

Samuel  
López  
Tejeida

Tratamiento y acondicionamiento del agua residual acuícola para su  
reutilización en jitomate hidropónico por medio del control de las variables  
físico-químicas

2023



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Tratamiento y acondicionamiento del agua residual  
acuícola para su reutilización en jitomate hidropónico por  
medio del control de las variables físico-químicas

Tesis

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

Presenta

M. en C. Samuel López Tejeida

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Tratamiento y acondicionamiento del agua residual  
acuícola para su reutilización en jitomate hidropónico  
por medio del control de las variables físico-químicas

**por**

Samuel López Tejeida

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

**Clave RI:** IGDCC-110562



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

Tratamiento y acondicionamiento del agua residual acuícola para su reutilización en jitomate hidropónico por medio del control de las variables físico-químicas

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Doctorado en Ingeniería de Biosistemas

**Presenta:**

M. en C. Samuel López Tejeida

**Dirigido por:**

Dr. Juan Fernando García Trejo

**Sinodales**

Dr. Juan Fernando García Trejo

Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González

Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Luis Miguel Contreras Medina

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Leticia Félix Cuencas

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala

Director de la Facultad de Ingeniería

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Loarca Piña

Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Septiembre, 2023

México

## RESUMEN

Hoy en día la forma en la que se produce la comida es de gran importancia ya que se tienen que ahorrar los recursos naturales, en este caso la acuicultura se basa en la producción de peces que es la comida, utilizando un recurso natural no renovable como lo es el agua, cabe mencionar que además de que la producción de peces para consumo humano, hay una gran presión ya que parte de esta producción de peces se destina para la producción de alimento para los mismos peces o alimento para otros animales, ya que la proteína que se produce de los peces en otras palabras la harina de pescado tiene un alto contenido proteico, dicha proteína es fundamental para consumo humano. En el caso del agua los sistemas acuícolas utilizan una gran cantidad de agua, además si no se tienen sistemas de filtración este consumo aumenta, aunado a esto los desechos que se producen en los sistemas acuícola si no se disponen correctamente generan una alta contaminación ya que como se mencionó anteriormente, el alimento que se les provee a los organismos acuáticos tiene un alto contenido proteico que al ser consumido por los peces se transforma en compuesto nitrogenados (amonio, nitrito, nitrato), por tal motivo los desechos acuícolas o aguas residuales tiene un alto contenido de compuesto nitrogenado.

Con todo lo anterior mencionado se requiere de ahorrar en todos los sentidos en los sistemas acuícolas desde la alimentación hasta los desechos acuícolas, un caso especial en los desechos acuícolas es reutilizarlos esto se puede lograr o se ha hecho en los sistemas acuapónicos o dichos desechos acuícolas enviarlos a algún cultivo hidropónico.

En este caso para esta investigación se utilizan los desechos acuícolas para reutilizarlos en un cultivo hidropónico de jitomate, para esto se utiliza una serie de sensores para medir los derivados del nitrógeno que se encuentren en el agua residual acuícola, posteriormente se ajusta de acuerdo a la cantidad que se requiere

para el sistema hidropónico de jitomate y por ultimo al cultivo de jitomate se le provee de los desechos acuícolas pero ajustados de acuerdo a la edad fenológica de la planta.

**Palabras clave:** Acuicultura, compuestos nitrogenados, modelo matemático, acuponia.

## SUMMARY

Today how food is produced is of great importance since natural resources have to be saved, the aquaculture production use non-renewable natural resource such as It is water, it is worth mentioning that in addition to the production of fish for human consumption, there is great pressure since part of this fish production is used for the production of food for the same fish or food for other animals, since the protein produced from fish, in other words, fishmeal has a high protein content, said protein is essential in the diet of the vast majority of meat production for human consumption. In the case of water, aquaculture systems use a large amount of water, and if there are no filtration systems, this consumption increases, in addition to this, the waste produced in aquaculture systems, if not disposed of correctly, generates high pollution since As mentioned above, the food that is provided to aquatic organisms has a high protein content that when consumed by fish is transformed into nitrogenous compounds (ammonium, nitrite, nitrate), for this reason, aquaculture waste or wastewater has a high content of nitrogenous compound.

With all of the above mentioned, it is necessary to save in all senses in aquaculture systems from food to aquaculture waste, a special case in aquaculture waste is to reuse it, this can be achieved or has been done in aquaponic systems or said aquaculture waste send them to some hydroponic culture.

In this case, for this research, the aquaculture waste is used to reuse in a hydroponic tomato culture, for this a series of sensors is used to determine the amount of nitrogen compounds present in the aquaculture waste, later it is adjusted according to the amount that It is required for the tomato hydroponic system and finally the tomato cultivation is provided with the aquaculture waste but adjusted according to the phenological age of the plant.

**Key words:** Aquaculture, nitrogen compounds, mathematical model, aquaponics.

## DEDICATORIA

Angelica Nadxielli

Joss

Sofi

Gabo

Abby

Lalo Jr

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Juan Fernando García Trejo por darme la oportunidad de formar parte de su equipo y a su vez de haberme dado la oportunidad para realizar un proyecto y que el fuera mi director. También a todos los Doctores y Doctoras que fungieron como profesores a lo largo de estos 8 semestres.

A los compañeros del laboratorio de Bioingeniería por el apoyo recibido para la realización de este proyecto. Especialmente a mis compañeros del área acuícola Leticia y Josafat ya que sin su apoyo este proyecto no se hubiese culminado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido con la beca.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de seguirme preparando académicamente.



## I. Contenido

<b>II. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>III. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1 <i>Hidroponía .....</i>	<i>17</i>
2.2 <i>Jitomate .....</i>	<i>22</i>
2.1.1 <i>Variables físicas y químicas en el jitomate.....</i>	<i>22</i>
2.3    ACUACULTURA.....	23
2.3.1 <i>Acuicultura .....</i>	<i>23</i>
2.4 <i>Agua residual.....</i>	<i>30</i>
2.4.1 <i>Métodos de tratamiento para el agua residual .....</i>	<i>31</i>
2.4.2 <i>Osmosis Inversa .....</i>	<i>32</i>
2.4.3 <i>Centrifugación .....</i>	<i>32</i>
2.4.4 <i>Carbón activado.....</i>	<i>32</i>
2.4.5 <i>Microfiltración .....</i>	<i>32</i>
2.4.6 <i>Separación por Gravedad .....</i>	<i>33</i>
2.4.7 <i>Fitoremediación.....</i>	<i>33</i>
2.4.9 <i>Ozono .....</i>	<i>34</i>
2.4.10 <i>Nitrificación y Desnitrificación.....</i>	<i>35</i>
<b>3    HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>36</b>
3.1 <i>Hipótesis .....</i>	<i>36</i>
3.2 <i>Objetivo general .....</i>	<i>36</i>
3.3 <i>Objetivos particulares.....</i>	<i>36</i>
<b>4    METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
4.1 <i>Determinación de las características físico químicas de los efluentes. ....</i>	<i>39</i>
4.1.1 <i>Toma de muestra de los compuestos nitrogenados.....</i>	<i>43</i>
4.1.2 <i>Determinaciones químicas.....</i>	<i>43</i>
4.1.3 <i>Respirometria .....</i>	<i>45</i>
4.1.4 <i>Contenido de nitrógeno en heces.....</i>	<i>47</i>

4.1.6	Contenido de nitrógeno en filete. ....	48
4.1.7	Análisis de efluentes en otras etapas.....	49
4.2	Determinación del modelo matemático .....	50
4.3	Evaluación del funcionamiento del sistema electrónico .....	52
4.3.1	Adaptación del sensor a la tarjeta arduino.....	53
4.3.2	Evaluación del sistema electrónico en un cultivo hidropónico. ....	54
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>55</b>
5.1	Compuestos nitrogenados presentes en el agua debido al tipo de alimento.....	55
5.1.1	Tasa metabólica del pez .....	59
5.1.2	Relación longitud-peso .....	60
5.1.3	Crecimiento del pez.....	62
5.2	Modelos obtenidos .....	63
5.3	Cantidad de nitrógeno en las heces y en filete.....	63
5.4	Evaluación del sistema electrónico .....	64
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>65</b>
<b>VI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2020).....	25
<b>Figura 2.2</b> Usos de la producción mundial acuícola (FAO, 2020).....	25
<b>Figura 2.3</b> Distribución de la producción acuícola y de captura por región (FAO, 2020). .....	26
<b>Figura 2.4</b> Comparación sistema tradicional y sistemas RAS (Lekang, 2020b) .....	29
<b>Figura 4.1</b> Poblado de Amazcala, municipio de El Marqués, estado de Querétaro (Google Maps, 2018). .....	37
<b>Figura 4.2</b> Diagrama de flujo del proyecto.....	37
<b>Figura 4.3</b> Colocación de los tratamientos en la estructura metálica.....	4
<b>Figura 4.4</b> Calentador utilizado para mantener la temperatura del agua....	41
<b>Figura 4.5.</b> Espectrofotómetro utilizado para las determinaciones químicas.....	45
<b>Figura 4.6</b> Medidor Multiparámetro HQ40 HACH.....	46
<b>Figura 4.7</b> pH metro de lápiz utilizado.....	47
<b>Figura 4.8</b> Electrodo selectivo de iones.....	52
<b>Figura 4.9</b> Conexión del módulo de pH a la tarjeta arduino.....	53
<b>Figura 5.1</b> Nitrito experimento veinticuatro horas.....	55
<b>Figura 5.2</b> Nitrito experimento siete días.....	55
<b>Figura 5.3</b> Nitrito experimento siete días 10% de recambio.....	56

<b>Figura 5.4</b> Nitrato experimento veinticuatro horas.....	57
<b>Figura 5.5</b> Nitrato experimento siete días.....	57
<b>Figura 5.6</b> Nitrato experimento siete días 10% de recambio.....	57
<b>Figura 5.7</b> Amonio experimento veinticuatro horas.....	58
<b>Figura 5.8</b> Amonio experimento siete días.....	58
<b>Figura 5.9</b> Amonio experimento siete días 10% de recambio.....	58
<b>Figura 5.10</b> Consumo de oxigeno durante 24 horas por tratamiento.....	60
<b>Figura 5.11</b> Excreción de $NH_4^+$ durante 24 horas por tratamiento.....	60
<b>Figura 5.12</b> Relación peso talla semana 4, tratamiento 1.....	61
<b>Figura 5.13</b> Relación peso talla semana 4, tratamiento 2.....	61
<b>Figura 5.14</b> Relación peso talla semana 4, tratamiento 3.....	61
<b>Figura 5.15</b> Crecimiento obtenido por los tres tratamientos.....	62
<b>Figura 5.16</b> Valores obtenidos por el sensor.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Entidades con mayor producción de jitomate (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020).....	19
<b>Tabla 2.2</b> Nutrición para el crecimiento del jitomate .....	23
<b>Tabla 4.1</b> Características nutrimentales de los tratamientos.....	39
<b>Tabla 4.2</b> Cantidad de alimento por pecera.....	41
<b>Tabla 4.3</b> Niveles de nutrientes en el medio aceptables para el cultivo de tilapia en sistemas de recirculación acuícola.....	42
<b>Tabla 4.4</b> Especificaciones de los tratamientos.....	49
<b>Tabla 4.5</b> Especificaciones de los alimentos debido a los tratamientos.....	49
<b>Tabla 5.1</b> Nitrógeno en alimento y en heces.....	64

## II. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se tiene dos grandes retos la producción de alimento y el ahorro de agua. El agua y la tierra son recursos esenciales, además existe una relación intrincada entre agua, tierra y alimentos con grandes incertidumbres; para tener un crecimiento agrícola sostenible es necesario de una gestión eficaz de dicha relación (Yao et al., 2021).

Respecto al alimento en el 2020 la producción tuvo un desabasto debido a la pandemia, lo que provocó que el hambre se mantuviera sin ningún cambio a lo largo de cinco años, a su vez la subnutrición aumento de 8.4 a 9.9 por ciento en tan solo un año. A su vez entre 720 y 811 millones de la población padecieron el desabasto de alimento, por tal motivo alrededor del 21% de las personas en el mundo, específicamente el 9.1% en Latinoamérica y el Caribe (FAO, IFAD, UNICEF, WFP, 2021). Aunado a lo anterior en un año aproximadamente un tercio del alimento para consumo humano se desperdicia en el mundo (Sulis et al., 2021).

Una forma de producir alimento es utilizando la agricultura, pero últimamente está se ha expandido a áreas naturales y se ha intensificado en otras regiones del mundo; en contra parte otras regiones agrícolas han sido abandonadas, dicho abandono es a causa de los factores socioeconómicos principalmente el cambio en la demanda mundial de alimentos, también la rentabilidad agrícola y por último la transformación de los suelos agrícolas a urbanos (Boke Olén et al., 2021). Además las preferencias por la dieta también tienen un impacto en la agricultura, medio ambiente y economía; lo anterior se considera como causante de la pérdida de la diversidad biológica, erosión del suelo y la escasez del agua (Souissi, 2019).

El consumo mundial de verduras y frutas en el 2018 aumento a más de 1.1 millones de toneladas, lo anterior fue un incremento del 22.9% a nivel global, respecto a los últimos 10 años, pero las tierras de cultivo se han mantenido constante, lo que ha provocado la sobre explotación para solventar el aumento en

la producción de alimento (Jiménez-Rosado et al., 2021). A su vez el sector agrícola es de lo que más requieren de agua, con un porcentaje de hasta el 70% del uso global del agua, aunado a esto también representa una de las fuentes de contaminación de agua en todo el mundo. Se considera un cuarto de las personas a nivel global sufren de estrés hídrico alto (Caro et al., 2021). El consumo de esta relacionada con el crecimiento y desarrollo de los cultivos, la optimización como espacio, sustratos, acolchado permiten un ahorro en este recurso (Li et al., 2021).

Por otra parte, el volumen de las reservas de agua es de aproximadamente 1,386 millones de  $\text{km}^3$ , el 96.5% es agua salada de los océanos. El total de reservas de agua dulce es del alrededor de 35 millones de  $\text{km}^3$  tan solo el 2.5% del total de la hidrosfera. Una porción del agua dulce se encuentra almacenada en las regiones antártica y ártica en forma de hielo, mientras un tercio de las reservas de agua dulce se encuentran en los acuíferos como agua subterránea. Los lagos y ríos son la fuente más importante para las necesidades humanas, estas contienen en promedio unos 90,000  $\text{km}^3$  o el 0.26% de la reservas totales de agua dulce (Meran et al., 2021). Además, el agua es de vital importancia para la subsistencia humana, también en la industria y en la agricultura; por último, el agua mantiene el equilibrio del medio ambiente ecológico. Adicionalmente el agua subterránea sustenta los ecosistemas y al mismo tiempo asegura el suministro de agua para los alimentos, a través de la extracción del agua subterránea e irrigación. Pero el bombeo de agua subterránea contribuye a la disminución de los niveles freáticos en acuíferos y cuencas hidrográficas de todo el mundo, estudios anteriores también indicaron que el efecto del uso humano del agua en la hidrología terrestre es comparable a los efectos del cambio climático a nivel regional (Keune et al., 2018). La distribución de los recursos hídricos es desigual a nivel mundial lo que afecta gravemente al desarrollo de la economía y a la integridad del ambiente (Deng et al., 2021 y Ahmed et al., 2021). El gasto de agua a nivel mundial ha aumentado casi ocho veces durante el último siglo; en el año de 1900 se consumían 500  $\text{km}^3$  por año y en el

2000 4,000 km<sup>3</sup> por año. Además durante las últimas décadas, la tasa de demanda de agua ha superado al doble la tasa de crecimiento demográfico (Soligno et al., 2019).

Los escenarios como el cambio climático, pandemias y aparición de nuevos contaminantes cada vez son más frecuentes y estos pueden inducir algunas variaciones en las características del agua (Suquet et al., 2021). Adicionalmente, la falta de agua a nivel mundial es debido a los efectos de la contaminación combinado con el cambio climático, por tal motivo se requieren de tecnologías sostenibles para conservar los recursos hídricos (Yao et al., 2021). La planificación y gestión eficaz del agua está condicionada a la capacidad de la sociedad para comprender cómo los sistemas humanos hacen uso del agua en el espacio y el tiempo. La comunidad científica cada vez más reconocen la necesidad de un reconocimiento sobre la configuración espacial y el patrón de uso de la tierra ya que esto impulsa la variación espacial en la demanda de agua (Sanchez et al., 2018).

