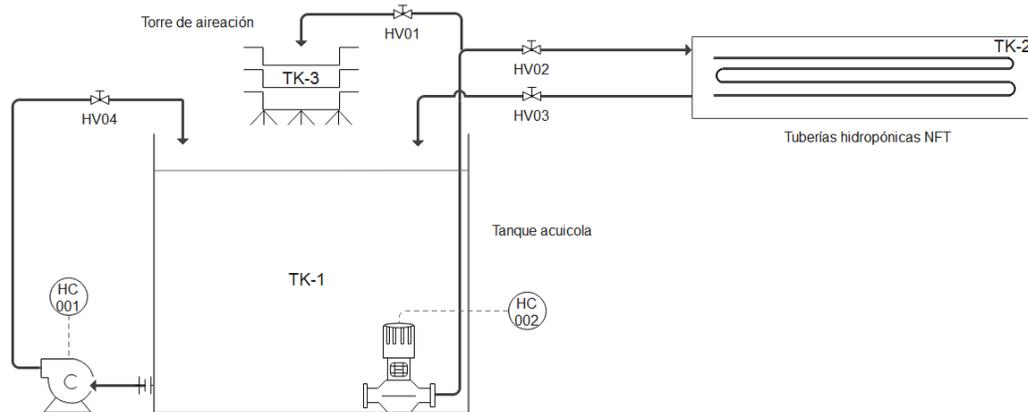
El sistema de tuberías hidropónicas NFT en serie cuenta con una inclinación que permite el flujo constante de agua, culminando su recorrido de nuevo en el tanque de peces. En su interior se encuentran espumas, que cumplen el propósito de sostener la plántula, además de retener y absorber fluidos por capilaridad, en este caso el agua proveniente del sistema acuícola

Según sea la especie a cultivar y su estado fenológico variará el tipo de espuma, los caudales y la altura del agua en la tubería.

2.4.2 Diagrama P&ID

- **Diagrama previo:**

Teniendo en cuenta el levantamiento de datos sobre la estructura, es dibujado un diagrama P&ID del sistema, esto con el fin de entender la distribución de la red de tuberías, sus conexiones y accesorios (Figura 2-6) y de este modo lograr proponer una solución para instrumentación, monitoreo y control.

Figure 2-6. Diagrama P&ID del sistema acuapónico del SENA CBA

Fuente: Elaboración propia

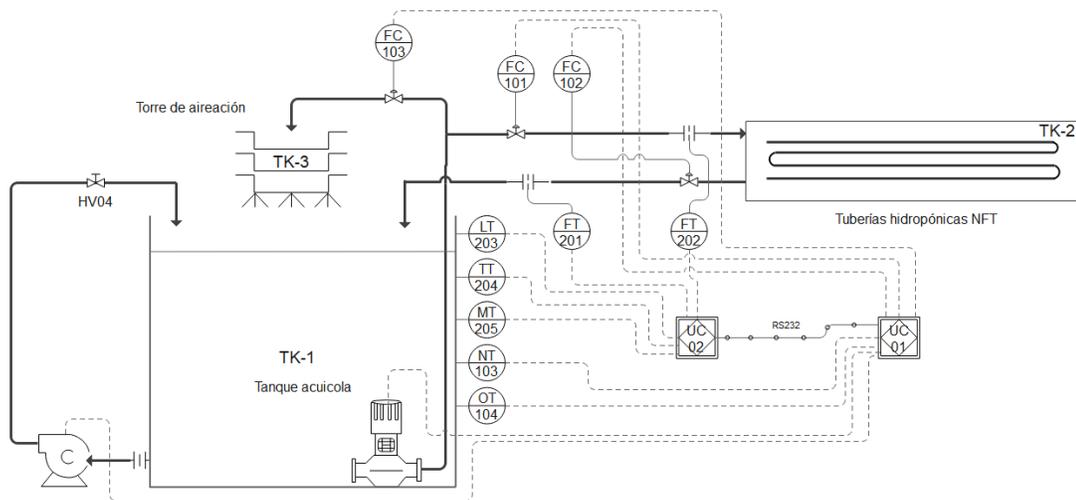
En el diagrama se encuentran 3 estructuras principales, la primera corresponde al tanque acuícola, la segunda representa las tuberías hidropónicas (dispuesto de esta forma para vislumbrar mejor los accesorios de entrada y salida al sub sistema hidropónico NFT) y la tercera identificada como la torre de aireación (compuesta de 3 bandejas perforadas). Adicionalmente, en el sistema se encuentran dos bombas de agua, una sumergible (encargada de realizar la circulación desde TK-1 hacia TK-2 y TK-3) dispuesta al interior del tanque, y otra externa (sistema de oxigenación propio) junto con su válvula de bola manual HV004, ambas accionadas por un operario mediante los pulsadores HC001 (bomba oxigenación) y HC002 (bomba recirculación).

Por otra parte, se encuentran las válvulas de bola HV01 y HV02 (accionadas manualmente), con las que se distribuye el flujo de agua hacia la torre de aireación y las tuberías hidropónicas NFT respectivamente. Finalmente se tiene la válvula HV03, encargada de controlar el flujo de retorno desde TK-2 hacia TK-1.

- **Diagrama propuesto:**

A partir del diagrama previo, se realiza el diseño de un P&ID actualizado en el que se incluyen varios sensores para monitorear las variables críticas en el sistema (identificadas por la caracterización de las especies a trabajar), permitiendo conocer el estado actual del proceso y controlar los recambios de agua, ciclos de recirculación y oxigenación (Figura 2-7).

Figure 2-7. Diagrama P&ID propuesto para el sistema acuapónico del SENA CBA



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se reemplazan los controles manuales de las bombas, ahora estas son controladas por el nodo central UC01 (PLC Xinje), permitiendo accionarlas según se establezca en el programa (también con control manual a través de una pantalla táctil HMI en el nodo central).

En el sistema de recirculación las válvulas de bola manuales son sustituidas por electroválvulas (FC101-103), permitiendo su accionamiento mediante las instrucciones dadas por UC01, además se agregan sensores de flujo (FT201-202) para conocer la cantidad de agua que entra y sale de las tuberías hidropónicas.

Por otra parte, en TK-1 se agregan los sensores para monitorear el oxígeno disuelto (OT104) y pH (NT103) en el agua de los peces. Al ser sensores de alto costo con protocolo HART (comunicación a través de un lazo de corriente de 4-20mA) estos son conectados al nodo central para facilitar su lectura y asegurar su funcionamiento.

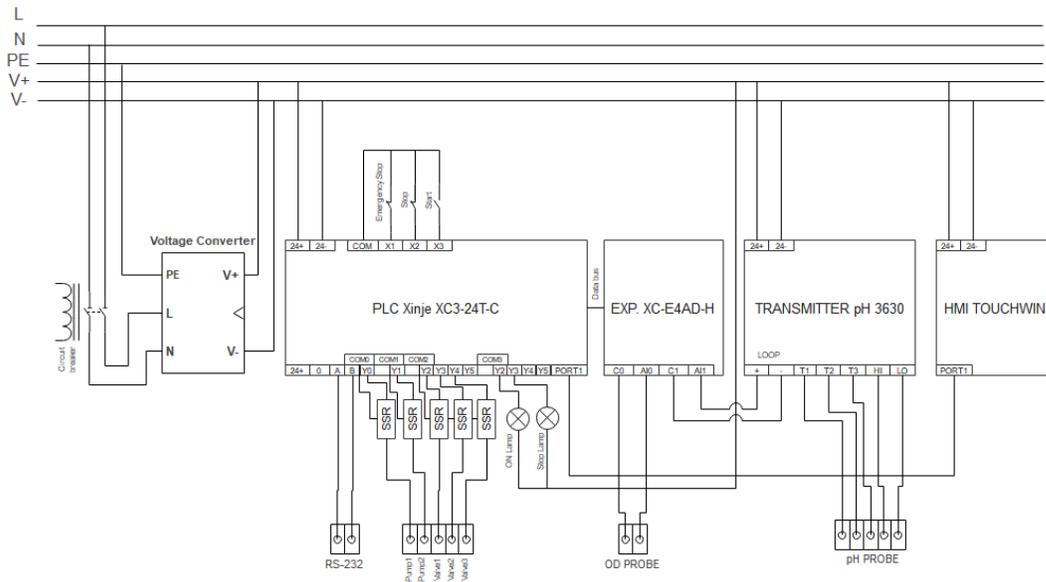
En paralelo, el nodo periférico de bajo costo UC02 (Arduino Mega) se encarga de adquirir las señales de los sensores de flujo (FT201-202), nivel (LT203), temperatura (TT204) y turbidez (MT205). Este nodo recolecta la información y por medio de una conexión RS232

la envía hacia el nodo central, el cual se encargará de actuar de acuerdo a los datos recibidos.

2.4.3 Diseño y construcción del nodo central

Con base en el dimensionamiento del sistema, las características del cultivo y el P&ID, se procede al diseño del nodo central. Para lograr monitorear y controlar el sistema acuapónico en los diferentes puntos identificados, este prototipo se construye alrededor de un PLC Xinje y una pantalla HMI Touchwin, encargados de adquirir y mostrar la información relevante para los operarios (Figura 2-8).

Figure 2-8. Diagrama eléctrico del nodo central



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el nodo central es alimentado por una fuente de voltaje fijo que convierte 110VAC a 24VDC (protegida por un breaker de dos polos), esta se encarga de suplir de energía al PLC, su módulo de expansión, la HMI y el transmisor de pH.

El PLC cuenta con tres pulsadores (start, stop y paro de emergencia), que funcionan para iniciar, pausar o detener el proceso, y dos pilotos (ON y Stop), los cuales cumplen la función de dar alertas visuales a los operadores del sistema acuapónico.

Por otro lado, cuenta con cinco salidas a relés de estado sólido (SSR), dos de ellos para el accionamiento de las bombas de agua y los otros tres con el fin de controlar las electroválvulas de recirculación y oxigenación.

En conjunto con el módulo de expansión para entradas analógicas, el PLC es capaz de obtener datos a partir de señales bajo protocolo HART (0-20 o 4-20mA y 0-5V o 0-10V). Teniendo esto en cuenta se adapta una sonda de oxígeno disuelto (capaz de entregar la señal estándar directamente) y un transmisor de pH (que adquiere, convierte y transmite los valores registrados por la sonda).

Finalmente se adapta una entrada para la comunicación RS-232, la cual servirá para lograr conectarse con los nodos periféricos.

A partir de los planos especificados se realiza la construcción del nodo central, para esto todos los elementos requeridos se ubican en un gabinete de protección contra polvo y humedad (IP62), Figura 2-9.

Figure 2-9. (a) Vista frontal del panel del nodo central; (b) Vista posterior de la puerta del panel del nodo central; (c) Vista interna del panel del nodo central



(a)

(b)

(c)

Fuente: Elaboración propia

En la vista frontal del gabinete, sobre la zona superior se encuentra la HMI táctil, utilizada para mostrar información relevante para el usuario y controlar cada uno de los actuadores del proceso.

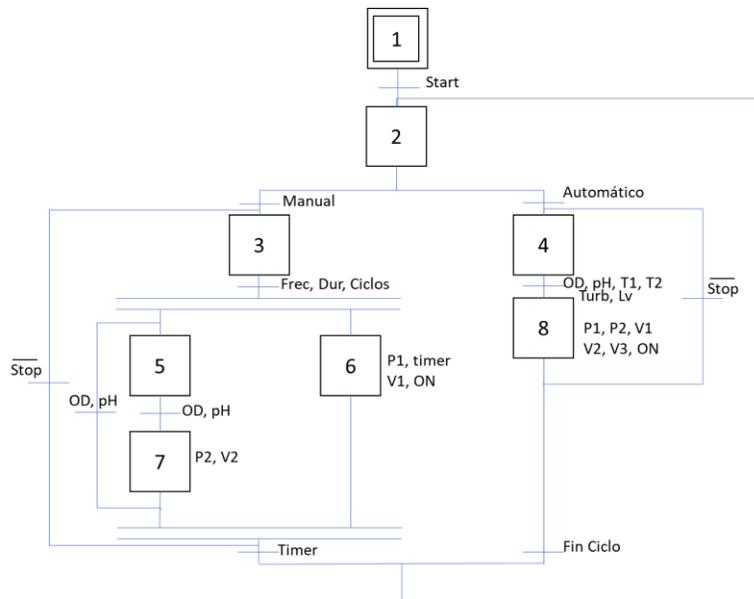
Bajo la pantalla están los dos pilotos de alerta, el verde indicando el flujo normal del proceso y el rojo para notificar sobre fallas o eventos que requieren de un operario para poder resolverse (por ejemplo, deficiencias en los valores de pH, oxígeno disuelto, niveles de agua, entre otros). Finalmente se encuentran los tres pulsadores (start, stop y paro de emergencia) cumpliendo las funciones descritas en la sección anterior.

Al interior del gabinete (Figura 2-9b y 2-9c), se pueden ver los elementos de la vista frontal (y su cableado), mientras que en la zona derecha superior se observan el breaker de dos polos, la fuente de alimentación y el transmisor de pH; abajo están el PLC y su módulo de expansión; y en la parte inferior todos las borneras y relés para las entradas y salidas descritas en el plano eléctrico (en conjunto con una serie de prensa estopas para asegurar la integridad del cableado y el gabinete).

▪ Programación e interfaz del nodo central

Para la programación del controlador Xinje, inicialmente fue diseñado un diagrama grafcet (Figura 2-10), a partir del cual se genera la programación a lenguaje Ladder (ver anexo a).

Figure 2-10. Grafcet del programa de control



Fuente: Elaboración propia

El programa inicia con el estado 1 de *stand by*, en la que se espera al pulsador *start* para dar paso al arranque del proceso. Posteriormente en el estado 2 se espera la selección del modo de operación, en este caso manual o automático. Una vez es seleccionado uno de los modos se procede a ejecutar el ciclo correspondiente.

Durante la operación manual se ingresa al estado 3, en donde el usuario podrá seleccionar la frecuencia, duración y cantidad de ciclos de recirculación deseados, para esto dispone de un cuadro de dialogo en la interfaz en donde se ingresan los ciclos por semana y diarios además de la duración en horas y minutos del flujo de agua. Según sea la información ingresada el sistema procesará y calculará un *timer* que definirá el tiempo total de duración del estado 6, activando y desactivando la bomba 1, válvula 1 y el piloto verde ON. Simultáneamente se ejecuta el ciclo los estados 5 y 6, cuya función es evaluar los niveles de OD y pH para activar la bomba 1 (recirculación interna), y la válvula 2 de la torre de oxigenación.

Por otro lado, si es seleccionado el modo automático el controlador realiza una medición preliminar (estado 7) para determinar los valores actuales de OD, pH, temperatura, turbidez y nivel, para lograrlo se integra un bloque PID (Figura 2-11) con funcionalidades de auto tune, en donde se hace una medición preliminar y el mismo controlador se encarga de optimizar el control según los rangos establecidos.

Figure 2-11. Bloque PID del controlador Xinje

Fuente: Programa Xinje

A partir de los rangos establecidos en el programa y comparándolos con los medidos, se actúa para mantener estables las variables, esto haciendo uso de las bombas 1 y 2 y las válvulas 1, 2 y 3, en el modo manual no se tienen en cuenta los ciclos de recirculación, por lo que prioriza el control de las variables de oxígeno disuelto y potencial de hidrogeno.

Al finalizar el *timer* del ciclo manual, o al pulsar el fin de ciclo del modo automático, el sistema retorna al estado 2 para iniciar un nuevo proceso de cultivo, además en cada uno de los modos se cuenta con una función de stop que permite detener la actuación de las salidas y rearmar el proceso a sus estados iniciales.

La interfaz gráfica de la HMI cuenta con un menú principal en donde se pueden observar cada una de las pantallas a las cuales el usuario puede acceder (Figura 2-12a).

Figure 2-12. (a) Pantalla principal; (b) Vista general; (c) Vista sensores; (d) Control manual; (e) Control ciclado; (f) Gráficos, (g) Guardar datos, (h) Alarmas.



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se programa una pantalla de vista general (Figura 2-12b) en donde el usuario podrá ver la configuración de las tuberías, la dirección de los flujos de agua, el estado actual (encendido o apagado) de cada uno de los actuadores del sistema y los valores en tiempo real de las variables medidas.

En la vista de sensores (Figura 2-12c) fueron implementadas diferentes escalas con el fin de ver los rangos óptimos, de alarma y emergencia, indicando en cuales casos se debe actuar de manera inmediata por parte del usuario (arrojando pop-ups a modo de alarma).

En la vista de control manual (Figura 2-12d) el usuario podrá encender o apagar los diferentes actuadores, además de programar la frecuencia y duración de los ciclos de recirculación (Figura 2-12e) (variándolos según el estado actual de crecimiento tanto de plantas como de peces).

Finalmente se tiene la pantalla de gráficos (Figura 2-12f) en donde es posible observar la línea de tendencia de cada una de las variables medidas, permitiendo además almacenar toda la información en los registros del PLC o en una memoria USB gracias al botón Guardar Datos.

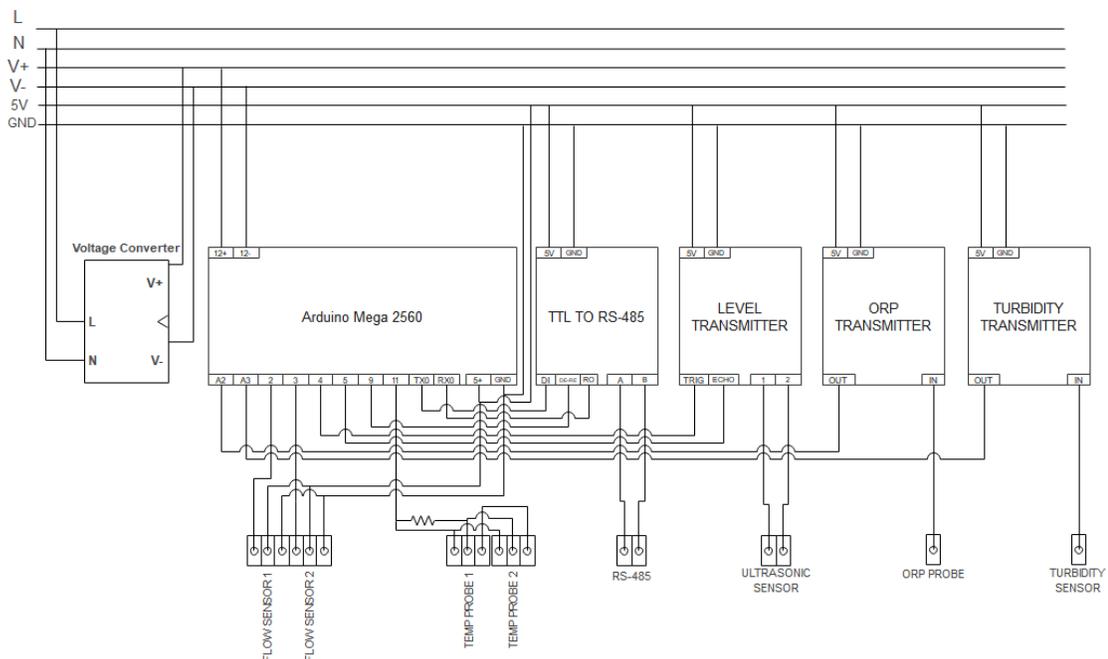
En la pantalla de guardar datos (Figura 2-12g) se observa una tabla con la información organizada de cada uno de los sensores, además de la hora en la cual se registró el valor correspondiente. Con el fin de exportar la información la pantalla cuenta con un guardado automático que cada 30 segundos va llenando un archivo csv en el que cada iteración anexa una nueva fila. Por otro lado, cuenta con un botón de exportación manual que permite enviar todos los datos visibles en la tabla a un nuevo archivo.

Además, cuenta con tres *pop-ups* (en el lateral derecho) que entregan información de las alarmas producidas a lo largo de la operación del sistema (Figura 2-12h), una configuración de luz y tono de la pantalla y un botón dedicado en el cual se podrá consultar un código QR que llevará al usuario a la documentación (planos, diagramas y programas) concerniente al proyecto de acuaponía automatizada.

2.4.4 Diseño y construcción del nodo periférico

A diferencia del nodo central, la planificación, diseño y construcción del nodo periférico fueron pensados para ser de bajo costo, teniendo en cuenta la modularidad del sistema, haciendo más sencilla la expansión del sistema y permitiendo agregar nuevos nodos si así lo requiere el usuario. El nodo periférico envía constantemente información hacia el nodo central, por esta razón no incluye una pantalla o interfaz para interactuar con el usuario (Figura 2-13).

Figure 2-13. Diagrama eléctrico del nodo periférico



Fuente: Elaboración propia

El nodo periférico se construye alrededor de un Arduino Mega como controlador, un adaptador de voltaje para su alimentación, un conversor serial TTL a RS-485 para la comunicación con el nodo central y tres transmisores de nivel, ORP y turbidez que toman las señales de sus respectivas sondas. Por otro lado, cuenta con dos sensores de flujo de efecto hall y dos sondas de temperatura (sumergibles), los cuales no requieren de módulos de conversión.

Este nodo únicamente adquiere y transmite las señales de las variables seleccionadas en el diagrama P&ID, por esta razón no se incluye ningún tipo de relé o transistor para el control de salidas, tarea delegada al nodo central.

Teniendo en cuenta el diagrama eléctrico, las dimensiones de los circuitos integrados y su cableado correspondiente, se realiza la construcción del nodo periférico, Figura 2-14. Cada uno de los elementos se adecuan al interior de una carcasa con protección IP61 resistente a polvo y salpicaduras de líquido, con 4 prensa estopas para la entrada y salida de los cables de sensores, alimentación y comunicación.

Figure 2-14. Vista interna del gabinete del nodo periférico



Fuente: Elaboración propia

Sobre la esquina superior izquierda están las tarjetas de reloj en tiempo real (RTC) y comunicación TTL a RS-485, en la región central se encuentra el Arduino Mega 2560 junto con una regleta de distribución para las líneas de alimentación y en la esquina superior derecha están los módulos de conversión de señales de los sensores de ORP, turbidez y ultrasonido. Bajo las tarjetas de conversión se distribuye una región para la conexión de cada una de las sondas y sensores, facilitando su acceso y permitiendo una mayor organización al interior del nodo.

- **Programación del nodo periférico**

El programa del nodo periférico fue escrito con el programa Arduino, en consecuencia, por su funcionalidad este incluye las librerías y códigos proporcionados por los fabricantes para la lectura de cada uno de los sensores seleccionados (ver anexo b).

Además del código normal, se agrega la librería de comunicación MODBUS RTU (SimpleModbusSlave.h) de código abierto, la cual permite asignar una serie de registros los cuales estarán recibiendo la información de cada uno de los sensores en tiempo real, estos registros pueden ser consultados por el nodo central mediante la función MODBUS RTU 06H, todos los datos son procesados y mostrados en la interfaz HMI (Figura 2-15).

Figure 2-15. Código para el registro MODBUS.

```
// Registros del esclavo ----->
enum
{
    // The first register starts at address 0
    T1, //0
    T2,
    TURB1,
    FLU1,
    FLU2,
    ORP1,
    NIV1,
    DI0,
    DO0,
    TOTAL_ERRORS, //3
    HOLDING_REGS_SIZE // leave this one
    // total number of registers for function 3 and 16 share the same register array
    // i.e. the same address space
};

unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE]; // function 3 and 16 register array
unsigned int counter;
```

Fuente: Elaboración propia

Con cada uno de los registros asignados en el Arduino se construye una trama de datos en la dirección del esclavo, estos son guardados y retenidos para luego ser consultados por el PLC para ser procesados según los criterios del sistema de control.

