



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial

**Tesis**

**“Diseño y construcción de un sistema para fitorremediación por medio de  
*Lema gibba*”**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Licenciatura en Ingeniero Agroindustrial

**Presenta:**

César Iván Hernández Pérez

Dirigido por:

M. en C. Leticia Félix Cuencas

M. en C. Leticia Félix Cuencas

Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Juan Fernando García Trejo

Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez

Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

M. en C. Samuel López Tejeida

Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Dr. Manuel Toledano Ayala

Director de la Facultad

\_\_\_\_\_

Dr. María Guadalupe Flavia Loarca Piña

Director de Investigación y Posgrado



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Diseño y construcción de un sistema para  
fitorremediación por medio de Lema gibba

**por**

César Iván Hernández Pérez

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

**Clave RI:** IGLIN-248760

## RESUMEN

El diseño de un sistema presenta un gran reto para la ingeniería ya que se debe contemplar un sin fin de características para su efectivo funcionamiento, sin los conocimientos previos y la identificación de los puntos críticos presentara un rotundo fracaso, impidiendo el desarrollo de en este caso del organismo. Al tomar la mayor cantidad de parámetros se minimiza el rango de fallo (flujo de alimentación al sistema de entrada y salida, cantidad de organismos presentes, tiempo de retención en el sistema, calidad de agua de entrada y salida).

El presente trabajo tiene como objetivo utilizar la *Lemna gibba* de modelo para el diseño y fabricación de un sistema de fitorremediación para disminuir el exceso de nutrientes provenientes del sector acuícola (nitrógeno y fósforo). Este sistema permitirá reducir los recambios de agua de la acuicultura, principalmente el nitrógeno presente en las aguas residuales en todas sus formas presentes (nitratos, nitritos y amoníaco), al ser asimilados por la planta. Se montó un sistema de recirculación de 1 m<sup>3</sup>, se evaluó el incremento de biomasa (peso seco y peso fresco) de la *Lemna*, así como se midieron las variaciones en los N-nitratos, N-nitritos, amonio, potasio, fosfatos, sulfatos. Los resultados se analizaron estadísticamente con la prueba de normalidad de estadística paramétrica utilizando el programa estadístico statGraphic centurion.

**(Palabras clave:** *Lemna gibba*, fitorremediación, acuicultura)

## SUMMARY

This work aims to use the *Lemna gibba* model for the design and manufacture of a phytoremediation system to eliminate excess nutrients from the aquaculture sector. With this system of continuous recirculation will greatly reduce the excess of nutrients taken by the plant, causing the reduction of these compounds mainly nitrogen in all forms (nitrates, nitrites and ammonia). A system of 1 m<sup>3</sup> was measured, increment of biomass and the following elements N-nitrates, n-nitrites, ammonium, potassium, phosphates, sulphates were evaluated. The results were analyzed statistically with the test ANOVA using the statistical program statGraphic centurion. The design of a system presents a great challenge for the engineering as it must contemplate in endless features that must meet and take into account for its effective functioning, not only implies the taking of the paper to the realized, without the previous knowledge and the Identification of the critical points will present a resounding failure, preventing the development of the plant in this case or an inefficient removal of excess nutrients present. Taking several factors into account minimizes the fault range (feed flow to the input and output system, number of organism's present, retention time in the system, inlet and outlet water quality).

**(Key words:** *Lemna gibba*, phytoremediation, aquaculture)

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo que me brindo el Dr. Juan Fernando García Trejo en la realización de este trabajo de tesis, con su dirección y consejos a lo largo del proyecto. Agradezco al cuerpo de profesores que conforman el campus Amazcala que a lo largo de la carrera se encargaron de guiarme y aconsejarme.

Agradezco el apoyo del equipo del laboratorio de bioingeniería por la ayuda brindada en los análisis y donación de los peces usados en este experimento.

En lo particular a mi tutor Dr. Enrique García Rico por brindarme consejos y estar al tanto de mi carrera universitaria.

En especial agradecimiento a mi directora de tesis la M. en C. Leticia Félix Cuencas y al maestro en ciencias Samuel López Tejeida, que en lo particular me motivaron a terminar este proceso y me han guiado en lo académico y laboral en el invernadero perteneciente al laboratorio de bioingeniería.

A mis compañeros de carrera que a lo largo de 5 años que compartimos en el aula motivándonos mutuamente para lograr concluir nuestros estudios profesionales.

A mis amigos Tania, Daniel, Janet a quienes les debo todo mi conocimiento adquirido relacionado a los invernaderos y producción de los mismos.

Y por último y no menos importante mencionar a todas aquellas personas que brindaron su tiempo, motivación, consejos para concluir esta carrera: Auryn, Valeria, Rebeca, Paco, Ricardo, Diego.



## Contenido

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>II.I Importancia económica de acuicultura en México y el mundo. ....</b>	<b>11</b>
<b>II.II Ventajas y desventajas de la acuicultura .....</b>	<b>11</b>
<b>II.III Sistemas de tratamiento para acuicultura .....</b>	<b>13</b>
<b>II.IV Biorremediación .....</b>	<b>14</b>
<b>II.V Fitorremediación .....</b>	<b>16</b>
<b>II.VI <i>Lemna gibba</i> .....</b>	<b>19</b>
<b>III. OBJETIVOS E HIPOTESIS .....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivo General:.....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivos Particulares:.....</b>	<b>19</b>
<b>Hipótesis.....</b>	<b>20</b>
<b>IV. METODOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
<b>a) Fosfatos.....</b>	<b>24</b>
<b>b) N-nitratos. ....</b>	<b>24</b>
<b>c) N-Nitritos. ....</b>	<b>25</b>
<b>d) Amonio.....</b>	<b>25</b>
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
<b>V.I. Determinaciones físicas.....</b>	<b>32</b>
<b>V.II. Determinaciones químicas .....</b>	<b>34</b>
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>38</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>VIII. REFERENCIAS .....</b>	<b>39</b>
<b>VIII. APÉNDICE .....</b>	<b>43</b>



## I. INTRODUCCIÓN

Se estima que para el 2050 la población alcance los 9.700 millones de habitantes (FAO, 2018). La producción total de pescado alcanzó en 2016 un máximo histórico de 171 millones de toneladas, de las cuales el 88% se utilizaron para el consumo humano directo (FAO, 2018). En 2015, el pescado representó alrededor del 17% de la proteína animal consumida por la población mundial. Además, el pescado proporcionó casi un 20% del aporte de proteínas animales per cápita a unos 3,200 millones de personas (FAO, 2018).

La acuicultura crece más rápido en comparación con otros sectores de producción de alimentos. La producción acuícola mundial en 2016 fue de 80 millones de toneladas de pescado comestible y 30.1 millones de toneladas de plantas acuáticas, así como 37,900 toneladas de productos no alimentarios (FAO, 2018).

Actualmente se sabe con certeza que el cambio climático está ocasionando modificaciones en la distribución de las especies acuáticas y que esta tendencia continuará. Entre los cambios que se producen con el cambio climático se encuentran el aumento de la temperatura promedio global de los océanos y la superficie terrestre, aumento promedio mundial del nivel del mar, acidificación del mar, aumento de la temperatura superficial de los océanos y alteración de la abundancia de algas, plancton y peces en los ambientes marinos; esto solo por mencionar algunos de los problemas (FAO, 2018).

Se estima que habrá un incremento en la demanda de alimentos y por ende un mayor uso del agua para producirlo, lo que ocasiona un incremento en la contaminación; siendo perjudicial para el medio ambiente y afectando la disponibilidad de recursos naturales. Para evitar que esta situación se agrave, se busca la manera de tener cultivos empleando una menor cantidad de agua y un uso eficiente de la energía (FAO, 2014).

Es por ello que se han desarrollado tecnologías para contrarrestar el daño que se ocasiona al medio ambiente provocado por el crecimiento en la producción para satisfacer la gran demanda, así como la administración adecuada de los recursos

naturales. La acuicultura se ha desarrollado como una alternativa para minimizar las problemáticas presentes (FAO, 2018).

La ley General de Pesca y Acuicultura Sustentable, define a la acuicultura como el conjunto de actividades dirigidas a la reproducción controlada, pre-engorda y engorda de especies de fauna y flora realizadas en instalaciones ubicadas en aguas dulces, marinas o salobres, por medio de técnicas de cría o cultivo, que sean susceptibles de explotación comercial, ornamental o recreativa (Suhl *et al.*, 2016).

Una de las principales problemáticas de la acuicultura es la contaminación que se genera principalmente por exceso de alimento y fertilizantes que se usan para la cría de peces, moluscos y plantas acuáticas, usados normalmente en la etapa de cría y engorda. La alta demanda de productos acuícolas favorece el desarrollo de esta actividad, pero incrementa los residuos generados que contaminan los ambientes acuáticos naturales (To, Security, & All, 2016).

Entre los residuos generados por la producción acuícola y que son grandes contaminantes del recurso hídrico, destacan el nitrógeno y el fósforo; siendo a su vez, los principales nutrientes que requieren las plantas para su desarrollo. Estos nutrientes son desechados por los peces en los sistemas de producción acuícolas (Goddek & Körner, 2019).

Por otro lado, la fitorremediación es llevada a cabo por el sistema radicular de las plantas por medio de traslocación, bioacumulación y con la habilidad de degradar contaminantes (Sadowsky, 1999). Con el paso del tiempo, la tecnología verde va tomando más campo en diferentes áreas, siendo una de éstas el tratamiento de contaminantes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el agua y suelo (Dhir, 2013). Las plantas poseen la habilidad de remover o tratar una gran variedad de contaminantes: metales, pesticidas, solventes, explosivos, aceite crudo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, radio nucleídos y aguas residuales, entre otros (Sadowsky, 1999).