Hoy en día hay dos técnicas que se utilizan para la producción de alimento y además permiten un ahorro en el agua que se usa para producir dicho alimento; dichas técnicas son la hidroponía y la acuicultura; la primera de estas se utiliza para producir vegetales utilizando un sustrato (fibra de coco, tezontle, arena, peat moss, etc.) el riego se hace por medio de goteros o micro aspersión lo que permite el bajo consumo de agua comparado con la agricultura que utiliza el riego rodado. Por su parte la acuicultura se utiliza para producir proteína de origen animal (pescados y mariscos), esta técnica también permite reducir el consumo de agua debido a los métodos que se utilizan para filtrar el agua. Continuando con la idea, también se pueden combinar ambas técnicas hidroponía y acuicultura para producir alimento utilizando el agua residual de los sistemas acuícolas la cual tiene una gran cantidad de compuestos nitrogenados debido al alimento no consumido por los peces y las heces excretadas por los peces, dichos compuestos nitrogenados pueden ser



aprovechados por las plantas, enviado el agua hacia estas últimas; dicha técnica combinada se le denomina acuaponia.

La razón de este proyecto es aprovechar completamente el agua residual acuícola tomando en cuenta el estadio del pez (alevín, juvenil y adulto) y utilizar la en sistemas hidropónicos tomando en cuenta la edad fenológica de la planta para suplementar el agua acuícola con los químicos faltantes.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Hidroponía

La hidroponía es utilizada para cultivar plantas sin el requerimiento de suelo, la cual ha sido integrada a la producción hortícola incrementando la eficacia en el uso del agua y nutrientes. La técnica se basa en tener a la raíz del cultivo en un ambiente controlado, por lo que se evita que el suelo funja como medio de cultivo como medio para almacenar agua y nutrientes, lo anterior se mejora por medio del uso de sustratos que generalmente se encuentran en una bolsa (Parra & Intrigliolo, 2020). Aunado a lo anterior la hidroponía es una de las tecnologías del sector agrícola con mayor crecimiento, las ventajas de la hidroponía son; la planta recibe la cantidad de nutrientes adecuados y en el momento idóneo, está se puede cultivar en interiores esto maximiza el espacio con el que se cuenta, además se evitan los problemas relacionados con el suelo como lo son algunas enfermedades así como el deshierbe y la cosecha es más fácil (Alipio et al., 2019).

Hoy en día existe una desigualdad en la distribución de los alimentos y esto se ve agravado debido al incremento de la pobreza en las zonas urbanas. Otros factores los cuales afectan la seguridad alimentaria son los relacionados al clima ya que pueden reducir los rendimientos de la tierra y la idoneidad del cultivo (Romeo et al., 2018). Por tal motivo el cultivo de verduras es de gran importancia ya que son fundamentales para la salud humana debido a que proporcionan una variedad de fitoquímicos los cuales funcionan como antioxidantes, fitoestrógenos y antiinflamatorios, también son la principal fuente de fibra dietética esto tiene relación a una reducción de enfermedades cardiovasculares, hipertensión y obesidad (Ruangrak & Khummueng, 2019).

También los sistemas hidropónicos proporcionan un mejor control en la fertilización de la planta y ahorro en agua y nutrientes (Rufí-salís et al., 2020). Además los cultivos en suelo convencional requieren de una rotación de cultivos y de cambiar el área de cultivo para obtener la calidad de suelo ideal, esto puede tomar una gran cantidad de tiempo, esto se resuelve con la hidroponía (Arancon et al., 2019). También en los sistemas hidropónicos se utilizan los invernaderos los cuales permiten un mejor control en las variables climáticas y a su vez con los sistemas hidropónicos se pueden reciclar el agua y los nutrientes ya que la solución que se provee a las plantas se puede drenar y reutilizar fácilmente, con esto se evita la contaminación de los recursos hídricos (Khan et al., 2021), adicionalmente se reduce el uso de pesticidas por lo tanto los cultivos se encontraran limpios para la cosecha (Gilmour et al., 2019). Al usar los sistemas hidropónicos se puede producir las plantas de forma intensiva (Aji et al., 2020).

En cuanto a los cultivos que se producen con la hidroponía son lechuga, tomate, pepión, hierbas y muchos tipos de flores ya que con este tipo de sistema los cultivos antes mencionados tienen crecimiento más rápido y con mayor productividad y un manejo más fácil (Cifuentes-Torres et al., 2021). Últimamente ha habido un creciente interés en el uso de los sistemas hidropónicos, para el cultivo de vegetales en todo el mundo; combinando la agricultura protegida y fábricas de plantas, aproximadamente el 3.5% de la superficie mundial ha optado por el uso de los sistemas hidropónicos (Aji et al., 2020).

En especial el jitomate es la hortaliza de mayor producción, tan solo en 2019 se cosecharon 442 mil toneladas, el consumo por persona por año fue de 13.8 kg, además contribuyo con el 21.9% de producción en el país (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020).

**Tabla 2.1 Entidades con mayor producción de jitomate (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020)**

Ranking	Entidad federativa	Volumen (toneladas)
1	Sinaloa	764,435
2	San Luis Potosí	391,719
3	Michoacán	280,478
4	Zacatecas	180,319
5	Jalisco	175,999
6	Baja California Sur	159,423
7	Puebla	140,425
8	Baja California	137,632
9	Morelos	134,093
10	Coahuila	121,580

Una variación de los sistemas hidropónicos tradicionales son los sistemas verticales y sin suelo, esto mantienen una producción con mayor rendimiento y ocupan menor espacio comparado con los sistemas de campo abierto, esto permite que sean una opción alterna viable para el cultivo de vegetales (Arcas-pilz et al., 2021).

Las plantas requieren para crecer de macronutrientes (N, P, K), micronutrientes (Ca, Mg, Na, S, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo y B); para el potasio (K) el efecto en la planta es en el crecimiento y desarrollo además está asociado con el nitrógeno (N) (Cezar et al., 2020), a su vez N y K son los nutrientes más demandantes (Alvarado-camarillo et al., 2020). Adicionalmente la mezcla de macro y micro nutrientes en la solución hidropónica determina el crecimiento de la planta, número de hojas, área folia, rendimiento comercial y calidad en el cultivo como la cantidad de minerales presentes y clorofila (Sapkota et al., 2019).

Existen diferentes tipos de sistemas hidropónicos como; sistema flotante también conocido como balsa flotante o método de cultivo en estanque, las plantas se insertan en una espuma de poli estireno las cuales se encuentran flotando en una solución con nutrientes almacenada en un estanque a una altura de 15 cm (Alvarado-camarillo et al., 2020). Los sistemas hidropónicos cerrados reciclan la solución nutritiva, cabe mencionar que los exudados radiculares varían en la composición química (Talukder et al., 2018).

Sin embargo la hidroponía también tiene sus desventajas, por ejemplo de acuerdo al tipo de producción y nivel de automatización los costos de inversión pueden ser altos, esto evitaría que los pequeños agricultores puedan cambiar al uso de la hidroponía, por otra parte las grandes compañías que usan esta técnica de cultivo requieren de una gran cantidad de insumos como infraestructura, nutrientes sintéticos, energía para iluminación y actuadores, por ultimo sustratos para el cultivo, además generan una gran cantidad de desechos (Kennard et al., 2020).

Con la agricultura a campo abierto no se puede cumplir la demanda a corto referente a la producción de alimentos, ya que se requiere de una demanda considerable de tierra y agua lo cual provocara impactos ambientales (Chen et al., 2020).

Los distintos tipos de sistemas hidropónicos que hay son:

*Sistema de goteo:* El fertilizante se envía a la planta a través de un gotero, el cual como su nombre lo dice por medio de cierta cantidad de gotas proporciona la cantidad requerida a cada una de las plantas, lo anterior se hace utilizando una bomba, generalmente la plantas se colocan en una sustrato con un buen drenaje para que la raíz de la planta se humedezca adecuadamente (Gaikwad & Maitra, 2020).

*Sistema de mecha:* Es el sistema más sencillo y más barato, dicho sistema consta de dos partes; la primer parte se conforma de un recipiente en el que se encuentra la nutrición química y la segunda parte consta de un recipiente en el que se encuentran las plantas en una maceta, estos recipientes se encuentran separados, la solución química llega a los vegetales con ayuda de una mecha (Science, 2021).

*Sistema de cultivo en aguas profunda:* Se utiliza una tina llena de solución nutritiva la cual debe de estar aireada, en dicha solución se agrega una balsa flotante la cual tiene como función de soporte para que las plantas queden verticalmente y solamente la raíz está sumergida en la solución nutritiva (Janeczko & Timmons, 2019).

*Sistema de película de nutrientes:* Es utilizado para producir vegetales de hoja, además el consumo de agua y nutrientes se puede estimar midiendo la diferencia de nutrientes en el tanque de almacenamiento (Son et al., 2020). En este sistema el riego es continuo por lo tanto no se consideran las necesidades reales de las plantas o los posibles ahorros energéticos (Ramos, 2019).

*Sistema de flujo y refluo poco profundo:* Este sistema combina el sistema de película de nutrientes y el sistema de agua profunda, el agua es bombeada desde un depósito a una bandeja que contiene a la planta, posteriormente el agua es drenada por gravedad al depósito (Halveland, 2020).

*Sistema aerónico:* Este tipo de sistemas no utilizan sustrato para sostener a la planta, las plantas crecen suspendida en el aire lo anterior se hace con un soporte artificial, las raíces se mantienen en un recipiente cerrado y los nutrientes se proveen por medio de unos nebulizadores (Meneghelli et al., 2021).

## **2.2 Jitomate**

El jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) es de la familia de las Solanaceas (Askari-Khorasgani & Pessarakli, 2020), es la hortaliza más cultivada a nivel global, es el 30% de la producción hortícola, lo anterior convierte al jitomate en el segundo cultivo de mayor importancia (Leana-Acevedo et al., 2022). En el país A nivel nacional es la hortaliza con mayor extensión de su cultivo a nivel nacional; tan solo en el 2020 se sembraron 45 mil 300 hectáreas el resultado fue una producción de 3 millones 371 toneladas, dicha producción se destinó para consumo nacional e internacional (SIAP, 2021). Otro de los motivos por los cuales el jitomate es una fruta de gran popularidad a nivel global es debido a que es una fuente importante de fibra y vitaminas A y C. Además, el consumo del jitomate se ha asociado con la disminución de padecimientos con tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares, osteoporosis (Wan et al., 2018).

### **2.1.1 Variables físicas y químicas en el jitomate**

Las plantas se conforman por elementos químicos, aproximadamente entre el 95 y 98% del total de la masa de la planta la constituyen H, C, O y N, el restante 2 al 5% es cenizas. También en las plantas se encuentra una gran cantidad de elementos químicos, de los cuales hay esenciales para el desarrollo y producción de los vegetales, de aquí se pueden clasificar a los elementos minerales como elementos vitales, elementos útiles y elementos no vitales (Favela Chavez et al., 2006). La nutrición mineral se le tiene que proveer a la planta por medio del riego, para realizar la nutrición se tiene que tomar en cuenta que los nutrientes para la planta son asimilables en cationes y aniones tabla 1 (Vargas-Canales et al., 2014).

**Tabla 2.2 Nutrición para el crecimiento del jitomate.**

Fuente: (Favela Chavez et al., 2006).

Fertilizante	Cationes (meq.litro <sup>-1</sup> )					Aniones (meq.litro <sup>-1</sup> )		
	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$NH_4^+$	$H^+$	$NO_3^-$	$H_2PO_4^-$	$SO_4^{2-}$
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$		6				6		
$NH_4 H_2PO_4$				0.5			0.5	
$KNO_3$	4					4		
$K_2SO_4$	1							1
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$			3					3
$H_3PO_4$					0.5		0.5	
$H_2SO_4$					1			1
Subtotal	5	6	3	0.5	1.5	10	1	5
Total cationes			16					
Total aniones							16	

Específicamente en la fertilización del jitomate, se le tiene que dar importancia a la relación (N/K) durante todo el ciclo de cultivo, puede ser 1/1 desde el trasplante hasta la etapa de flor, modificando a 1/2 e incluso 1/3 en el período de cosecha. En cultivos de racimo, el potasio es esencial en la maduración del jitomate, y puede administrarse en nitrato de potasio ( $KNO_3$ ), sulfato potásico ( $K_2SO_4$ ), fosfato mono potásico ( $KH_2PO_4$ ) o mediante quelatos foliares ricos en K (Bustamante- Orañegui et al., 2013).

## 2.3 Acuicultura

### 2.3.1 Acuicultura

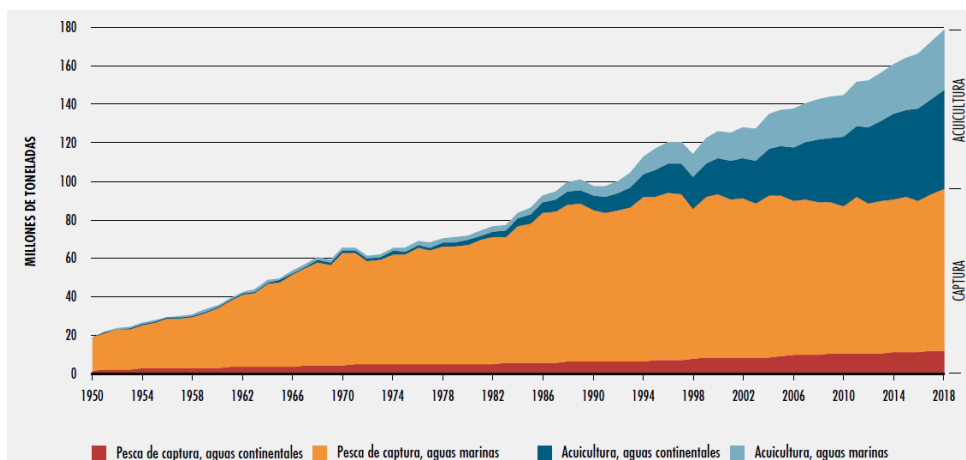
La acuicultura es la práctica que consiste en cultivar especies acuáticas como peces, plantas y microorganismos acuáticos (Paudel et al., 2019), generalmente la



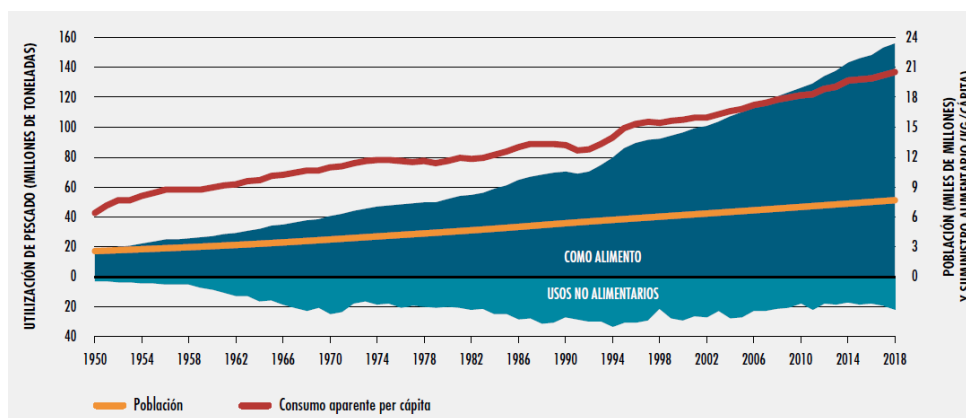
práctica se hace en lugares en los cuales no hay zonas costeras utilizando tanques, pero también estos sistemas son implementados en zonas costeras y marinas utilizando jaulas (Bouwmeester et al., 2021). Este tipo de sistemas de producción se requiere de la intervención humana en la crianza para obtener una mejor producción, además los sistemas acuícolas modernos se han industrializado teniendo componentes tecnológicos y científicos en las áreas de biología, ingeniería y economía (Mulema & García, 2019).

Tener la seguridad alimentaria es de gran importancia para el desarrollo sostenible en el mundo; cabe mencionar que la población aumenta en gran tamaño y rápidamente, además los patrones de consumo alimenticios también están cambiando, las personas hoy en día buscan alimentos saludables, dichos alimentos pueden ser solventados con los pescados y mariscos por tal motivo habrá un incremento en la demanda (Shen et al., 2021). La acuicultura es una forma de producir proteína de calidad, para la creciente población, lo anterior sin agotar los recursos que se encuentran en los océanos, también este tipo de sistemas proporcionan empleo alrededor de 20 millones de la población a nivel global, sobre todo en países de Asia y Latinoamérica los cuales se encuentra en desarrollo (Betanzo-torres et al., 2020).

En 2018 en el mundo se tuvo una producción de 179 millones de toneladas de pescado, esto fue 401,000 millones de dólares, los cultivos acuícolas proveyeron de 82 millones de toneladas y 156 millones de toneladas del producto global se destinaron para consumo de la población y las 22 millones de toneladas sobrantes se usaron para usos diferentes a la alimentación, harina y aceite de pescado (FAO, 2020); en la Figura 2.1 puede observar la comparación de la industria acuícola y la industria de captura; en la Figura 2.2 se puede observar la utilización de la producción mundial acuícola.