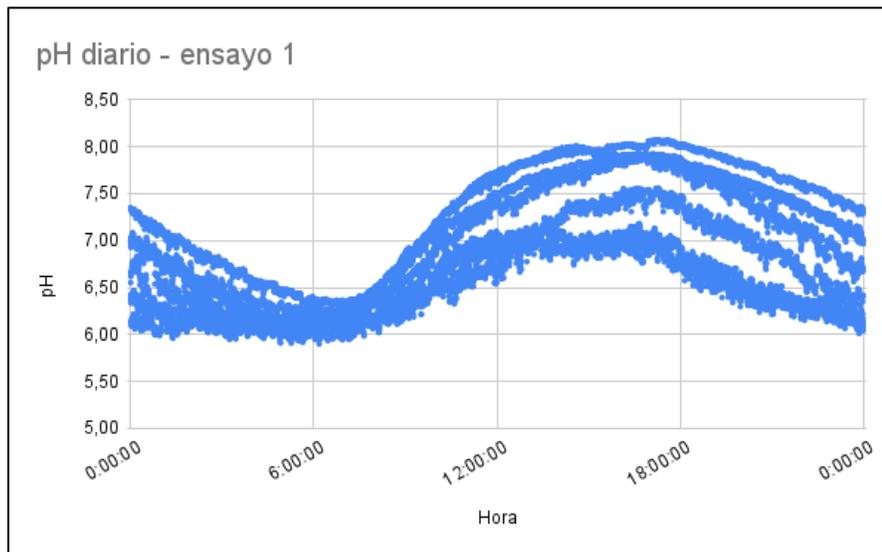
Desde el nodo central se programa un temporizador que cada 30 segundos (definido a criterio del programador) envía el código 06H para recibir la información y luego guardarla en sus registros internos que permiten retener los datos en caso de un apagado del sistema.

2.4.5 Adquisición de datos sistema automatizado

▪ pH

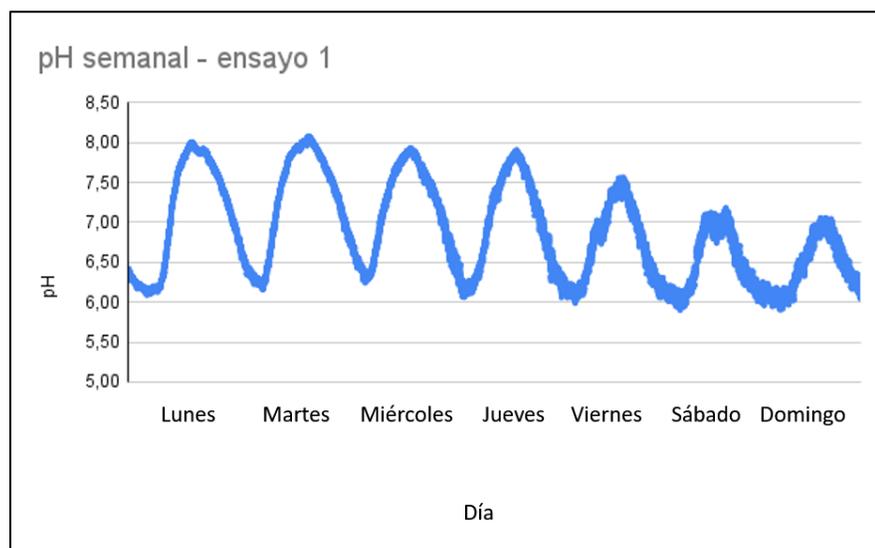
Para la prueba inicial del sistema de control se generaron las Figura 2-16 y 2-17, mostrando que los valores más bajos se encontraron entre las 00:00 h y las 06:00 h, mientras que los valores más altos entre las 12:00 h y las 18:00 h.

Figure 2-16. pH diario – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Figure 2-17. pH semanal – ensayo 1

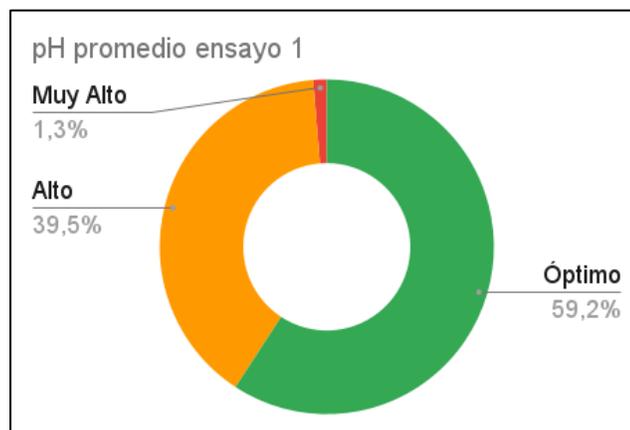


Fuente: Elaboración propia

Además, se hace especial énfasis en los picos máximos que alcanzan valores de hasta 8,01 y los picos mínimos que se encuentran alrededor de 5,8, con una diferencia promedio de 2 aproximadamente

Teniendo en cuenta los reportes de [5] y [30] los valores promedio calculados el ensayo, se genera un gráfico (Figura 2-18) en dónde se puede notar que el 59,2% de los valores de pH se ajustan a los admisibles para el bienestar de los peces (entre 6 y 8) y las bacterias nitrificantes (entre 5,5 y 7).

Figure 2-18. Porcentaje de distribución en los rangos de pH

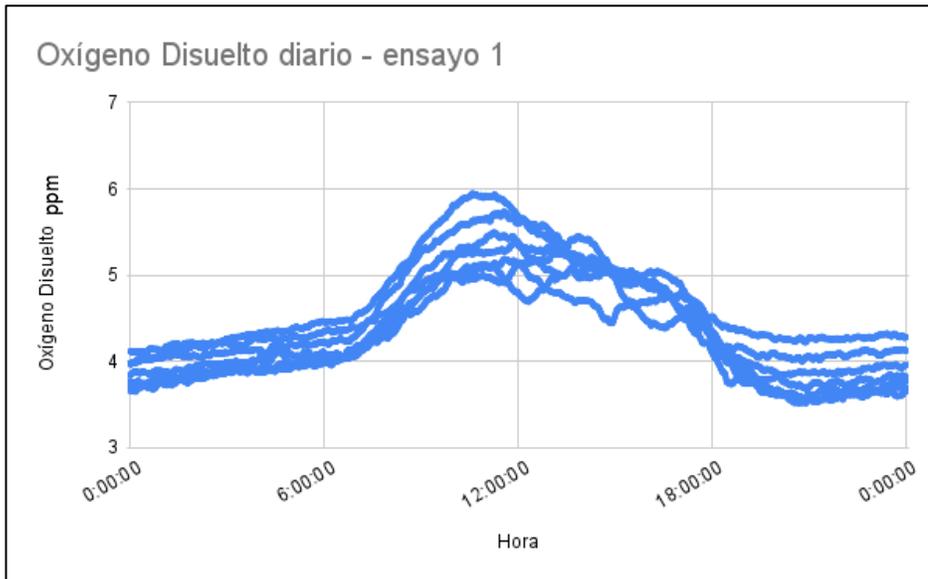


Fuente: Elaboración propia

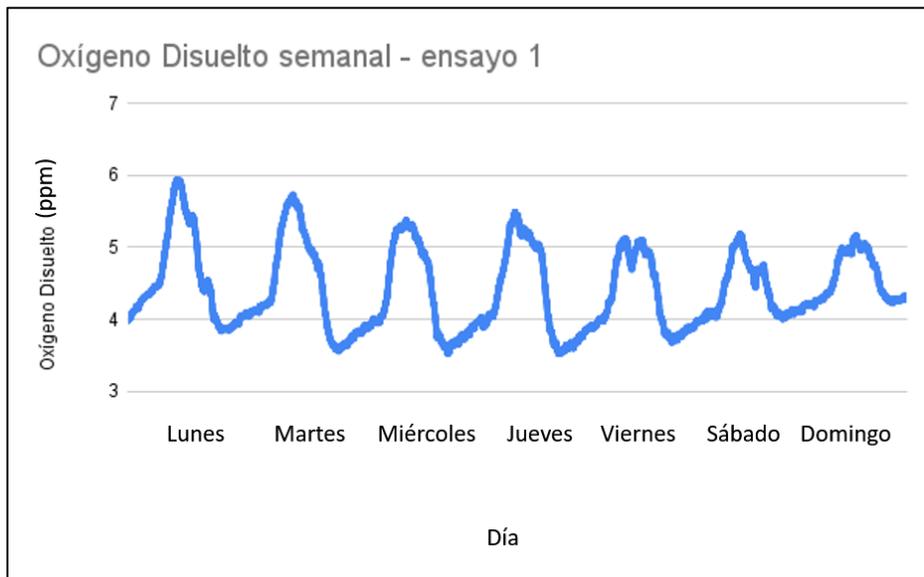
Aunque para el caso de las plantas, las cuales son menos tolerantes (entre 6 y 7) se alcanza a percibir un estrés por alcalinidad, en el 39,5% de los valores de pH, el cual se traduce en dificultad para disolver compuestos como el calcio, hierro y fosforo [36], además de producir un aumento en la descomposición de sustancias orgánicas que en el largo plazo generan acumulación de biomasa no deseada en los sistemas de tuberías, como se pudo observar a lo largo del primer ensayo.

- **Oxígeno disuelto:**

Para el primer ensayo se generó un gráfico del oxígeno disuelto diario (Figuras 2-19 y 2-20), logrando encontrar que los valores se mueven en un rango de 3,5 ppm a 5,9 ppm.

Figure 2-19. Oxígeno disuelto diario – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

Figure 2-20. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 1

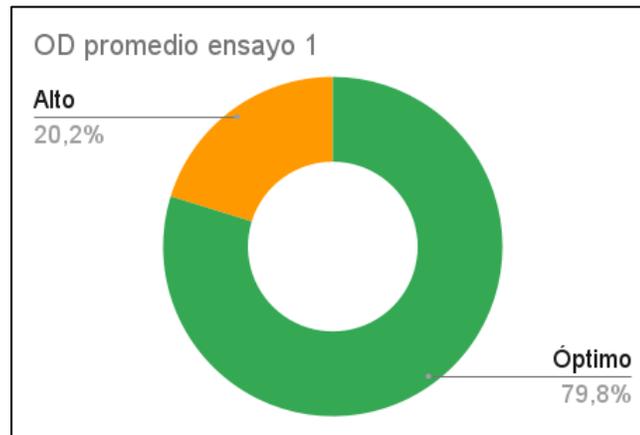
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia también que en la franja horaria de 09:00 h a 17:00 h es cuando se produce un aumento en la producción de oxígeno disuelto.

En el ensayo se manejan valores dentro del rango óptimo (Figura 2-21) para la productividad de peces, plantas y bacterias [30], encontrándose en 79,8%. Aunque se

llegan a notar picos altos que sobrepasan los valores nominales, la duración de estos no llega a producir un impacto grave en la generación de biomasa (principalmente para las especies vegetales), como lo demuestra en su estudio [37].

Figure 2-21. Porcentaje de distribución en los rangos de oxígeno disuelto

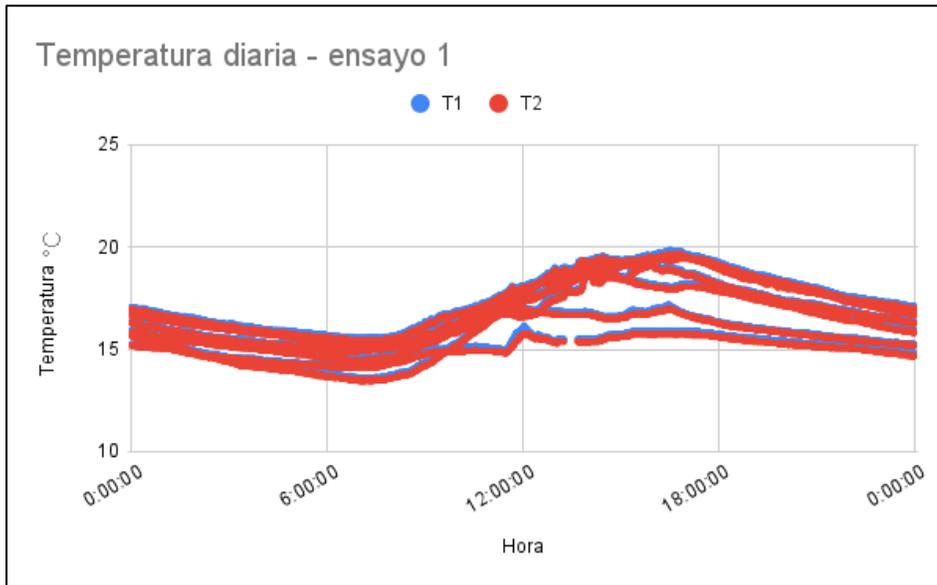


Fuente: Elaboración propia

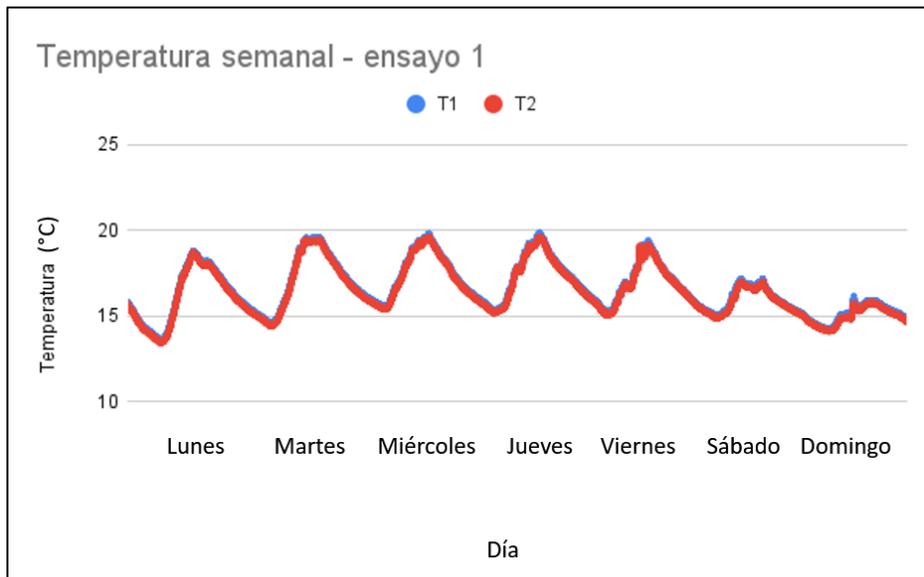
Según reportes de [38] y comparándolo con los resultados obtenidos, una de las principales causas del aumento de productividad en oxígeno disuelto (en las franjas identificadas) se debe al fitoplancton, su fotosíntesis y la relación con la cantidad e intensidad de luz fotosintéticamente disponible, que, aunque en estanques de grandes dimensiones disminuye con la profundidad del agua como lo reporta [39], para el caso de la estructura manejada para estos ensayos no representa un factor crítico.

- **Temperatura:**

En el caso de la temperatura, esta fue medida en dos puntos del tanque con el fin de obtener una medida representativa. En las Figuras 2-22 y 2-23 se muestra la temperatura diaria para los sensores T1 y T2 en el ensayo, logrando ver la homogeneidad con respecto a su distribución.

Figure 2-22. Temperatura diaria – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

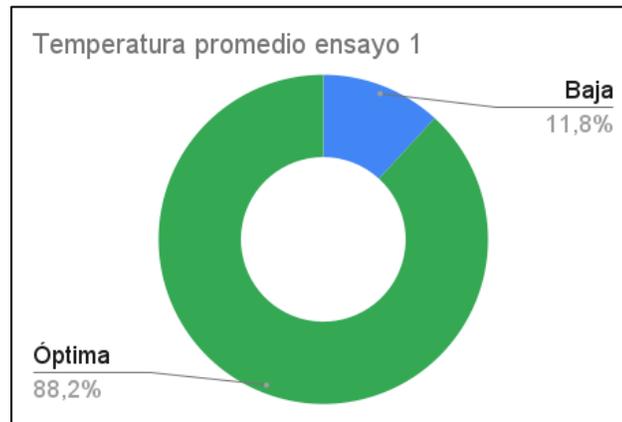
Figure 2-23. Temperatura semanal – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se identifican dos franjas importantes que son manejadas por la temperatura ambiente y la incidencia de las condiciones psicrométricas al exterior del sistema, una comprendida entre las 00:00 h y las 07:00 h en donde se registran los valores más bajos, y la otra entre las 11:00 h y las 17:00 h que representa las horas más cálidas en el agua.

Teniendo en cuenta los valores mínimos de 14,9 °C y máximo de 21 °C, y comparándolos con los encontrados en estudios como [5], se puede notar como los valores medidos por los sensores se mantienen en niveles adecuados (Figura 2-24) para las especies de peces, plantas y bacterias la mayoría del tiempo, en un 88,2%.

Figure 2-24. Porcentaje de distribución en los rangos de temperatura

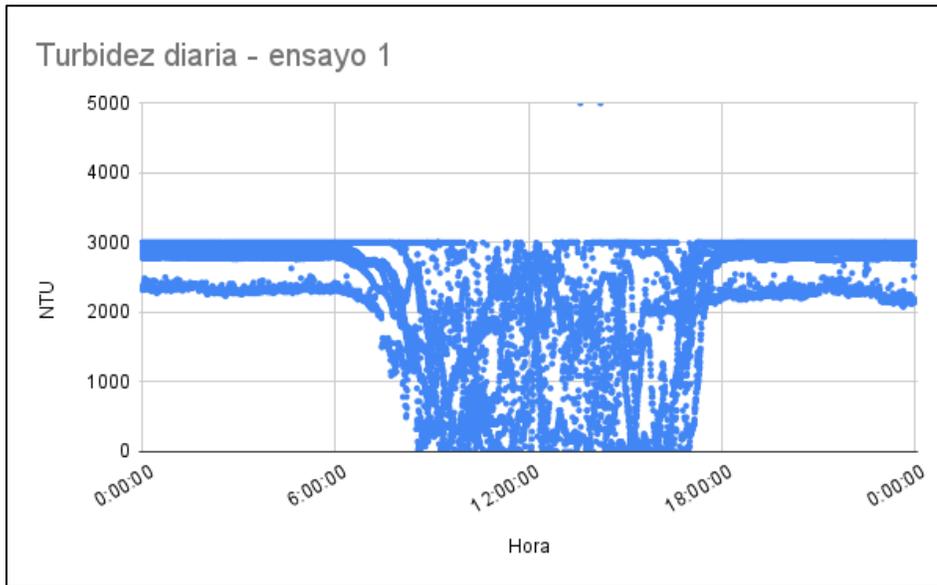


Fuente: Elaboración propia

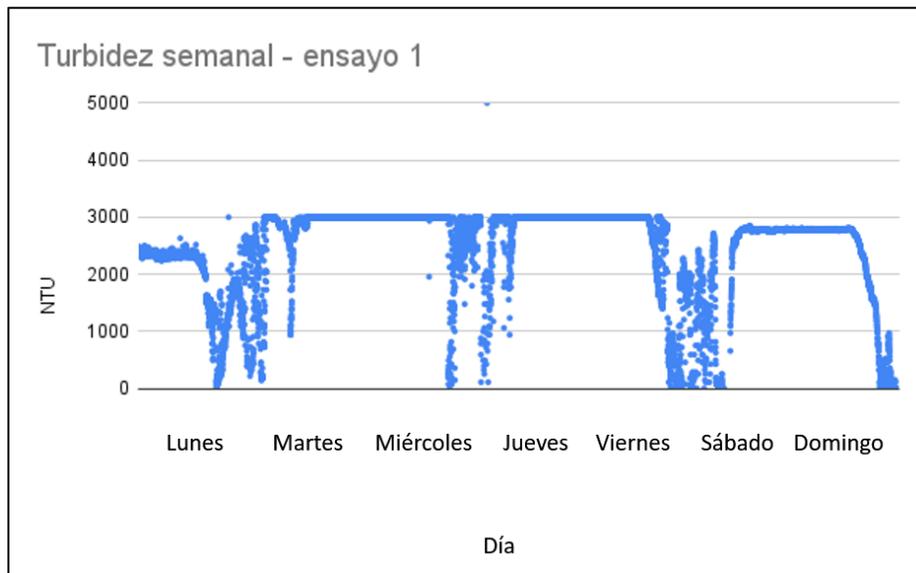
A pesar de que en las madrugadas debido a la inversión térmica se dan picos en cortos períodos de tiempo con una diferencia de 1,7 °C por debajo de lo normal, representando un 11,8% de los valores medidos en el primer ensayo, se ha demostrado [40] que los peces pueden llegar a soportar hasta 5 °C por debajo de los valores nominales por ciertos periodos, a costa de sufrir una reducción en la tasa metabólica.

- **Turbidez:**

Para el primer ensayo se lograron construir las Figuras 2-25 y 2-26, permitiendo tener un panorama claro del comportamiento de la turbidez a lo largo del tiempo. Para los intervalos de tiempo comprendidos entre las 07:00 h y hasta las 17:00 h se puede notar un cambio en la turbidez, observándose una reducción que baja desde 3000 NTU hasta 0 NTU en ciertos instantes.

Figure 2-25. Turbidez diaria – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

Figure 2-26. Turbidez semanal – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

Para lograr interpretar los valores se tiene en cuenta el análisis expuesto por [39], en donde se atribuyen los altos valores a sistemas acuapónicos sin mecanismos de filtrado (tal y como sucede en este estudio), en donde los materiales particulados derivados de los desechos de los peces y el alimento no consumido son la principal causa de niveles NTU más altos de lo normal y generando también deficiencias en los niveles de oxígeno

disuelto, haciendo que sean requeridas acciones como mantenimientos en los tanques de recirculación y la activación de aireadores.

A pesar de lo anteriormente nombrado, y en contraste con las conclusiones de [41], es esencial entender que en los sistemas con tecnología de biofloc requieren de niveles de NTU altos que permitan a las bacterias nitrificantes mantenerse en ambientes favorables para que puedan descomponer los derivados del nitrógeno y amonio, y en el proceso, producir oxígeno que compense la elevada turbidez del agua.

▪ **Peso plantas:**

Para las plantas utilizadas en el primer ensayo de cultivos hidropónicos se obtuvo un promedio de peso inicial equivalente a 2,92 gr mientras que para las plantas del cultivo de control en suelo fue de 2,81 gr (Tabla 2-4). Por otro lado, los pesos finales registrados al terminar el ensayo fueron de 82,57 gr en acuaponía y 81,14 gr en el control.

Table 2-4. Pesos promedio, ganancias y rendimientos de biomasa

	Cultivo Acuapónico Ensayo 1		Cultivo Control Ensayo 1	
	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)
		2,92	82,57	2,81
Ganancia (gr)	79,64		78,33	
Ganancia (%)	96,46		96,53	
Rendimiento (kg/m²)	1,638		1,159	
Peso total (kg)	2,477		2,4342	

En la tabla, además se encuentran registradas las ganancias de peso el ensayo, notando que la diferencia entre tratamientos fue de apenas 1,31 gr, evidenciando un ligero incremento en cuanto a la ganancia del cultivo de lechugas en acuaponía. Con respecto a la ganancia porcentual se encontró que el rendimiento fue superior en el cultivo tradicional en suelo, reflejado una diferencia de 0,07% para el ensayo.