Las plantas acuáticas se han explorado y estudiado para observar su capacidad fitorremediadora, algunas especies de plantas acuáticas asociadas con microorganismos se han usado para crear plantas de tratamiento de aguas residuales (Basílico *et al.*, 2017; Marchand *et al.*, 2018).

Las lentejas de agua son pequeñas plantas acuáticas pertenecientes a la familia de las angiospermas de libre flotación (Sullivan & Giblin, 2012). Son plantas monocotiledóneas pertenecientes a la familia de las *Lemnaceae*. Tienen distribución a nivel mundial y se encuentran en aguas ricas en nutrientes y temperaturas cálidas en las zonas de los trópicos (Basílico *et al.*, 2017). Las lentejas de agua consisten en 4 géneros: *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia* y *Wolffiella* (Sullivan & Giblin, 2012). *Lemna gibba* es la especie más abundante de todas las lentejas de agua, son pequeñas plantas y su cuerpo parece una hoja larga. Las condiciones óptimas de crecimiento de esta planta son con temperatura en el agua entre 26-33°C y pH entre 5.5-7 (Liu, Dai, & Sun, 2017). Entre las características de estas plantas destaca que son comunes por su crecimiento rápido, son fáciles de cultivar, tienen alta producción de biomasa, alta tolerancia a condiciones ambientales extremas; además de su alta capacidad de bioacumulación (Dhir, 2013).

Debido a la problemática de generación de residuos contaminantes derivados de los sistemas acuícolas, así como a la capacidad de la *Lemna* de absorción de nutrientes, se llevó a cabo el diseño y construcción de un sistema de fitorremediación que permita un desarrollo óptimo del cultivo de la *Lemna gibba*, disminuyendo los excesos de nutrientes presentes en el agua residual de un sistema acuícola, con la finalidad de reutilizar esta agua residual o su desecho de manera segura. En este trabajo se propone un modelo de aplicación agroindustrial para la fitorremediación de aguas residuales provenientes del sector acuícola usando lenteja de agua.

## **II. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES**

### **II.I Importancia económica de acuicultura en México y el mundo.**

La producción pesquera mundial alcanzó un máximo de aproximadamente 171 millones de toneladas en 2016, de los cuales la acuicultura representó un 47% del total y un 53% si se excluyen los usos no alimentarios (incluyendo la reducción para la preparación de harina y aceite de pescado) (FAO, 2018). El valor total de la primera venta de la producción pesquera y acuícola en 2016 se estimó en 362 000 millones de USD, de los cuales 232 000 millones de USD procedían de la producción acuícola (FAO, 2018).

La acuicultura en México genera una derrama económica por 154, 940 MDP, destinando el 99.99% al consumo humano (SAGARPA, 2017). Las actividades encargadas de este sector se encargan de la reproducción controlada, preeen gorda y engorda de especies de fauna y flora marina, por medio de técnicas de cría o cultivo que sean susceptibles de explotación comercial, ornamental o recreativa. Al respecto (SAGARPA, 2017).

El desarrollo de la acuicultura o acuicultura como también se le conoce tanto en México y el mundo es progresivo, ya que existen condiciones necesarias tanto para generar empleos para explotar comercialmente las diferentes especies de cultivo en un contexto de creciente demanda para las siguientes décadas (FAO, 2018). En México existen 8550 granjas acuícolas que hay en el país, 4605 concentran 80% de la producción a nivel nacional (SAGARPA, 2017). La derrama económica generada por la actividad acuícola en 2016, de acuerdo con la CONAPESCA, fue de 15 mil 940 mdp, lo que representa un incremento de 32% respecto al 2015 (CONAPESCA, 2016). Siendo la mojarra, camarón, ostión, carpa y trucha las especies principales en la producción (CONAPESCA, 2017).

### **II.II Ventajas y desventajas de la acuicultura**

Todos conocemos que el pescado es un alimento muy nutritivo, que posee bajo contenido graso y contiene multitud de aceites esenciales, además de que su consumo es adecuado para personas de cualquier edad. Lo que

ignoramos es que la mitad de los peces que hoy en día llegan a nuestros platos no han sido pescados de forma tradicional, sino en criaderos (FAO, 2016), La acuicultura se ha convertido en una manera cada vez más utilizada para regular y cultivar los suministros de peces tanto en lugares de agua dulce como salda, y se estima que en el año 20150 se convertirá en la principal fuente de proteínas para la humanidad (CONAPESCA, 2018).

*a) Ventajas*

Una de las principales ventajas de la acuicultura es el cuidado de los ecosistemas marinos. Un criadero de peces puede ser colocado en casi cualquier lugar donde exista una fuente de agua limpia, y al poder combinarse con prácticas de irrigación, no sólo permite reducir los costos de los negocios, sino que proporciona agua para los cultivos cercanos y pescado como fuente alimentaria a la población.

*b) Desventajas*

La contaminación en el agua incluye el color, olor y los sólidos suspendidos. Estos parámetros varían dependiendo de la procedencia del agua. La demanda de oxígeno bioquímica, química y el total de carbón orgánico son indicadores de la calidad del agua (Dhir, 2013), siendo el oxígeno requerido para los microorganismos aerobios. Algunos de los contaminantes orgánicos más comunes presentes en el agua son: pesticidas, detergentes, solventes y líquidos de limpieza, hormonas, antimicrobianos, aditivos para alimentos, nutrientes (aguas de drenaje invernaderos) (Basílico *et al.*, 2017). Los contaminantes inorgánicos más comunes encontrados en el agua son metales, nutrientes y radio nucleídos (Dhir, 2013).

La contaminación con los iones o nutrientes utilizados por la agricultura son los que se encuentran en mayor concentración siendo nitratos, nitrito, fosfatos, amonio, cloro (Basílico *et al.*, 2017). La mayor parte de los desechos de la agroindustria terminan en mantos acuíferos y en drenaje, al igual que el amonio termina principalmente en drenaje.

### **II.III Sistemas de tratamiento para acuicultura**

Los métodos para tratamiento de agua utilizan la tecnología convencional para contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua y consiste en 3 procesos; primario, secundario y terciario.

Primario: El agua es pasada por un tanque de almacenaje donde se podrá separa los desperdicios que se encuentren flotando libremente en la superficie, y al mismo tiempo permitirá la sedimentación de los materiales más pesados, aquí también podremos separar las grasas y aceites presentes (Marchand *et al.*, 2018).

Secundario: En esta etapa se remueve alrededor del 90% de la materia orgánica y es llevado a cabo por procesos bilógicos. Aquí se permite el crecimiento bacteriano el cual promueve la oxigenación del agua (Marchand *et al.*, 2018).

Terciario: Aquí se busca el disminuir la mayor cantidad posible de partículas que se encuentren en el medio y para esto hay diversos métodos para realizarlo, desde dejar que sedimente, filtración , osmosis inversa son algunos de los métodos por mencionar (Marchand *et al.* , 2018).

Todo esto es llevada a cabo para tratar el agua y por último se desinfecta adicionando cloro, dando tratamiento de luz ultravioleta y con ozono lo que garantiza la calidad del agua para su uso (Marchand *et al.*, 2018).

Cada una de las técnicas para tratar el agua son efectivas para tratar algún contaminante en específico ya sea osmosis inversa, intercambio iónico, precipitación alcalina, filtración, electrolisis, muchas de estas tecnologías son basadas en métodos físicos y químicos lo cual la tecnología es de alto costo, además de producir un impacto en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana (Basílico *et al.*, 2017). Con el paso del tiempo se ha prestado mayor interés en el tratamiento del agua en especial utilizando métodos biológicos, para tratar el agua residual de la industria (Vidakovič-Cifrek, Sorić, & Babić, 2013). Entre los métodos sugeridos para el tratamiento de agua por medio de microorganismos destacan la utilización de algas, bacterias, hongos, plantas e inclusive residuos agrícolas con

alto potencial para remover varios contaminantes del ambiente y pueden tratar aguas de drenaje (Basílico *et al.*, 2017).

#### **II.IV Biorremediación**

La biorremediación es el aprovechar la capacidad de los organismos que limpian el medio ambiente. Principalmente se utilizan microorganismos y materiales biológicos como lo son las algas, hongos, bacterias, plantas encargadas de remover todos los elementos tóxicos presentes asimilándolos en diferentes vías metabólicas (Dhir, 2013). La bioestimulación utiliza los microorganismos para tratar suelos adicionado nutrientes que posteriormente podrán ser utilizados por algún otro organismo, para esto se introducen microorganismos exógenos siendo capaces de desintoxicar un elemento en particular (Basílico *et al.*, 2017).

La biorremediación es efectiva al disminuir hidrocarburos, halogenados solventes orgánicos y compuestos, pesticidas y herbicidas, compuestos de nitrógeno, metales pesados y radio nucleídos (Marchand *et al.*, 2018).

Las bacterias son utilizadas para biodegradar compuestos orgánicos complejos a más simples acompañados de agua y dióxido de carbono, resultando ser una completa mineralización de estos compuestos, siendo principalmente la biodegradación de pesticidas, halogenados, hidrocarburos; los cuales son fácilmente transformados por las enzimas presentes en los microbios (Sadowsky, 1999). Las enzimas son la pieza clave para poder realizar todo este proceso; las oxidorreductasas por medio de oxidación a través de polimerización, copolimerización con otros sustratos para producir sustancias húmicas. Las bacterias anaeróbicas son usadas para degradar halogenados, nitrosamina, reduciendo epotoxinas entre las más usadas se encuentran *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Neisseria*, *Moraxella*, *Trochoderma*, *Aerobacter*, *Mocrococcus*, *Burkholderia* y *Acinetobacter* (Basílico *et al.*, 2017). Las bacterias implementan una gran variedad de métodos y mecanismos para adaptarse a las condiciones del sustratos, para adaptarse a un exceso de metales inorgánicos ya sea asimilando, reduciendo,

oxidando, si bien no degradan los metales inorgánicos, los transforman a un estado de oxidación (Cao *et al.*, 2007).