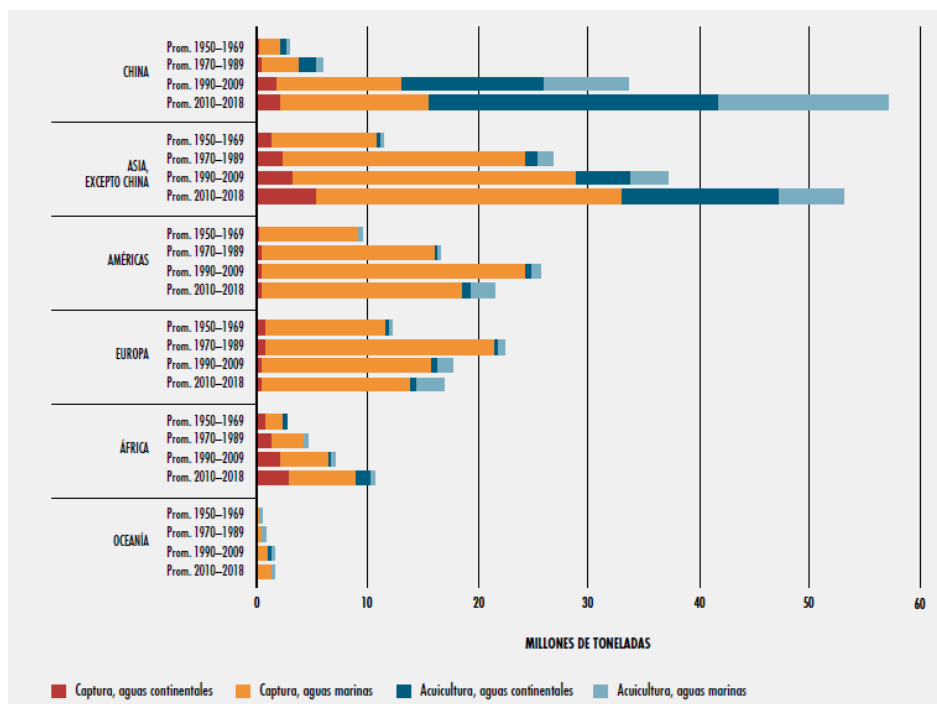


**Figura 2.1 Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2020).**



**Figura 2.2 Usos de la producción mundial acuícola (FAO, 2020).**

La mayoría de la producción de la acuicultura se da de productores menores de los países Asiáticos, los cinco países con mayor producción en Asia son China, India, Indonesia, Vietnam y Bangladesh (Ford, 2020). A nivel mundial la cantidad de producto en 2018 procedió de la siguiente forma: el 34% de Asia, el 14% de América, el 10% de Europa, el 7% África y el 1% de Oceanía. La producción total de pescado a sufrido considerables aumentos en todos los continentes en las últimas décadas a excepción de Europa y América, mientras que en África y Asia casi se ha duplicado en los últimos veinte años (FAO, 2020) en la Figura 2.3, se muestra la producción acuícola y de captura por región.



**Figura 2.3 Distribución de la producción acuícola y de captura por región (FAO, 2020).**

Las especies que se utilizan en los sistemas acuícolas, son criadas desde las primeras etapas hasta adultos para su posterior cosecha (Omotade et al., 2019). Las especies con mayor densidad de simbra a nivel mundial son la carpa herbívora, carpa plateada, carpa común, almeja japonesa, tilapia del Nilo, carpín y carpa cabezona (Garlock et al., 2019). Con respecto a la tilapia del Nilo aproximadamente el 40% de la producción acuícola proviene de esta especie (Prabu et al., 2019). Las plantas acuáticas cultivadas principalmente son algas y un volumen pequeño de micro algas (Cavalli et al., 2019). Pero el pescado sigue siendo el mayor grupo de especies de producción acuícola, seguido por las plantas acuáticas, moluscos, crustáceos, anfibios y reptiles, también diversos animales invertebrados (Tacon, 2019). Además una de las ventajas que tiene la producción acuícola, es que la producción mundial aumenta a una tasa anual del 8%, aunado a lo anterior en 1980, estos sistemas de producción de alimento eran muy pocos, hoy en día es la fuente

de proteína más importante a nivel mundial (Garlock et al., 2019); tanto que la acuicultura tiene una producción mayor en biomasa total que la carne de res (Boyd et al., 2020).

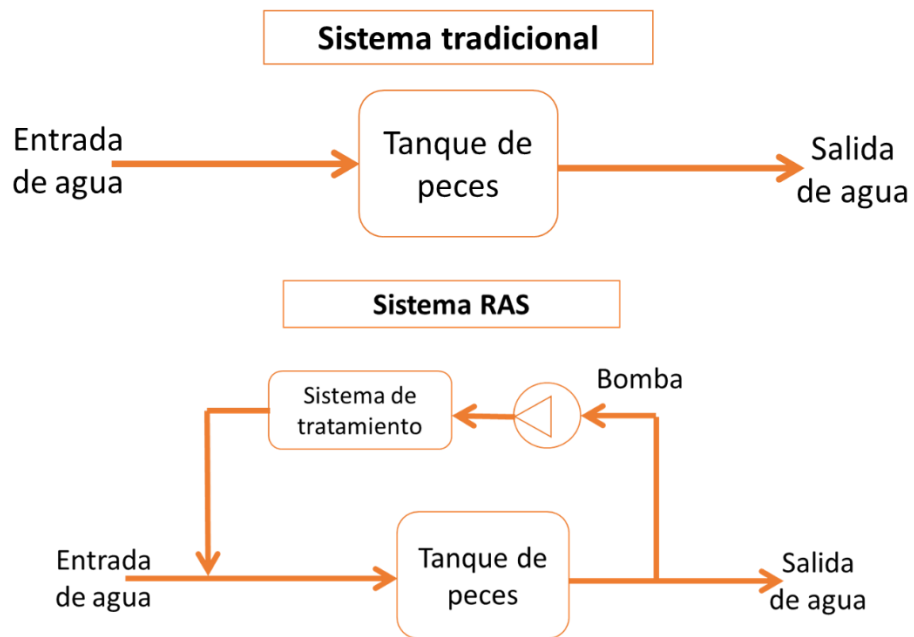
En el 2016 México contribuyó con 1.7 millones de toneladas de peso vivo de producción del mar y mar adentro; además las principales especies acuícolas en volumen y valor, son la mojarra, camarón y trucha (DOF, 2021). Las especies con mayor producción en nuestro país son el camarón (*Litopenaeus vanamei*), tilapia (*Oreochromis niloticus*), ostra (*Crassostrea gigas*), carpa (*Cyprinus carpio*) y trucha (*Oncorhynchus mykiss*); los estados con mayor producción acuícola son Sinaloa, Sonora, Jalisco, Veracruz y Chiapas (Betanzo-torres et al., 2020). A nivel global México está en el lugar nueve en cuanto a la producción de tilapia con 180,000 toneladas en 2017, además el 91 % de la producción se produjo en sistemas acuícolas (Gerbens-leenes, 2021). Específicamente la producción de tilapia a través de la acuicultura representó 75% en total se obtuvieron 183 mil toneladas; el consumo anual por persona fue de 2.1 kg (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020).

Los sistemas acuícolas pueden tener una variación en cuanto a diseño y estos generalmente se dividen en dos categorías extensivos e intensivos, las cuales tienen relación con la intensidad de la práctica (densidad de siembra); los sistemas extensivos requieren de menos insumos de alimento y energía, por su parte los sistemas intensivos utilizan sistemas de recirculación acuícola los cuales permiten de un 90 a 99% de reutilización del agua residual sin embargo los requisitos de energía son altos (Ghamkhar et al., 2021).

La producción acuícola demanda una gran cantidad de agua, por tal motivo hoy en día se tiene el interés en sistemas de producción que requieran menos agua por kilogramo de pez (Lekang, 2020a). Las aguas residuales de los sistemas acuícolas tienen cantidades altas de sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y otros

contaminantes los cuales causan efectos adversos al medio ambiente, estos residuos requieren de un tratamiento para su posible reutilización, un ejemplo de esto pueden ser en la agricultura (Omotade et al., 2019). Los sistemas acuícolas hacen uso de sistemas de recirculación acuícola (RAS por sus siglas en inglés), dichos sistemas logran que el agua de salida en otras palabras el agua residual sea reutilizada en lugar de liberar a alguna superficie de agua, por tal motivo la cantidad de agua limpia que se utilizar se reduce considerablemente, el sistema RAS pueden contener una gran cantidad de elementos para filtrar el agua esto dependerá de los requisitos del pez (Lekang, 2020b) en la Figura 2.4 se puede observar la comparación de un sistema de recirculación tradicional acuícola y un RAS.

A medida que la acuicultura se tecnifica requiere de más insumos ya que dicha tecnificación permite una producción intensiva por tal motivo se requiere de una mejor calidad en la alimentación, alevines, mano de obra, maquinaria y en ocasiones fertilizantes y medicinas (Mitra et al., 2019). En el caso de los alimentos, se requiere de los mismos peces los cuales contienen principalmente proteínas de origen animal; tan solo en 2016 la producción global de peces fue de 171 millones de toneladas, de dicha cantidad el 53% se utilizó para la fabricación de alimento para peces. Lo anterior provocara una disminución en las poblaciones de peces en mar abierto, se tendrán que buscar el remplazo de la proteína de harina de pescado, por proteínas vegetales esto sin afectar el crecimiento de los organismos acuáticos (Zetl et al., 2019). Soja, maíz, mandioca, trigo y canola son las fuentes de proteína y aceite que se han utilizado en los alimentos acuícolas debido al incremento de precio del pienso de pescado; sin embargo los factores anti nutricionales contenidos en estas especies vegetales inciden en el rendimiento, crecimiento, salud y nutrición de los peces (Cottrell et al., 2020).



**Figura 2.4 Comparación sistema tradicional y sistemas RAS**

Hoy en día se busca tener una acuicultura sostenible, cuyo objetivo es proveer de proporcionar alimento nutritivo de origen acuícola en pro de las personas pero sin poner en riesgo los ecosistemas existentes del planeta (Boyd et al., 2020). Para lograr lo anterior se requiere el despliegue de nuevas estrategias en ciencia y tecnología en beneficio de los sistemas acuícolas, provocando el incremento en la producción de organismos (Shah & Mraz, 2020).

Para proveer una buena salud a los organismos acuáticos se requiere de una buena calidad en él agua ya que de lo contrario se contribuirá a la generación de estrés y por ende riesgo de contraer enfermedades; algunos problemas en la calidad del agua pueden provocar una mortalidad masiva de organismos (Lebel et al., 2018).

## 2.4 Agua residual

El uso de aguas residuales puede ir desde el uso formar del agua recicla ultra pura para uso avanzado con fines industriales al uso informal de agua residuales sin tratamiento y crudas para la producción de hortalizas en una zona periurbana. La diversidad de los tipos de aguas residuales y lodos es muy variado así como los tipos de reutilización y los tipos de usuarios. Antes de que el agua residual sea tratada, a esta se le tiene que hacer un pre retratamiento para remover arena, grasa y solidos que puede obstruir en las siguientes etapas de los tratamientos. Generalmente los tratamientos que se le hacen al agua residual se pueden dividir en:

Primer tratamiento: Este tipo de tratamiento es la primera etapa de las agua residuales principalmente para eliminar la materia flotante grande, aceite y grasa, arena, partículas suspendidas y coloidales (Mritunjay, 2021).

Segundo tratamiento: El propósito de este tratamiento es producir un líquido homogéneo para que se puedan tratar biológicamente y por separado de los lodos, también se requiere la reducción de la demanda de oxígeno bioquímico, ya que todo esto es regido por un conjunto de bacterias heterótrofas las cuales utilizan el constituyente orgánico para obtener energía y crecimiento (Characteristics et al., 2017)

Tercer tratamiento: Se basa en eliminar los nutrientes (nitrógeno y fósforo), compuestos tóxicos, materia residual en suspensión o microorganismos (desinfección con cloro, ozono, radiación ultravioleta u otros), antes de que el efluente sea reutilizado. Este tipo de tratamiento usualmente no se emplea en países con bajos recursos. Por ultimo este tipo de tratamiento también se puede utilizar la membrana de filtración (micro, nado ultra y osmosis inversa), filtración/percolación, ozono e UV, por ultimo algo importante a considerar para

elegir el tipo de tratamiento es las características del agua de desecho y el uso final que tendrá. (Pay Drechsel et al., 2015)

#### **2.4.1 Métodos de tratamiento para el agua residual**

Estos se pueden dividir en tratamientos aeróbicos y tratamientos anaeróbicos. Los tratamientos aeróbicos son conocidos por su eficiencia y sus resultados, el producto final obtenido debido a la actividad aeróbica corresponde a las moléculas inorgánicas que son  $\text{CO}_2$  y agua además del aumento de los microorganismos. Además se tienen que considerar ciertas variables como (Barbera & Gurnari, 2018):

- a) La tecnología en el suministro de oxígeno.
- b) La rapidez de la propagación de los microorganismos.
- c) La dimensión del bioreactor y el concomitante y la cantidad de los microorganismos aeróbicos.

Por parte de los tratamientos anaeróbicos requieren de la biodescomposición de los contaminantes a falta de oxígeno con la producción de biogás (metano y  $\text{CO}_2$ ) y en esto métodos se distinguen tres tipos de bacterias (Barbera & Gurnari, 2018):

- a) Microorganismos de fermentación, las acules producen moléculas orgánicas simples como alcohol, dióxido de carbono y amonio.
- b) Bacterias de ácido acético, estas convierten los carbohidratos o alcohol etílico en ácido acético.
- c) Microorganismos productores de metano, esto convierten el hidrogeno molecular y el dióxido de carbono en metano.



#### **2.4.2 Osmosis Inversa**

La osmosis inversa puede eliminar cantidades mayores de contaminantes del agua proveniente de la industria o de los hogares, permitiendo la reutilización de esta (L. Wang et al., 2021). El proceso consiste en pasar el agua por una membrana semipermeable utilizando presión externa para superar la presión osmótica del agua con mayor cantidad de sales (Altmann & Das, 2021). Por último la gran limitante de este método es el excesivo uso de energía que requiere (Okampo & Nwulu, 2021).

#### **2.4.3 Centrifugación**

La característica de este método es que se utiliza para separar partículas sólidas de los líquidos, ya que debido a la fuerza que se genera por el movimiento circular rápidamente se hace la separación entre los líquidos y sólidos (Lin & Wu, 2022). Generalmente la centrifuga debe girar entre 1000 y 3000 rpm (Luckiram, 2022).

#### **2.4.4 Carbón activado**

Es un material poroso y tiene un área superficial alta. Debido a lo anterior es un material con excelentes propiedades de adsorción. Se utiliza en la purificación de agua potable, tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, y remediación ambiental. Actualmente la principal fuente de precursores para el carbón activado es la madera, pero debido a su costo se han estado utilizando desechos agrícolas para la preparación de carbón activado (S. Wang et al., 2020).

#### **2.4.5 Microfiltración**

Se considera una técnica adecuada para eliminar la turbidez y disminuye la demanda química de oxígeno, así como la biológica; puede tratar un volumen alto de agua (Belgada et al., 2021). Puede eliminar esporas, bacterias, ya que el tamaño de poro es de aproximadamente 1.4  $\mu\text{m}$  (Zhang et al., 2021).

#### **2.4.6 Separación por Gravedad**

Este tipo de filtración se caracteriza por el uso de la fuerza de gravedad para eliminar la fricción entre el líquido y el medio filtrante (Mirafuentes-Gómez, 2021). Básicamente la sedimentación sucede cuando las partículas sólidas se asientan en la parte inferior y lo anterior permita separar el líquido de dichas partículas (Alcocer Quinteros et al., 2020)

#### **2.4.7 Fitoremediación**

Esta técnica hace el uso de plantas para purificar el agua ya que por medio de los microorganismos, biomasa o plantas vivas se reduce la toxicidad del líquido a una aceptable según el uso que se tenga (Pedraza Guevara, 2021). Dicha técnica se puede dividir en:

*Fitroextracción:* Los contaminantes son absorbidos por las raíces y esto son acumulados en la corteza y nucleó del tallo, también en las hojas y en tejidos como el epidérmico, floema y xilema (Jiménez, 2021).

*Fitofiltración:* Con esta técnica los contaminantes son filtrados por la planta por medio del sistema dérmico rizodermis (Netzahuatl-Muñoz & Rodríguez-Cuamatzi, 2020).

*Fitotransformación:* Las plantas reducen la toxicidad de los componentes que se encuentran en el agua debido a que dichas plantas tienen la capacidad de degradar parcial o totalmente los componentes tóxicos del agua; el proceso anterior se hace debido a reacciones enzimáticas de las plantas y microorganismos en la rizosfera (Paredes Tello, 2021).

*Fitovolatilización:* En este proceso los contaminantes solubles en agua los absorbe la planta y posteriormente se volatilizan hacia la atmósfera por medio de la transpiración. La fitovolatilización puede ser directa o indirecta; la directa después de

la absorción los contaminantes son translocados y después se volatilización a través de los órganos aéreos. La indirecta hay un flujo de los contaminantes volátiles en el pero esta es en el suelo debido a las raíces de las plantas (Hernández-caricio et al., 2022).