En cuanto a los rendimientos se puede notar una diferencia de 0,479 kg/m² que favorece a los cultivos acuapónicos en sistemas automatizados, haciendo énfasis en las dimensiones y el aprovechamiento del espacio en las tuberías NFT.

- **Altura plantas:**

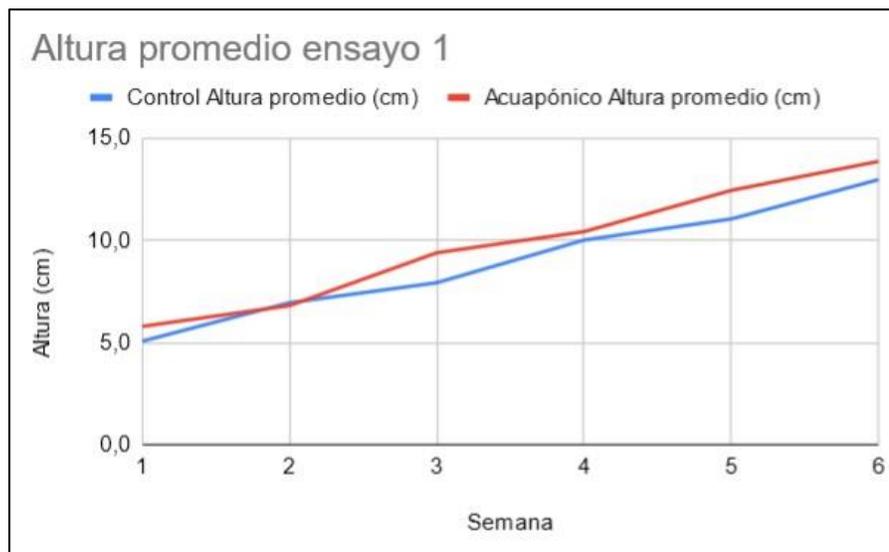
En las mediciones previas al primer ensayo se obtuvo una altura promedio de 5,09 cm para el cultivo control, mientras que para el cultivo acuapónico se encontró que esta fue de 5,81 cm (Tabla 2-5).

Table 2-5. Altura promedio semanal

	Cultivo Control ensayo 1	Cultivo Acuapónico ensayo 1
Semana	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)
1	5,1	5,8
2	7,0	6,8
3	7,9	9,4
4	10,0	10,4
5	11,0	12,5
6	13	13,9

En la tabla también se registran cada uno de los valores promedio por semana para el ensayo en ambos sistemas. A partir de la tabla de alturas por semana, se construye la Figura 2-27 en dónde se observa más a detalle la curva de comportamiento referente al crecimiento de las lechugas.

Figure 2-27. Altura promedio – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar, en los datos comparativos con respecto a la altura, en el caso del ensayo acuapónico se presenta un tamaño final promedio mayor (13,9 cm) a comparación del valor encontrado para el control (13 cm), a pesar de que la variación es apenas de 0,9 cm, se destaca que sus valores son muy similares.

En estudios como el de [24], se notan diferencias de altura de hasta 8 cm al comparar sistemas de balsa flotante versus lecho de sustrato (perlita), atribuyendo el crecimiento en altura a las deficiencias de nitrógeno y a los umbrales de temperatura que la lechuga es capaz de soportar, produciendo plantas grandes en tamaño, pero con bajo volumen foliar.

- **Número de hojas:**

En las mediciones iniciales de ambos cultivos y ensayos se puede encontrar, en la Tabla 2-6, que, al ser plántulas certificadas por el semillero de la Universidad Tadeo Lozano, el proveedor asegura que estas cuentan con 3 hojas verdaderas. A partir del conteo inicial, se puede notar un incremento sostenido de entre 1 y 3 hojas por semana.

Table 2-6. Numero de hojas semanales

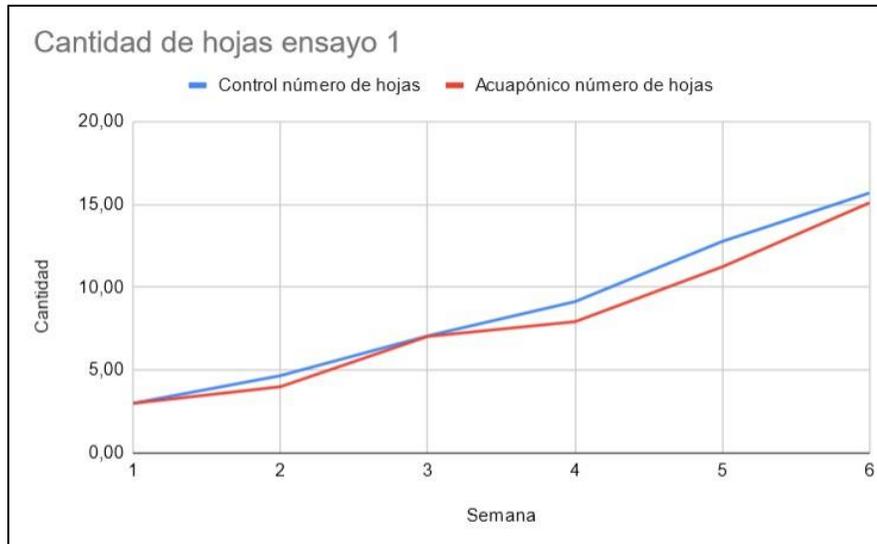
	Cultivo Control ensayo 1	Cultivo Acuapónico ensayo 1
Semana	número de hojas	número de hojas
1	3,00	3,00
2	4,67	4,00
3	7,07	7,03
4	9,13	7,92
5	12,77	11,23
6	15,69	15,10

Como valor final para el ensayo en acuaponía se tiene un promedio de 15,1 hojas en contraste con las 15,69 hojas del cultivo control.

En la tabla también se registran cada uno de los valores promedio por semana para cada uno de los ensayos en ambos sistemas. A partir de la tabla de hojas por semana, se

construye la Figura 2-28 en donde se observa más a detalle la curva de comportamiento referente al crecimiento de hojas de las lechugas.

Figure 2-28. Cantidad de hojas – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, y realizando una comparación, se puede notar que, aunque el crecimiento en hojas del sistema acuapónico es inferior al control, la diferencia es de apenas 0,5 cm. Cabe resaltar que en el inicio del ensayo, el sistema acuapónico tuvo un incremento más rápido en crecimiento de hojas, a pesar de esto, luego de la semana 4 su rendimiento disminuyó significativamente en contraste con el control.

2.5 Conclusiones

Con el fin de realizar el diseño y construcción del sistema automatizado sobre un sistema tradicional, es necesario proceder con un levantamiento de datos adecuado, incluyendo un dimensionamiento que describa las características de las especies acuáticas y vegetales a cultivar, identificando los rangos óptimos. Llevar a cabo estas tareas permite que la selección de sensores, actuadores y controladores sea más sencilla pero también adecuada y objetiva.

Cuando se realizan los modos de operación de los nodos, y en general la programación del sistema de control y su interfaz, es importante tener en cuenta que los usuarios puedan interactuar de forma sencilla, con funciones básicas que este pueda aprender y ejecutar,

por eso se recomienda un acercamiento integral con los usuarios que trabajen con los nodos, tanto central como periférico.

Aunque la selección de los elementos como sensores, actuadores y controladores fue adecuada, los protocolos de comunicación pueden llegar a limitar e interferir con la transmisión de la información, es por esto que en algunos casos pueden presentarse retrasos en la muestra en tiempo real de las variables e incluso perder valores.

La propuesta basa su proceder en la aplicación de tecnologías de bajo y medio costo con el fin de hacerla atractiva para nuevos usuarios que deseen aplicar nuevas herramientas en sus cultivos, por esta razón fue diseñada para ser modular, ampliable mediante nodos periféricos económicos. Aunque lo anterior es posible, se recomienda aplicar diferentes métodos de comunicación como WiFi, GPRS o LoRa que permitan una escalabilidad mucho más adecuada y se pueda adaptar a terrenos y territorios diferentes.

2.6 Referencias

- [1] A. Neori *et al.*, "Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture," *Aquaculture*, vol. 231, no. 1, pp. 361–391, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.015>.
- [2] H. Monsees, J. Suhl, M. Paul, W. Kloas, D. Dannehl, and S. Würtz, "Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer," *PLoS One*, 2019, doi: [10.1371/journal.pone.0218368](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218368).
- [3] S. Wongkiew, Z. Hu, K. Chandran, J. W. Lee, and S. K. Khanal, "Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review," *Aquacultural Engineering*. 2017, doi: [10.1016/j.aquaeng.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004).
- [4] H. W. Palm *et al.*, "Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature," *Aquaculture International*. 2018, doi: [10.1007/s10499-018-0249-z](https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z).
- [5] A. R. Yanes, P. Martinez, and R. Ahmad, "Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems," *Journal of Cleaner Production*. 2020, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.121571](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571).

-
- [6] Z. M. Gichana, D. Liti, H. Waidbacher, W. Zollitsch, S. Drexler, and J. Waikibia, "Waste management in recirculating aquaculture system through bacteria dissimilation and plant assimilation," *Aquaculture International*. 2018, doi: 10.1007/s10499-018-0303-x.
- [7] B. König, J. Janker, T. Reinhardt, M. Villarroel, and R. Junge, "Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system," *J. Clean. Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.037.
- [8] H. Monsees, W. Kloas, and S. Wuertz, "Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes," *PLoS One*, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0183056.
- [9] K. H. Dijkgraaf, S. Goddek, and K. J. Keesman, "Modeling innovative aquaponics farming in Kenya," *Aquac. Int.*, 2019, doi: 10.1007/s10499-019-00397-z.
- [10] S. Goddek and O. Körner, "A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments," *Agric. Syst.*, vol. 171, pp. 143–154, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.01.010>.
- [11] D. Karimanzira, K. J. Keesman, W. Kloas, D. Baganz, and T. Rauschenbach, "Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system," *Aquac. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/j.aquaeng.2016.10.004.
- [12] P. A. Schwartz, T. S. Anderson, and M. B. Timmons, "Predictive equations for butterhead lettuce (*Lactuca sativa*, cv. *flandria*) root surface area grown in aquaponic conditions," *Horticulturae*, 2019, doi: 10.3390/horticulturae5020039.
- [13] S. Pedersen and T. Wik, "A comparison of topologies in recirculating aquaculture systems using simulation and optimization," *Aquac. Eng.*, vol. 89, p. 102059, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102059>.
- [14] M. Manju, V. Karthik, S. Hariharan, and B. Sreekar, "Real time monitoring of the environmental parameters of an aquaponic system based on internet of things," 2017, doi: 10.1109/ICONSTEM.2017.8261342.
- [15] R. Lefers, A. Alam, F. Scarlett, and T. Leiknes, "Aquaponics water use and nutrient cycling in a seawater-cooled controlled environment agriculture system," 2020, doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1271.54.
- [16] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, and Q. Wei, "Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review," *IEEE Access*. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953491.
- [17] R. Calone *et al.*, "Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics," *Sci. Total Environ.*, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.167.

-
- [18] J. P. Mandap *et al.*, “Oxygen Monitoring and Control System Using Raspberry Pi as Network Backbone,” *TENCON 2018 - 2018 IEEE Reg. 10 Conf.*, no. October, pp. 1381–1386, 2018.
- [19] S. E. Wortman, “Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 194, pp. 34–42, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.045>.
- [20] S. Y. Choi and A. M. Kim, “Development of indoor aquaponics control system using a computational thinking-based convergence instructional model,” *Univers. J. Educ. Res.*, 2019, doi: 10.13189/ujer.2019.071509.
- [21] W. Vernandhes, N. S. Salahuddin, A. Kowanda, and S. P. Sari, “Smart aquaponic with monitoring and control system based on IoT,” 2018, doi: 10.1109/IAC.2017.8280590.
- [22] D. Karimanzira and T. Rauschenbach, “Enhancing aquaponics management with IoT-based Predictive Analytics for efficient information utilization,” *Inf. Process. Agric.*, vol. 6, no. 3, pp. 375–385, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.12.003>.
- [23] A. M. Nagayo, C. Mendoza, E. Vega, R. K. S. Al Izki, and R. S. Jamisola, “An automated solar-powered aquaponics system towards agricultural sustainability in the Sultanate of Oman,” *2017 IEEE Int. Conf. Smart Grid Smart Cities, ICSGSC 2017*, pp. 42–49, 2017, doi: 10.1109/ICSGSC.2017.8038547.
- [24] L. F. Hernández, “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*),” p. 127, 2017, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/62310/1/1057592154.2018.pdf>.
- [25] U. Knaus and H. W. Palm, “Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania),” *Aquaculture*, 2017, doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.01.020.
- [26] M. Colorado and M. Ospina, *Acuaponia, Herramienta de formación en tiempos de paz*. 2019.
- [27] H. Wu, Y. Zou, J. Lv, and Z. Hu, “Impacts of aeration management and polylactic acid addition on dissolved organic matter characteristics in intensified aquaponic systems,” *Chemosphere*, vol. 205, pp. 579–586, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.089>.
- [28] B. Marques, R. Calado, and A. I. Lillebø, “New species for the biomitigation of a super-intensive marine fish farm effluent: Combined use of polychaete-assisted sand filters and halophyte aquaponics,” *Sci. Total Environ.*, vol. 599–600, pp. 1922–1928,

- 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.121>.
- [29] S. Khalil, "Growth performance, nutrients and microbial dynamic in aquaponics systems as affected by water temperature," *Eur. J. Hortic. Sci.*, 2018, doi: 10.17660/eJHS.2018/83.6.7.
- [30] C. Maucieri, C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo, and M. Borin, "Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review," *Italian Journal of Agronomy*. 2018, doi: 10.4081/ija.2017.1012.
- [31] W. Lennard and J. Ward, "A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system," *Horticulturae*, 2019, doi: 10.3390/horticulturae5020027.
- [32] D. Tanikawa, Y. Nakamura, H. Tokuzawa, Y. Hirakata, M. Hatamoto, and T. Yamaguchi, "Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage nitrification–denitrification using a down-flow hanging sponge reactor," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 132, pp. 268–273, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.04.016>.
- [33] S. M. Pinho, D. Molinari, G. L. de Mello, K. M. Fitzsimmons, and M. G. Coelho Emerenciano, "Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties," *Ecol. Eng.*, vol. 103, pp. 146–153, 2017, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.03.009.
- [34] E. G. Durigon *et al.*, "Biofloc technology (BFT): Adjusting the levels of digestible protein and digestible energy in diets of Nile tilapia juveniles raised in brackish water," *Aquac. Fish.*, vol. 5, no. 1, pp. 42–51, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.07.001>.
- [35] L. Collazos and J. Arias., "Fundamentals of bioflocs technology (BFT). An alternative for fish farming in Colombia . A review .," *Orinoquia*, vol. 19, pp. 77–86, 2015.
- [36] Y. Zou, Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, C. Guimbaud, and Y. Fang, "Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics," *Bioresour. Technol.*, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.12.079.
- [37] J. Suhl, B. Oppedijk, D. Baganz, W. Kloas, U. Schmidt, and B. van Duijn, "Oxygen consumption in recirculating nutrient film technique in aquaponics," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*., vol. 255, pp. 281–291, 2019, doi: 10.1016/j.scienta.2019.05.033.
- [38] F. Li *et al.*, "Effects of Rice-Fish Co-culture on Oxygen Consumption in Intensive Aquaculture Pond," *Rice Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 50–59, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.12.004>.
- [39] Z. Khiari, K. Alka, S. Kelloway, B. Mason, and N. Savidov, "Integration of Biochar Filtration into Aquaponics: Effects on Particle Size Distribution and Turbidity

Removal,” *Agric. Water Manag.*, vol. 229, p. 105874, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105874>.

[40] M. Colorado and M. Ospina, “Acuaponia, Herramienta de formación en tiempos de paz,” p. 66, 2019, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11404/5555>.

[41] E. C. Legarda et al., “Integrated recirculating aquaculture system for mullet and shrimp using biofloc technology,” *Aquaculture*, vol. 512, p. 734308, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734308>.

3. Evaluación del rendimiento de biomasa de Lechuga crespa (*Lactuca sativa*) cultivada en sistemas de producción acuapónica NFT automatizada y sistemas tradicionales de siembra en suelo

3.1 Resumen

En la actualidad los sistemas automatizados representan una oportunidad para monitorear, evaluar y controlar diferentes sistemas o procesos industriales, es por esta razón que se ha ido extrapolando hacia los sistemas agrícolas tradicionales en donde se requiera mantener bajo condiciones estables ciertas características al interior de los cultivos. Teniendo en cuenta lo anterior, y basada en el diseño y construcción de un sistema acuapónico NFT automatizado (ubicado en el Centro de Biotecnología Agropecuaria CBA del SENA), se lleva a cabo una evaluación comparativa del rendimiento de biomasa de Lechuga crespa (*Lactuca sativa*) cultivada en este medio, teniendo como población de control un lote de la misma especie bajo un sistema tradicional de siembra en suelo. Para llevar a cabo la evaluación se desarrollaron 2 repeticiones (cosechas) de 42 días de duración, para cada una se utilizaron 60 plantas de *L. sativa* germinadas en semilleros con una proporción de 30 plantas en acuaponía, mantenidas a lo largo de su desarrollo vegetativo (a partir de plantulación hasta la cosecha de la planta lista para distribución); y 30 plantas en siembra tradicional (control) trasplantadas desde el estado de plantulación. En cada repetición se tuvieron en cuenta los parámetros de diámetro de cuello, altura de planta, peso por planta y número de hojas, todos tomados 1 vez por semana, desde el inicio hasta el final de cada ensayo, tanto para el sistema acuapónico como para el control. Se evidenció un rendimiento superior en el sistema acuapónico automatizado, reflejado en un aumento del 52,82 % en cuanto a kg/m^2 . Además, se logró realizar un levantamiento de información crítica concerniente a los valores de pH, Oxígeno disuelto, temperatura y

turbidez, comparando e identificando los porcentajes en cada nivel (bajo, óptimo, alto, muy alto) de los rangos de operación recomendables para mantener el sistema estable y operativo en ambientes de producción estandarizados.

Palabras clave: acuaponía, automatización, control, rendimiento, comparación.

3.2 Introducción

La acuaponía es un sistema de cultivo que integra sistemas de recirculación acuícolas, entendidos como entornos intensivos de producción de especies acuáticas, en conjunto con sistemas hidropónicos cuya principal característica es la generación de especies de plantas en medios de cultivo sin sustrato [1]. Hoy en día, la acuaponía ha ido incrementando su popularidad debido a diversos estudios que sugieren reducciones en el consumo de agua [2], el impacto ambiental [3] y la eficiencia en el aprovechamiento de nutrientes [4].

A pesar del potencial de la acuaponía, una de las mayores preocupaciones se centra en el rendimiento de biomasa de plantas comparado con otro tipo de técnicas de cultivo [5]. En este punto se crea la necesidad de comparar la producción en estos sistemas con el fin de evaluar y determinar si tiene la habilidad de superar, o al menos equiparar la calidad del producto [1]. A lo largo de los últimos años, se han realizado estudios comparativos con distintos resultados, como los enunciados por [6] los cuales han reportado que existe un déficit de producción de biomasa con respecto a los sistemas hidropónicos clásicos, por otro lado, en artículos como [7] se ha concluido que con el uso adecuado de suplementos nutricionales se puede equiparar su rendimiento al de los sistemas hidropónicos e incluso a los sistemas tradicionales de siembra en suelo.

En cualquier caso, la mayoría de los estudios identificados, resaltan una gran variedad de factores que afectan directamente la productividad de las especies cultivadas, desde el tipo de peces y plantas seleccionados [8], la densidad de los cultivos [9], el ratio pez/planta [10], las tasas y frecuencias de recirculación y alimentación [11], así como el tipo de acople recirculante (simple o doble recirculación conocido también como desacoplado) [12],

llegando al tipo de sistema hidropónico (medio de sustrato, NFT o raíz flotante), entre otros tantos que generan un impacto en la variabilidad del rendimiento de biomasa del sistema.

Teniendo en cuenta las razones enunciadas, y desde la recomendación de varios autores, se propone entonces generar un análisis comparativo mediante la evaluación del rendimiento de biomasa de Lechuga crespa (*Lactuca sativa*) cultivada en sistemas de producción acuapónica automatizada de Carpa roja (*Cyprinus carpio*) y sistemas tradicionales de siembra en suelo.

En concordancia con lo descrito anteriormente, este estudio tiene como objetivo principal realizar la evaluación comparativa de la biomasa de lechuga crespa cultivada desde su fase de plantulación en el sistema acuapónico automatizado en contraste con la siembra tradicional en suelo, implementando un entorno controlado que permita mantener los niveles adecuados (reportados por literatura y estudios previos en el sistema acuapónico del Centro de Biotecnología Agrícola del SENA regional Mosquera) asegurando la repetibilidad y reproducibilidad de cada ensayo.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Material biológico

Para la especie vegetal fueron utilizadas 120 plántulas de lechuga crespa verde (*Lactuca sativa*), adquiridas en el semillero de plantulación de la Universidad Jorge Tadeo Lozano ubicado en Chía-Cundinamarca. Cada una de las plántulas contando con 3 hojas verdaderas y un peso inicial promedio de 2,9 gr luego de ser removido el sustrato de turba.

Para la especie acuática se usaron 10 peces en estado adulto (60 semanas) de Carpa roja (*Cyprinus carpio*) criados bajo el sistema biofloc en las instalaciones del CBA Sena regional Mosquera-Cundinamarca. Con un peso en promedio de 1,1kg y una longitud de 30cm. Bajo un régimen de alimentación de 1 ración diaria de 182gr aproximadamente, manteniendo niveles proteicos de 25% a 30% con pellets de 4mmx4mm.

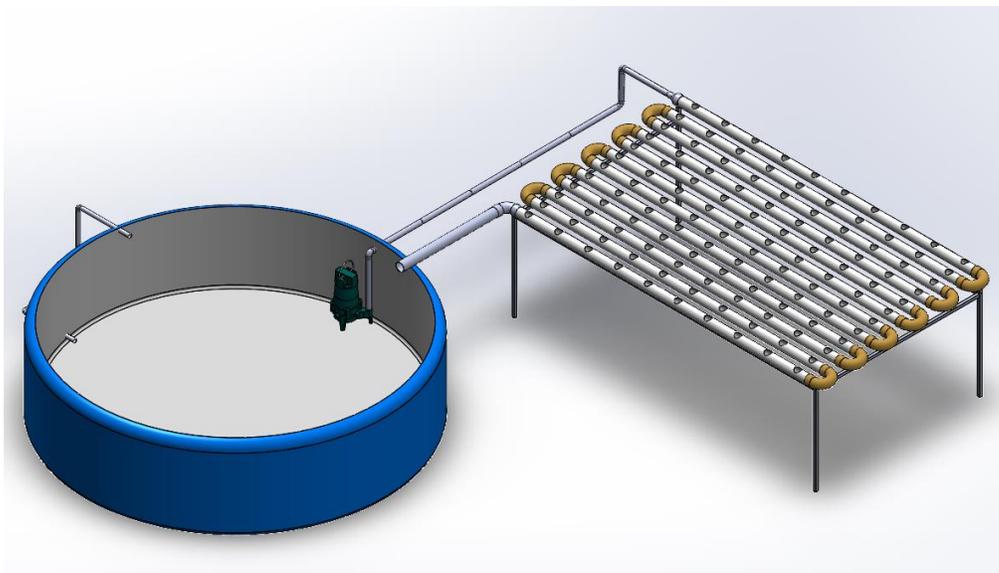
Para la generación de bacterias nitrosomonas y nitrobacter se prepara el tanque previo al inicio ciclo de cultivo con una relación C:N (carbono-nitrógeno) de 10:1. Una vez se ha

alcanzado el tiempo para generación de bio-flóculos (alrededor de 15 días), se inicia con la producción de peces y plantas.