Los mecanismos que ocurren en la biorremediación al ser llevado a cabo por las bacterias son los siguientes:

1. Bioadsorción y bioacumulación

La bioadsorción funciona con los iones cargados positivamente de los metales pesados y son llevados al interior de la membrana de la célula al estar cargada negativamente. Los metales son transportados de la superficie hasta el citoplasma de la célula (Basílico *et al.*, 2017).

2. Inmovilización

Los iones se unen al hierro y esto entran a las células bacterianas y quedan estáticos (Basílico *et al.*, 2017).

3. Solubilización

A través de reducción de los metales causado por las enzimas de las bacterias se reducen y se solubilizan oxidando los minerales (Basílico *et al.*, 2017).

La acción de los hongos *Penicillium*, *Aspergillus wentii*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus oryzae*, *Mucor*, *Saccharomyces*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus sajor-caju* son capaces de adsorber metales y radionucleidos (Dhir, 2013). La bioadsorción ocurre en la superficie de la célula por intercambio iónico y completando con grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos, aminas, aminas, fosfatos y sulfatos; Las enzimas extracelulares se encargan de degradar xenobióticos, materiales de lignocelulosa, fenoles PAHs, nitro aromáticos, PCBs, pesticidas y herbicidas (Shammout & Zakaria, 2015). La degradación de los pesticidas es influenciada por varios factores externos como el pH, temperatura, los nutrientes disponibles y la oxigenación en el medio (Basílico *et al.*, 2017).

La aparición de algas en un ambiente es consecuencia de una contaminación y estas juegan un papel en la remediación del medio donde aparecen. Las especies más comunes en aparecer son *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella*, *Ankistrodesmus* y *Scenedesmus*; todas estas especies se han probado y han tenido un éxito en el tratamiento de aceite de oliva, en la industria del papel y claro en el tratamiento de aguas residuales. Removiendo los contaminantes por bioacumulación, biotransformación y biodegradación (Basílico *et al.*, 2017). Las microalgas *Chlorella fusca* var. *Cavulata* y *Chlamydomonas reinhardtii* son capaces de remover y transformar nutrientes como lo es nitrógeno y fósforo. Todas las especies de algas antes mencionadas son capaces de resistir a los ambientes con metales pesados e inclusive algunas de ellas son capaces de removerlos; por medio de la adsorción; en la cual la pared celular adsorbe los iones de metal y posteriormente son llevados al citoplasma de la célula (Dhir, 2013). Los cuerpos polifosfatos tiene dos funciones una al servir como almacenamiento para los metales y otra como mecanismo de desintoxicación (Miretzky, Saralegui, & Cirelli, 2004).

La biorremediación son unas técnicas las cuales requieren más tiempo para su funcionamiento, son más económicas comparadas a los métodos físicos y químicos, inclusive son consideradas como una de las mejores 10 tecnologías debido a su potencial tratamiento en la mitigación de la contaminación del medio ambiente y de costo accesible (Cao *et al.*, 2007). En el área de biorremediación, como opción biológica tenemos las plantas capaces de remover contaminantes específicos en suelos, desperdicios, sedimentos, agua subterránea, cuerpos de agua y aguas residuales, por medio de procesos metabólicos e hidráulicos; a este método se le denomina fitorremediación (Dhir, 2013).

## **II.V Fitorremediación**

La fitorremediación es llevada a cabo por el sistema radicular de las plantas por medio de traslocación, bioacumulación y con la habilidad de degradar contaminantes (Sadowsky, 1999). Con el paso del tiempo la tecnología verde va

tomando más campo en diferentes áreas, siendo una de estas el tratamiento de contaminantes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el agua y suelo (Dhir, 2013). Las plantas poseen la habilidad de remover o tratar una gran variedad de contaminantes: metales, pesticidas, solventes, explosivos, aceite crudo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, radio nucleídos, campos de agricultura, aguas residuales (Sadowsky, 1999). Las características de las plantas juegan un papel importante en remover los contaminantes, las adaptaciones genéticas y procesos biológicos, las especies con mayor adaptación al ambiente, producción de biomasa son estas las cualidades necesarias para ser buenos fitorremediadores (Dhir, 2013).

La asociación en la zona de rizosfera con los microorganismos presentes, permiten realizar degradación, detoxificación y transformación de los contaminantes. La selección de las semillas o las plantas a colocar en el medio deben de tener una adaptación al clima de la fitorremediación ya que esto es un punto crítico (Sadowsky, 1999). Las especies de plantas absorber e hiperacumulan metales contaminantes y el exceso de nutrientes, materia orgánica contaminante presente en los suelos y desperdicios. La rizo filtración es el remover los contaminantes por medio de las raíces, y se puede tratar agua subterránea, superficies acuáticas y aguas residuales, en la cual se remueven metales, radionúclidos y las plantas más utilizadas son las del género *Eichornia* y *Lemna* (Basílico *et al.*, 2017).

La rizo filtración es el remover los contaminantes que se encuentren en la superficie del agua por medio de las raíces. Esto involucra la adsorción y la precipitación en las raíces de la planta. Este tipo de filtración es utilizado para tratar grandes volúmenes de agua (Miretzky *et al.*, 2004).

Las plantas utilizadas para la fitorremediación pueden ser acuáticas y terrestres, para las especies utilizadas en tierra es más eficaz debido a que tiene un sistema radicular mayor, los árboles y céspedes son los más utilizados (Marchand *et al.*, 2018). Las plantas acuáticas se han explorado y estudiado para observar su capacidad fitorremediadora, algunas especies de plantas acuáticas asociadas con

microorganismos se han usado para crear plantas de tratado de aguas residuales (Basílico *et al.*, 2017; Marchand *et al.*, 2018). La biomasa de estas plantas representa una abundante fuente de material biológico. Las características de estas plantas son comunes al ser de crecimiento rápido, fáciles de cultivar, alta producción de biomasa, tolerancia a condiciones ambientales combinada con una alta bioacumulación (Dhir, 2013).

Estos grupos de plantas se clasifican en 3 grupos:

#### 1. Especies de flotación libre:

(a) Libre flotación: Plantas que se encuentran en la superficie del agua, mientras sus raíces se encuentran sumergidas de manera libre en el agua, algunas especies representativas son *Lemna*, *Eichhornia*, *Pistia*, *Salvinia*, *Azolla* y *Spirodela* (Appenroth, Borisjuk, & Lam, 2013; Bonomo, Pastorelli, & Zambon, 1997; Shammout & Zakaria, 2015).

(b) Flotación estática: Son plantas las cuales se encuentran flotando en la superficie pero sus raíces se encuentran en el sustrato (Dhir, 2013).

#### 2. Plantas sumergidas:

Aquí se incluyen especies que también se pueden encontrar en la superficie del agua; algunas de las especies más estudiadas son: *Potamogeton*, *Ceratophyllum* y *Myriophyllum* (Dhir, 2013).

#### 3. Plantas emergentes:

Son especies las cuales son encontradas en el agua y como lo dice emergen cuando sobre pasan cierta altura: algunas especies son: *Typha*, *Elodea*, *Phragmites* y *Scirpus* (Dhir, 2013).

Todas la plantas mencionadas anteriormente son de interés mundial debido al efecto que tienen en el medio ambiente al remover los agentes contaminantes, incluyendo metales pesados, materiales radioactivos, explosivos, desechos orgánicos e inorgánicos (Basílico *et al.*, 2017).

## II.VI *Lemna gibba*

Las lentejas de agua son pequeñas plantas acuáticas pertenecientes a la familia de las angiospermas siendo de libre flotación (Sullivan & Giblin, 2012). Son plantas monocotiledóneas pertenecientes a la familia de las *Lemnaceae*. Tienen una distribución a nivel mundial y son encontradas en aguas ricas en nutrientes y temperaturas cálidas en las zonas de los trópicos (Basílico *et al.*, 2017). Las lentejas de agua consisten en 4 géneros: *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia* y *Wolffiella* (Sullivan & Giblin, 2012). *Lemna* es el género más largo de todas las lentejas de agua, son pequeñas plantas y su cuerpo parece una hoja larga. Las condiciones óptimas de crecimiento de esta planta son con una temperatura en el agua entre 26-33°C y un pH entre 5.5-7 (Liu *et al.*, 2017). Son plantas de reproducción asexual, son plantas fáciles de cultivar en condiciones de laboratorio y funcionan como material de investigación para pruebas eco toxicológico. Las lentejas de agua tienen la capacidad de remover contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados, radio nucleídos, nutrientes, pesticidas, explosivos y aguas residuales (Dhir, 2013).

Las especies *L.minor*, *L.gibba* y *L.trisulca*, han demostrado ser capaces de remover metales pesados como lo son el Hg, Pb, Cr, Cu, Zn, Al, Cd, Ag, As y Au en aguas residuales (Basílico *et al.*, 2017; Dhir, 2013; Marchand *et al.*, 2018).

## III. OBJETIVOS E HIPOTESIS

### Objetivo General:

- Diseñar y construir un sistema para la remoción de NP (Nitrógeno y fósforo) utilizando la *Lemna gibba*.