*Fitorrestauración:* Con esta técnica dependiendo de la planta podrá depurar los desechos tóxicos del agua, provocando la disminución de los contaminantes en el líquido (Huarisueca & Ramos, 2020).

#### **2.4.8 Nanofiltración**

En este método se utiliza una membrana la cual tiene la característica de ser permeable, los poros de esta membrana tiene un tamaño de 1 nanómetro, el líquido que se desea filtrar se pasa a través de la membrana por presión (Islas, 2020). La capacidad de filtración de esta técnica está dada por el intercambio iónico ya que la membrana tiene la capacidad e mantener ciertos iones de tal forma que el líquido tendrá una composición iónica diferente, este método se aplica sobre todo para cambiar salinidades y pH (Agustín & Marín, 2022).

#### **2.4.9 Ozono**

En este método la degradación de contaminantes se produce debido a un ataque electrofílico debido al ozono molecular y ataque indirecto debido a radicales OH, los cuales se generan debido a la descomposición del ozono en el agua (Pedreros Calvo et al., 2021). Debido a sus propiedades física y químicas el ozono puede oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos, además su poder desinfectante es mucho mayor que el del cloro, puede eliminar bacterias, virus y microorganismos (Espinoza & Martines, 2022).

#### **2.4.10 Nitrificación y Desnitrificación**

La nitrificación y desnitrificación biológica tiene su importancia en el control de contaminantes presentes en el agua, esta se lleva a cabo por medio de microbios que usan nitrato como receptor de electrones terminales, y orgánicos e inorgánicos, además hay dos variables de desnitrificación biológica heterótrofa y autótrofa. Los desnitrificadores autótrofos requieren hidrógeno, hierro o derivados del azufre como fuente de energía y derivados del carbono inorgánico como el CO<sub>2</sub> y bicarbonato como fuente de carbono. En el caso del heterótrofo utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono. Además dicha técnica es considerada económicamente viable a gran escala (J. Wang & Chu, 2016).

## **3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **3.1 Hipótesis**

El agua proveniente de efluentes acuícolas contiene compuestos inorgánicos aprovechables por organismos vegetales. Es así que, mediante un sistema electrónico con base en sensores para dichos compuestos, el agua puede ser tratada y acondicionada de acuerdo a los requerimientos de un cultivo hidropónico de jitomate obteniendo rendimientos similares al manejo convencional.

### **3.2 Objetivo general**

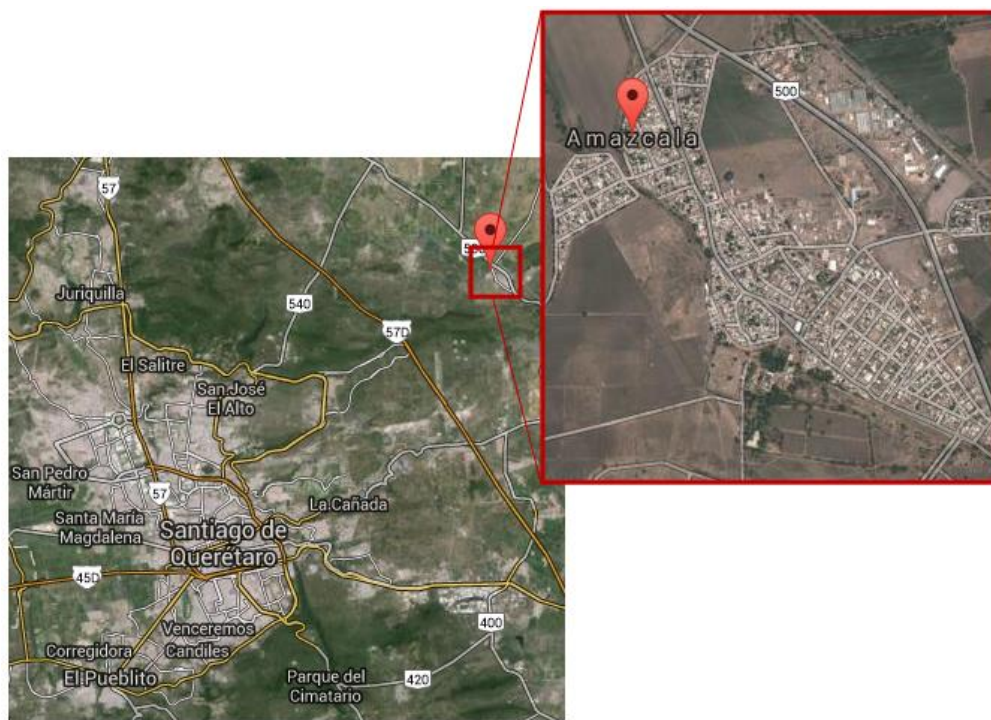
Desarrollar un sistema electrónico que permita "corregir" en línea el agua residual acuícola para emplearla en un cultivo hidropónico de jitomate

### **3.3 Objetivos particulares.**

- Determinar las características físico químicas de los efluentes acuícolas debida al alimento y talla estadio de los peces para la elección de sensores
- Determinar un modelo matemático con base en la caracterización previa y emplearlo como salida en los sensores de medición para realizar la "corrección" del agua residual
- Evaluar el funcionamiento del sistema electrónico tras su implementación en un cultivo hidropónico de jitomate a partir del rendimiento obtenido

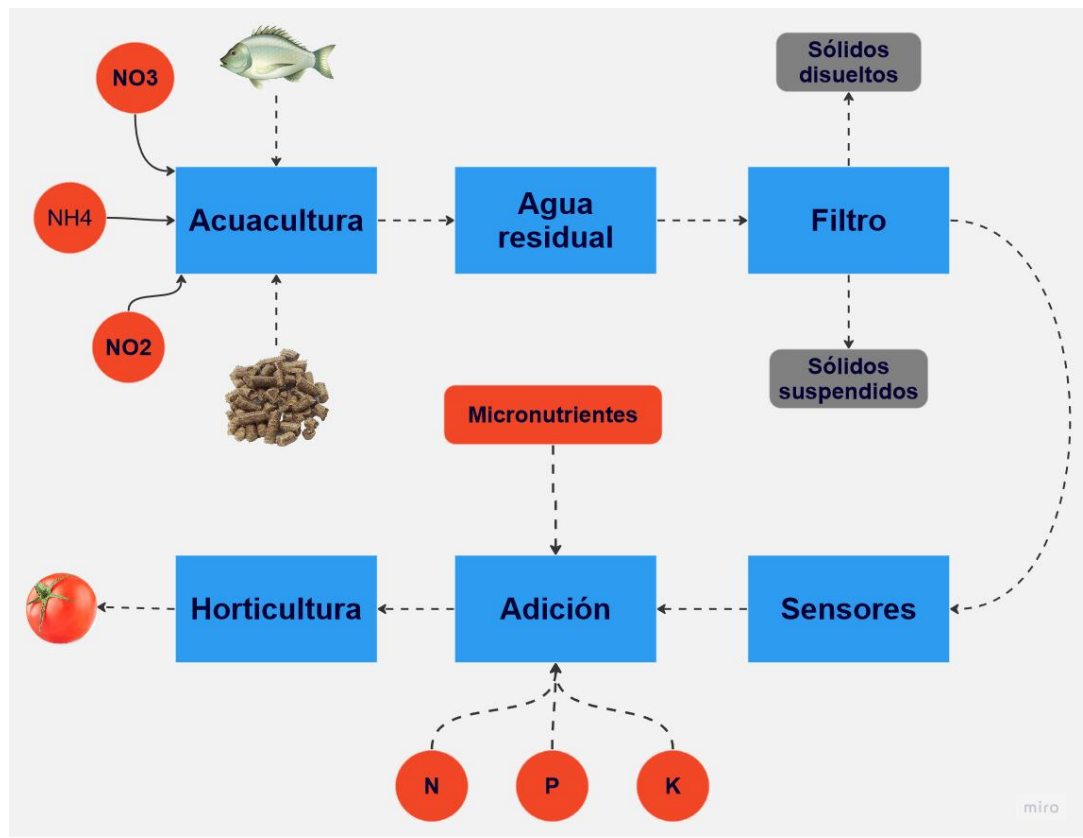
#### 4 METODOLOGÍA

El experimento fue realizado en el Laboratorio de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro en el Campus Amazcala. Este se encuentra en Municipio del Marqués, Estado de Querétaro (Figura 4.1), coordenadas  $20^{\circ} 31'$  y  $20^{\circ} 58'$  de latitud norte y  $100^{\circ} 24'$  longitud oeste, a 1890 msnm. La temperatura media anual oscila entre los  $18^{\circ}\text{C}$  y los  $24^{\circ}\text{C}$ , con un clima subtropical, templado semiseco.



**Figura 4.1 Poblado de Amozaca, municipio de El Marqués, estado de Querétaro (Google Maps, 2018).**

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo de la investigación



**Figura 4.2 Diagrama de flujo del proyecto.**

En todo el proyecto la especie utilizada para la investigación fue la tilapia *Oreochromis niloticus*, se utilizaron alevines se consiguieron con un productor que se encuentra en Ixmiquilpan Hidalgo, antes de que los peces fueran introducidos a las peceras, estos se aclimataron durante 1 semana en un tanque de 1 m<sup>3</sup> de geomembrana durante este periodo se les proveyó de alimento Aпитilapia 1, de la marca maltaCleyton® concluida la semana de adaptación se eligieron al azar 54 peces y fueron colocados en las distintas repeticiones de cada tratamiento.

#### 4.1 Determinación de las características físico químicas de los efluentes.

Para el análisis de las características físico-químicas de los efluentes se utilizaron tres alimentos comerciales tomando en cuenta esto como los tratamientos, dichos tratamientos quedaron de la siguiente manera:

Tratamiento 1 alimento comercial de la marca maltaCleyton®

Tratamiento 2 alimento comercial de la marca Purina®

Tratamiento 3 alimento comercial de la marca Pedregal®

En la tabla 4.1 se muestran las características de cada uno de los tratamientos.

**Tabla 4.1. Características nutrimentales de los tratamientos.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Grasa (%)</b>	<b>Fibra (%)</b>	<b>Ceniza (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
1	45	16	2.5	12	12
2	45	16	2.5	12	11
3	44	15	2.5	12	12

Para evitar la combinación de los efluentes de los diferentes tratamientos se utilizó una estructura rack construida con tubo de acero rectangular inoxidable PTR de una pulgada, de esta forma cada uno de los tratamientos tenía tres repeticiones, cada una de las repeticiones fue una pecera de acrílico, con capacidad de 20 litros (30 cm de longitud x 25 cm de anchura y 20 cm de alto). En cada una de las peceras de 20 litros se colocaron 6 peces, para mantener una densidad de 207 peces / m<sup>3</sup>. En la Figura 4.2 se muestra el acomodo de los tratamientos en la estructura metálica. En el sistema se tuvo una recirculación las 24 horas del día, para esto se utilizaron tres bombas EVANS® de 33 L/min una para cada tratamiento, dicha



bomba fue colocada en una pecera de 200 litros que tenía cada uno de los tres tratamientos; para toda la distribución hidráulica del agua se utilizó tubería PVC cedula 40 de 2" y 1/2".



**Figura 4.3 Colocación de los tratamientos en la estructura rack de PTR**

También se utilizó un generador de oxígeno AIRSEP® Topaz, dicho generador produce 6 L/min con una presión de 9 psig y una concentración del 93%, a este se le conectaron 3 piedras difusoras una por cada reservorio de agua para mantener el nivel de oxígeno disuelto en los valores óptimos de la especie. Para mantener la temperatura se utilizaron calentadores eléctricos de 300 W de la marca Aquakril, uno para cada tratamiento Figura 4.4. esto permitió mantener la temperatura del agua en 28 °C.



**Figura 4.4 Calentador utilizado.**

El alimento se les proveyó a cada uno de los tratamientos en los siguientes horarios 8:00 h, 11:00 h, 14:00 h y 17:00, la cantidad de alimento que se les proveyó fue al 10% de su biomasa en la Tabla 4.2 se observa cuanto alimento se les proveyó a cada repetición de los tratamientos tratamiento de acuerdo a la biomasa total.

**Tabla 4.2. Cantidad de alimento por pecera.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Repetición</b>	<b>Biomasa Total (gr)</b>	<b>Cantidad de alimento por ración (gr)</b>
1	1	120	0.75
1	2	100	0.63
1	3	115	0.72
2	1	80	0.50
2	2	140	0.88
2	3	105	0.66
3	1	105	0.66
3	2	95	0.59
3	3	100	0.63

El alimento comercial contiene cierta cantidad de proteína, dicha proteína generalmente se obtiene de la harina de pescado, pero hoy en día debido al incremento en el precio del pienso de pescado; los alimentos se están suplementando con proteínas procedentes de vegetales y esto puede traer ciertas consecuencias. Por tal motivo las variables de respuesta fisicoquímicas que se tomaron en cuenta de los efluentes fueron pH, temperatura, amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ); para esto se consideraron los niveles aceptables para el cultivo de tilapia esto se muestran en la Tabla 4.3. Con lo anterior se va a caracterizar la cantidad de compuestos nitrogenados que tiene cada tratamiento.

**Tabla 4.3 Niveles de nutrientes en el medio aceptables para el cultivo de tilapia en sistemas de recirculación acuícola.**

<b>Compuesto</b>	<b>Concentración (peces)</b>
<b>Nitrógeno total (NT)</b>	< 3.0
<b>Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N)</b>	<1
<b>Nitrito (NO<sub>2</sub>)</b>	<1
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub>)</b>	0-400
<b>Fósforo</b>	0.01-3
<b>Potasio</b>	<5

Además la razón por la que se tomaron en cuenta los compuesto nitrogenados como lo menciona (Ip & Chew, 2018) un componente muy importante en los sistemas biológicos es el nitrógeno, ya que es fundamental para los aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos. La catabolización provoca que el nitrógeno libere amoníaco, este es considerado tóxico para los organismos acuáticos y se debe eliminar. Los peces consumen aminoácidos por medio de alimento después los digieren para producir proteínas, el requerimiento de aminoácidos consumidos por pez para su crecimiento y desarrollo es excedente, por dicha razón se degradan y no se puede almacenar en el organismo de los peces, por último, en su mayoría los aminoácidos se catabolizan en el hígado. Aunado a lo anterior, las proteínas son de gran importancia ya que regulan de muchas funciones fisiológicas, sobre todo la regulación del estrés, fisiología y comportamiento (Y. Wang et al., 2019).

#### **4.1.2 Toma de muestra de los compuestos nitrogenados**

Para el análisis de los compuestos nitrogenados de cada tratamiento primero se llevó a cabo un experimento con una duración de 24 horas, en este los peces se alimentaron en los siguientes horarios 08:00, 12:00 y 16:00 h, para la toma de muestra se utilizaron recipientes de plástico de 250 ml. El procedimiento para la toma de muestra fue el siguiente; primero se introdujo el recipiente de plástico en la pecera sumergiéndolo completamente para evitar las burbujas de aire, posteriormente se sacó el recipiente y este se cerró con su respectiva tapa y por último la muestra se congelo hasta que el análisis de los compuestos nitrogenados fuese hecho. En total se tomaron seis muestras por cada repetición de cada tratamiento, esto se hizo cada cuatro horas.

Después se hizo una segunda experimentación con una duración de siete días para analizar el comportamiento de los compuestos nitrogenados por alimento durante, cabe mencionar que durante estos siete días se hicieron recambios del 10% por día. Para el experimento se tomo en cuenta el mismo horario y después de una hora se tomo la muestra a su vez las heces y alimento no consumido fueron extraídos de la pecera.

#### **4.1.3 Determinaciones químicas**

Los análisis químicos se hicieron con los métodos propuestos en el manual HACH, 1997, usando un espectrofotómetro modelo DR/6000 HACH, en la Figura 4.5 se puede observar el espectrofotómetro utilizado.