3.3.2 Sistema acuapónico NFT automatizado

Se implementa un sistema acuapónico NFT automatizado que cuenta con un sistema de recirculación accionado por una bomba sumergible encargada de llevar el agua desde el tanque acuícola hacia la red de tuberías hidropónicas NFT (Figura 3-1).

Figure 3-1. Sistema acuapónico SENA CBA.



Fuente: Elaboración propia

Cuenta además con un sistema de oxigenación propio, sobre el tanque se encuentra una torre de aireación en la que el agua proveniente de una bifurcación en las tuberías de recirculación entra por la parte superior de la torre y pasa a través de cuatro bandejas perforadas para generar oxígeno por caída de gravedad.

El sistema hidropónico, está compuesto por una serie de tuberías de 3" perforadas con agujeros de 50 mm de diámetro y espaciados a 30 cm entre centros, que son capaces de albergar hasta 120 plantas

Mientras que el sistema acuícola, en el que se desarrolla la crianza de peces, cuenta con un tanque cilíndrico de 9 m³ (Radio externo 1.5 m y Altura interna 0.72m).

- **Manejo del sistema automatizado:**

El manejo del sistema automatizado es realizado mediante la interfaz humano máquina (Figura 3-2), configurando los ciclos y frecuencias de recirculación como lo reporta [13], con una tasa de recirculación a tiempo completo de 280 l/h

Figure 3-2. Configuración del modo de control – HMI sistema automatizado



Fuente: Elaboración propia

Se realiza un mantenimiento semanal para cada ciclo de cultivo para la remoción de materia orgánica acumulada en las tuberías, asegurando el correcto funcionamiento del sistema.

3.3.3 Ciclos de cultivo

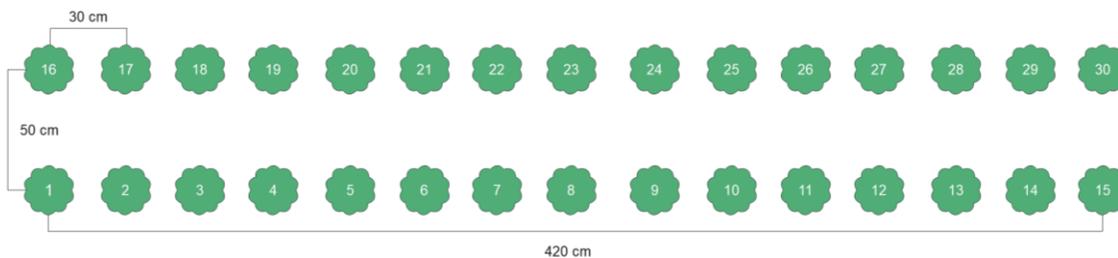
A modo de preparación preliminar para el tanque, se ejecutan las tareas requeridas para la generación del biofloc en el cual estarán criándose los peces.

Una vez obtenido el biofloc se siembran las 10 carpas rojas adultas que son trasladadas desde el tanque principal del CBA SENA al sistema acuapónico automatizado, mismas que serán usadas a lo largo de todos ensayos. Su implementación en estado de adultez corresponde a que se encuentran en una etapa de crecimiento lenta en la que su consumo de alimento, generación de excretas y nutrientes es estable y permite que sean mantenidos el tiempo que duren los ensayos con plantas.

Para la obtención de datos significativos, se realizaron 2 ciclos iguales de cultivo vegetal, descritos a continuación:

Inicialmente se siembra un lote de 2,1 m² de 30 plántulas de lechuga en un sistema de cultivo tradicional en suelo (Figura 3.3), el sustrato es suelo mineral y se manejan con un régimen de riego por goteo dos veces al día.

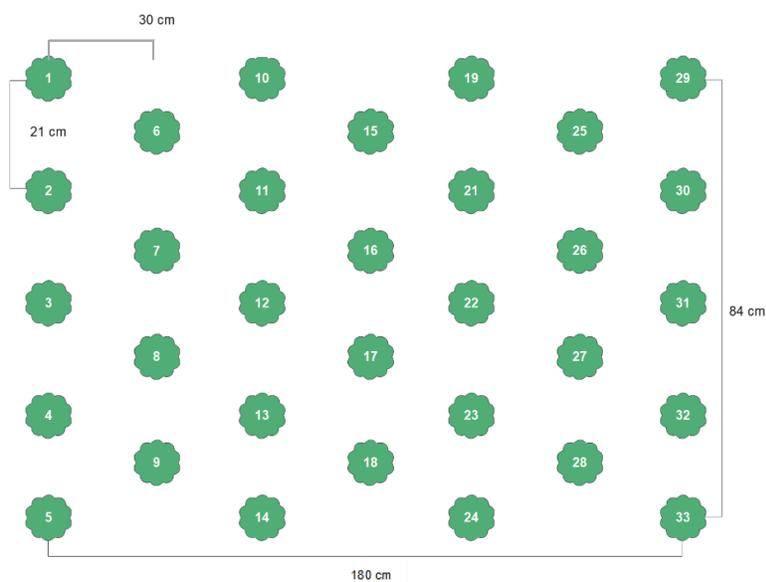
Figure 3-3. Distribución del lote de control de cultivo en suelo



Fuente: Elaboración propia

De forma paralela se siembra un lote de 1,5 m² de 30 plántulas de lechuga con espuma agrícola de la marca *Germinar* (Figura 3-4).

Figure 3-4. Distribución del lote del sistema acuapónico



Fuente: Elaboración propia

Se realizan 6 tomas de datos (peso únicamente al inicio y final del ensayo, altura y número de hojas), una vez por semana (por 42 días) de todas las lechugas de cada lote.

3.3.4 Registro y análisis de datos

- **Registro de sensores:**

Cada 30 segundos se registran y almacenan los datos tomados para las variables de pH, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez y flujo. Una vez a la semana se descargan y grafican los datos para su posterior análisis.

- **Registro de datos biomasa de lechuga:**

Partiendo de la base metodológica planteada por [14] se realiza la medición de los parámetros lechuga como se enuncia a continuación:

- **Peso:** En primera instancia las plántulas de lechuga seleccionadas son pesadas momentos previos a la siembra inicial, lavándolas y dejándolas en remojo para que la tierra y el agua no interfieran en la medición, posteriormente haciendo uso de una balanza digital se pesan y registran los valores obtenidos. Para la segunda toma de datos, al final del ciclo de cultivo, se repite el procedimiento anterior, para reducir el agua contenida en las raíces.
- **Altura:** Una vez por semana, las lechugas seleccionadas aleatoriamente son medidas desde el cepellón hasta la corona de la planta utilizando un calibrador Vernier.
- **Número de hojas:** Una vez a la semana son contadas de forma manual, teniendo en cuenta las hojas verdaderas y excluyendo todos los cotiledones.

- **Análisis de datos biomasa de lechuga:**

Para el procesamiento de los datos se consideraron las ganancias que relacionan los valores al inicio del cultivo y los valores tomados en la cosecha (1) y (2).

$$\text{ganancia dimensional} = X_f - X_i \quad (1)$$

$$\text{ganancia porcentual} = \frac{X_f - X_i}{X_f} \times 100 \quad (2)$$

Donde X_i corresponde al valor inicial de la variable (tomada al inicio del cultivo) y X_f al valor final (tomada en cosecha).

Estos valores son calculados para ganancia en peso (gr), altura (cm) y diámetro de cuello (cm).

- **Análisis comparativo de los tratamientos:**

Como paso final, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los datos de biomasa de lechuga cultivada en el sistema acuapónico NFT automatizado y los obtenidos para el sistema tradicional de siembra en suelo.

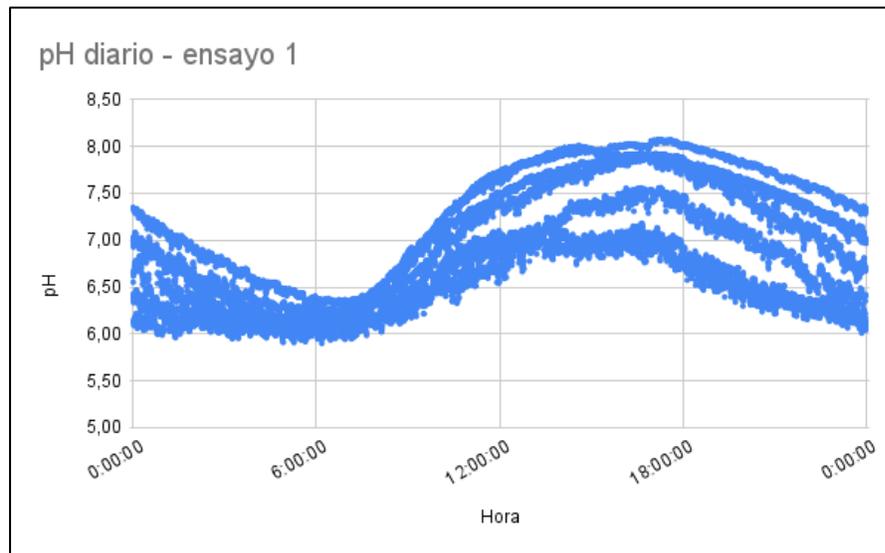
3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Levantamiento y análisis de la información - Sensores

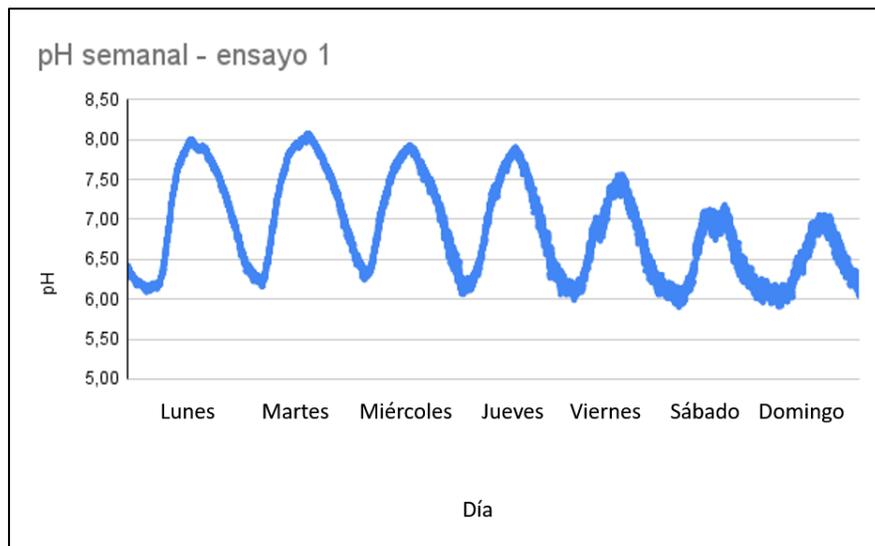
Se recopilaron los datos semanales de ambos ensayos y se agruparon por variable en dos lapsos de tiempo, promedio diario (de 0 a 24 horas) y promedio semanal (de lunes a viernes), además se muestran los porcentajes en los rangos bajo, óptimo, alto y muy alto:

- **pH:**

Para el primer ensayo se generó un gráfico del pH diario (Figuras 3-5 y 3-6), en donde se puede observar que los valores más bajos se encuentran entre las 00:00 h y las 06:00 h mientras que los más altos se dan en la franja horaria comprendida entre las 12:00 h y las 18:00 h.

Figure 3-5. pH diario – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

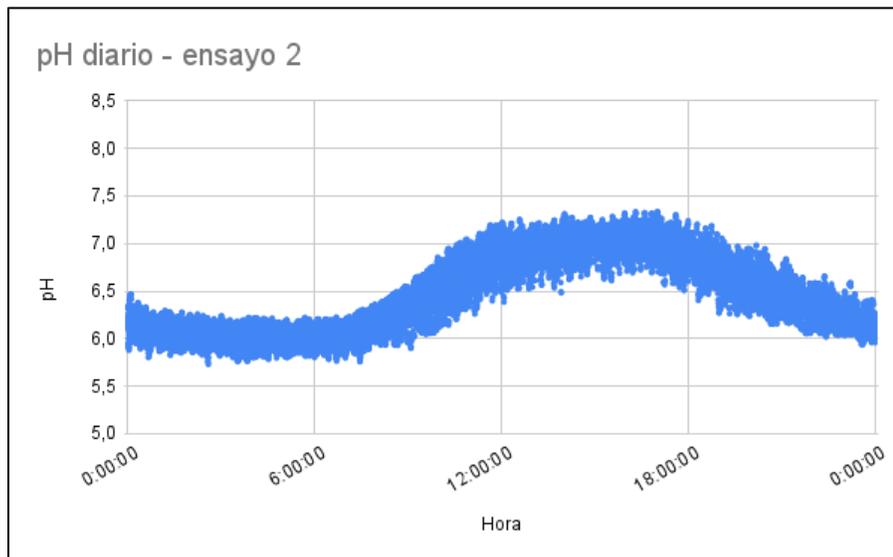
Figure 3-6. pH semanal – ensayo 1

Fuente: Elaboración propia

Además, se hace especial énfasis en los picos máximos que alcanzan valores de hasta 8,01 y los picos mínimos que se encuentran alrededor de 5,8, con una diferencia promedio de 2 aproximadamente. Cabe resaltar que hay reducciones hacia el final del ensayo debido a la acumulación de biomasa en las tuberías, problema que se resolvió haciendo mantenimiento y limpieza constante en los siguientes ensayos.

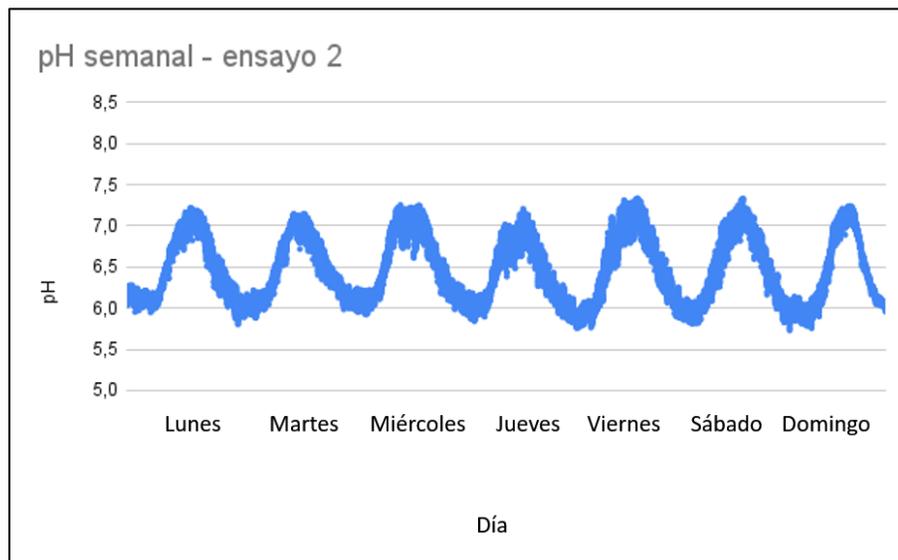
Para el segundo ensayo (Figuras 3-7 y 3-8), al igual que en el primero, los valores más bajos se pueden visualizar entre las 00:00 h y las 06:00 h y, a su vez los más altos se dan en la franja horaria comprendida entre las 12:00 h y las 18:00 h.

Figure 3-7. pH diario – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-8. pH semanal – ensayo 2



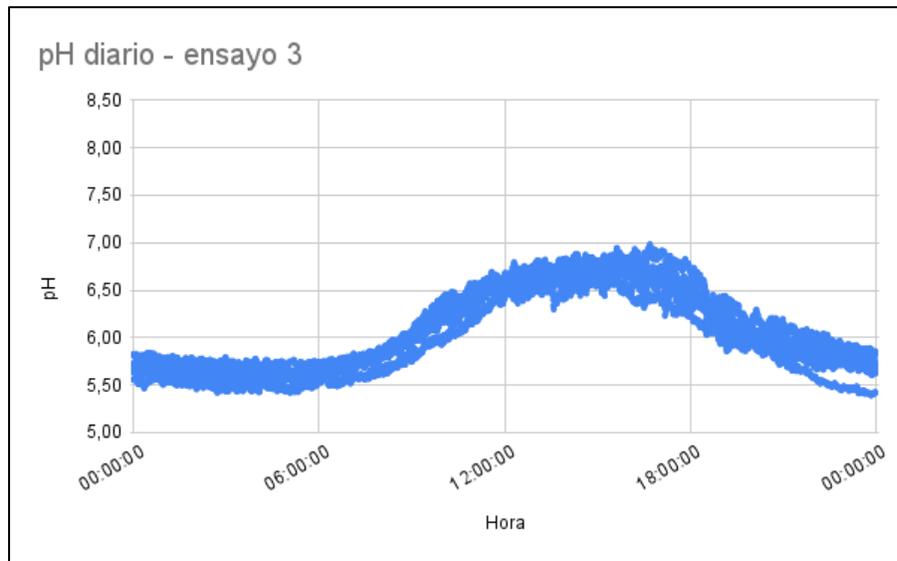
Fuente: Elaboración propia

En este caso se observa una reducción en los valores de pH máximos, rondando los 7,3.

En ambos casos se identifica una tendencia en la franja horaria tanto para las curvas ascendentes como para las descendentes.

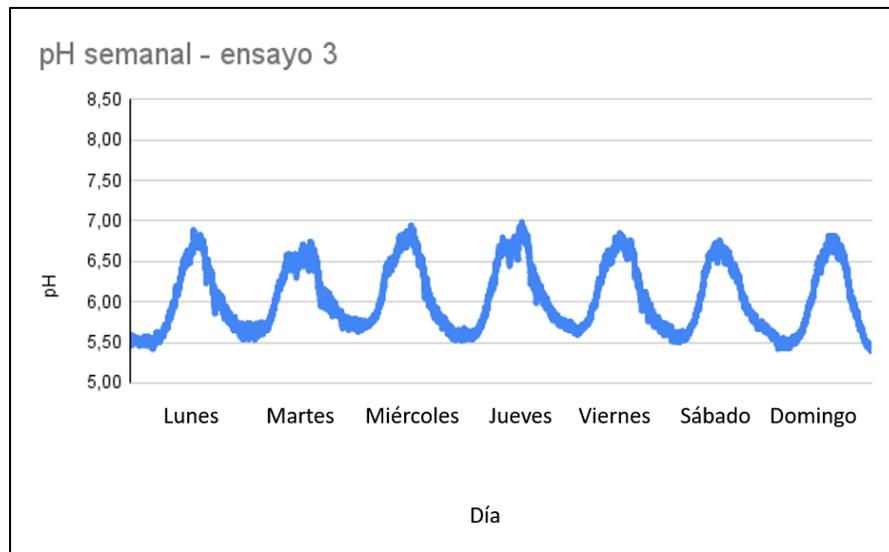
Para el tercer ensayo (Figuras 3-9 y 3-10), se nota una tendencia en la franja horaria de los puntos mínimos y máximos, haciendo especial énfasis en una reducción en la diferencia absoluta siendo de 1,5 aproximadamente.

Figure 3-9. pH diario – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

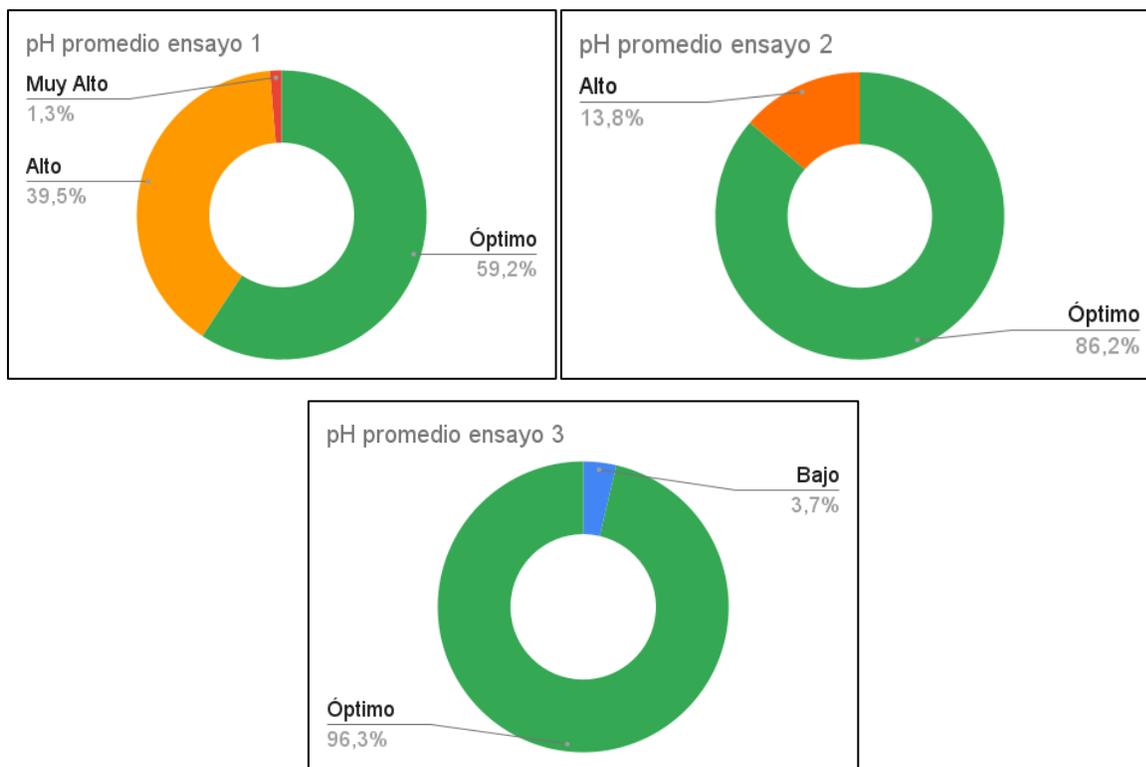
Figure 3-10. pH semanal – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los reportes de [15] y [16] los valores promedio calculados para los tres ensayos, se genera un gráfico (Figura 3-11) en dónde se puede notar, para el primer ensayo, que el 59,2% de los valores de pH se ajustan a los admisibles para el bienestar de los peces (entre 6 y 8) y las bacterias nitrificantes (entre 5,5 y 7).

Figure 3-11. Porcentaje de distribución en los rangos de pH



Fuente: Elaboración propia

Aunque para el caso de las plantas, las cuales son menos tolerantes (entre 6 y 7) se alcanza a percibir un estrés por alcalinidad, en el 39,5% de los valores de pH, el cual se traduce en dificultad para disolver compuestos como el calcio, hierro y fosforo [17], además de producir un aumento en la descomposición de sustancias orgánicas que en el largo plazo generan acumulación de biomasa no deseada en los sistemas de tuberías, como se pudo observar a lo largo del primer ensayo.