### Objetivos Particulares:

- Evaluar la eficiencia de remoción de nitrógeno y fosforo de aguas residuales de un cultivo acuícola utilizando la *Lemna gibba*.
- Diseñar un sistema para la fitorremediación de agua.
- Construir un sistema para fitorremediación de agua con *Lemna gibba*.

## Hipótesis

Los nutrientes nitrógeno y fósforo provenientes del agua residual de un cultivo acuícola hipertensivo son removidos en un 30% por *Lemna gibba*, debido a su capacidad de fitorremediación.

## IV. METODOLOGÍA

### IV.I Ubicación del área de estudio.

El sistema acuícola se instaló en el invernadero de producción acuícola bajo la responsabilidad del Laboratorio de Bioingeniería localizado en el campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (20.705786, -100.260240) (Figura 1).



**Figura 1.** Campus Amazcala, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

### IV.II Muestra vegetal

Las muestras vegetales (*Lemna gibba*) fueron colectadas de un biofiltro dentro del campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro.



**Figura. 2.** Muestra vegetal (*Lemna gibba*) utilizada en el experimento.

#### **IV.II.I Tratamiento de la planta**

De acuerdo a lo descrito por Toyama en 2018, se realizó una desinfección con una solución de hipoclorito sódico al 0.3% durante 3 minutos, después en etanol al 30% durante 1 minuto y por último en agua esterilizada durante 1 minuto.



**Figura. 2.1.** Tinas de desinfección

#### **IV. II. II. Maduración de planta**

Las plantas fueron cultivadas en un recipiente aséptico con una solución nutritiva esterilizada (ácido fosfórico 30 ml, nitrato de calcio 780 gr, nitrato de potasio 225 gr, sulfato de potasio 300 gr, sulfato de magnesio 275 gr, sulfato de cobre 6 gr, quelato de hierro 15 gr, quelato de zinc 3 gr y quelato de manganeso 3 gr), bajo condiciones de invernadero.



**Figura. 2.2.** Tratamiento de desinfección de *Lemna gibba*.

Posterior al periodo de reproducción y climatización al invernadero, se procedió a retirar cada 2 días un 25% de la solución nutritiva y sustituirla por agua procedente del sector acuícola, hasta lograr sustituir el 100% de la solución. Los cambios se realizaron los días lunes, miércoles, viernes y domingo. Terminado el proceso de sustitución de la solución nutritiva por el agua proveniente del sector acuícola, se procedió a tener una semana de adaptación de la planta a su nuevo medio.

#### **IV.III Eficiencia de la fitorremediación.**

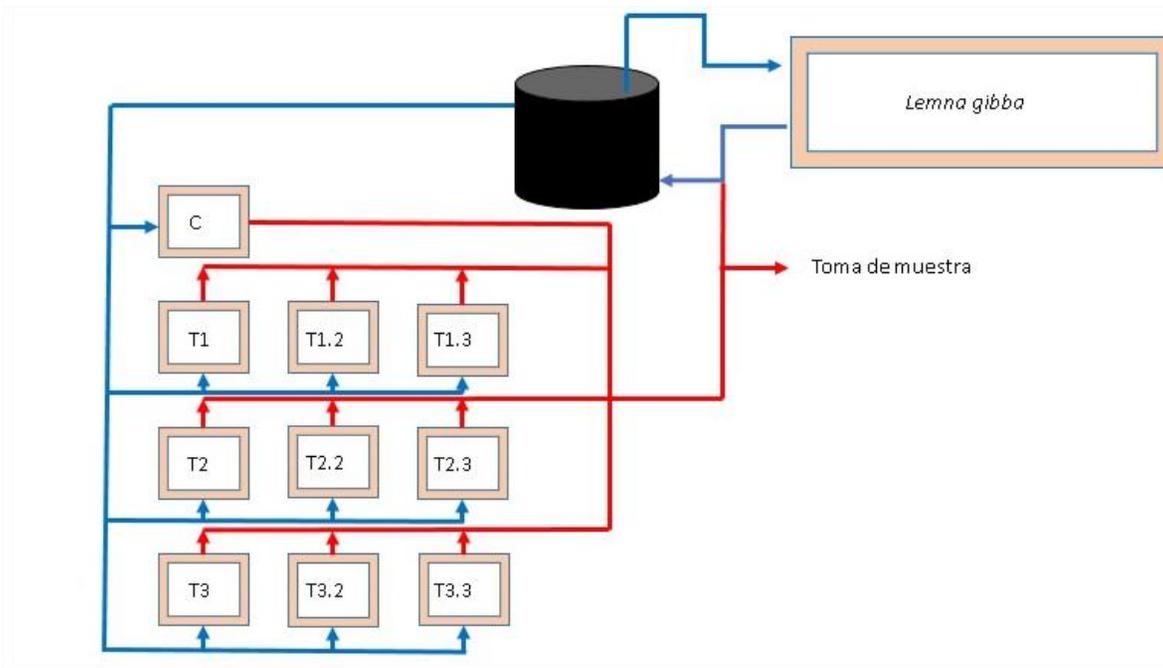
El diseño experimental para determinar la eficiencia de la fitorremediación de la planta consistió en un experimento en el cual se manejaron 3 densidades diferentes de *Lemna gibba*: 50g, 100g y 200g.

El experimento se montó dentro del invernadero en 10 recipientes plásticos de 29 cm x 6.5 cm x 11 cm. A cada recipiente se le agregaron 3 L de agua proveniente de un sistema acuícola, en los cuales 3 de ellos tuvieron una concentración de 50g en peso fresco de *Lemna*, 3 recipientes con 100g, 3 recipientes con 200g y un último recipiente como control, el cual solo contuvo agua del sistema acuícola sin planta como se muestra en la Figura 3.

El experimento tuvo una duración de 12 horas en su totalidad recolectando muestras una vez pasada 2, 4, 6, 8, 10 y 12 horas después de la inoculación de la *Lemna* como se muestra a continuación en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Horarios de toma de muestra.

Tratamiento	Toma						
	0	2	4	6	8	10	12
Control	11:16 a.m.	1:16 p.m.	3:16 p.m.	5:16 p.m.	7:16 p.m.	9:16 p.m.	11:16 p.m.
<i>Lemna 50 g</i>	11:16 a.m.	1:16 p.m.	3:16 p.m.	5:16 p.m.	7:16 p.m.	9:16 p.m.	11:16 p.m.
<i>Lemna 100 g</i>	11:16 a.m.	1:16 p.m.	3:16 p.m.	5:16 p.m.	7:16 p.m.	9:16 p.m.	11:16 p.m.
<i>Lemna 200 g</i>	11:16 a.m.	1:16 p.m.	3:16 p.m.	5:16 p.m.	7:16 p.m.	9:16 p.m.	11:16 p.m.



**Figura. 3.** Diseño del montaje de experimental.

Las muestras de agua fueron colectadas en frascos plásticos de 250 ml. Al momento de tomar las muestras se tomaron las lecturas de los parámetros de pH, oxígeno y temperatura, utilizando un medidor HACH HQ 400.

#### IV.III.I Análisis de las muestras

Se realizaron análisis para determinar la cantidad de contenido de Fosforo, N-nitratos, N-nitritos y amonio. A continuación, se describe la metodología usada para cada determinación.

**a) Fosfatos.** La determinación analítica del fósforo se hizo mediante el método 8048 de los métodos HACH denominado del ácido ascórbico para ortofosfatos con un intervalo de 0.02–2.50 mg/L  $\text{PO}_4^{3-}$ , donde el ortofosfato reacciona con molibdato en un medio ácido, formando un complejo de fosfomolibdato para que el ácido ascórbico reduzca el complejo dando un intenso color azul de molibdeno que puede ser medible a 880 nm.

**b) N-nitratos.** La determinación analítica de los nitratos se hizo por el método de reducción de cadmio con identificación 8039 de los métodos HACH con un intervalo

de medición de 0.3-30 mg/L de  $\text{NO}_3$ . El cadmio metálico reduce a nitrito el nitrato presente en la muestra. El ion nitrito reacciona en medio ácido con ácido sulfanílico para formar una sal de diazonio intermedia. Esta sal reacciona con el ácido gentísico para formar una solución de color ámbar. Los resultados se miden a 500 nm.

**c) N-Nitritos.** La determinación analítica de los nitritos se hizo por el método de diazotación con identificación 8507 de los métodos HACH con un intervalo de medición de 0.002-0.3 mg/L. El nitrito de la muestra reacciona con el ácido sulfanílico para formar una sal de diazonio que reacciona con el ácido cromotrópico para producir un complejo de color rosa. Este color es proporcional a la cantidad de nitrito presente. Los resultados del ensayo se miden a 507 nm.

**d) Amonio.** La determinación analítica del amonio se hizo por el método de Nessler con identificación 8038 de los métodos HACH con un intervalo de medición de 0.2-2,5 mg/L. El estabilizador mineral disminuye la dureza en las muestras. El agente dispersante alcohol polivinílico contribuye a la formación de la coloración del reactivo Nessler con los iones de amonio. Se forma un color amarillo proporcional a la concentración de amoniaco. Los resultados del ensayo se miden a 425 nm.