**Figura 4.5 Espectrofotómetro utilizado para las determinaciones químicas.**

Cada uno de los análisis se hizo de la siguiente manera:

*Amonio:* En este análisis se usó el método 8038 propuesto por el manual HACH para el espectrofotómetro DR6000, llamado método de Nessler con intervalo de 0.02-2.50 mg/L  $\text{NH}_3$ . Con este método se usa un estabilizador de origen mineral que reduce la dureza de las muestras y también se usa dispersante (alcohol polivinílico) que promueve a la formación de color en la reacción del reactivo Nessler debida a los iones de amonio. Lo antes mencionado provoca la formación de un color amarillo en proporción a la concentración de amoniaco que se puede medir a una longitud de onda de 425 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

*Nitritos:* En este análisis se usó el método 8057 propuesto por el manual HACH para el espectrofotómetro DR6000, llamado método de diazotacion con intervalo de 0.002-0.300 mg/L  $\text{NO}_2$ . Con dicho método el nitrito presente en la muestra hace reacción con el ácido sulfanílico para que se forme sal de diazonio la cual hace reacción con el ácido cromotrópico para generar un color rosa proporcional a la saturación de nitrito encontrado en la muestra y puede ser medible a una longitud de onda de 507 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

*Nitratos:* Este análisis se hizo de acuerdo al método 8039 presente en el manual HACH para el espectrofotómetro DR6000, también llamado método de reducción de cadmio con intervalo de 0.3-30.0 mg/L NO<sub>3</sub>. En este análisis el cadmio metálico transforma a nitrito el nitrato presente en la muestra. Posteriormente el ion nitrito hace reacción en el medio ácido debido al ácido sulfanílico para crearse una sal de diazonio intermedia. Dicha sal reacciona con el ácido gentísico para tener una solución de color ámbar que se puede medir a una longitud de onda de 500 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

#### **4.1.4 Respirimetria**

Después de dos semanas que los peces permanecieron la estructura rack de PTR, se realizó una respirometría para medir las diferencias entre los metabolismos debido al alimento. El metabolismo de los peces de agua dulce puede variar según el estado físico y variables químicas del agua. El rango óptimo de pH, es 6.5-9.0. Lo anterior puede variar debido a la cantidad de compuestos carbonatados presentes en el agua (Mohammadi *et al.*, 2019). En cuanto a los rangos óptimos de temperatura pueden ser diferentes dependiendo de la especie, pero esto puede ser de 24-30 ° C (Lithgow *et al.*, 2017). En el caso del oxígeno disuelto (OD) el rango es de 6 mg L<sup>-1</sup> Ma *et al.* (2019), Abdel-Tawwab *et al.* (2019) y Junxian Wang *et al.* (2019), mencionaron que la tasa de consumo de oxígeno se puede utilizar como parámetro para evaluar las actividades metabólicas. También el consumo de OD se puede usar para obtener una tasa de respiración de los peces y obtener una medida para la tasa metabólica (Magnhagen *et al.*, 2018). Para esta investigación se hizo una respirometría sin flujo, se utilizaron 17 envases de plástico de 10 L cada una de estas se consideró como una cámara, se utilizaron cinco cámaras para cada tratamiento y las dos restantes se utilizaron como control.

Para la respirometría se tomaron aleatoriamente cinco individuos de cada tratamiento para medir el metabolismo aeróbico (consumo de oxígeno =  $QO_2$ ), utilizando varias cámaras respirométricas cerradas con temperatura constante y un volumen de agua establecido (Timmons et al., 2002; Soto-Zarazúa et al., 2010). Las mediciones de OD y  $NH_4$  se midieron cada cuatro horas (14:00, 18:00, 22:00, 02:00, 06:00 y 10:00 h) por un ciclo de 24 h, dichas mediciones de oxígeno disuelto se hicieron un medidor multiparámetro de la marca HACH, este observa en la Figura 4.6



**Figura 4.6 Medidor Multiparámetro HQ40 HACH.**

Durante la experimentación también se hicieron mediciones de pH utilizando un pH metro de lápiz de la marca Vicometer este se observa en la Figura 4.7



**Figura 4.7 pH metro.**

También se agregó alimento a cada cámara por tratamiento, considerando el 10% de la biomasa de los peces, esta se administró en los horarios 8:00, 12:00 y 16:00 h; las muestras se tomaron en los horarios 9:00, 13:00, 17:00, 21:00, 1:00 y 9:00 h, evitando tomar burbujas de aire o alimento de los peces o excreciones. Al culminar el experimento los organismos fueron sacrificados para determinar su peso seco y obtener la relación del oxígeno consumido por la biomasa. Durante la respirometría también se midieron compuestos nitrogenados  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ .

#### **4.1.5 Contenido de nitrógeno en heces**

Para analizar la cantidad de nitrógeno en heces se capturó heces de los peces por cada tratamiento; esto con el objetivo de obtener la cantidad de nutrientes presentes en las heces de los organismos acuáticos. Los horarios de alimentación elegidos fueron los siguientes 8:00, 11:00, 14:00 y 17:00 horas, también fue necesario retirar el alimento no ingerido por los organismos esto se realizó en los siguientes horarios, 8:30, 11:30, 14:30 y 17:30 horas, el retiro de las heces se hizo en los horarios 10:00, 13:00, 16:00 y 19:00 horas, para retirar las heces se utilizó una jeringa con una manguera unida a la punta, las heces que se recolectaron con la jeringa se vertían en papel fieltro para retirar la humedad, posteriormente las heces



se colocaban en un crisol el cual se encontraba en una estufa a peso constante. Después de que el crisol tenía las heces acumuladas del día, este se introducía a la estufa hasta obtener peso constante, esto fue aproximadamente durante 3 días.

#### **4.1.6 Contenido de nitrógeno en filete.**

También se analizó la cantidad de nitrógeno en el filete para esto se sacrificaron algunos organismos colocándolos en hielo y posteriormente se diseccionaron, después se les retiró la piel para obtener cierta cantidad de filete, esto se realizó con 10 organismos de cada tratamiento. Los filetes que se obtuvieron de cada tratamiento se colocaron en aluminio y fueron introducidos en una estufa hasta obtener peso constante. Posteriormente los filetes de cada tratamiento se pulverizaron utilizando un procesador de alimentos.

La determinación del nitrógeno se obtuvo como lo indica la Norma Mexicana NMX-F-608-NORMEX-2011, los pasos se mencionan a continuación:

**Digestión:** Esto se hizo de la siguiente forma primero se pesó una cantidad de la muestra la cual debe estar adecuadamente homogeneizada y esta se coloca en un matraz Kjeldahl con un catalizador, dicho catalizador es una combinación de sulfato de cobre y sulfato de potasio; además en el matraz se colocó ácido sulfúrico concentrado y cuerpos de ebullición para la digestión.

**Destilación:** Una vez obtenido el residuo digerido y a temperatura ambiente se le agrega agua desionizada, granalla de zinc, también una disolución de hidróxido de sodio 1:1 y algún tipo de agente. El destilado se coloca en una mezcla de ácido bórico con mezcla de indicadores generalmente rojo de metilo/verde de bromocresol.

**Titulación:** Ya con el destilado se procede a la titulación ácido-base con un ácido fuerte valorado (ácido clorhídrico 0.1 N para el caso) cuando el indicador

cambia de color verde o azul a un color rojizo, también se puede utilizar un potenciómetro previamente calibra. La titulación terminada tiene un pH de 4.6.

#### 4.1.7 Análisis de efluentes en otras etapas

Con los datos de la experimentación previa se prosiguió a caracterizar los compuestos nitrogenados en los efluentes de peces en estadio juvenil y adulto, pero con el alimento maltaCleyton ya que este tuvo el mejor desempeño. Para esto se utilizaron tres tanques de 1 m<sup>3</sup> uno para cada etapa de desarrollo (alevín, juvenil y adulto). En la Tabla 4.4 se observa la cantidad de organismos de cada tratamiento.

**Tabla 4.4 Especificaciones de los tratamientos.**

Tratamiento	Numero de organismos	Biomasa total (kg)
Alevín	420	1.528
Juvenil	140	8.680
Adulto	60	11.779

Durante el experimento a los organismos se les proporciono el alimento comercial dependiendo la etapa de estadio, las características de cada uno de los alimentos se pueden observar en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Especificaciones de los alimentos debido a los tratamientos.**

Tratamiento	Tipo de alimento	Proteína	Grasa
Alevín	Biofingerling 1.5	45%	16%
Juvenil	Grow-tilapia 2	35%	3%
Adulto	Grow-tilapia 3	30%	3%

Los horarios de alimentación fueron 9:00, 13:00 y 17:00 horas, de acuerdo al porcentaje de biomasa de cada etapa. Cada tratamiento contaba con una bomba

de la marca TRUPER de 300 W, filtro canister de 200 L de la marca LOMAS, también se colocó una resistencia de 1,000 W en cada uno de los tanques para mantener la temperatura durante la noche.

Se obtuvieron muestras de agua cada semana de tratamiento esto se realizó en cada uno de los tanques de cada tratamiento. Las muestras fueron congeladas para su posterior determinación química de (amonio, nitrito y nitrato). La toma de la muestra se hizo con un recipiente de plástico de 250 ml, para la toma de muestra se introdujo el envase de plástico en el tanque evitando que en la muestra hubiese burbujas de oxígeno, así que para asegurar esto se sumergió completamente el envase de plástico.

Las determinaciones químicas de las muestras se hicieron de la siguiente forma, las muestras se sacaron del congelador para que estas se descongelaran a temperatura ambiente, posteriormente que se descongelaron se siguieron los pasos mencionados de acuerdo a cada método HACH para obtener  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ .

#### **4.2 Determinación del modelo matemático**

Una vez que se obtuvieron las determinaciones químicas de los experimentos anteriormente realizados se prosiguió a obtener un modelo matemático. Para esto se tuvo que hacer un análisis con los datos obtenidos esto se hizo utilizando OriginLab® 8 y Statgraphics® Centurion XV. Se utilizó un ANOVA de factor único con Tukey HSD para probar las diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos en función de los valores medios de los datos. Los gráficos se realizaron con las medias utilizando las desviaciones estándar. Luego, se realizó una regresión lineal de un factor entre compuestos nitrogenados entre tratamientos individuales, cambiando la variable independiente y la variable dependiente entre compuestos nitrogenados, para encontrar el modelo de mejor ajuste.

Una parte de gran importancia que se tomó en consideración fue cómo se comporta el nitrógeno en el agua. En este caso, los residuos sólidos de la industria acuícola son uno de los más ricos en nutrientes, los estiércoles de pescado que contienen un 4,47 % de nitrógeno y un 2,35 % de fósforo. En la acuicultura, solo el 25 % del nitrógeno se recolecta a través de la biomasa de los peces y casi el 70 % se excreta a los medios en forma de amoníaco (Khiari et al., 2019); el compostaje puede transformar el estiércol en un fertilizante sólido, pero incluye largos períodos de procesamiento y equipos costosos (Kim et al., 2015). Además, el nitrógeno está asociado con la proteína, que es la parte de mayor costo en la alimentación de los peces, además la alimentación representa más de la mitad de los costos de la producción. También el rendimiento y la eficiencia de un sistema de acuicultura se puede evaluar con un análisis de la conversión de nitrógeno en biomasa de peces (Taylor et al., 2014).

El ciclo del nitrógeno en los sistemas productivos de la acuicultura empieza con la proteína contenida en la alimentación para los peces, después es ingerida por el organismo acuático y este la excreta al medio acuoso en forma de nitrógeno amoniacal total y amonio. El  $\text{NH}_3$  se oxida a nitrito debido a las bacterias oxidantes de amoníaco (AOB), y posteriormente se convierten en nitrato debido a las bacterias oxidantes de nitrito (NOB, *Nitrobacter* spp. y *Nitrosospira* spp.) (Khiari et al., 2019). Otra posibilidad es que las AOB se han detectado en la mayoría de los entornos aeróbicos, como plantas de tratamiento de agua dulce, suelo y aguas residuales; las bacterias anteriormente mencionadas tienen un papel de gran importancia para los sistemas acuáticos. Otra bacteria la cual recibe el nombre de arqueas oxidante de amoníaco (AOA) está en el agua de mar, también en los sedimentos de los estuarios, el suelo y las plantas de tratamiento de aguas residuales (Cáceres et al., 2018).

### 4.3 Evaluación del funcionamiento del sistema electrónico

Posteriormente que se obtuvieron los modelos matemáticos se prosiguió a elegir los sensores para la medición de los compuestos nitrogenados en la Figura 4.8 se puede observar el electrodo selectivo de iones para amonio de la marca BANTE con un rango de captura de 0 a 18,000 ppm.

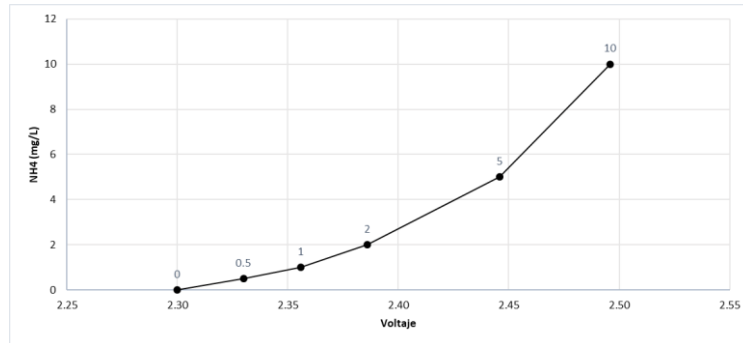


**Figura. 4.8 Electrodo selectivo de iones.**

El sensor elegido tiene una entrada BNC por tal motivo se utilizó un módulo PH-4502C para conectar en este el sensor de amonio y posteriormente la salida del módulo conectarla a una entrada analógica de la tarjeta Arduino. Debido a que el módulo utilizado es para un sensor de pH lo que se hizo fue una curva de calibración para corroborar el valor medido por el sensor y el voltaje que el sensor saca debido a la cantidad de iones que hay en la solución.

El sensor de fábrica contiene una solución de amonio a 1,000 ppm a partir de esta se hicieron diluciones para obtener soluciones de 0.5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L, 5 mg/L y 10 mg/L de amonio, para hacer diluciones se utilizó agua tridestilada a su vez el agua tridestilada se utilizó como blanco a 0 mg/L. Las mediciones de voltaje se obtuvieron de la siguiente forma, primero el electrodo fue sumergido a una solución de agua tridestilada para encontrar el voltaje del sensor debido a los 0 mg/L posteriormente el sensor fue sumergido en la solución de 0.5 mg/L y se verifico el voltaje que marcaba, posteriormente el electrodo se volvió a limpiar con agua tridestilada hecho esto el sensor fue sumergido en la solución de 1 mg/L, después se verifico el voltaje que marcaba el sensor, seguido el electrodo fue limpiado con

agua tridestilada, todo estos pasos se repitieron con las soluciones de 2 mg/L, 5 mg/L y 10 mg/L. En la Figura 4.9 se puede apreciar la curva de calibración.



### 4.3.1 Adaptación del sensor a la tarjeta arduino

Posteriormente que se obtuvo la curva de calibración del sensor se prosiguió a conectar este último a la tarjeta arduino, para esto se utilizó una entrada analógica de la tarjeta arduino, en la Figura 4.10 se muestra la conexión del módulo de pH PH-4502C a la tarjeta arduino.

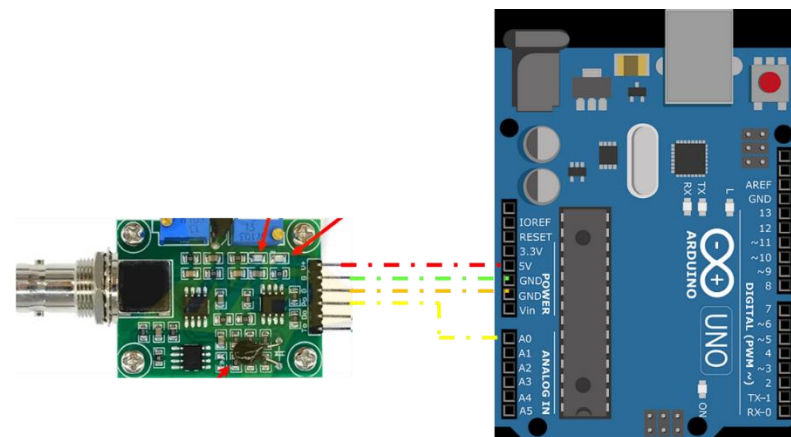


Figura. 4.9 Conexión del módulo de pH a la tarjeta arduino.

### 4.3.2 Evaluación del sistema electrónico en un cultivo hidropónico.

La ultima parte del proyecto fue colocar en un sistema de cultivo el sistema electrónico para verificar el funcionamiento de este. En la Figura 4.10 se muestra el diagrama utilizado para evaluar el sistema electrónico.