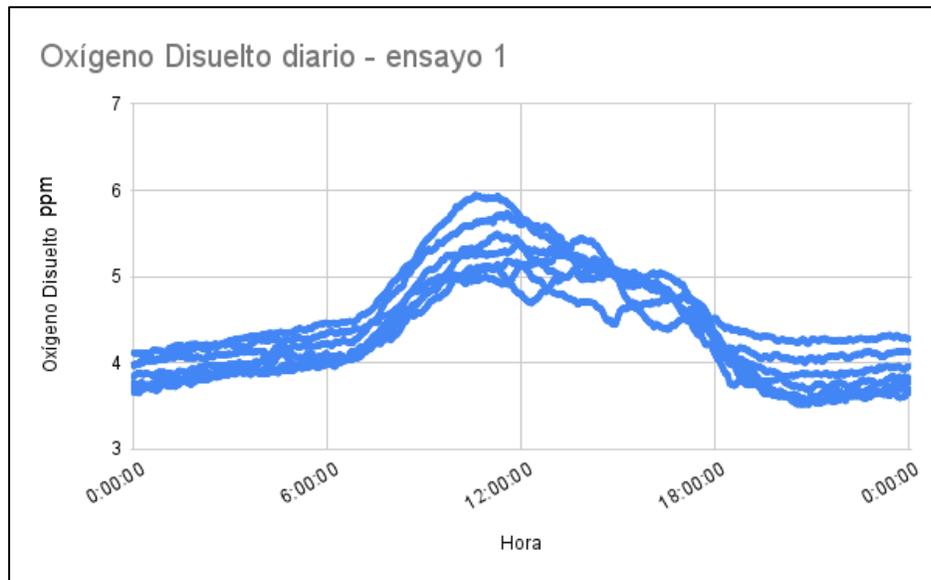
Para los ensayos 2 y 3 se tuvo en cuenta una mejor adecuación con respecto a la metodología de limpieza de tuberías, reduciendo la cantidad de biomasa acumulada y permitiendo una recirculación adecuada en el sistema. Como resultado el sistema de control trabajó de forma óptima y permitió tener un flujo regular de agua que se vio reflejado

en niveles más estables de pH, teniendo un 86,2% y un 96,3% en valores aceptables para los ensayos 2 y 3 respectivamente.

- **Oxígeno disuelto:**

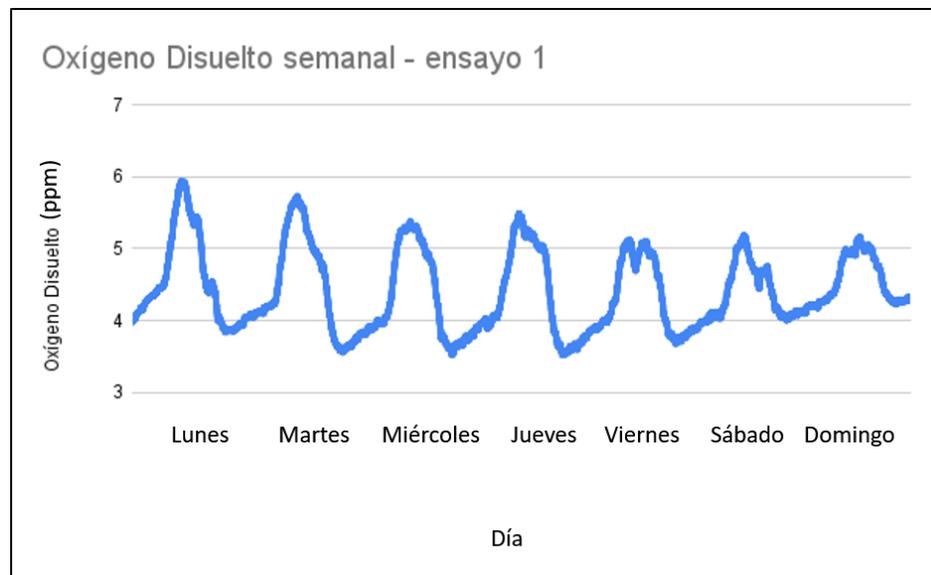
Para el primer ensayo se generó un gráfico del oxígeno disuelto diario (Figuras 3-12 y 3-13), logrando encontrar que los valores se mueven en un rango de 3,5 ppm a 5,9 ppm.

Figure 3-12. Oxígeno disuelto diario – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-13. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 1



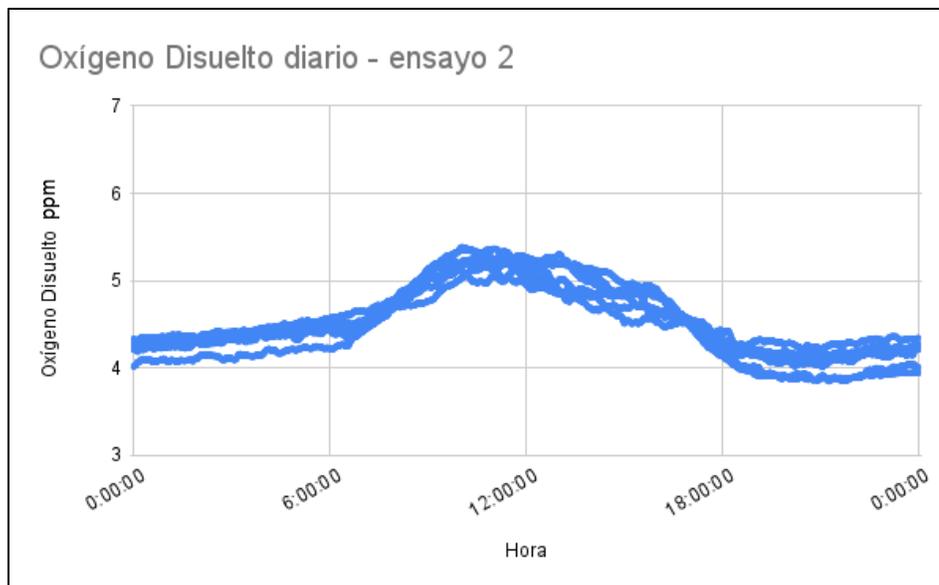
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia también que en la franja horaria de 09:00 h a 17:00 h es cuando se produce un aumento en la producción de oxígeno disuelto.

Según reportes [19] y comparándolo con los resultados obtenidos, una de las principales causas del aumento de productividad en oxígeno disuelto (en las franjas identificadas) se debe al fitoplancton, su fotosíntesis y la relación con la cantidad e intensidad de luz fotosintéticamente disponible, que, aunque en estanques de grandes dimensiones disminuye con la profundidad del agua como lo reporta [20], para el caso de la estructura manejada para estos ensayos no representa un factor crítico.

En el segundo ensayo (Figura 3-14 y 3-15) se evidencia una reducción en los picos máximos de oxígeno disuelto, esto se puede notar por el rango de 3,8 ppm a 5,3 ppm.

Figure 3-14. Oxígeno disuelto diario – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-15. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 2

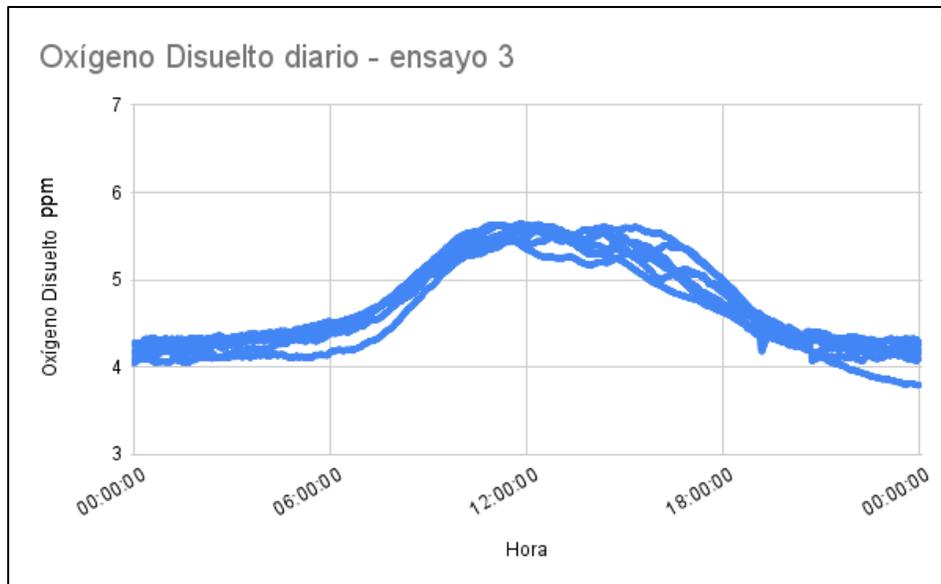


Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el ensayo 1, se maneja una franja horaria de mayor concentración de oxígeno disuelto para las horas comprendidas entre las 09:00 h y las 17:00 h.

Para el último ensayo (Figuras 3-16 y 3-17) se manejan rangos similares a los anteriores, notando una tendencia similar en las diferencias entre mínimos y máximos diarios, de 4 a 5,5 ppm, siendo esta de 1,5 ppm aproximadamente.

Figure 3-16. Oxígeno disuelto diario – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

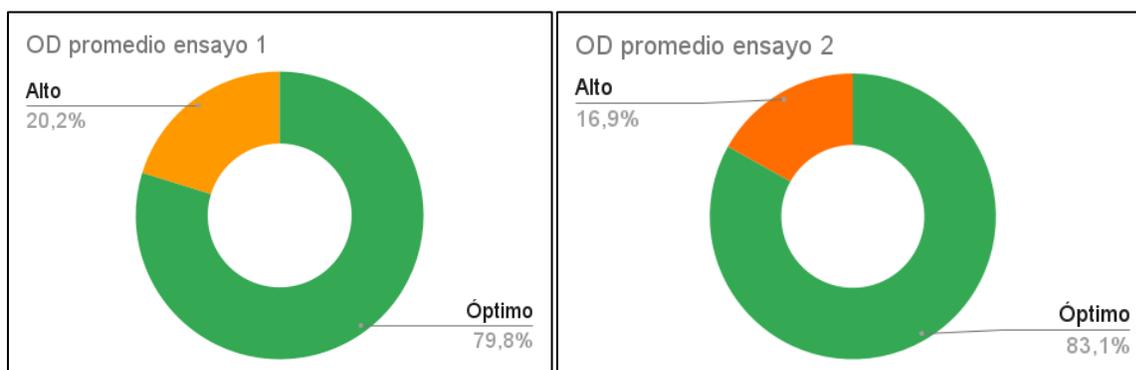
Figure 3-17. Oxígeno disuelto semanal – ensayo 3

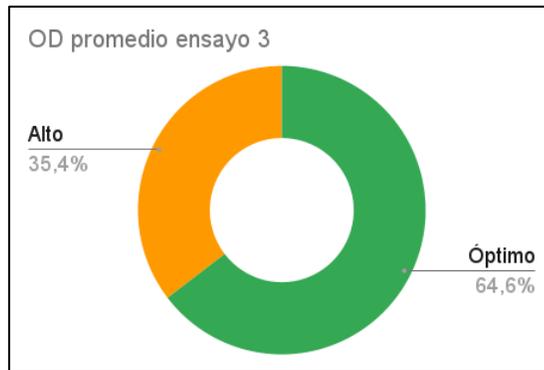


Fuente: Elaboración propia

Para los tres ensayos se manejan valores dentro del rango óptimo (Figura 3-18) para la productividad de peces, plantas y bacterias [16], encontrándose en 79,8%, 83,1% y 64,6% para los ensayos 1, 2 y 3 respectivamente.

Figure 3-18. Porcentaje de distribución en los rangos de oxígeno disuelto





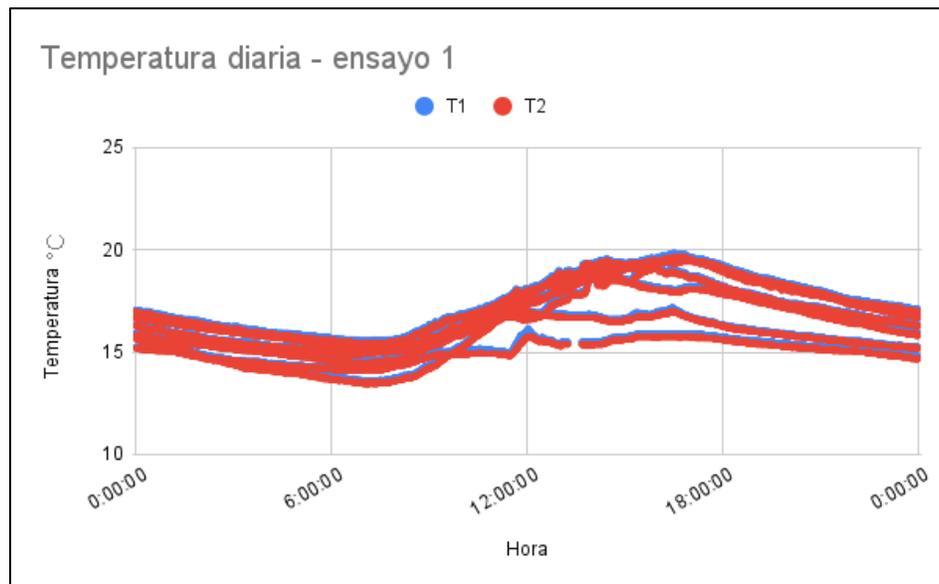
Fuente: Elaboración propia

Aunque se llegan a notar picos altos que sobrepasan los valores nominales, la duración de estos no llega a producir un impacto grave en la generación de biomasa (principalmente para las especies vegetales), como lo demuestra en su estudio [18].

- **Temperatura:**

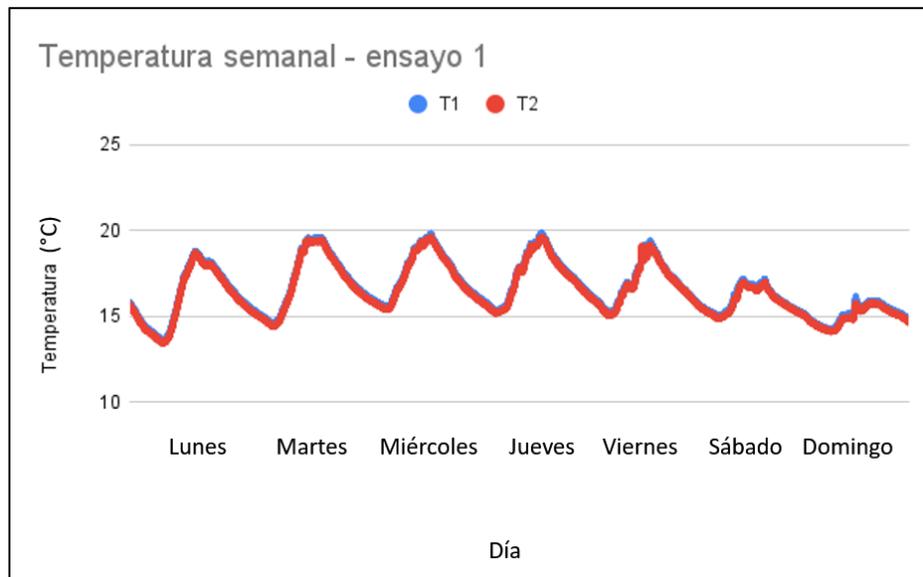
En el caso de la temperatura, esta fue medida en dos puntos del tanque con el fin de obtener una medida representativa. En las Figuras 3-19 y 3-20 se muestra la temperatura diaria para los sensores T1 y T2 en el ensayo 1, logrando ver la homogeneidad con respecto a su distribución.

Figure 3-19. Temperatura diaria – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-20. Temperatura semanal – ensayo 1

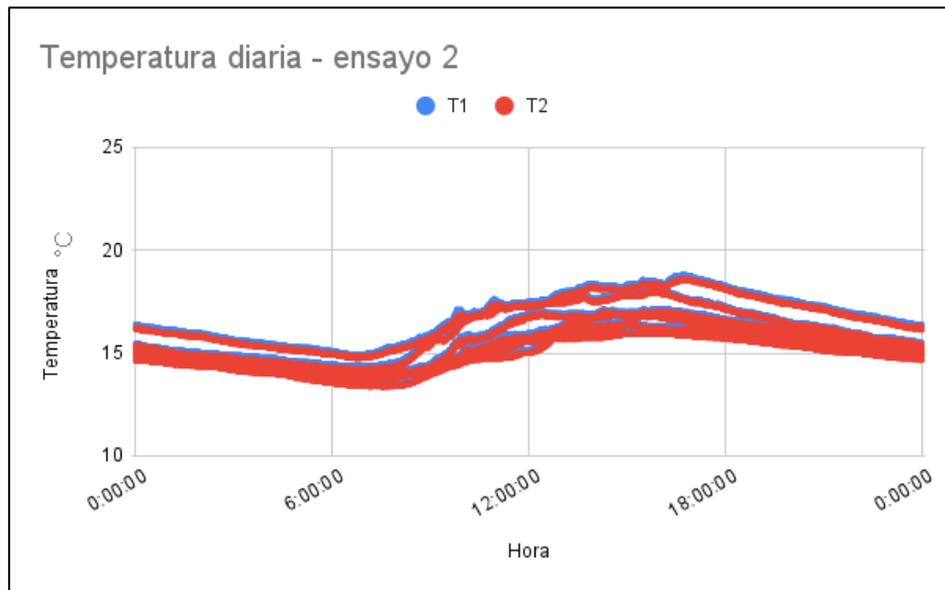


Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se identifican dos franjas importantes que son manejadas por la temperatura ambiente y la incidencia de las condiciones psicrométricas al exterior del sistema, una comprendida entre las 00:00 h y las 07:00 h en donde se registran los valores más bajos, y la otra entre las 11:00 h y las 17:00 h que representa las horas más cálidas en el agua.

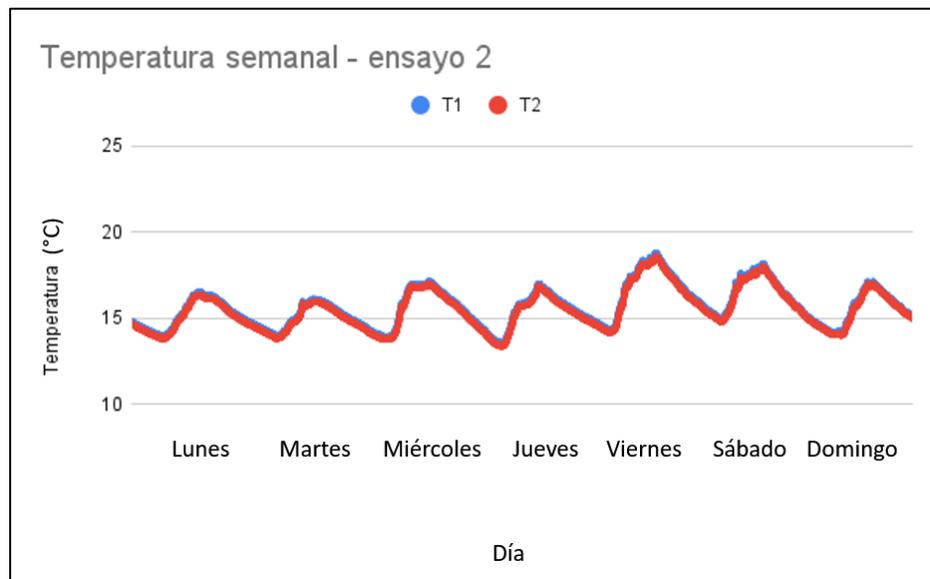
De forma similar, para el segundo ensayo se encuentra una similitud en cuanto a las franjas horarias y los valores mínimos y máximos (Figuras 3-21 y 3-22), siguiendo la tendencia de temperaturas bajas en la madrugada y altas a lo largo de la tarde.

Figure 3-21. Temperatura diaria – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

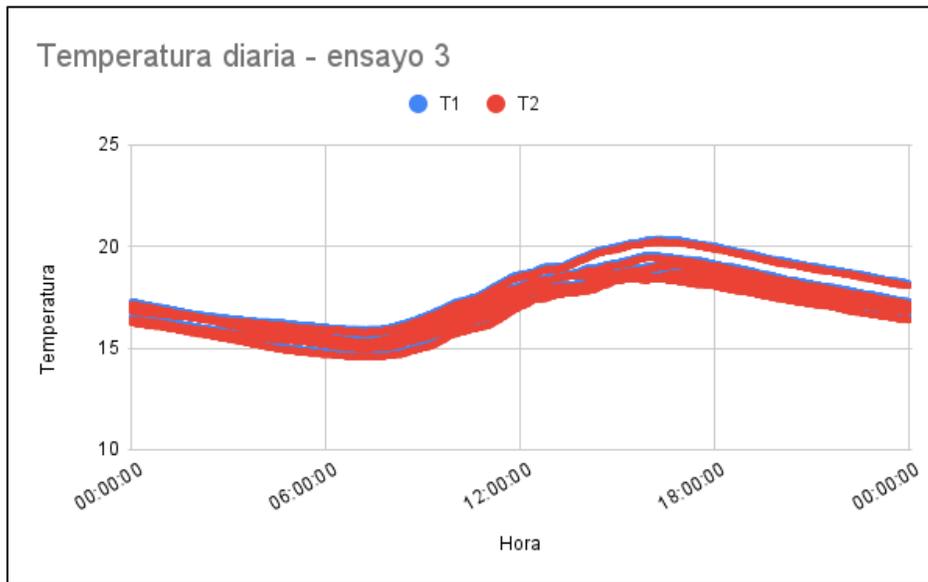
Figure 3-22. Temperatura semanal – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

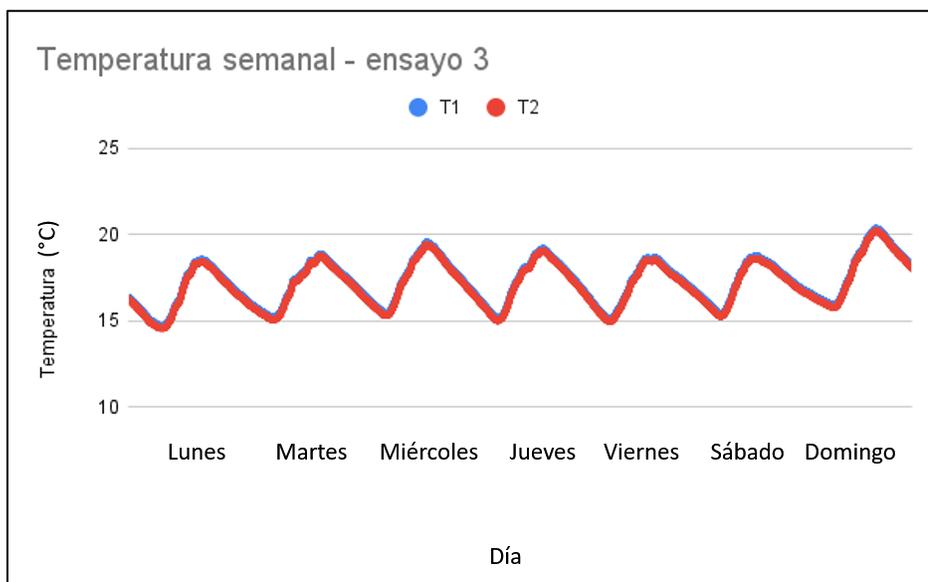
Para el último ensayo (Figura 3-23 y 3-24) se puede notar un aumento en la temperatura máxima diaria, llegando a valores de 21 °C, aunque siendo más homogénea a lo largo de las semanas.