#### **IV.IV Diseño en software**

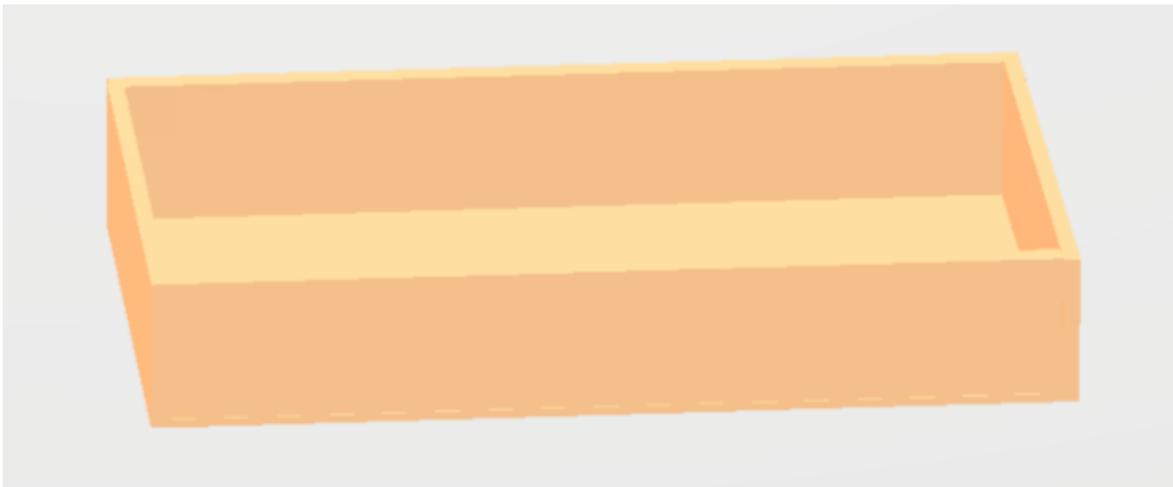
Se realizó el diseño del sistema en AutoCAD® 2019, en el que se contempló un tanque para albergar a los peces y una estructura de soporte para mantener elevada una tina que será utilizada para albergar a la planta. El modelo propuesto es un sistema semicontinuo con la adición de dos bombas sumergibles para la recirculación del agua.

Se propuso utilizar un tanque de geomembrana con un diámetro de 1.70 m y 70 cm de altura, como se muestra en la Figura 4.



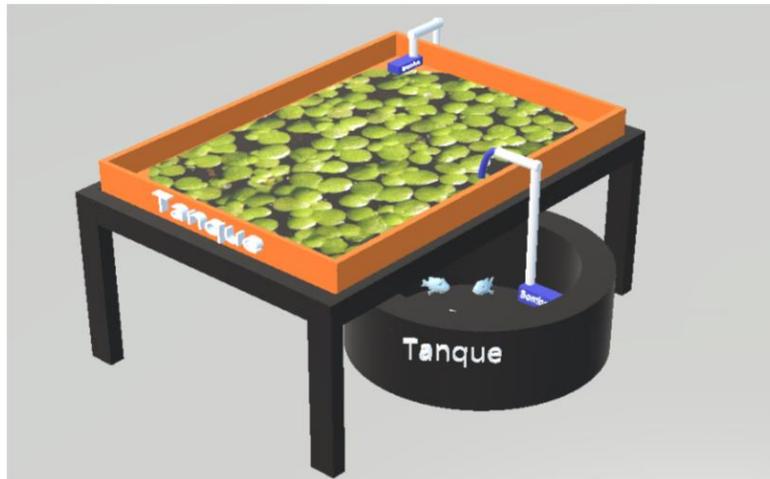
**Figura 4.** Tanque de almacenamiento de peces.

Para el diseño de la tina la cual almacenará la *Lemna*, se consideraron unas medidas de 1.90 cm de largo x 1.60 de ancho y 40 cm de alto (Figura 4.1).



**Figura. 4.1.** Tanque de tratamiento de agua de 2 m de largo x 1.79 m de ancho x 50 cm de alto.

Por último, se diseñó una estructura metálica para mantener elevada la tina con las siguientes medidas: 2 m de largo x 1.79 m de ancho x 1 m de alto (Figura 4.2).



**Figura. 4.2.** Sistema de fitorremediación.

#### **IV.V Montaje del sistema**

El sistema se montó dentro del invernadero de producción acuícola bajo el resguardo del Laboratorio de Bioingeniería, perteneciente a la Facultad de Ingeniería, como a continuación se muestra en las Figuras 5 y 5.1 respectivamente:



**Figura 5 y 5.1** Sistema armado

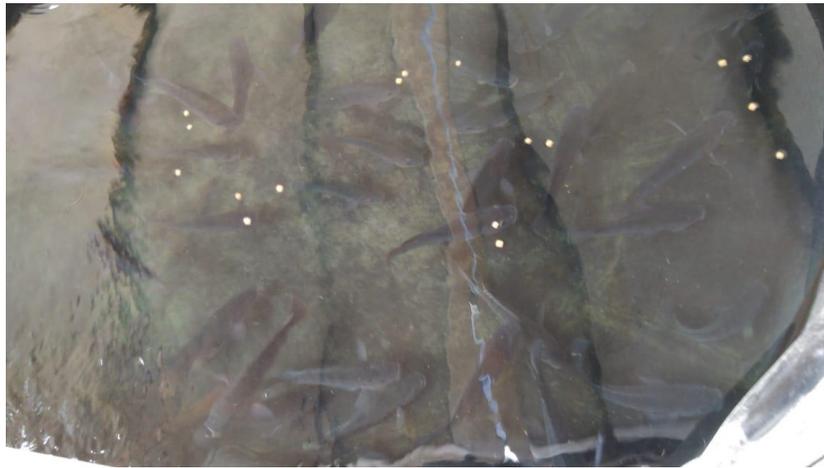
En la instalación del sistema se trabajó con tubería de PVC de 1 ½" y mangueras de la misma medida.

Para el sistema de recirculación se utilizó una bomba sumergible HDOM modelo CP-8000, la cual se usó para transportar el agua del estanque a las tinas de fitorremediación. Para el regreso al tanque principal se utilizó una bomba de la marca CAT modelo P-AAA.

La capacidad de la bomba de llenado del tanque superior se enciende durante 1 minuto llenando con un nivel de 10 cm de profundidad, lo idóneo para la planta.

#### **IV.V.I Obtención de peces**

Se colocaron 44 peces de la especie *Oreochromis niloticus*, los cuales fueron donados por parte del Laboratorio de Bioingeniería, siendo éstos provenientes de la granja acuícola Zidedho ubicada en Ixmiquilpan, Hidalgo. Los peces tuvieron un peso promedio de 279.27 gramos por individuo.



**Figura. 5.2.** Peces dentro del sistema.

Los peces fueron alimentados con alimento comercial de la marca Maltacleyton con un 28% de proteína y con un tamaño de 5/16”.

El suministro de alimento fue el 2% del peso total de la biomasa, los cuales fueron distribuidos en 3 horarios de alimentación, aportando durante la primera toma un 20% de la ración, y en la segunda y tercera el 40% respectivamente como se muestra en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Horarios de alimentación.

Hora	Alimento (g)	Porcentaje
8:00 a.m.	55.854	20
12:00 p.m.	111.708	40
4:00 p.m.	111.708	40

Con la finalidad de administrar el oxígeno adecuado para la sobrevivencia de los peces, se colocaron 3 piedras difusoras de oxígeno dentro del tanque. El oxígeno fue suministrado por el equipo Airsep modelo Topaz (Figura 5.4), con el número de serie 1789292-2. Se realizó un arreglo en paralelo utilizando 3 timers de la marca Voltech (Figura 5.3) para obtener un arreglo de 24 tiempos, activándose durante 30 minutos cada hora, inyectando 6 LPM de O<sub>2</sub> suministrando en cada periodo 2400 LPM de O<sub>2</sub>. Se muestra la programación utilizada en la tabla 3:



**Figura. 5.3.** Arreglo de “Timers”



**Figura. 5.4.** Airstep

**Tabla 3.** Secuencia de encendido del Airsep.

Hora de encendido	Hora de apagado
12:00 a.m.	12:30 a.m.
1:00 a.m.	1:30 a.m.
2:00 a.m.	2:30 a.m.
3:00 a.m.	3:30 a.m.
4:00 a.m.	4:30 a.m.
5:00 a.m.	5:30 a.m.
6:00 a.m.	6:30 a.m.
7:00 a.m.	7:30 a.m.
8:00 a.m.	8:30 a.m.
9:00 a.m.	9:30 a.m.
10:00 a.m.	10:30 a.m.
11:00 a.m.	11:30 p.m.
12:00 p.m.	12:30 p.m.
1:00 p.m.	1:30 p.m.
2:00 p.m.	2:30 p.m.
3:00 p.m.	3:30 p.m.
4:00 p.m.	4:30 p.m.
5:00 p.m.	5:30 p.m.
6:00 p.m.	6:30 p.m.
7:00 p.m.	7:30 p.m.
8:00 p.m.	8:30 p.m.
9:00 p.m.	9:30 p.m.
10:00 p.m.	10:30 p.m.
11:00 p.m.	11:30 p.m.