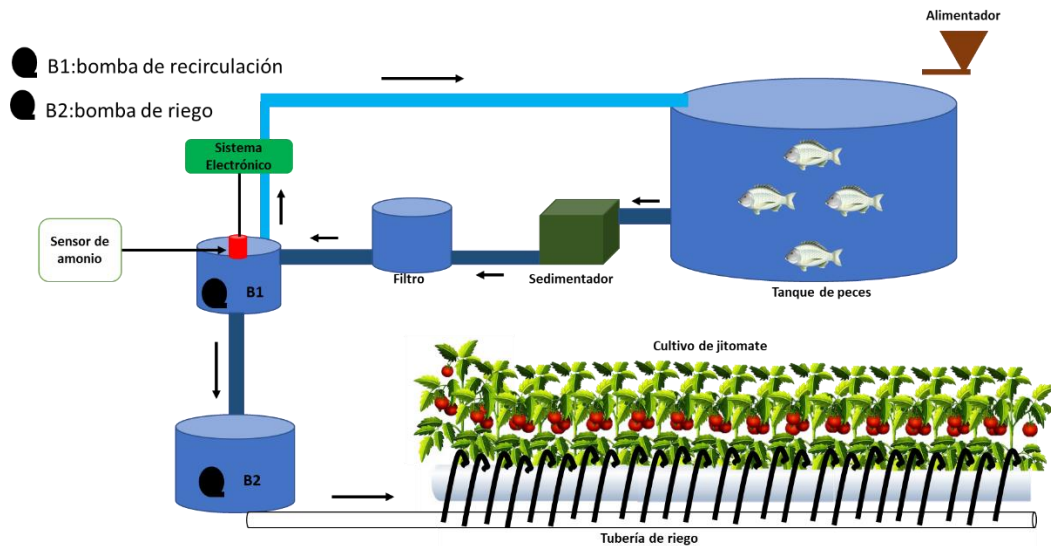


Figura. 4.10 Diagrama del sistema para evaluar el sistema electrónico.

La etapa de los peces que se utilizaron para esta parte del experimento fue juvenil, la densidad fue de 270 peces/m<sup>3</sup>. El sistema electrónico se colocó en el tanque destinado para el agua que había pasado por el filtro, dicho sistema electrónico contaba con el sensor de amonio y además se tenía una LCD en el cual se mostraba la lectura en tiempo real que realizaba el sensor

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 5.1 Compuestos nitrogenados presentes en el agua debido al tipo de alimento

Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran la concentración de  $NO_2^-$  de *Oreochromis niloticus* en 24 h, siete días sin intercambio de agua y siete días con intercambio de agua al 10%. En 24 h, el tratamiento 2 alcanzó la concentración alta y tratamiento 1 la más baja, con diferencias significativas. El seguimiento durante siete días sin cambios de agua muestra una acumulación de nitritos con una cantidad tóxica. Por eso la importancia del intercambio parcial de agua, como se muestra en el gráfico con intercambio de agua, donde el comportamiento comienza a estabilizarse a partir del quinto día. Los  $NO_3^-$  no mostraron diferencias significativas en su comportamiento durante 24 h para tres tratamientos.

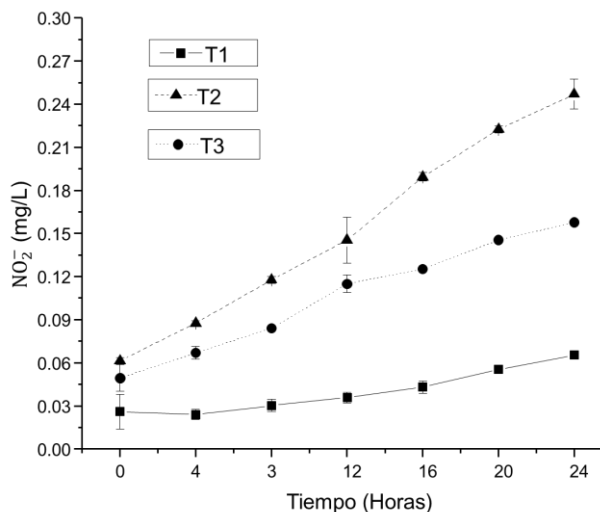


Figura 5.1 Nitrito experimento veinticuatro horas.

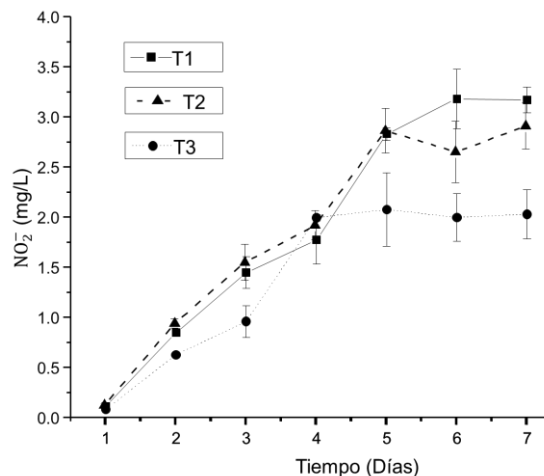
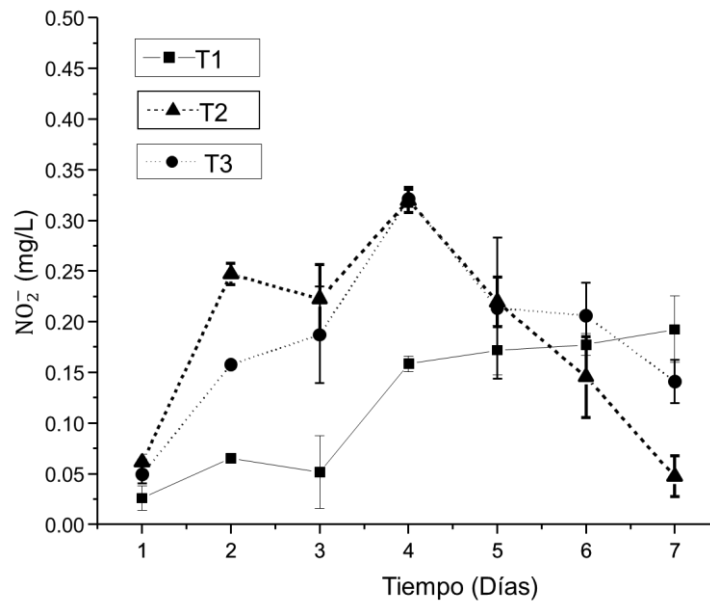


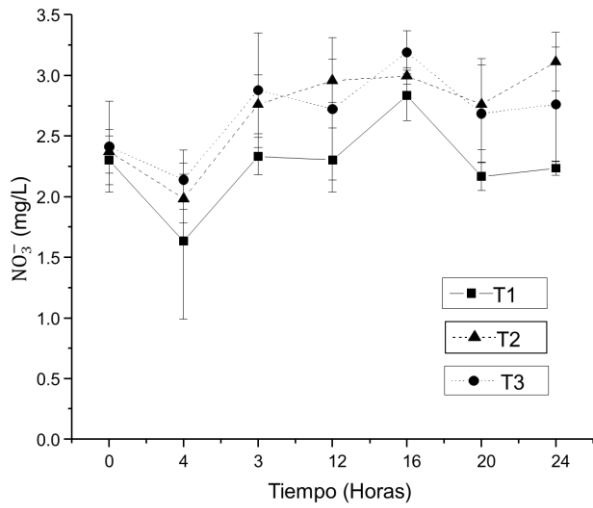
Figura 5.2 Nitrito experimento siete días.



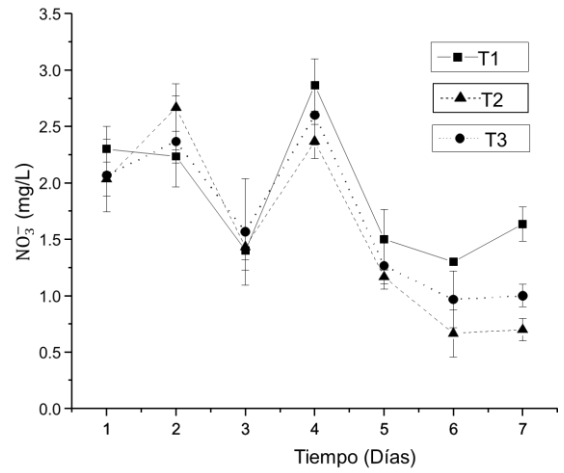


**Figura 5.3 Nitrito experimento siete días 10% de recambio.**

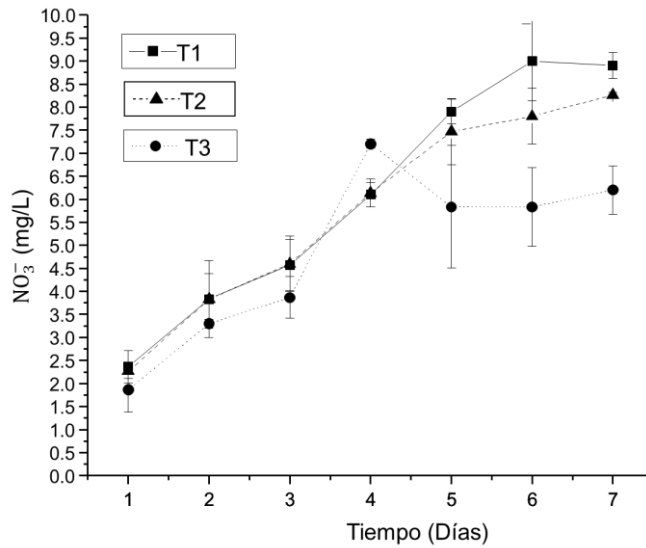
La misma tendencia ocurrió en el monitoreo de 7 días sin intercambio de agua; sin embargo, se observaron diferencias significativas a partir del día cinco, teniendo una mayor concentración en el tratamiento 1 y una menor concentración en el tratamiento 3, alcanzando una cantidad máxima de 40 mg L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. La tendencia en siete días con recambio de agua tuvo un comportamiento similar en todos los tratamientos en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestra lo anterior.



**Figura 5.4 Nitrate experimento veinticuatro horas.**



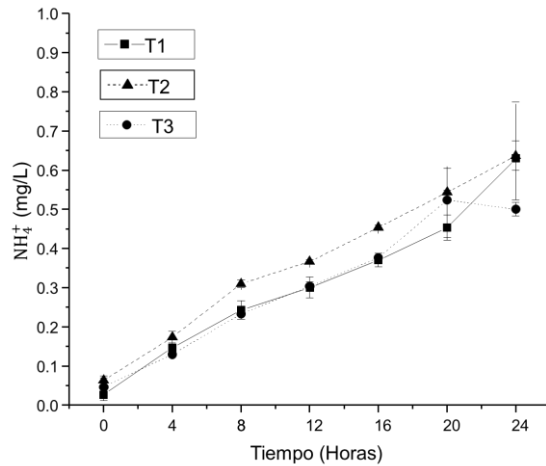
**Figura 5.5. Nitrate experimento siete días.**



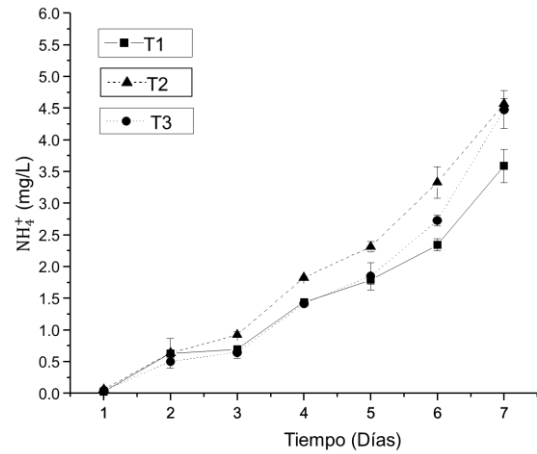
**Figura 5.6 Nitrate experimento siete días 10% de recambio.**

El amonio ( $NH_4^+$ ) muestra la misma tendencia en el seguimiento de 24 h y siete días, un comportamiento ascendente, con mayor cantidad en el tratamiento 2 pero sin mostrar diferencias significativas, esto se muestra en la Figura 5.7, 5.8 y 5.9 Alcanzó un valor máximo de 5 mg L<sup>-1</sup> de amonio en siete días de seguimiento,

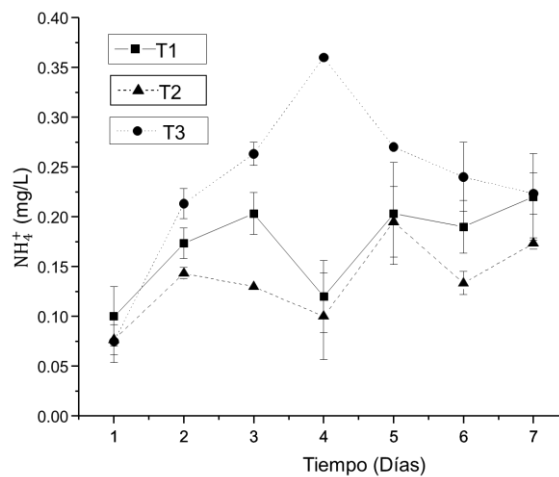
siendo una cantidad tóxica para los peces. Lo anterior se muestra en un gráfico con reemplazos de agua, donde se alcanzaron valores inferiores a 1 mg L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, los cuales son tolerables por los organismos.



**Figura 5.7 Amonio experimento veinticuatro horas.**



**Figura 5.8 Amonio experimento siete días.**



**Figura 5.9 Amonio experimento siete días 10% de recambio.**

El tratamiento 2 tiene más cantidad de compuestos nitrogenados en los experimentos de 24 h. Las elevadas cantidades de estos compuestos nitrogenados obtenidas por el tratamiento 2 podrían considerarse como gasto energético.

De acuerdo con los datos obtenidos en el experimento el alimento que tiene un mejor desempeño es el tratamiento 1, a su vez como lo menciona (Pérez, 2022) la especie tilapia

### **5.1.1 Tasa metabólica del pez**

El comportamiento del metabolismo muestra la misma tendencia en los tres tratamientos, sin presentar diferencias significativas, con un pico de consumo máximo por la noche y un consumo menor durante el día. Se muestra el consumo diario de OD por tratamiento, esto se puede observar en las Figuras 5.10 y 5.11 Las tasas metabólicas están relacionadas con el consumo de oxígeno, y esto está directamente relacionado con la masa del pez, la tasa de alimentación, el nivel de actividad, la limpieza del sistema de los desechos y la temperatura del agua. La tilapia *O. niloticus* podría adaptarse mejor a los ocasionales niveles bajos de OD que las especies de agua fría, aunque todas las especies pueden tolerar niveles bajos de OD. Existe una relación particular entre la cantidad de OD y la excreción de compuestos nitrogenados, especialmente la excreción de  $NH_4^+$ , considerando el peso y el tiempo de los peces. El tratamiento 1 consumió menos oxígeno disuelto y la excreción de  $NH_4^+$  fue menor en comparación con los otros dos alimentos para peces. El tratamiento 3 presentó niveles bajos relacionados con compuestos nitrogenados y niveles bajos de OD consumido y, en el caso del  $NH_4^+$ , tuvo niveles bajos en comparación con los otros dos piensos para peces.

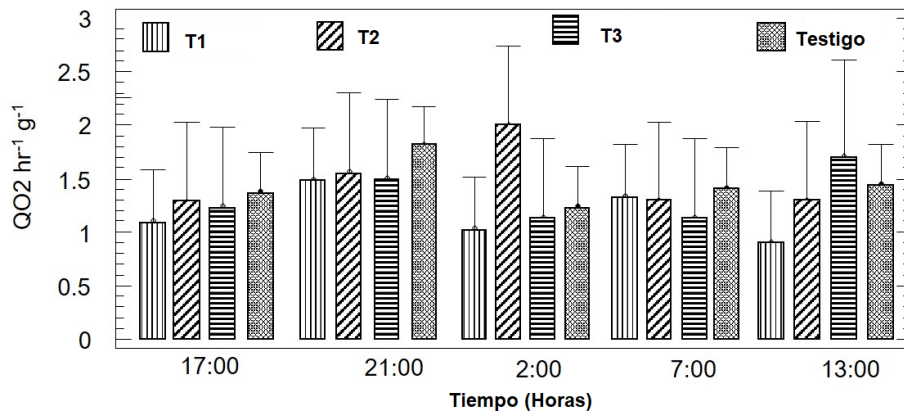


Figura 5.10 Consumo de oxígeno durante 24 horas por tratamiento.