Figure 3-23. Temperatura diaria – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-24. Temperatura semanal – ensayo 3

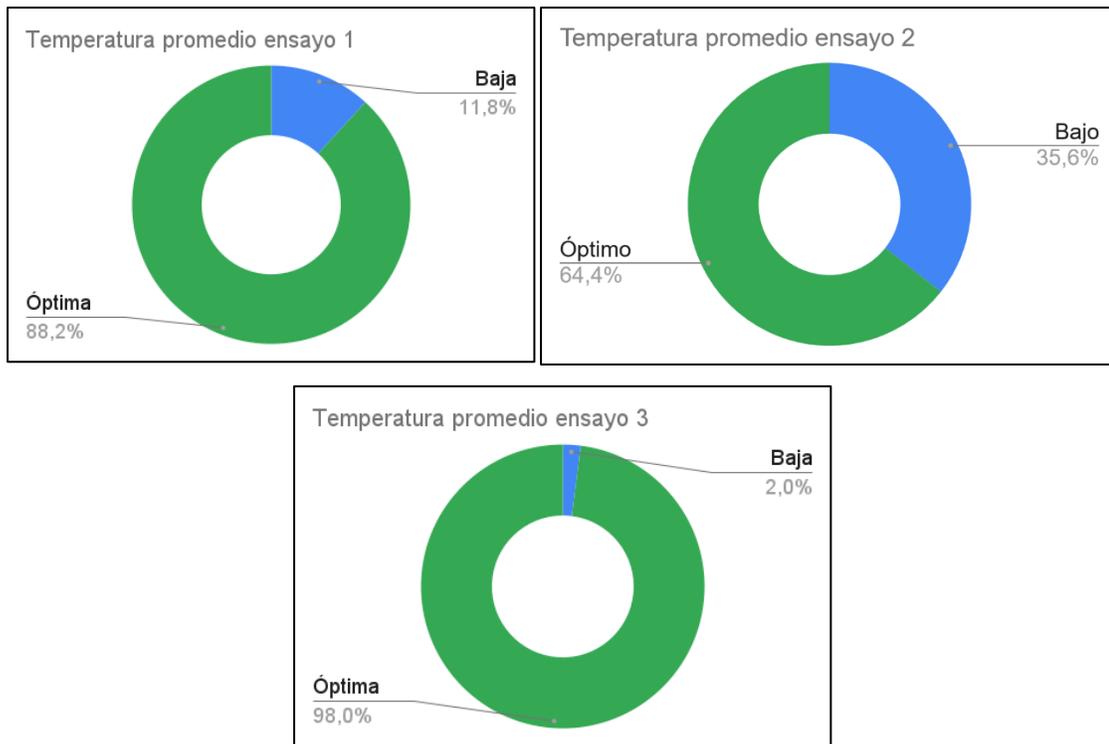


Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los valores mínimos de 14,9 °C y máximo de 21 °C, y comparándolos con los encontrados en estudios como [15], se puede notar como los valores medidos por los sensores se mantienen en niveles adecuados (Figura 3-25) para las especies de peces,

plantas y bacterias la mayoría del tiempo, en un 88,2% para el primer ensayo, 64,4 % para el segundo ensayo y 98% para el último ensayo.

Figure 3-25. Porcentaje de distribución en los rangos de temperatura



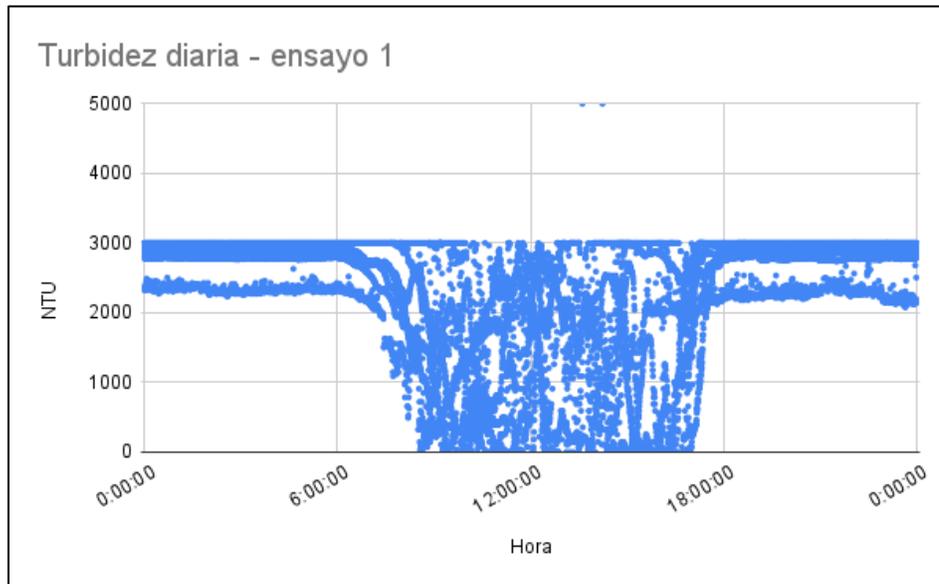
Fuente: Elaboración propia

A pesar de que en las madrugadas debido a la inversión térmica se dan picos en cortos períodos de tiempo con una diferencia de 1,7 °C por debajo de lo normal, representando un 11,8% de los valores medidos en el primer ensayo, se ha demostrado [21] que los peces pueden llegar a soportar hasta 5 °C por debajo de los valores nominales por ciertos periodos, a costa de sufrir una reducción en la tasa metabólica.

- **Turbidez:**

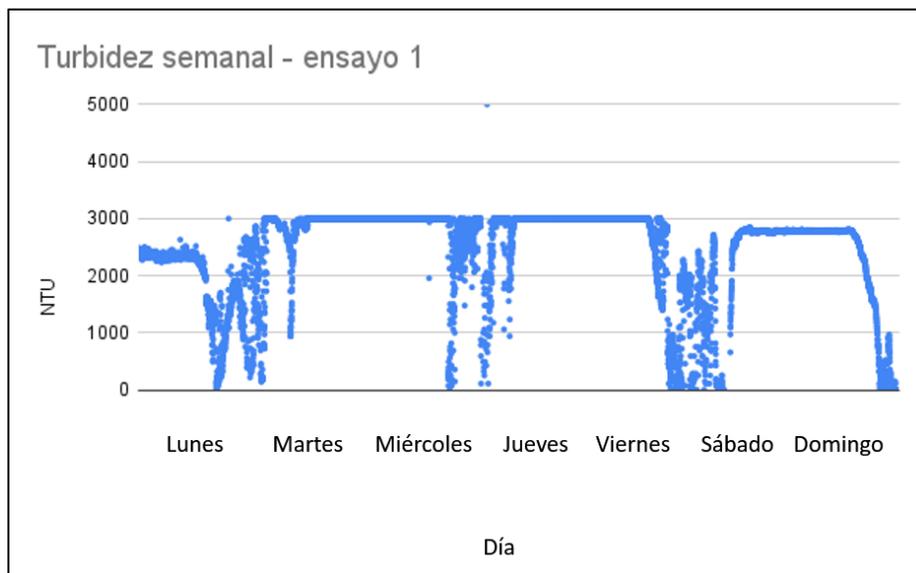
Para el primer ensayo se lograron construir las Figuras 3-26 y 3-27, permitiendo tener un panorama claro del comportamiento de la turbidez a lo largo del tiempo. Para los intervalos de tiempo comprendidos entre las 07:00 h y hasta las 17:00 h se puede notar un cambio en la turbidez, observándose una reducción que baja desde 3000 NTU hasta 0 NTU en ciertos instantes.

Figure 3-26. Turbidez diaria – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-27. Turbidez semanal – ensayo 1



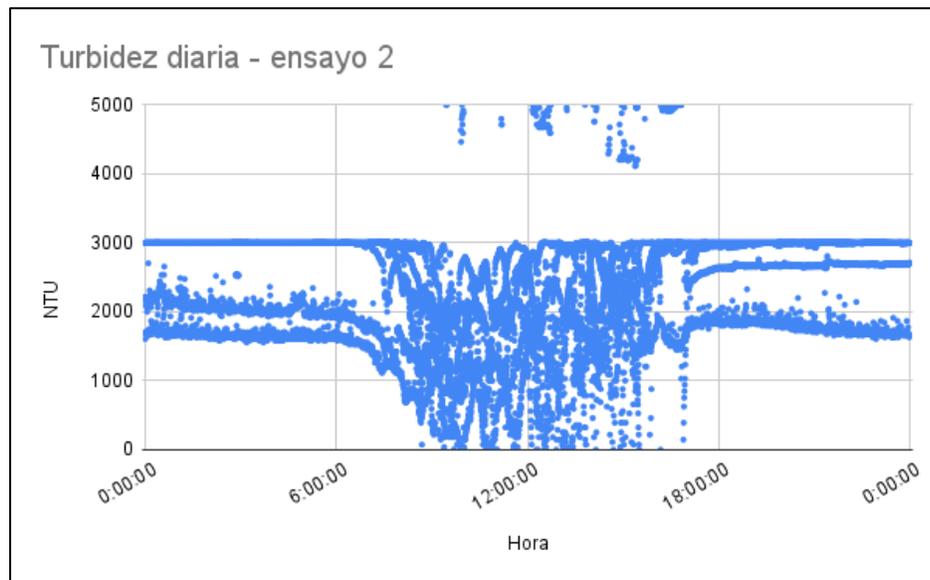
Fuente: Elaboración propia

Para lograr interpretar los valores se tiene en cuenta el análisis expuesto por [20], en donde se atribuyen los altos valores a sistemas acuapónicos sin mecanismos de filtrado (tal y

como sucede en este estudio), en donde los materiales particulados derivados de los desechos de los peces y el alimento no consumido son la principal causa de niveles NTU más altos de lo normal y generando también deficiencias en los niveles de oxígeno disuelto, haciendo que sean requeridas acciones como mantenimientos en los tanques de recirculación y la activación de aireadores. A pesar de lo anteriormente nombrado, y en contraste con las conclusiones de [22], es esencial entender que en los sistemas con tecnología de biofloc requieren de niveles de NTU altos que permitan a las bacterias nitrificantes mantenerse en ambientes favorables para que puedan descomponer los derivados del nitrógeno y amonio, y en el proceso, producir oxígeno que compense la elevada turbidez del agua.

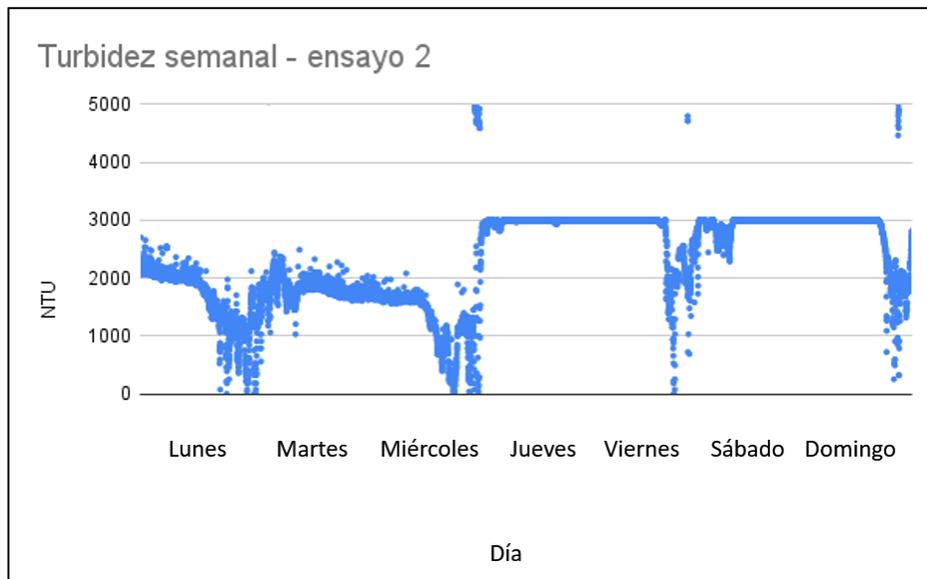
En el segundo ensayo (Figuras 3-28 y 3-29) se puede notar también, que las variaciones de turbidez se pueden deber a periodos de alta intensidad de luz que al tocar con el agua generan un efecto de difracción que llega a alterar la medida del sensor [23].

Figure 3-28. Turbidez diaria – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-29. Turbidez semanal – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

A pesar de que en la acuaponía se han llevado diversos estudios con respecto a los niveles nominales de turbidez, no se han encontrado referencias que permitan comparar directamente los rangos para sistemas acuapónicos NFT con biofloc, por lo cual el levantamiento de información sirve como una aproximación en el manejo de esta variable.

3.4.2 Levantamiento y análisis de la información – Biomasa plantas

- **Peso plantas:**

Para las plantas utilizadas en el primer ensayo de cultivos hidropónicos se obtuvo un promedio de peso inicial equivalente a 2,92 gr mientras que para las plantas del cultivo de control en suelo fue de 2,81 gr (Tabla 3-1). Por otro lado, los pesos finales registrados al terminar el ensayo fueron de 82,57 gr en acuaponía y 81,14 gr en el control.

Para las plantas utilizadas en el segundo ensayo de cultivos hidropónicos se obtuvo un promedio de peso inicial equivalente a 2,99 gr mientras que para las plantas del cultivo de

control en suelo fue de 2,97 gr. Por otro lado, los pesos finales registrados al terminar el ensayo fueron de 87,42 gr en acuaponía y 84,82 gr en el control.

Table 3-1. Pesos promedio, ganancias y rendimientos de biomasa en tres ensayos

	Cultivo Acuapónico Ensayo 1		Cultivo Control Ensayo 1		Cultivo Acuapónico Ensayo 2		Cultivo Control Ensayo 2		Cultivo Acuapónico Ensayo 3		Cultivo Control Ensayo 3	
	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)	Peso inicial promedio (gr)	Peso final promedio (gr)
	2,92	82,57	2,81	81,14	2,99	87,42	2,97	84,82	3,14	91,52	3,03	93,27
Ganancia (gr)	79,64		78,33		84,43		81,85		88,38		90,24	
Ganancia (%)	96,46		96,53		96,58		96,50		96,57		96,75	
Rendimiento (kg/m²)	1,638		1,159		1,735		1,212		1,816		1,332	
Peso total (kg)	2,477		2,4342		2,627		2,5445		2,7456		2,7981	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla, además se encuentran registradas las ganancias de peso para cada ensayo, notando que para el primero la diferencia entre tratamientos fue de apenas 1,31 gr, para el segundo de 2,6 gr y 1,86gr para el tercero, evidenciando un ligero incremento en cuanto a la ganancia del cultivo de lechugas en acuaponía para los dos primeros ensayos y una diferencia favorable para el control en el último ensayo. Con respecto a la ganancia porcentual se encontró que el rendimiento fue superior en el cultivo tradicional en suelo, reflejado una diferencia de 0,07% para el primer ensayo, 0,08% para el segundo y para el tercer ensayo en dónde la ganancia porcentual fue mayor en 0,18%.

En cuanto a los rendimientos se puede notar una diferencia de 0,479 kg/m² para el primer ensayo, de 0,523 kg/m² para el segundo ensayo y 0,484 kg/m² para el último. que favorece a los cultivos acuapónicos en sistemas automatizados, haciendo énfasis en las dimensiones y el aprovechamiento del espacio en las tuberías NFT.

Según los datos reportados por [24] en sus sistemas acuapónicos el rendimiento del cultivo puede llegar a ser de hasta 1,94 kg/m² haciendo uso de espuma fenólica especializada para este tipo de montajes. Cabe recalcar que la variación en cuanto a rendimientos, se ha reportado que puede moverse en un rango de 0,58 kg/m² a 3,6 kg/m², llegando al límite inferior de los valores recopilados en estos estudios.

▪ **Altura plantas:**

En las mediciones previas al primer ensayo se obtuvo una altura promedio de 5,09 cm para el cultivo acuapónico, mientras que para el cultivo control se encontró que esta fue de 5,81 (Tabla 3-2).

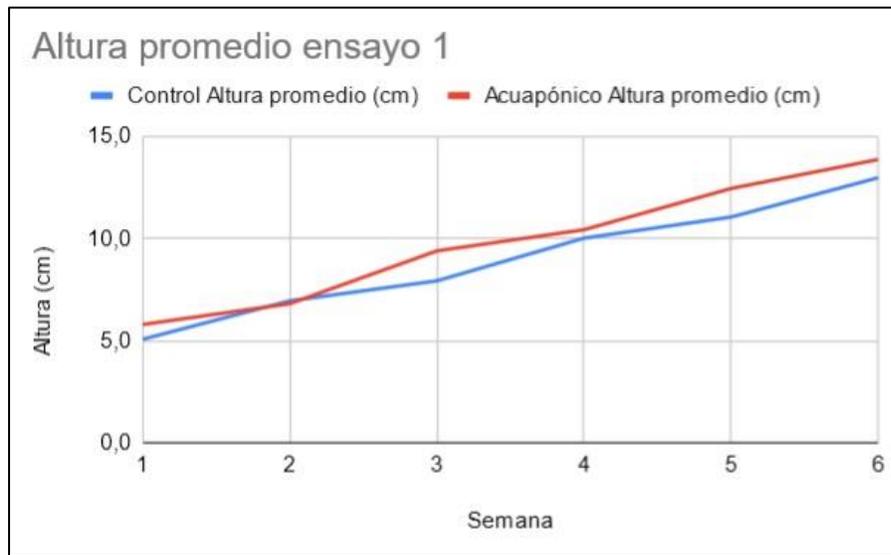
Table 3-2. Altura promedio semanal para los tres ensayos

	Cultivo Control ensayo 1	Cultivo Acuapónico ensayo 1	Cultivo Control ensayo 2	Cultivo Acuapónico ensayo 2	Cultivo Control ensayo 3	Cultivo Acuapónico ensayo 3
Semana	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Altura promedio (cm)
1	5,1	5,8	5,9	5,7	6,0	5,5
2	7,0	6,8	7,3	7,4	7,5	7,3
3	7,9	9,4	9	9,4	8,4	10,5
4	10,0	10,4	10,3	10,7	10,0	10,9
5	11,0	12,5	11,5	12,6	11,9	11,4
6	13	13,9	12,3	14,3	12,6	13,5

Fuente: Elaboración propia

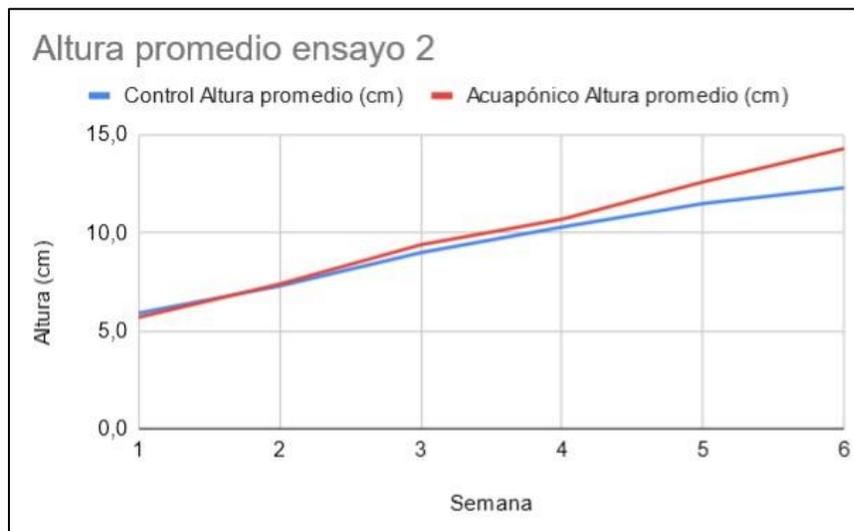
En la tabla también se registran cada uno de los valores promedio por semana para cada uno de los ensayos en ambos sistemas. A partir de la tabla de alturas por semana, se construyen la Figuras 3-30, 3-31 y 3-32 en dónde se observa más a detalle la curva de comportamiento referente al crecimiento de las lechugas.

Figure 3-30. Altura promedio – ensayo 1



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-31. Altura promedio – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-32. Altura promedio – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Como se puede notar, en los datos comparativos con respecto a la altura, en el caso del ensayo 1 acuapónico se presenta un tamaño final promedio mayor (13,9 cm) a comparación del valor encontrado para el control (13 cm), a pesar de que la variación es apenas de 0,9 cm, se destaca que sus valores son muy similares. Se resalta que se ve la misma tendencia en el segundo y tercer ensayo, encontrando una diferencia de 1,1 cm, resultando en una altura mayor del control con respecto al cultivo acuapónico con respecto al control.

En estudios como el de [14], se notan diferencias de altura de hasta 8 cm al comparar sistemas de balsa flotante versus lecho de sustrato (perlita), atribuyendo el crecimiento en altura a las deficiencias de nitrógeno y a los umbrales de temperatura que la lechuga es capaz de soportar, produciendo plantas grandes en tamaño, pero con bajo volumen foliar.

- **Número de hojas:**

En las mediciones iniciales de ambos cultivos y ensayos se puede encontrar, en la Tabla 3-3, que, al ser plántulas certificadas por el semillero de la Universidad Tadeo Lozano, el proveedor asegura que estas cuentan con 3 hojas verdaderas. A partir del conteo inicial, se puede notar un incremento sostenido de entre 1 y 3 hojas por semana.

Table 3-3. Numero de hojas semanales para los tres ensayos

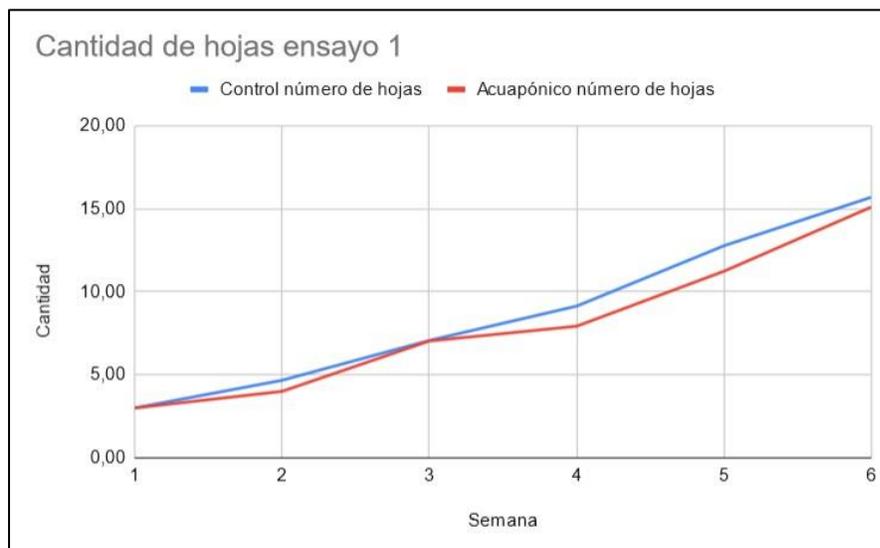
	Cultivo Control ensayo 1	Cultivo Acuapónico ensayo 1	Cultivo Control ensayo 2	Cultivo Acuapónico ensayo 2	Cultivo Control ensayo 3	Cultivo Acuapónico ensayo 3
Semana	número de hojas	número de hojas	número de hojas	número de hojas	número de hojas	número de hojas
1	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
2	4,67	4,00	3,93	6,07	4,52	5,98
3	7,07	7,03	7,23	7,77	8,23	8,77
4	9,13	7,92	9,33	9,63	10,77	9,63
5	12,77	11,23	11,93	12,47	13,11	12,47
6	15,69	15,10	15,87	15,34	16,20	15,55

Fuente: Elaboración propia

Como valor final para el primer ensayo en acuaponía se tiene un promedio de 15,1 hojas en contraste con las 15,69 hojas del cultivo control. Por otro lado, para el segundo ensayo se registra un promedio de 15,87 hojas en el control y 15,34 hojas en el control. Para el tercer ensayo se puede notar una tendencia igual en la que la diferencia es de aproximadamente 1 hoja en promedio.