#### IV.VI Validación del sistema de fitorremediación

De acuerdo Martins *et al.* (2019) los intervalos óptimos para el crecimiento de los peces son los siguientes:

**Tabla 4.** Rangos óptimos de crecimiento de Tilapia (*Oreochromis niloticus*).  
Fuente Martins (2019).

Temperatura optima	28-32 (+- 5) C
Dureza del agua	50-350 ppm CaCO
pH	6.5-9
Amonio	0.6-2 ppm
Nitritos	<0.1 ppm
Fosfatos	0.6-1.5 ppm

De acuerdo Arroyave (2004) los requerimientos para la *Lemna gibba* son los siguientes:

**Tabla 5.** Rangos óptimos de crecimiento para *Lemna gibba*. Fuente Arroyave (2004)

Temperatura	20-30
pH	5.8-7.0
Solidos disueltos totales	300-800 ppm
Amonio	2-10 ppm
Fosfatos	1-4 ppm

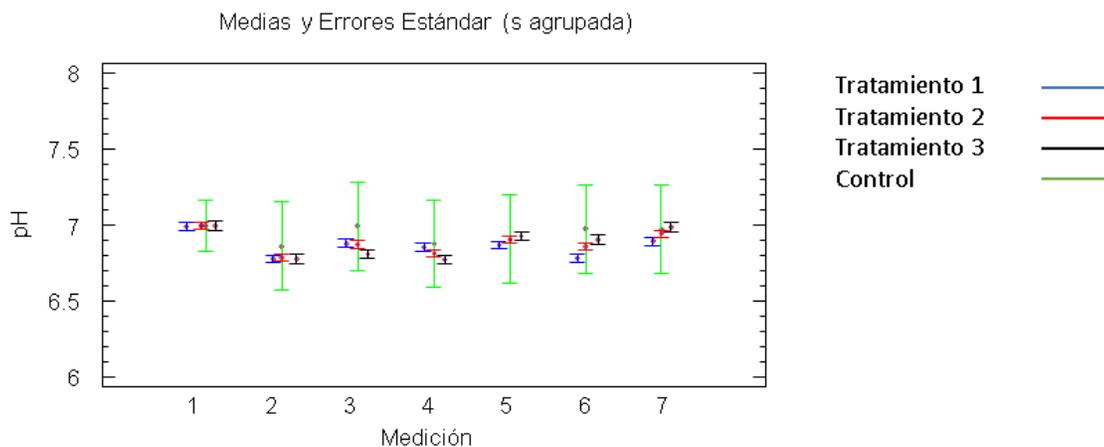
El tanque fue llenado con agua hasta alcanzar 10 cm de altura e inoculando con *Lemna gibba*. La temperatura fue controlada con un calentador sumergible manteniendo el agua a 24°C.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan las gráficas con los resultados del monitoreo de las condiciones físicas del agua del sistema de fitorremediación diseñado y validado, así como los resultados de la variación de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el agua residual acuícola por efecto de la asimilación de la Lemna.

### V.I. Determinaciones físicas

El pH presentó un comportamiento similar en todos los tratamientos, no habiendo diferencias significativas entre ellos. Con base en la información presentada por Arroyave (2004) se corrobora que los resultados obtenidos en el presente proyecto están dentro de los parámetros idóneos de pH para el funcionamiento de la planta en su efecto de fitorremediación (Figura 6.1).

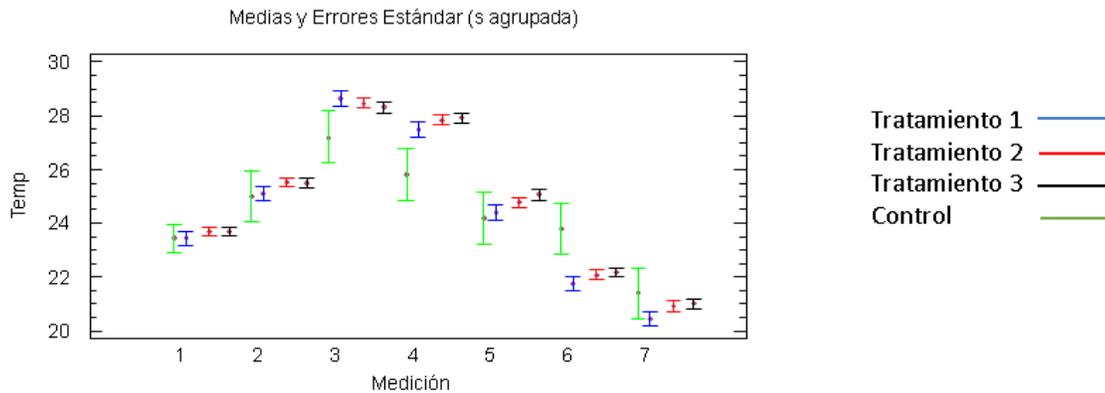


**Figura 6.1.** Gráfica de pH.

Al realizar los análisis de las temperaturas obtenidas durante el experimento, se puede observar que no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos; sin embargo, el tratamiento 3 (200g) presenta ligeramente una temperatura más alta con respecto a los demás tratamientos. El tratamiento 1 (50g) presentó la temperatura las baja. El control de la temperatura durante el experimento jugó un papel importante para el correcto desarrollo de la fitorremediación, por lo que se consideraron las condiciones adecuadas con la

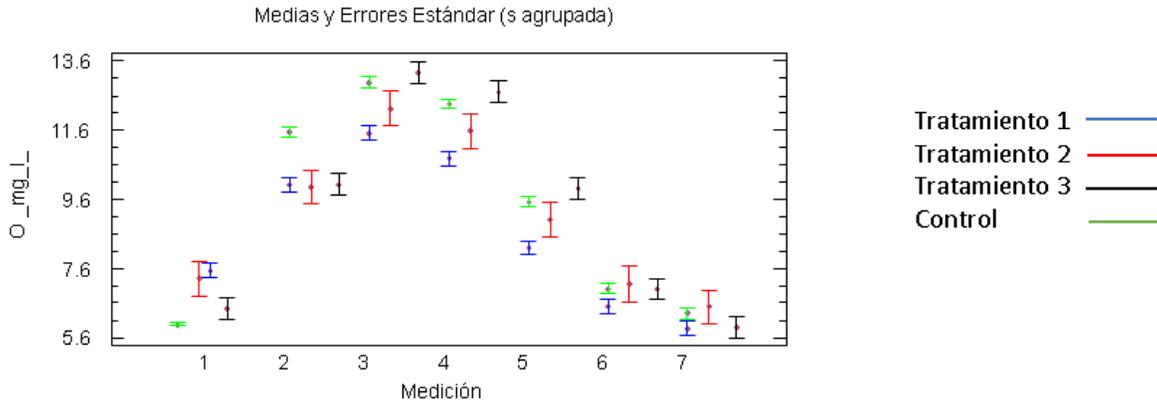
finalidad de mantener esta condición dentro del rango idóneo para que la planta desarrollara sus funciones de manera adecuada, como describe “Obtaining and Culturing Duckweed Optimal Growth Conditions for Duckweed” (2009)

A continuación, se presenta la gráfica obtenida del análisis de temperatura Figura 6.2.



**Figura 6.2.** Gráfica de temperatura.

Al analizar el oxígeno presente en las muestras se pueden observar diferencias entre tratamientos influenciado por la cantidad de organismos. Como se esperaba, el tratamiento 3 (200g) presentó una mayor concentración de oxígeno hasta la 5 medición, debido a la fotosíntesis realizada por la planta y la adición del oxígeno como resultado del proceso al ambiente. Se puede observar que el mayor consumo de oxígeno es durante la noche, y va disminuyendo por la *Lemna* en las horas con mayor calor del día. El tratamiento 2 (100g) es el que presenta el mejor comportamiento con respecto al nivel de oxígeno para poder realizar las actividades biológicas como lo indica Roots (1986), en el cual describe los requisitos que necesita la planta para su óptimo desarrollo. A continuación, se presenta la gráfica obtenida del análisis de oxígeno (Figura 6.3).