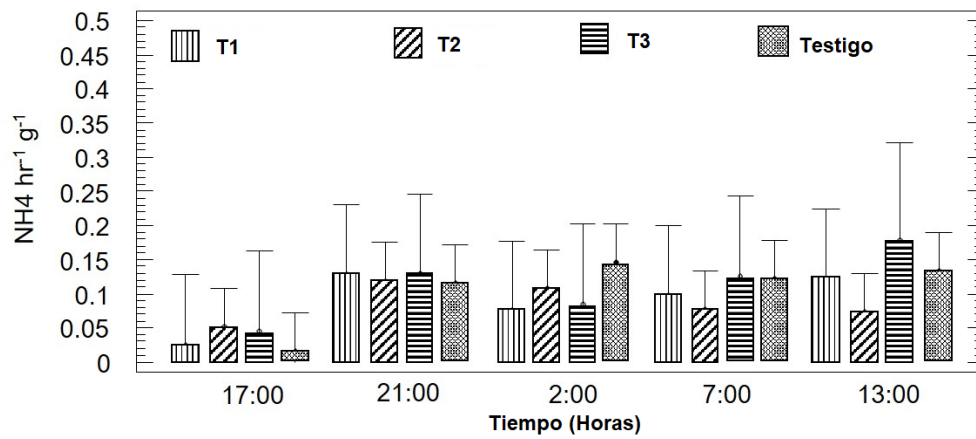
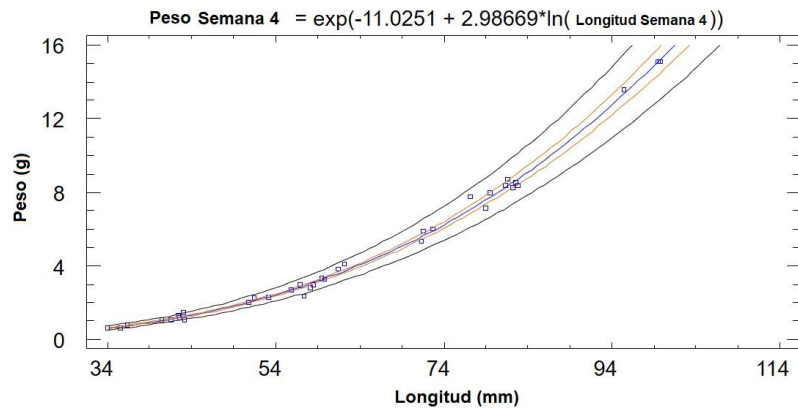


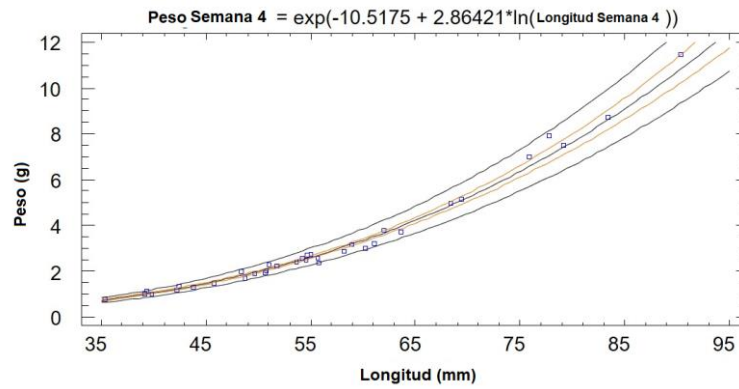
Figura 5.11 Excreción de  $NH_4^+$  durante 24 horas por tratamiento.

### 5.1.2 Relación longitud-peso

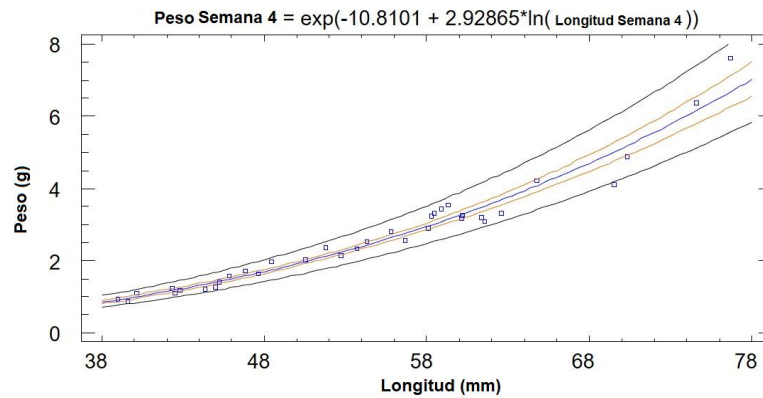
La relación talla-peso se obtuvo para los tres tratamientos del presente estudio, obteniendo el mismo coeficiente de regresión en todos ellos, con un valor de 2.9, lo que sugiere un crecimiento isométrico, indicando un buen estado fisiológico; en las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14, se muestra la relación talla-peso obtenida en el T1, T2 y T3 respectivamente.



**Figura 5.12 Relación peso talla semana 4, tratamiento 1.**



**Figura 5.13 Relación peso talla semana 4, tratamiento 2.**



**Figura 5.14 Relación peso talla semana 4, tratamiento 3.**

### 5.1.3 Crecimiento del pez

En todos los sistemas de acuicultura, el crecimiento de los peces es importante porque es uno de los objetivos de la acuicultura mejorar el crecimiento de los peces. La Figura 5.15 muestra el rendimiento del crecimiento entre los tratamientos que tienen diferencias significativas, lo que da como resultado un tratamiento con T1 de mayor crecimiento, seguido del tratamiento con T2 y el tratamiento con T3 de menor crecimiento. La proteína principal componente del musculo del pez y también la fuente de nitrógeno en las excreciones. La proteína al ser ingerida por él pez se digiere en el estómago y se absorbe en el intestino en forma de aminoácidos y péptidos. Estos son usados en la formación y crecimiento de musculo, producción de energía, depende de la condición del pez y la composición del alimento. La proteína metabolizada, provoca la producción nitrógeno inorgánico,  $\text{CO}_2$  y agua. Después el nitrógeno inorgánico se libera en forma de  $\text{NH}_3$ . Una parte esencial de la proteína es que si el pescado la digiriera por completo, el pescado absorbería todo y las heces no contendrían proteínas. De los anteriores, y relacionados con el crecimiento de los peces, se observó que la proteína en T1 es la más digerible por los organismos.

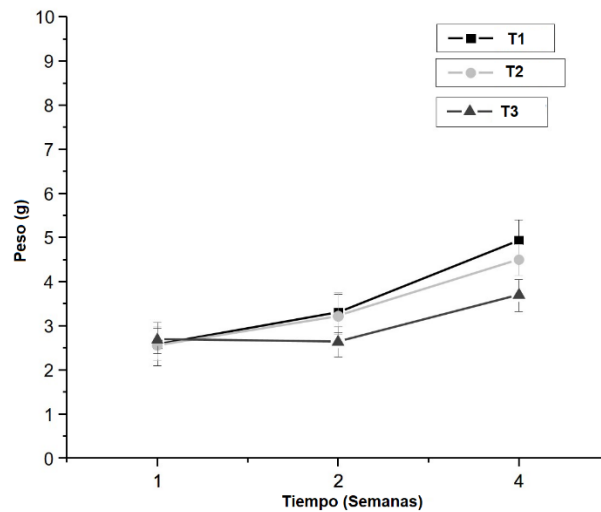


Figura 5.15 Crecimiento obtenido por los tres tratamientos

## 5.2 Modelos obtenidos

Para obtener los modelos matemáticos se hicieron varias regresiones lineales utilizando el software Statgraphics Centurion XV, cada modelo fue ajustado para obtener la  $R^2$  lo más cerca de 1. En la ecuación 1 se muestra el modelo obtenido del tratamiento 3, con una  $R^2 = 90.12\%$

$$NO_2 = 0.550162 + 0.0238976 * NH_4 \quad (1)$$

En la ecuación 2 se muestra el modelo obtenido del tratamiento 1, con una  $R^2 = 81.33\%$

$$NO_2 = 0.139578 + 0.14042 * NH_4 \quad (2)$$

En la ecuación se muestra el modelo obtenido del tratamiento 2, con una  $R^2 = 66.55\%$

$$NO_2 = 10.3194 - 1.40892 * NH_4 \quad (3)$$

Donde  $NO_2$  representa la cantidad de nitrito presente en el agua a partir de la lectura de amonio.

## 5.3 Cantidad de nitrógeno en las heces y en filete

Anteriormente se mostró la cantidad de nitrógeno presente en el agua, pero una parte importante es analizar la cantidad de nitrógeno presente en el alimento que se les provee a los peces y la cantidad de nitrógeno que se queda en las heces de los organismos acuáticos. En la Tabla 5.1 se muestra la cantidad de nitrógeno por tratamiento.



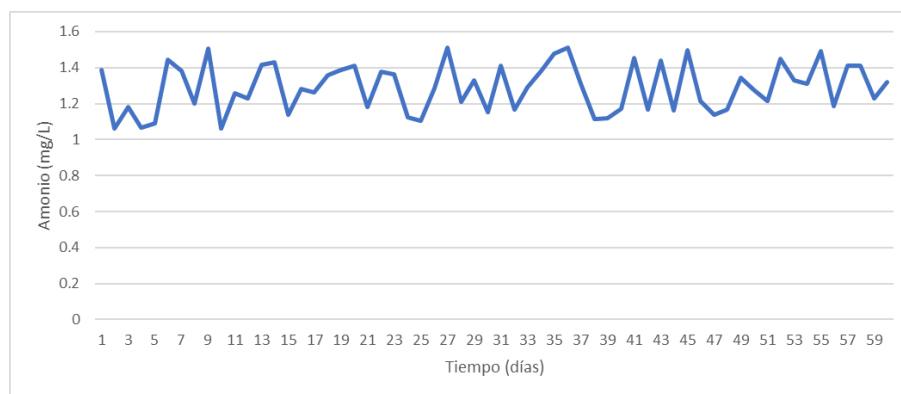
**Tabla 5.1. Nitrógeno en alimento y en heces.**

Tratamiento	N en alimento (g/100 g)	N en heces g/100 g)
1	7.03	5.565
2	7.035	5.805
3	7.435	6.63

Como se puede apreciar en la Tabla 5.1 el tratamiento 1 y tratamiento 2 tienen menor cantidad de nitrógeno en las heces pero mayor cantidad de nitrógeno en el alimento; en el caso del tratamiento 3 tiene mayor contenido de nitrógeno en el alimento y por tal motivo hay mayor contenido de nitrógeno en las heces, esto concuerda con los resultados obtenidos anteriormente en cuanto los compuestos nitrogenados ya que fueron mayores en el tratamiento 3 y también las excreciones de amonio en la respirometría también fueron mayores, en otras palabras debido a que el alimento tiene una gran cantidad de proteína los organismos tienen un excedente de proteína.

#### **5.4 Evaluación del sistema electrónico**

El sistema electrónico utilizado se usó durante tres meses de cultivo del jitomate, en la Figura 5.16 se muestra el comportamiento del sensor de amonio.



**Figura 5.16 Valores obtenidos por el sensor**

## V. CONCLUSIÓN

El alimento que tiene mejores resultados con una baja excreción de compuestos nitrogenados es el tratamiento 1, además tiene buenos resultados asociados con la relación talla-peso por tal motivo este alimento es el que se debería de emplear en una granja acuícola sobre todo una granja hiperintensiva. Hay una gran cantidad de métodos para medir los compuestos nitrogenados, la selección de estos dependerá de tipo de instalación que se tenga, hay dos opciones un aparato para hacer la medición exsitu en un laboratorio o utilizar sensores para hacer la medición insitu y en tiempo real cabe mencionar que es de gran importancia tener la medición de amonio o nitrito ya que en cantidad muy altas los peces puede morir o enfermarse y esto causaría una pérdida de organismo y también de la inversión económica que se hizo en un inicio, por tal motivo la mejor opción es utilizar sensores para que en tiempo se real se tenga la cantidad de nutrientes que hay en el tanque de cultivo y evitar altas concentraciones que son toxicas para los peces. Además la industria acuícola requiere métodos rápidos para obtener los valores de los compuestos nitrogenados porque en ocasiones depende de ellos la vida de los organismos acuáticos, estos métodos deben ser in situ, por esta razón, se requieren nuevos métodos que puedan ser utilizados en tiempo real o en el lugar donde se encuentra el sistema de acuicultura, se pueden utilizar nuevas tecnologías como inteligencia artificial, lógica difusa, PID pero para esto es necesario una gran cantidad de datos y estos datos se obtienen de electrodos o sensores, estos sensores podría ser muy costoso por lo que si un modelo se utiliza para predecir cualquier variable se puede ahorrar dinero.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Tawwab, M., Monier, M. N., Hoseinifar, S. H., & Faggio, C. (2019). Fish response to hypoxia stress: growth, physiological, and immunological biomarkers. *Fish Physiology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10695-019-00614-9>
- Agustín, J., & Marín, S. (2022). *Rendimiento de nanofiltración para el tratamiento de aguas de cubetas de Tranques de Relaves de Minería de Cobre en Chile*.
- Aji, G. K., Hatou, K., & Morimoto, T. (2020). *Modeling the Dynamic Response of Plant Growth to Root Zone Temperature in Hydroponic Chili Pepper Plant Using Neural Networks*. 1–14.
- Alcocer Quinteros, P., Pincay de la Rosa, F., Murillo Villaprado, J., & Miranda Casanova, B. (2020). Diseño de un sistema de recuperación de fuel oil a partir de los residuos obtenidos del proceso de filtración para ser reutilizados en la Central Termoeléctrica Quevedo II. *Alternativas*, 21(3), 60–67. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v21i3.338>
- Alipio, M. I., Earl, A., Cruz, M. Dela, David, J., Doria, A., Maria, R., & Fruto, S. (2019). Engineering in Agriculture , Environment and Food On the design of Nutrient Film Technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, February, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.02.008>
- Altmann, T., & Das, R. (2021). Process improvement of sea water reverse osmosis (SWRO) and subsequent decarbonization. *Desalination*, 499(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114791>
- Alvarado-camarillo, D., Valdez-aguilar, L. A., & González-fuentes, J. A. (2020).

*Response of hydroponic lettuce to aeration , nitrate and potassium in the nutrient solution. 70(4), 341–348.*

Arancon, N. Q., Owens, J. D., & Converse, C. (2019). The effects of vermicompost tea on the growth and yield of lettuce and tomato in a non-circulating hydroponics system. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2447–2458. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1655049>

Arcas-pilz, V., Ruffí-salís, M., Parada, F., Petit-boix, A., Gabarrell, X., & Villalba, G. (2021). Science of the Total Environment Recovered phosphorus for a more resilient urban agriculture : Assessment of the fertilizer potential of struvite in hydroponics. *Science of the Total Environment*, 799, 149424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149424>

Askari-Khorasgani, O., & Pessarakli, M. (2020). Tomato (*Solanum lycopersicum*) culture in vermi-aquaponic systems: I. Cultural practices. *Journal of Plant Nutrition*, 43(11), 1712–1725. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739306>

Barbera, M., & Gurnari, G. (2018). *SPRINGER BRIEFS IN MOLECULAR SCIENCE Wastewater Treatment and Reuse in the Food Industry.*

Belgada, A., Charik, F. Z., Achiou, B., Ntambwe Kambuyi, T., Alami Younssi, S., Beniazza, R., Dani, A., Benhida, R., & Ouammou, M. (2021). Optimization of phosphate/kaolinite microfiltration membrane using Box-Behnken design for treatment of industrial wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104972. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104972>

Betanzo-torres, E. A., Á, D. L., Sandoval-herazo, L. C., Molina-navarro, A., Rodr, I., & Humberto, R. (2020). *Factors That Limit the Adoption of Biofloc Technology in Aquaculture Production in Mexico.*

Boke Olén, N., Roger, F., Brady, M. V., Larsson, C., Andersson, G. K. S., Ekroos,

- J., Caplat, P., Smith, H. G., Dänhardt, J., & Clough, Y. (2021). Effects of farm type on food production, landscape openness, grassland biodiversity, and greenhouse gas emissions in mixed agricultural-forestry regions. *Agricultural Systems*, 189(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103071>
- Bouwmeester, M. M., Thieltges, D. W., & Poulin, R. (2021). *Collateral diseases: Aquaculture impacts on wildlife infections*. September 2020, 453–464. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13775>
- Boyd, C. E., Abramo, L. R. D., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., Mcnevin, A. A., Tacon, A. G. J., Teletchea, F., & Jr, J. R. T. (2020). *Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges*. May, 578–633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>
- Bustamante- Orañegui, J. D. D., Vázquez- Alvarado, J. M., Trujillo-Campos, A., Reyes-Reyes, J., & Flores-Escalona, O. (2013). *Manual para el cultivo del jitomate en bioespacio e invernadero*.
- Cáceres, R., Malińska, K., & Marfà, O. (2018). Nitrification within composting: A review. *Waste Management*, 72, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.049>
- Caro, D., Alessandrini, A., Sporchia, F., & Borghesi, S. (2021). Global virtual water trade of avocado. *Journal of Cleaner Production*, 285(xxxx), 124917. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124917>
- Cavalli, L., Jeebhay, M. F., Marques, F., Mitchell, R., Neis, B., Ngajilo, D., & Watterson, A. (2019). *Scoping Global Aquaculture Occupational Safety and Health*. 0813. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1655203>
- Cezar, P., Fontes, R., Borges, C., Tufik, A., & Milagres, C. (2020). Nutrients

Accumulation , Biometric , Chlorophyll and Potassium Indexes and Production in Minituber Potato as Function of Potassium Doses in Organic and Hydroponic Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(10), 1357–1369. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1781155>

Characteristics, P., Characteristics, C., Characteristics, B., Removal, I., Treatment, P., Treatment, P., Treatment, S., Treatment, T., Treatment, A. W., Readings, S. F., Campus, K., Sharma, B. S., & Campus, K. (2017). Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future. In *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4>

Chen, P., Zhu, G., Kim, H., Brown, P. B., & Huang, J. (2020). Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122888>

Cifuentes-Torres, L., Mendoza-Espinoza, L. G., Correa-Reyes, G., & Daesslé, L. W. (2021). Hydroponics with wastewater: a review of trends and opportunities. *Water and Environmental Journal*. <https://doi.org/10.1111/wej.12617>

Cottrell, R. S., Blanchard, J. L., Halpern, B. S., Metian, M., & Froehlich, H. E. (2020). substantially reduce forage fish demand by 2030. *Nature Food*, 1(May). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0078-x>

Deng, G., Lu, F., Wu, L., & Xu, C. (2021). Social network analysis of virtual water trade among major countries in the world. *Science of the Total Environment*, 753, 142043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142043>

DOF. (2021). *DOF - Diario Oficial de la Federación DOF - Diario Oficial de la Federación*.