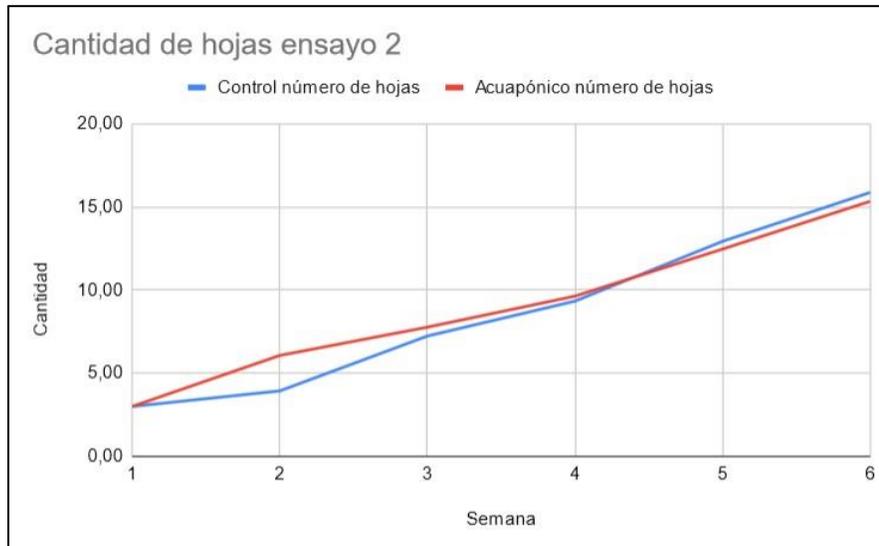
En la tabla también se registran cada uno de los valores promedio por semana para cada uno de los ensayos en ambos sistemas. A partir de la tabla de hojas por semana, se construyen la Figuras 3-33, 3-34 y 3-35 en dónde se observa más a detalle la curva de comportamiento referente al crecimiento de hojas de las lechugas.

Figure 3-33. Cantidad de hojas – ensayo 1



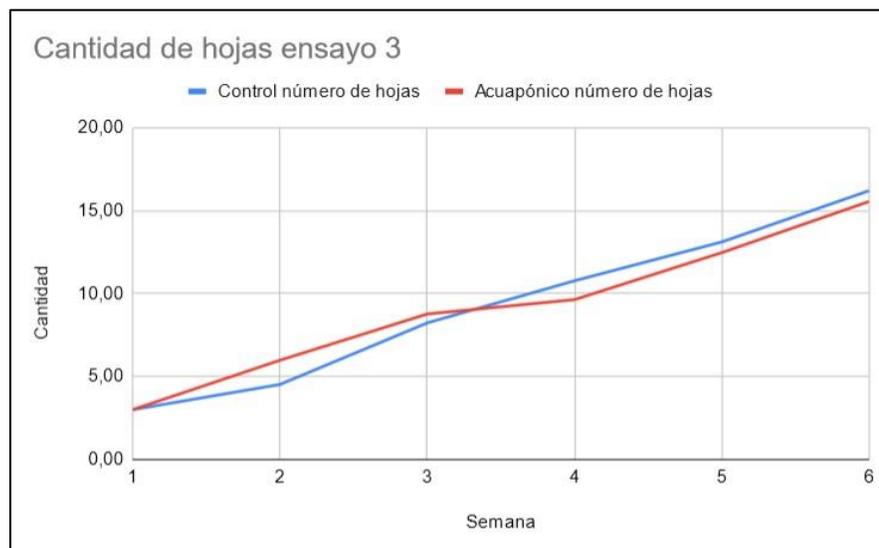
Fuente: Elaboración propia

Figure 3-34. Cantidad de hojas – ensayo 2



Fuente: Elaboración propia

Figure 3-35. Cantidad de hojas – ensayo 3



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, y realizando una comparación, se puede notar que, aunque el crecimiento en hojas del sistema acuapónico es inferior al control, la diferencia es mínima. Cabe resaltar que en el inicio de los ensayos 2 y 3 el sistema acuapónico tuvo un incremento más rápido en crecimiento de hojas, a pesar de esto, luego de la semana 4 su rendimiento disminuyó significativamente en contraste con el control.

3.5 Conclusiones

Se logró llevar a cabo el análisis comparativo del rendimiento de biomasa de lechuga, evaluando los sistemas acuapónicos NFT automatizados versus un control de siembra tradicional en suelo. El levantamiento de información permitió encontrar que los valores de peso, altura y número de hojas resultan ser muy similares en ambos ambientes, aunque el sistema acuapónico destaca en el aprovechamiento del espacio, lo cual se traduce en un rendimiento mayor referente a los kilogramos por metro cuadrado, siendo un 52,82% superior.

Los cambios en la disponibilidad del oxígeno y los valores fuera de los umbrales de temperatura para las plantas generaron que las lechugas acuapónicas se estresaran para los ensayos 2 y 3, esto se puede notar al encontrar una menor cantidad de hojas y mayor altura promedio a comparación de los controles en esos baches.

Con respecto a la información recogida, transformada y analizada de los sensores, se pudieron encontrar los porcentajes en los que se estaban las variables medidas a lo largo de las semanas, permitiendo evaluar de manera crítica el sistema y de esta forma poder dar recomendaciones en el manejo de los ciclos de cultivo, además de obtener datos relevantes para entender el estrés de las plantas en acuaponía y como estos ayudan a comprender el ambiente que se requiere para mantener una productividad sostenida.

Los sistemas automatizados de monitoreo y control en agricultura permiten estandarizar los ciclos de cultivo y la descarga de la información de las variables críticas del proceso, lo anterior se ve reflejado en la similitud de los ensayos que se llevaron a cabo, siendo reproducibles y dando la posibilidad de repetirlos bajo las mismas condiciones, con la probabilidad de obtener resultados bastante similares.

A pesar de que en la acuaponía se han llevado diversos estudios con respecto a los niveles nominales de turbidez, no se han encontrado referencias que permitan comparar directamente los rangos para sistemas acuapónicos NFT con biofloc, por lo cual el levantamiento de información sirve como una aproximación en el manejo de esta variable.

3.6 Referencias

- [1] E. Ayipio, D. E. Wells, A. McQuilling, and A. E. Wilson, "Comparisons between aquaponic and conventional hydroponic crop yields: A meta-analysis," *Sustainability* (Switzerland), 2019, doi: 10.3390/su11226511.
- [2] A. Graber and R. Junge, "Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production," *Desalination*, vol. 246, no. 1, pp. 147–156, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>.
- [3] A. E. Ghaly, M. Kamal, and N. S. Mahmoud, "Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed," *Environ. Int.*, 2005, doi: 10.1016/j.envint.2004.05.011.
- [4] U. Yogev, A. Barnes, and A. Gross, "Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics," *Water* (Switzerland), 2016, doi: 10.3390/w8120589.
- [5] W. A. Lennard and B. V. Leonard, "A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system," *Aquac. Int.*, 2006, doi: 10.1007/s10499-006-9053-2.
- [6] B. Delaide, G. Delhaye, M. Dermience, J. Gott, H. Soyeurt, and M. H. Jijakli, "Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system," *Aquac. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.06.002.
- [7] J. Suhl et al., "Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics," *Agric. Water Manag.*, vol. 178, pp. 335–344, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>.
- [8] Z. Hu, J. W. Lee, K. Chandran, S. Kim, A. C. Brotto, and S. K. Khanal, "Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics," *Bioresour. Technol.*, vol. 188, pp. 92–98, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>.
- [9] B. Baßmann, H. Harbach, S. Weißbach, and H. W. Palm, "Effect of plant density in coupled aquaponics on the welfare status of African catfish, *Clarias gariepinus*," *J. World Aquac. Soc.*, 2020, doi: 10.1111/jwas.12574.
- [10] K. K. T. Nuwansi, A. K. Verma, G. Rathore, M. H. Chandrakant, G. P. W. A. Prabhath, and R. M. Peter, "Effect of hydraulic loading rate on the growth of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi.) and Gotukola (*Centella asiatica* (L.) using phytoremediated

- aquaculture wastewater in aquaponics,” *Aquac. Int.*, 2020, doi: 10.1007/s10499-019-00485-0.
- [11] T. Hussain et al., “Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system,” *Aquac. Int.*, 2014, doi: 10.1007/s10499-014-9821-3.
- [12] H. Monsees, W. Kloas, and S. Wuertz, “Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes,” *PLoS One*, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0183056.
- [13] T. A. Babatunde, K. Ibrahim, B. Abdulkarim, N. H. Wagini, and S. A. Usman, “Co-production and biomass yield of amaranthus (*Amaranthus hybridus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in gravel-based substrate filter aquaponic,” *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, 2019, doi: 10.1007/s40093-019-00297-5.
- [14] L. F. Hernández, “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*),” p. 127, 2017, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/62310/1/1057592154.2018.pdf>.
- [15] A. R. Yanes, P. Martinez, and R. Ahmad, “Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems,” *Journal of Cleaner Production*. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121571.
- [16] C. Maucieri, C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo, and M. Borin, “Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review,” *Italian Journal of Agronomy*. 2018, doi: 10.4081/ija.2017.1012.
- [17] Y. Zou, Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, C. Guimbaud, and Y. Fang, “Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics,” *Bioresour. Technol.*, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.12.079.
- [18] J. Suhl, B. Oppedijk, D. Baganz, W. Kloas, U. Schmidt, and B. van Duijn, “Oxygen consumption in recirculating nutrient film technique in aquaponics,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 255, pp. 281–291, 2019, doi: 10.1016/j.scienta.2019.05.033.
- [19] F. Li et al., “Effects of Rice-Fish Co-culture on Oxygen Consumption in Intensive Aquaculture Pond,” *Rice Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 50–59, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.12.004>.
- [20] Z. Khiari, K. Alka, S. Kelloway, B. Mason, and N. Savidov, “Integration of Biochar Filtration into Aquaponics: Effects on Particle Size Distribution and Turbidity Removal,” *Agric. Water Manag.*, vol. 229, p. 105874, 2020, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105874>.

- [21] M. Colorado and M. Ospina, "Acuaponia, Herramienta de formación en tiempos de paz," p. 66, 2019, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11404/5555>.
- [22] E. C. Legarda et al., "Integrated recirculating aquaculture system for mullet and shrimp using biofloc technology," *Aquaculture*, vol. 512, p. 734308, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734308>.
- [23] Z. S. Juhi, N. A. A. A. Mubin, M. G. G. Jonik, S. Salleh, and M. Mohammad, "Impact of short-term light variability on the photobiology of turbid water corals," *J. Sea Res.*, vol. 175, p. 102088, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2021.102088>.
- [24] R. A. Jordan, E. F. Ribeiro, F. C. de Oliveira, L. O. Geisenhoff, and E. A. S. Martins, "Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates," *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, 2018, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p525-529.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Al generar la revisión sistemática y analizar los artículos, se logró hacer un análisis descriptivo de la información y un levantamiento de datos ya sea de flujos, ciclos de recirculación y características físico químicas que son útiles a la hora de diseñar un sistema automatizado. Esto también permitió visualizar que en las publicaciones coinciden en la medición de las variables, como lo son pH, oxígeno disuelto, conductividad, turbidez y temperatura y los sensores más adecuados para el funcionamiento del sistema. Esta revisión no solo funciona como una apertura al tema de acuaponía, sino que también sentó las bases para el manejo que se le daría al sistema acuapónico NFT encontrado en el CBA - SENA Mosquera, dando la posibilidad de tener material investigativo actual organizado y de rápida consulta en caso de ser requerido.

Partiendo de la información recolectada y la identificación del sistema acuapónico se diseñó y construyó un sistema automatizado a la medida, escalable y además que midiera las variables críticas del proceso. Gracias al levantamiento de planos y modelos, fue llevado a cabo el diseño y posterior construcción de los nodos central y periférico, realizando una evaluación del monitoreo y el control que se podría lograr al implementar tecnologías de bajo y medio costo.

Cuando se realizan los modos de operación de los nodos, y en general la programación del sistema de control y su interfaz, es importante tener en cuenta que los usuarios puedan interactuar de forma sencilla, con funciones básicas que este pueda aprender y ejecutar.

Se logró llevar a cabo el análisis comparativo del rendimiento de biomasa de lechuga, evaluando los sistemas acuapónicos NFT automatizados versus un control de siembra tradicional en suelo. El levantamiento de información permitió encontrar que los valores de

peso, altura y número de hojas resultan ser muy similares en ambos ambientes, aunque el sistema acuapónico destaca en el aprovechamiento del espacio, lo cual se traduce en un rendimiento mayor referente a los kilogramos por metro cuadrado, siendo un 52,82% superior.

4.2 Recomendaciones

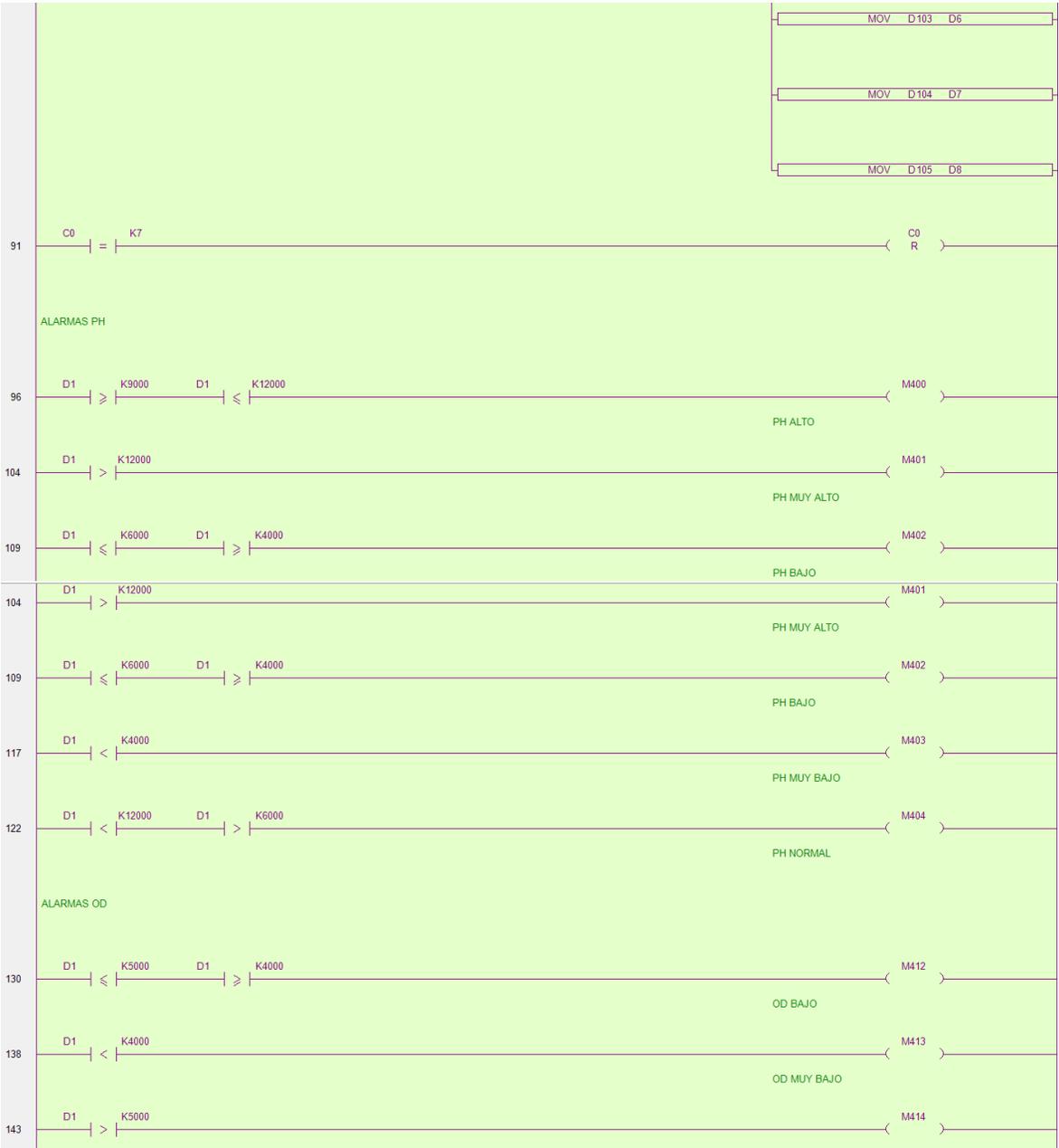
Aunque la selección de los elementos como sensores, actuadores y controladores fue adecuada, los protocolos de comunicación pueden llegar a limitar e interferir con la transmisión de la información, es por esto que en algunos casos pueden presentarse retrasos en la muestra en tiempo real de las variables e incluso perder valores. Por esto se recomienda en un futuro hacer uso de un controlador más robusto que admita protocolos de comunicación TCP/IP ya sea ethernet o WiFi, dándole más versatilidad a la solución.

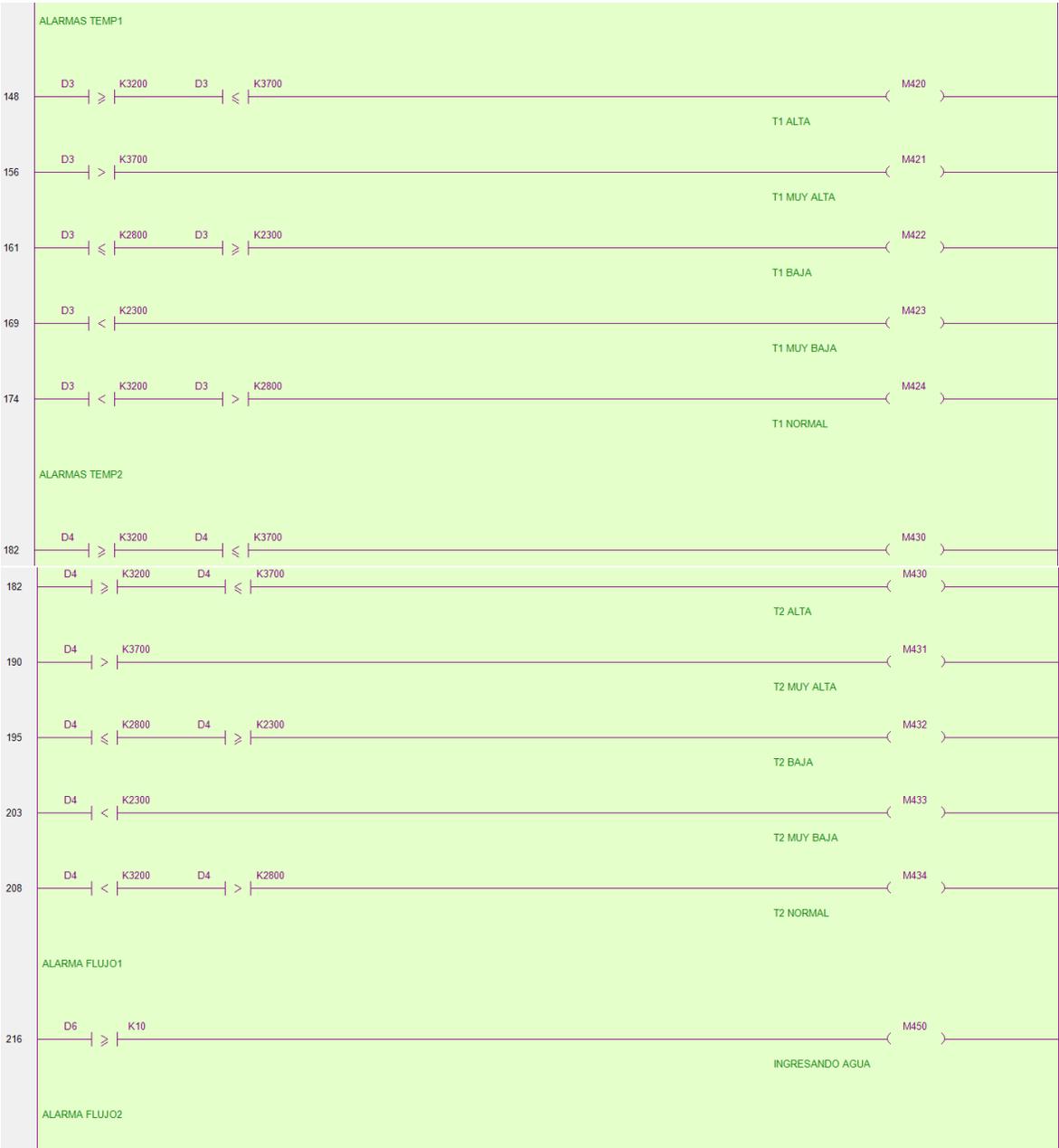
Para futuras investigaciones, teniendo en cuenta las conclusiones mencionadas sobre el manejo del controlador y su interfaz, se recomienda un acercamiento integral con los usuarios que trabajen con los nodos, tanto central como periférico, enseñándoles sus funcionalidades y permitiendo que se apropien de los equipos que en un futuro podrán manejar.

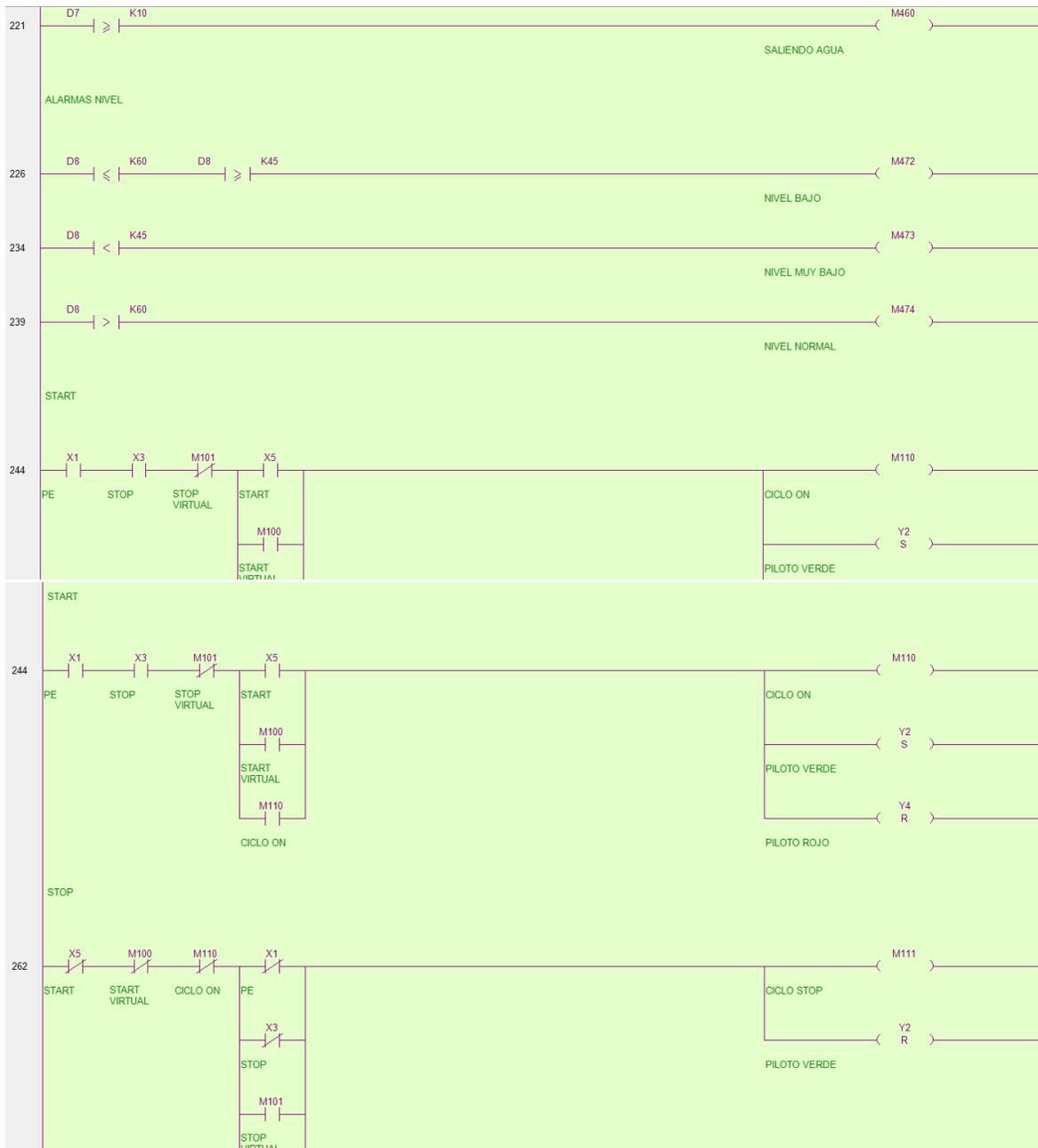
Al ser una solución de bajo y medio costo, se recomienda realizar labores de mantenimiento tanto a los nodos de monitoreo y control como a los tanques y tuberías acuapónicos, dando la certeza de que se puedan mantener los estándares de calidad que aseguren una reproducción de los próximos ciclos de cultivo.