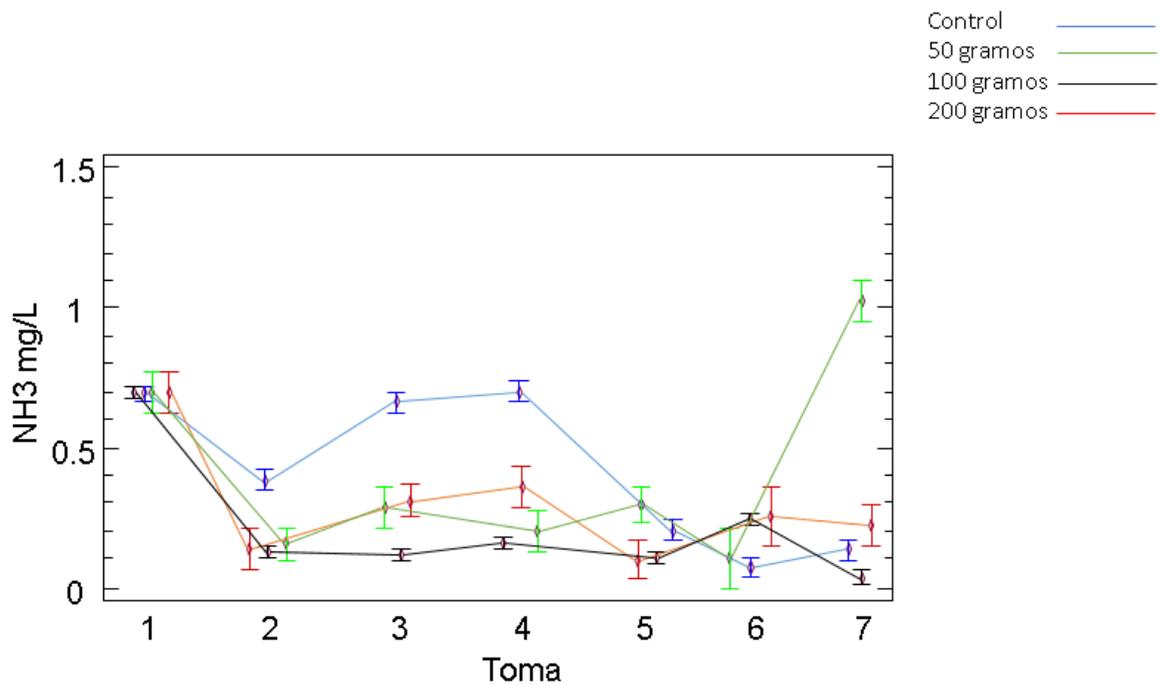


**Figura 6.3.** Gráfica de consumo de oxígeno

## V.II. Determinaciones químicas

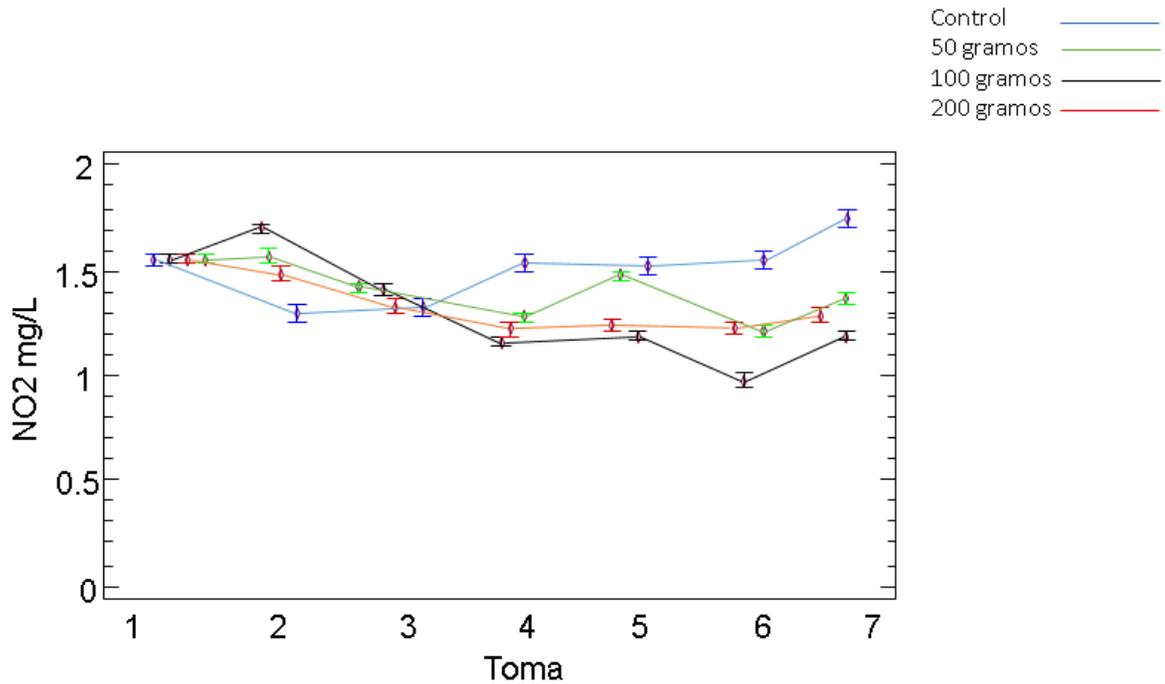
Al finalizar la instalación del sistema se tomaron muestras para obtener los valores de la calidad del agua a ser utilizada con la Lemna para la fitorremediación. Durante el transcurso de 24 horas se evaluaron el  $PO_4$ ,  $NO_3$ ,  $NO_2$  y  $NH_3$  en el agua recolectada del sistema para cada uno de los tratamientos.

Con respecto al  $NH_3$ , los tratamientos mostraron no tener una diferencia significativa entre ellos. Comparados con el control se obtuvieron resultados más bajos coincidiendo con los resultados obtenidos por Wahyuningsih, Effendi, & Wardiatno (2015). Destacó el tratamiento 2 (100 g) en la reducción del  $NH_3$  al reducir un 57% del  $NH_3$  total.



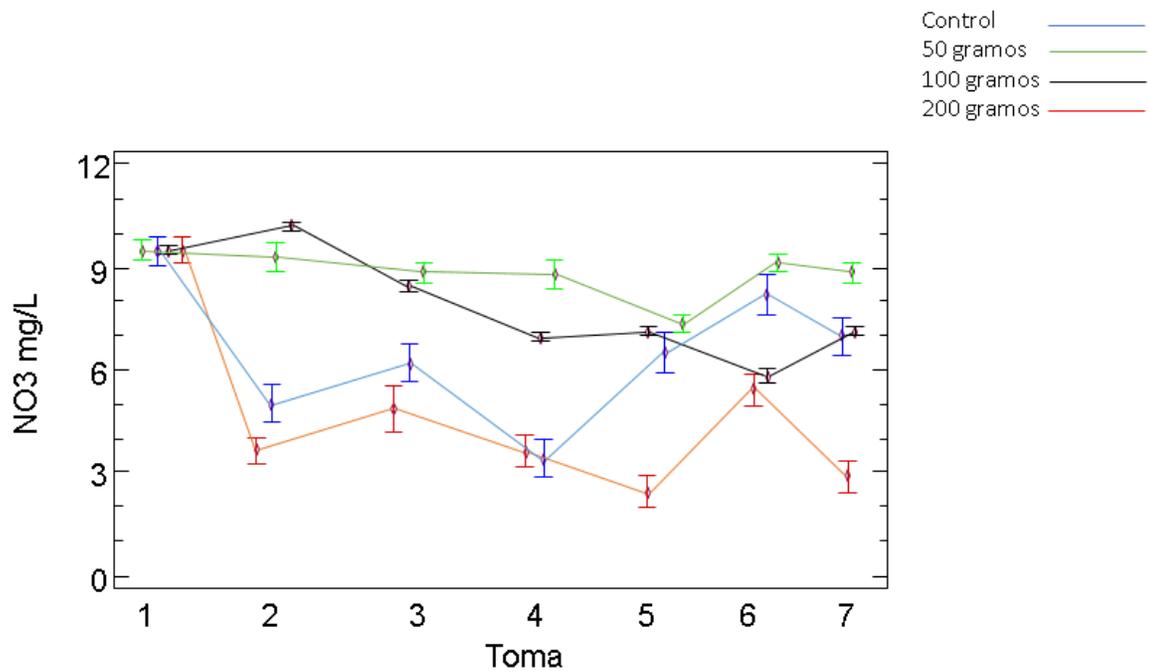
**Figura 7.1.** Gráfica del comportamiento del NH3

En el caso de los nitritos  $\text{NO}_2$  se observa un comportamiento similar en los tratamientos al no presentar diferencias significativas. Con respecto al control se mostró una mayor cantidad de nitritos en la toma 2; sin embargo, se observa a partir de la toma 3 una disminución de los nitritos en los 3 tratamientos, mostrando una mayor asimilación el tratamiento 2 (100 g) a partir de la 4 toma. Se obtuvo un 24% de asimilación de los nitritos  $\text{NO}_2$  presentes.



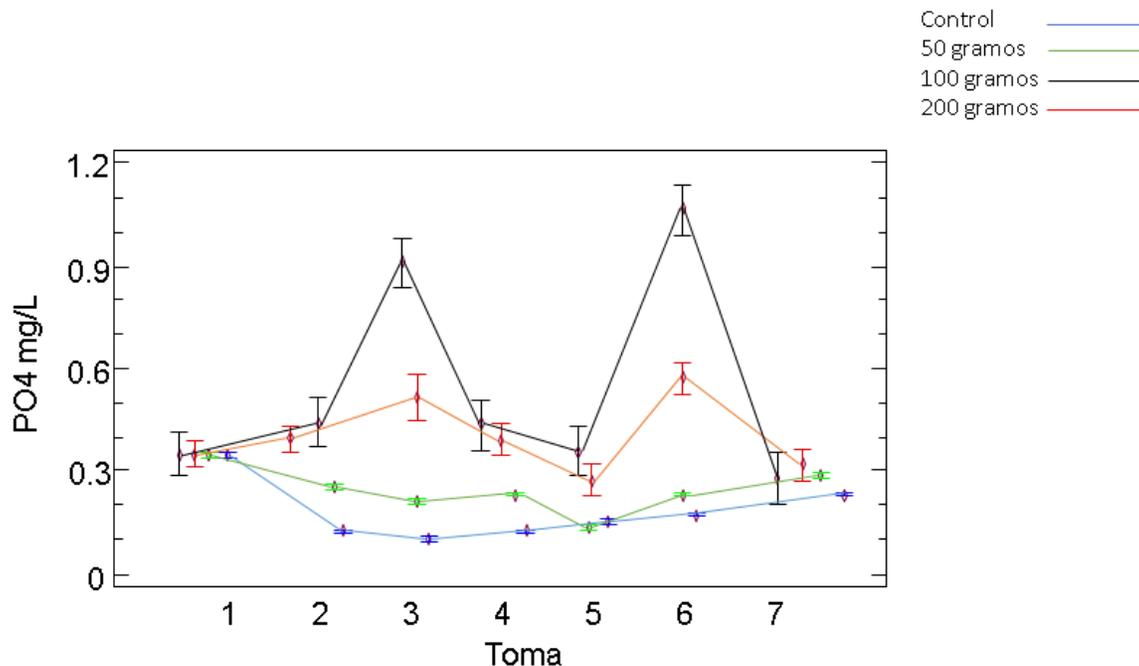
**Figura 7.2.** Gráfica del comportamiento del NO<sub>2</sub>

En el caso de los nitratos, se presentaron diferencias entre el control y los tratamientos 1 y 2 (50 y 100 g respectivamente), presentándose menor concentración en los tratamientos; sin embargo, el tratamiento 3 (200 g) no presentó diferencias significativas con respecto al control, obteniendo valores por debajo a lo largo del experimento.



**Figura 7.3.** Gráfica del comportamiento del NO<sub>3</sub>

La dinámica que mostró el fosfato durante el experimento indicó diferencias significativas en los tratamientos 2 y 3 respecto al control; en cambio, el tratamiento 1 no presentó diferencias significativas con respecto al control.