- Espinoza, E., & Martines, P. (2022). Diseño y construcción de un prototipo automatizado para desinfectar agua superficial usando ozono y radiación ultravioleta en el aeropuerto de Jaén. In *Revista Científica Pakamuros* (Vol. 10, Issue 1). <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v10i1.268>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, W. (2021). Food Security and Nutrition in the World the State of Transforming Food Systems for Affordable Healthy Diets. In *the State of the World*. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- FAO. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*.
- Favela Chavez, E., Preciado Rangel, P., & Benavides Mendoza, A. (2006). Soluciones nutritivas. In *Cultivos sin Suelo*.
- Ford, J. D. (2020). *Climate change adaptation in aquaculture*. 2160–2176. <https://doi.org/10.1111/raq.12427>
- Gaikwad, D. J., & Maitra, S. (2020). *Hydroponics Cultivation of Crops*. 279–287. <https://doi.org/10.30954/NDP-PCSA.2020.31>
- Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., Tveterås, R., Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., Tveterås, R., & Blue, A. G. (2019). A Global Blue Revolution : Aquaculture Growth Across Regions , Species , and Countries A Global Blue Revolution : Aquaculture Growth Across Regions ,. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 0(0), 1–10. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1678111>
- Gerbens-leenes, P. W. (2021). *Resources , Conservation & Recycling The water , energy , and land footprint of tilapia aquaculture in mexico , a comparison of the footprints of fish and meat*. 165(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105224>

- Ghamkhar, R., Boxman, S. E., Main, K. L., Zhang, Q., Trotz, M. A., & Hicks, A. (2021). Aquacultural Engineering Life cycle assessment of aquaculture systems : Does burden shifting occur with an increase in production intensity ? *Aquacultural Engineering*, 92(October 2020), 102130. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102130>
- Gilmour, D. N., Bazzani, C., Jr, R. M. N., & Snell, H. A. (2019). *Do consumers value hydroponics ? Implications for organic certification. July, 707–721.* <https://doi.org/10.1111/agec.12519>
- Halveland, J. (2020). *Design of a Shallow-Aero Ebb and Flow Hydroponics System and Associated Educational Module for Tri Cycle Farms Design of a Shallow-Aero Ebb and Flow Hydroponics System and Associated Educational Module for Tri Cycle Farms Julie Halveland Biological Engine.*
- Hernández-caricio, C., Ramírez, V., Martínez, J., Quintero-, V., Buap, P., Facultad, M., Químicas, D. C., Instituto, M., Ciencias, D., Valsequillo, B., Claudio, S., Ic-, E., Universitaria, C., & Manuel, C. S. (2022). *Los metales pesados en la historia de la humanidad , los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación: el caso de Bacillus como bioherramienta para la recuperación de suelos. 7(27), 1–68.*
- Huarisueca, E., & Ramos, B. (2020). Tratamiento de aguas residuales mediante la macrófita Lemna minor en los Pantanos de Villa. In *Universidad Andina del Cusco.* [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez\\_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ip, Y. K., & Chew, S. F. (2018). Acta Histochemica Air-breathing and excretory nitrogen metabolism in fi shes. *Acta Histochemica*, 120(7), 680–690. <https://doi.org/10.1016/j.acthis.2018.08.013>



- Islas, A. S. (2020). *Evaluación ambiental de un sistema de tratamiento de agua salobre por nanofiltración y energía solar en samalayuca, chihuahua*. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1241>
- Janeczko, B. D., & Timmons, B. M. (2019). Effects of Seeding Pattern and Cultivar on Productivity of Baby Spinach (*Spinacia oleracea*) Grown Hydroponically in Deep-Water Culture. *Horticulturae*.
- Jiménez-Rosado, M., Rubio-Valle, J. F., Perez-Puyana, V., Guerrero, A., & Romero, A. (2021). Eco-friendly protein-based materials for a sustainable fertilization in horticulture. *Journal of Cleaner Production*, 286(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124948>
- Jiménez, J. A. (2021). “Eichhornia crassipes y su uso en técnicas de aprovechamiento y fitorremediación de cuerpos de agua.” *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. [https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40340#.YpG\\_1ZwCQQw.mendel ey](https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40340#.YpG_1ZwCQQw.mendel ey)
- Kennard, N., Stirling, R., Prashar, A., & Lopez-Capel, E. (2020). Evaluation of Recycled Materials as Hydroponic Growing Media. *Agronomy*, 1–26.
- Keune, J., Sulis, M., Kollet, S., Siebert, S., & Wada, Y. (2018). Human Water Use Impacts on the Strength of the Continental Sink for Atmospheric Water. *Geophysical Research Letters*, 45(9), 4068–4076. <https://doi.org/10.1029/2018GL077621>
- Khan, S., Purohit, A., & Vadsaria, N. (2021). Hydroponics : current and future state of the art in farming. *Journal of Plant Nutrition*, 44(10), 1515–1538. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1860217>
- Khiari, Z., Kaluthota, S., & Savidov, N. (2019). Aerobic bioconversion of aquaculture

- solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. *Aquaculture*, 500(October 2018), 492–499. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.059>
- Kim, S., Brotto, A. C., Khanal, S. K., Hu, Z., Chandran, K., & Lee, J. W. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*, 188, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>
- Leana-Acevedo, J. L., Juárez-López, P., Palemón-Alberto, F., Sainz-Aispuro, M. de J., Alia-Tejacal, I., Avonce-Vergara, N., Damián-Nava, A., & Ortega-Acosta, S. Á. (2022). Competitividad agronómica de ecotipos nativos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivados en invernadero. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8(1). <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081017>
- Lebel, L., Lebel, P., & Chuah, C. J. (2018). Governance of aquaculture water use. *International Journal of Water Resources Development*, 0627, 1–23. <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1457513>
- Lekang, O. (2020a). *Natural Systems , Integrated*. 275–284.
- Lekang, O. (2020b). *Recycling Aquaculture Systems: Traditional Recirculating Water Systems*. 257–274.
- Li, R., Chai, S., Chai, Y., Li, Y., Lan, X., Ma, J., Cheng, H., & Chang, L. (2021). Mulching optimizes water consumption characteristics and improves crop water productivity on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 254, 106965. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106965>
- Lin, C. C., & Wu, J. M. (2022). A Novel Centrifugal Filtration Device. *Separations*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/separations9050129>
- Lithgow, D., De, G., & Silva, R. (2017). Ecosystem-Based Management strategies

to improve aquaculture in developing countries : Case study of Marismas Nacionales. *Ecological Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.039>

Luckiram, B. (2022). *Centrifugation*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823502-7.00014-1>

Ma, R., Liu, X., Meng, Y., Wu, J., Zhang, L., & Han, B. (2019). Protein nutrition on sub-adult triploid rainbow trout: Dietary requirement and effect on anti-oxidative capacity , protein digestion and absorption. *Aquaculture*, 507(March), 428–434. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.069>

Magnhagen, C., Backström, T., Nilsson, J., & Brännäs, E. (2018). Oxygen consumption and swimming performance in Arctic charr with different pigmentation patterns. *Applied Animal Behaviour Science*, 202(January), 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.01.006>

Meneghelli, C. M., Cezar, P., Fontes, R., Carmo, C., Maria, J., & Junior, E. G. (2021). Zinc-biofortified lettuce in aeroponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 44(14), 2146–2156. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1889587>

Meran, G., Siehlow, M., & Hirschhausen von, C. (2021). *The Economics of Water*.

Mirafuentes-Gómez, D. (2021). *Tecnologías de separación por filtración de separación y su uso en aguas de desecho doméstico* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/111486>

Mitra, S., Khan, A., & Nielsen, R. (2019). Credit constraints and aquaculture productivity. *Aquaculture Economics & Management*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/13657305.2019.1641571>

Mohammadi, M., Mahboobi-soo, N., Farhadian, O., & Malekpouri, P. (2019). *Science*

*of the Total Environment Metabolic and NH<sub>4</sub> excretion rate of fresh water species , Chondrostoma regium in response to environmental stressors , different scenarios for temperature and pH. 648, 90–101.*  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.131>

Mritunjay, C. (2021). *Challenges in Water Management Series*. [www.bauer.de/bre](http://www.bauer.de/bre)

Mulema, S. A., & García, A. C. (2019). Monitoring of an aquatic environment in aquaculture using a MEWMA chart. In *Aquaculture* (Vol. 504, pp. 275–280).  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.019>

Netzahuatl-Muñoz, A. R., & Rodríguez-Cuamatzi, P. (2020). Revisión sobre la ocurrencia de triclosán en aguas subterráneas y tendencias tecnológicas para su remoción. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 2(5), 99–135.  
<https://www.aytbuap.mx/aytbuap-520/revisión-sobre-la-ocurrencia-de-triclosán-en-aguas-subterráneas-y-tendencia>

Okampo, E. J., & Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140(September 2019), 110712.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>

Omotade, I. F., Alatise, M. O., & Olanrewaju, O. O. (2019). Recycling of aquaculture wastewater using charcoal based constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 0(0), 1–6. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1537247>

Paredes Tello, E. E. (2021). “Efecto de la fitorremediación con dos variedades de Ortiga (*Urtica urens* L.) y (*Urtica dioica* L.) en la calidad del suelo usado como botadero a cielo abierto, Marabamba, provincia y departamento de Huánuco - 2021. [http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/3187/Paredes Tello%20Erick Elías.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.udh.edu.pe/bitstream/handle/123456789/3187/Paredes%20Tello%20Erick%20Elías.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Parra, M., & Intrigliolo, D. S. (2020). *Open field hydroponics in fruit crops: Developments and challenges*. 419–430. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00030-7>
- Paudel, S. R., Luitel, S., Adhikari, R., & Wagle, A. (2019). Potential nitrous oxide (  $N_2O$  ) emission from aquaculture in Nepal. *International Journal of Environmental Studies*, 00(00), 1–11. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1560764>
- Pay Drechsel, Manzoor Qadir, D. W. (2015). *Wastewater Economic Asset in an Urbanizing World*.
- Pedraza Guevara, M. S. (2021). Técnicas de fitorremediación en cuerpos de agua. *Innova Biology Sciences*, 1, 61–78. <https://www.innovabiologysciences.org/index.php/IBS/article/view/6>
- Pedrerros Calvo, C., Valderrama Lopez, K. V., Agudelo Valencia, R. N., Pérez Cortés, K., & Campo, C. E. (2021). Reducción de la concentración de DQO y COT en aguas residuales de la industria farmacéutica empleando ozono catalizado por  $Fe^{2+}$ . Estudio de caso a escala real. *Revista Mutis*, 11(2), 56–63. <https://doi.org/10.21789/22561498.1707>
- Pérez, Á. F. (2022). ( *Oreochromis niloticus* ) CON TECNOLOGÍA BIOFLOC Trabajo de Fin de Máster en Acuicultura ,.
- Prabu, E., Rajagopalsamy, C. B. T., & Ahilan, B. (2019). *Tilapia – An Excellent Candidate Species for World Aquaculture: A Review*. 31(3), 1–14. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2019/v31i330052>
- Ramos, C. (2019). *Experimental NFT hydroponics system with lower energy consumption*. 500, 102–106.
- Romeo, D., Blikra, E., & Thomsen, M. (2018). Environmental impacts of urban

- hydroponics in Europe : a case study in Lyon. *Procedia CIRP*, 69(May), 540–545. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.048>
- Ruangrak, E., & Khummueng, W. (2019). Effects of artificial light sources on accumulation of phytochemical contents in hydroponic lettuce. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 378–388. <https://doi.org/10.1080/14620316.2018.1504630>
- Rufí-salís, M., Calvo, M. J., Petit-boix, A., Villalba, G., & Gabarrell, X. (2020). Resources , Conservation & Recycling Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture : An environmental assessment. *Resources, Conservation & Recycling*, 155(May 2019), 104683. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>
- Sanchez, M. G., Smith, W. J., Terando, A., & R., M. K. (2018). *Water Resources Research*. 1633–1649.
- Sapkota, S., Sapkota, S., & Liu, Z. (2019). *E f f e c t s of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture*.
- Science, E. (2021). *Growth and yield of shallot ( Allium ascalonicum L .) on different types of media and nutrient solution on hydroponic wick system Growth and yield of shallot ( Allium ascalonicum L .) on different types of media and nutrient solution on hydroponic wick sy.* <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012061>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*.
- Shah, B. R., & Mraz, J. (2020). *Advances in nanotechnology for sustainable aquaculture and fisheries*. 925–942. <https://doi.org/10.1111/raq.12356>

- Shen, Y., Ma, K., & Yue, G. H. (2021). Status, challenges and trends of aquaculture in Singapore. *Aquaculture*, 533(March 2020), 736210. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736210>
- SIAP. (2021). *Panorama Agroalimentario 2021*.
- Soligno, I., Malik, A., & Lenzen, M. (2019). *Socioeconomic Drivers of Global Blue Water Use Water Resources Research*.
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). Chapter 20 - Hydroponic systems. In *Plant Factory*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>
- Souissi, A. (2019). *Impact of food consumption on water footprint and food security in Tunisia. 2003*.
- Sulis, F., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Giannetti, B. F. (2021). Recognizing the wealth of non-marketable food in distribution centres: The environmental benefits of donation. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128482. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128482>
- Suquet, J., Godo-pla, L., Valentí, M., Ferràndez, L., Verdaguer, M., Poch, M., Martín, M. J., & Monclús, H. (2021). Science of the Total Environment Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis. *Science of the Total Environment*, 799, 149398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149398>
- Tacon, A. G. J. (2019). Reviews in Fisheries Science & Aquaculture Trends in Global Aquaculture and Aquafeed Production: 2000 – 2017 Trends in Global Aquaculture and Aquafeed Production: 2000 – 2017. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1649634>

- Talukder, R., Tanaka, H., & Asao, T. (2018). Scientia Horticulturae Light-emitting diodes and exogenous amino acids application improve growth and yield of strawberry plants cultivated in recycled hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 239(May), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.033>
- Taylor, P., Endut, A., Jusoh, A., & Ali, N. (2014). Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. October 2014, 37–41. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826336>
- Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 20(1), 71–88. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.02.005>
- Wan, P., Toudeshki, A., Tan, H., & Ehsani, R. (2018). A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 146(January), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.011>
- Wang, J., & Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1103–1112. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.07.001>
- Wang, J., Liang, D., Yang, Q., Tan, B., Dong, X., Chi, S., Liu, H., & Zhang, S. (2019). The effect of partial replacement of fish meal by soy protein concentrate on growth performance, immune responses, gut morphology and intestinal inflammation for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂). *Fish and Shellfish Immunology*. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.10.025>



- Wang, L., Cao, T., Dykstra, J. E., Porada, S., Biesheuvel, P. M., & Elimelech, M. (2021). Salt and Water Transport in Reverse Osmosis Membranes: Beyond the Solution-Diffusion Model. *Environmental Science and Technology*, *55*(24), 16665–16675. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05649>
- Wang, S., Nam, H., & Nam, H. (2020). Preparation of activated carbon from peanut shell with KOH activation and its application for H<sub>2</sub>S adsorption in confined space. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(2), 103683. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103683>
- Wang, Y., Han, G., Pham, C. V, Koyanagi, K., Song, Y., Sudo, R., Lauwereyns, J., Cockrem, J. F., & Furuse, M. (2019). *An acute increase in water temperature can increase free amino acid concentrations in the blood , brain , liver , and muscle in goldfish ( Carassius auratus )*.
- Yao, L., Li, Y., & Chen, X. (2021). A robust water-food-land nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yangtze River Basin. *Agricultural Water Management*, *256*, 107103. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107103>
- Zettl, S., Cree, D., Soleimani, M., & Tabil, L. (2019). Mechanical properties of aquaculture feed pellets using plant-based proteins. *Cogent Food & Agriculture*, *5*(00), 1–14. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1656917>
- Zhang, W., Liu, Y., Li, Z., Xu, S., Hettinga, K., & Zhou, P. (2021). Retaining bioactive proteins and extending shelf life of skim milk by microfiltration combined with Ultraviolet-C treatment. *Lwt*, *141*(December 2020), 110945. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110945>