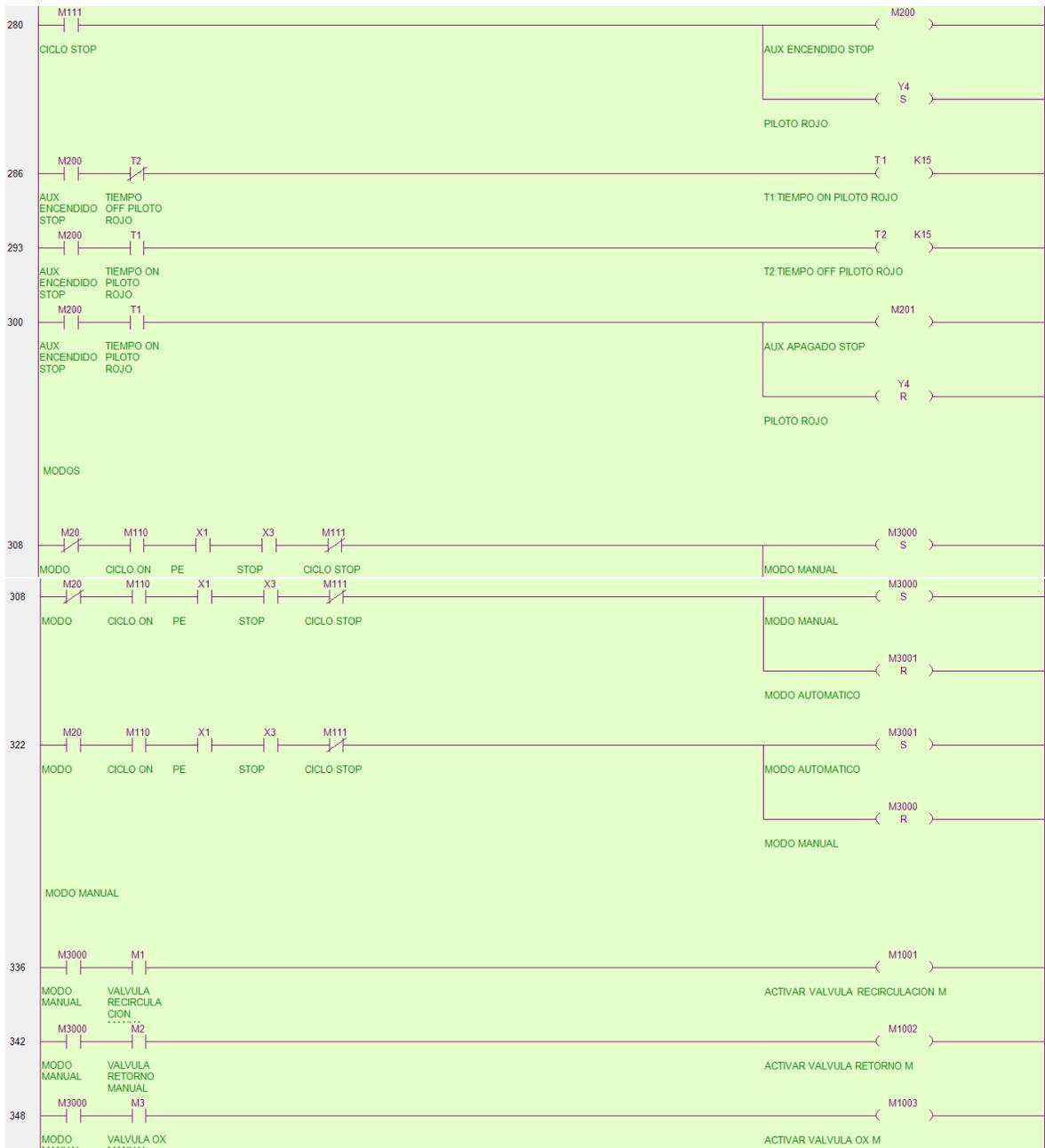
Anexo A. Programación del nodo central (LADDER)



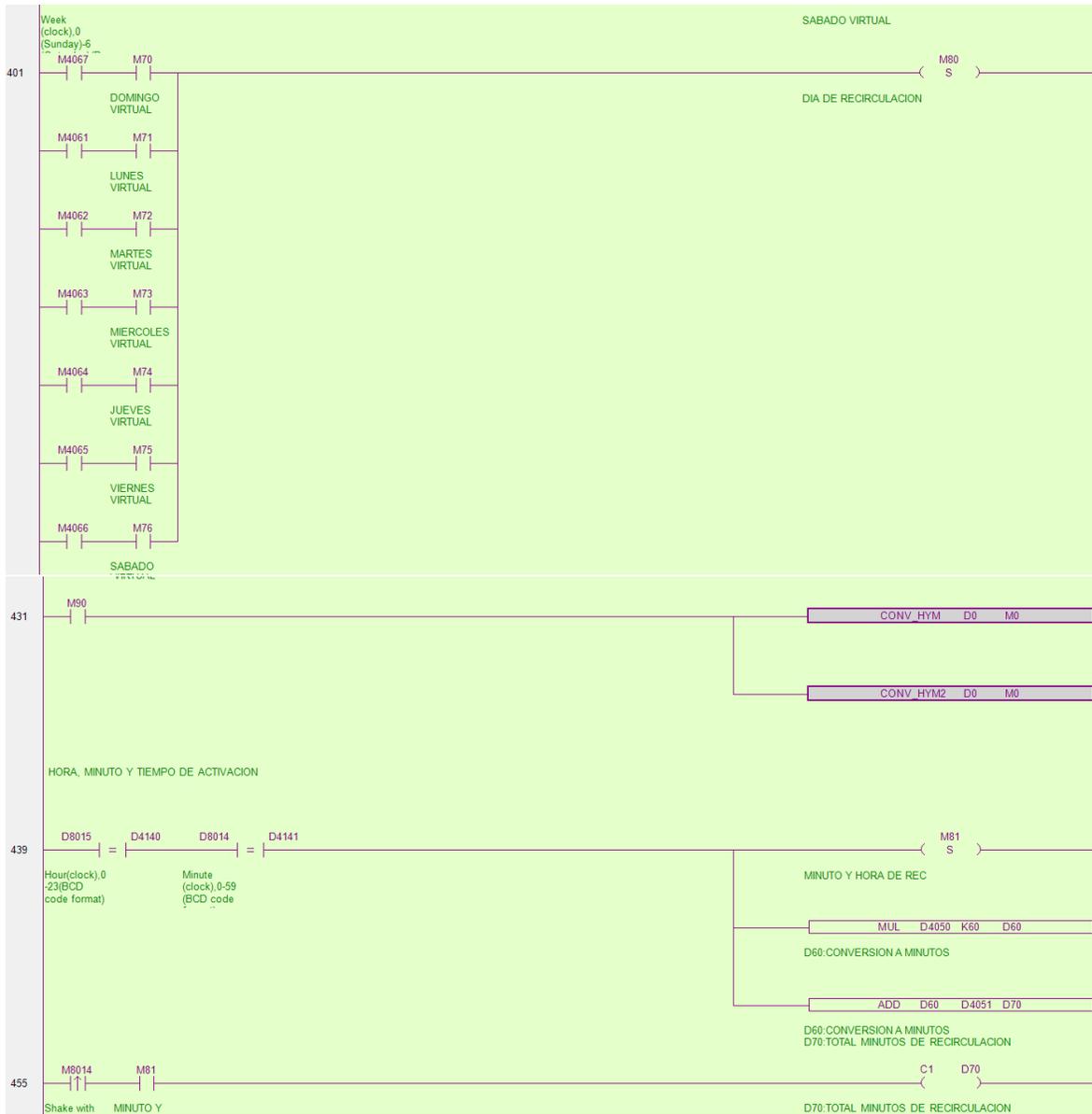


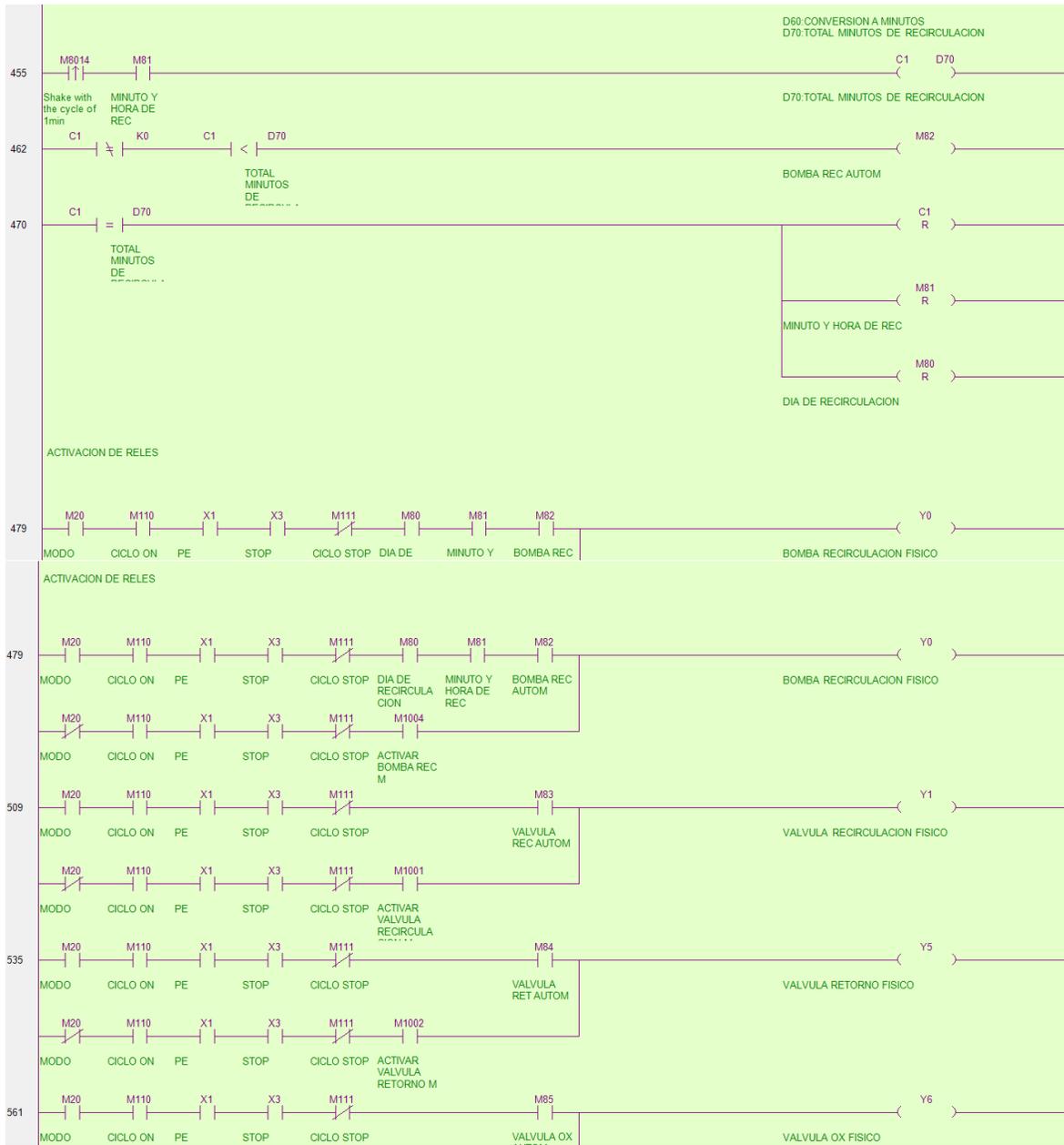


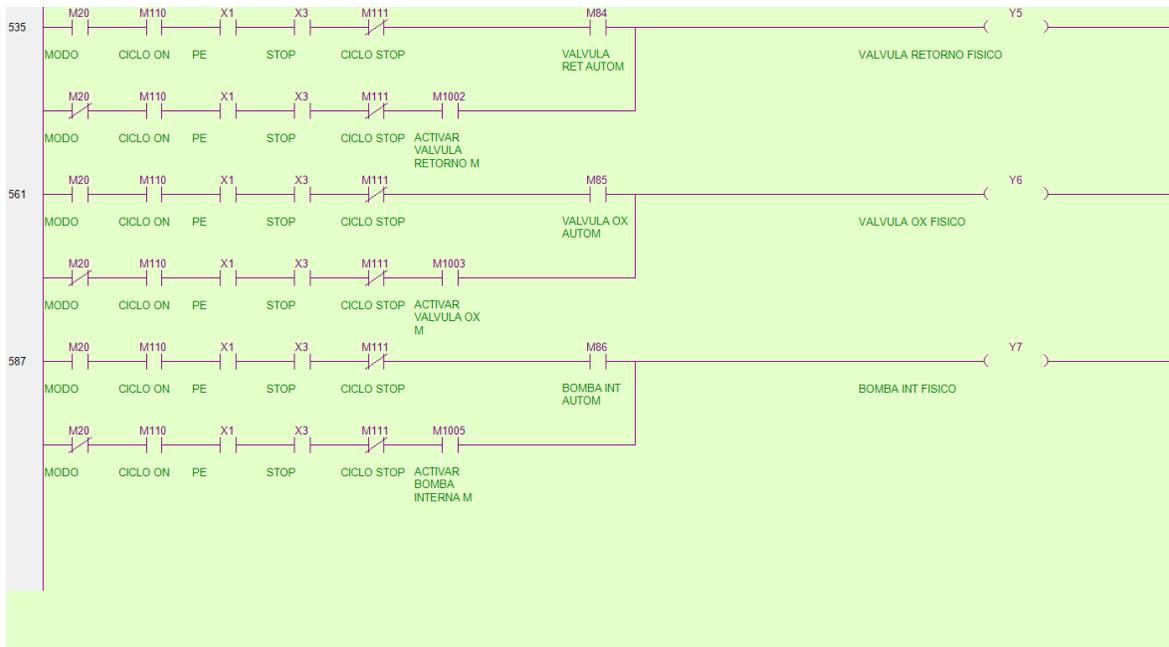












Anexo b. Programación del nodo periférico (ARDUINO)

```
#include <SimpleModbusSlave.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // set the LCD address to 0x27
for a 16 chars and 2 line display

// Variables y direcciones sensores de
temperatura----->
int tempPin = 11;

OneWire ourWire(tempPin); //Se establece el pin 2
como bus OneWire

DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se declara una variable u
objeto para nuestro sensor

DeviceAddress address1 = {0x28, 0xFF, 0x71, 0x78, 0x90, 0x15,
0x4, 0x6}; //dirección del sensor 1
DeviceAddress address2 = {0x28, 0xFF, 0xE9, 0x2F, 0x90, 0x15,
0x1, 0xEE}; //dirección del sensor 2
//-----
-----<

// Variable del sensor de
turbidez----->
int turbPin = A3;
float volt;
float ntu;

// Funcion redondeo
float round_to_dp( float in_value, int decimal_place )
{
float multiplier = powf( 10.0f, decimal_place );
in_value = roundf( in_value * multiplier ) / multiplier;
return in_value;
}
```

```

}
//----->
-----<
// Variable del sensor
ORP----->
double orpValue;
#define VOLTAGE 5.00 //system voltage
#define OFFSET 0 //zero drift voltage
#define ArrayLenth 40 //times of collection
#define orpPin A2 //orp meter input,connect to Arduino
controller ADC pin
int orpArray[ArrayLenth];
int orpArrayIndex=0;

//Funcion promedio ORP
double avergearray(int* arr, int number){
    int i;
    int max,min;
    double avg;
    long amount=0;
    if(number<=0){
        printf("Error number for the array to avraging!\n");
        return 0;
    }
    if(number<5){ //less than 5, calculated directly statistics
        for(i=0;i<number;i++){
            amount+=arr[i];
        }
        avg = amount/number;
        return avg;
    }else{
        if(arr[0]<arr[1]){
            min = arr[0];max=arr[1];
        }
        else{
            min=arr[1];max=arr[0];
        }
        for(i=2;i<number;i++){
            if(arr[i]<min){

```

```

        amount+=min;          //arr<min
        min=arr[i];
    }else {
        if(arr[i]>max){
            amount+=max;      //arr>max
            max=arr[i];
        }else{
            amount+=arr[i]; //min<=arr<=max
        }
    } //if
} //for
avg = (double)amount/(number-2);
} //if
return avg;
}
//----->
-----<

//Variables sensores de
flujo----->
volatile int flow_frequency4; // Measures flow sensor pulses
volatile int flow_frequency7; // Measures flow sensor pulses
unsigned int Flujo1; // Calculated litres/hour
unsigned int Flujo2; // Calculated litres/hour
unsigned char flowsensor4 = 2; // Sensor Input
unsigned char flowsensor7 = 3; // Sensor Input
unsigned long currentTime;
unsigned long cloopTime;

void flow () // Interrupt function
{
    flow_frequency4++;
}

void flow2 () // Interrupt function
{
    flow_frequency7++;
}

//----->

```

```

-----<
//Variables sensores de
nivel----->

// Define Trig and Echo pin:
#define trigpin 4
#define echopin 5
int nivelm = 0;
int nivel = 0;
//-----
-----<

// Registros del esclavo
----->

enum
{
    // The first register starts at address 0
    T1, //0
    T2,
    TURB1,
    FLU1,
    FLU2,
    ORP1,
    NIV1,
    DI0,
    DO0,
    TOTAL_ERRORS, //3
    HOLDING_REGS_SIZE // leave this one
    // total number of registers for function 3 and 16 share the
same register array
    // i.e. the same address space
};

unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE]; // function 3 and 16
register array
unsigned int counter;
//-----
-----<

```

```

void setup() {
// Setup LCD ----->
    lcd.init();
    lcd.backlight();
// -----<

// Setup Modbus ----->
    modbus_configure(&Serial, 19200, SERIAL_8N1, 1, 9,
HOLDING_REGS_SIZE, holdingRegs);

    // modbus_update_comms(baud, byteFormat, id) is not needed but
allows for easy update of the
    // port variables and slave id dynamically in any function.
    // modbus_update_comms(9600, SERIAL_8N1, 1);
// -----<

// Setup Flujo ----->
    digitalWrite(flowsensor4, HIGH); // Optional Internal Pull-Up
digitalWrite(flowsensor7, HIGH); // Optional Internal Pull-Up
attachInterrupt(0, flow, RISING); // Setup Interrupt
attachInterrupt(1, flow2, RISING); // Setup Interrupt
    sei(); // Enable interrupts
// -----<

// Setup Flujo ----->
    pinMode(trigpin, OUTPUT); // Initializing Trigger Output and
Echo Input
    pinMode(echopin, INPUT_PULLUP);
// -----<

// Setup Test ----->
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
// -----<

// Setup registros ----->
    holdingRegs[T1] = 0;
    holdingRegs[T2] = 0;
// -----<

```

```

delay(100);
}

void loop()
{

    //Lectura ORP-----
    orpArray[orpArrayIndex++]=analogRead(orpPin);    //read an
analog value every 20ms
    if (orpArrayIndex==ArrayLenth) {
        orpArrayIndex=0;
    }
    orpValue=((30*(double)VOLTAGE*1000)-(75*avergearray(orpArray,
ArrayLenth)*VOLTAGE*1000/1024))/75-OFFSET; //convert the analog
value to orp according the circuit
    holdingRegs[ORP1] = orpValue; // update data to be read by
the master
    volt = 0;
    //-----

    // Lectura turbidez-----
    for(int i=0; i<800; i++){
        volt += ((float)analogRead(turbPin)/1023)*5;
    }
    volt = volt/800;
    volt = round_to_dp(volt,2);
    if(volt < 2.5){
        ntu = 3000;
        holdingRegs[TURB1] = ntu; // update data to be read by the
master
    }else{
        ntu = -1120.4*square(volt)+5742.3*volt-4352.9;
        holdingRegs[TURB1] = ntu; // update data to be read by the
master
    }
    //-----

    // Lectura temperatura-----
    sensors.requestTemperatures(); //envía el comando para
obtener las temperaturas

```

```

float temp1= sensors.getTempC(address1); //Se obtiene la
temperatura en °C del sensor 1
float temp2= sensors.getTempC(address2); //Se obtiene la
temperatura en °C del sensor 2
holdingRegs[T1] = temp1*100; // update data to be read by the
master
holdingRegs[T2] = temp2*100; // update data to be read by the
master
//-----

// Lectura Flujo-----
Flujo1 = (flow_frequency4 * 60 / 7.5); // (Pulse frequency x
60 min) / 7.5Q = flowrate in L/hour
holdingRegs[FLU1] = Flujo1; // update data to be read by the
master
flow_frequency4 = 0; // Reset Counter
Flujo2 = (flow_frequency7 * 60 / 7.5); // (Pulse frequency x
60 min) / 7.5Q = flowrate in L/hour
holdingRegs[FLU2] = Flujo2; // update data to be read by the
master
flow_frequency7 = 0; // Reset Counter
//-----

// Lectura nivel-----
digitalWrite(trigpin, LOW); // Set the trigger pin to low for
2uS
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigpin, HIGH); // Send a 10uS high to trigger
ranging
delayMicroseconds(20);
digitalWrite(trigpin, LOW); // Send pin low again
int distance = pulseIn(echopin, HIGH,26000); // Read in times
pulse
nivelm= (distance/58)-22; //Convert the pulse duration to
distance
nivel=70-nivelm; //You can add other
math functions to calibrate it well
holdingRegs[NIV1] = nivel; // update data to be read by the
master

```

```
// Serial.print("Distance ");
// Serial.print(nivel);
// Serial.println("cm");
// -----
holdingRegs[TOTAL_ERRORS] = modbus_update();

if (holdingRegs[DI0] == 0) {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    holdingRegs[DO0] = 0;
}
else {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    holdingRegs[DO0] = 1;
}
}
```