**Figura 7.4.** Gráfica del comportamiento del PO4

Posteriormente se llevó a cabo una evaluación para determinar la frecuencia de recambios de agua derivados por el exceso de amonio como principal elemento dañino de la excreción de los peces en un sistema de producción acuícola.

Al obtener los resultados del comportamiento del PO4, NO3 y NO2, podremos determinar en que punto el amonio tiene una mayor disminución debido al efecto de la planta, jugando un papel sumamente importante la temperatura la cual permitió que la planta pudiera realizar el proceso de la fitorremediación más efectivo con una temperatura de 28°C, dado que el pH se puede observar se tuvo un comportamiento con todos los casos no influye en el resultado final.

## VI. CONCLUSIONES

Con este trabajo se confirman las cualidades que posee la *Lemna gibba* para la fitorremediación, lo cual, sumado a su rápido incremento de biomasa en corto tiempo, la hacen de gran interés para el sector acuícola e inclusive para el sector agropecuario debido a su alto contenido de proteína vegetal.

Se lograron obtener mejores resultados de la fitorremediación manteniendo y controlando valores de pH de 7, temperatura de 28° C y 12 mg/L de oxígeno disuelto; lo que nos indica que estos factores promueven una correcta fitorremediación.

Con los resultados obtenidos a partir del experimento realizado, se concluye que la cantidad idónea para utilizar en el sistema es de 200 gramos por cada 3 Litros. De acuerdo a los datos obtenidos, se recomienda un tiempo de retención del agua de 6 horas, teniendo un nivel de agua no superior a 10 cm de profundidad.

El nivel del agua en donde se encuentra la planta es de suma importancia debido a que es una planta pequeña y posee una única raíz que alcanza 10 cm de largo. Esa última característica limita el poder hacer más efectivo el proceso de fitorremediación.

## **VII. Recomendaciones**

Con base a los resultados obtenidos, se puede sugerir para la continuación del proyecto, una mejora en el sistema de control en el sistema de oxigenación, temperatura y el sistema de recirculamiento para una optimización en la entrada y salida de flujo de agua al tanque contenedor de la planta.

## **VIII. REFERENCIAS**

- Appenroth, K. J., Borisjuk, N., & Lam, E. (2013). Telling duckweed apart: Genotyping technologies for the Lemnaceae. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 19(1), 1–10. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1145.2013.00001>
- Arroyave, M. del P. (Escuela de I. de A. M.-C. (2004). LA LENTEJA DE AGUA (Lemna minor L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA. *Revista EIA. ISSN 1794-1237*, 1, 33–38. Retrieved from [www.redalyc.org/articulo.oa?id=149217763003](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149217763003)
- Basílico, G., Magdaleno, A., Paz, M., Moretton, J., Faggi, A., & de Cabo, L. (2017).

- Agro-Industrial Effluent Phytoremediation with *Lemna gibba* and *Hydrocotyle ranunculoides* in Water Recirculating Mesocosms. *Clean - Soil, Air, Water*, 45(3), 1–7. <https://doi.org/10.1002/clen.201600386>
- Bonomo, L., Pastorelli, G., & Zambon, N. (1997). Advantages and limitations of duckweed-based wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, 35(5), 239–246. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00074-7)
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z., Xiong, S., & Diana, J. (2007). Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(7), 452–462. <https://doi.org/10.1065/espr2007.05.426>
- Dhir, B. (2013). *Phytoremediation: Role of aquatic plants in environmental clean-up*. *Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1307-9>
- Estado, E. L. (2016). Y LA.
- Experiments and Projects with Duckweed. (1988), 69, 17–19.
- Goddek, S., & Körner, O. (2019). A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments. *Agricultural Systems*, 171(February), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.010>
- Liu, C., Dai, Z., & Sun, H. (2017). Potential of duckweed (*Lemna minor*) for removal of nitrogen and phosphorus from water under salt stress. *Journal of Environmental Management*, 187, 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.006>
- Marchand, C., Mench, M., Jani, Y., Kaczala, F., Notini, P., Hijri, M., & Hogland, W. (2018). Pilot scale aided-phytoremediation of a co-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 618, 753–764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.143>

- Martins, G. B., da Rosa, C. E., Tarouco, F. de M., & Robaldo, R. B. (2019). Growth, water quality and oxidative stress of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) in biofloc technology system at different pH. *Aquaculture Research*, 50(4), 1030–1039. <https://doi.org/10.1111/are.13975>
- Miretzky, P., Saralegui, A., & Cirelli, A. F. (2004). Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere*, 57(8), 997–1005. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.024>
- Obtaining and Culturing Duckweed Optimal Growth Conditions for Duckweed. (2009), 2009.
- Roots, D. (1986). Duckweed Roots Patterns of Root Growth Anatomy of a Developing Lemna Root, 1–4.
- Sadowsky, M. J. (1999). Phytoremediation: past promises and future practises. Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology, 1–7.
- Shammout, M. W., & Zakaria, H. (2015). Water lentils (duckweed) in Jordan irrigation ponds as a natural water bioremediation agent and protein source for broilers. *Ecological Engineering*, 83, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.041>
- Sullivan, J. F., & Giblin, S. M. (2012). Growth , Tissue Composition and Stoichiometry of Duckweed Grown in Low Nutrient Backwaters of the Upper Mississippi River, (March), 25. Retrieved from documents/reports/2012/duckweed\_wq\_report\_final\_2012.pdf
- To, C., Security, F., & All, N. F. O. R. (2016). *THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE*.
- Toyama, T., Hanaoka, T., Tanaka, Y., Morikawa, M., & Mori, K. (2018). Comprehensive evaluation of nitrogen removal rate and biomass, ethanol, and methane production yields by combination of four major duckweeds and three

types of wastewater effluent. *Bioresource Technology*, 250(September 2017), 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.054>

Vidakovič-Cifrek, Ž., Sorić, S., & Babić, M. (2013). Growth and photosynthesis of *Lemna minor* L. exposed to different light conditions and sucrose supplies. *Acta Botanica Croatica*, 72(2), 211–219. <https://doi.org/10.2478/v10184-012-0018-4>

Wahyuningsih, S., Effendi, H., & Wardiatno, Y. (2015). Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system, 8(4), 491–499.

## VIII. APÉNDICE

En esta sección se puede incluir toda la información que se obtuvo a través del trabajo experimental que no es necesario que se presente ya sea en el capítulo de metodología o en el de resultados, pero que al presentarse como apéndice puede ayudar a otros investigadores a realizar otro tipo de análisis o para aclarar dudas en cuanto a la realización de alguna parte del trabajo. Si se emplean cuadros, éstos seguirán el formato que se emplee en los capítulos de metodología o de resultados. Algunas veces cuando se trata de trabajos de tesis, en esta sección el investigador incluye algunos ejemplos de cómo realizó algunos cálculos y que le podrán ser de utilidad en el futuro como referencia.

En este apéndice se presentarán algunas de las abreviaturas más comunes de revistas científicas (Tabla 0-1) así como otras abreviaturas de uso frecuente en Español (Tabla 0-2).

**Tabla 0-1** Abreviatura de algunas revistas científicas

Acta Agric. Scand.	Can. J. Anim. Sci.	Lipids
Acta Endocrinol.	Can. J. Res. Sect. D Zool. Sci	Livest. Prod. Sci.
Adv. Appl. Microbiol.	Cell	Meat Sci.
Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.	Cereal Chem	Metabolism
Adv. Genet.	Clin. Toxicol.	Methods Enzymol
Adv. Lipid Res.	Comp. Biochem. Physiol.	Mol. Cell Endocrinol.
Adv. Protein Chem.	Domest. Anim. Endocrinol.	N. Engl. J. Med.
Agric. Eng.	Endocrinology	N.Z. J. Agric. Res.
Agron. J.	Eur. Assoc. Anim. Prod. Publ.	Nature (Lond)
Am. J. Anat.	Fed. Proc.	Nature (Paris)
Am. J. Clin. Nutr.	Feedstuffs.	Neth. J. Agric. Res.
Am. J. Clin. Pathol.	Fertil. Steril.	Neuroendocrinology
Am. J. Hum. Genet.	Feed Res.	Nutr. Abstr. Rev.
Am. J. Obstet. Gynecol.	Food Technol.	Nutr. Metab.
Am. J. Pathol.	Gastroenterology	Nutr. Rep. Int.
Am. J. Physiol	Genetics	Nutr. Res.
Am. J. Vet. Res.	Growth	Obstet. Gynecol.
Anal. Biochem.	Gut	Pharmacol. Rev.
Anal. Chem.	Horm. Behav.	Physiol. Rev.
Anim. Behav.	Immunology	Pig News Info
Anim. Breed. Abstr.	Infect. Immun.	Poult. Sci
Anim. Feed Sci. Technol.	Ir. J. Agric. Res.	Proc. N.Z. Grassl. Assoc.
Anim. Prod.	J. Agric. Food Chem.	Proc. Nutr. Soc.
Ann. Hum. Genet.	J. Agric. Sci	Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.
Annu. Rev. Biochem.	J. Am. Oil Chem. Soc.	Proc. Soc. Exp. Biol. Med.
Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol	J. Am. Vet. Med. Assoc.	Q.J. Exp. Physiol.
Annu. Rev. Physiol.	J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.	Recent Prog. Horm. Res.
Antibiot. Chemother. (Basel)	J. Anim. Sci.	Residue Rev.
Antibiot. Chemother. (Washington, DC)	J. Assoc. Off. Anal. Chem.	S. Afr. J. Anim. Sci.
Appl. Environ. Microbiol.	J. Br. Grassl. Soc.	Sci. Agric.
Appl. Microbiol.	J. Clin. Endocrinol & Metab.	Science (Washington, DC)
Arch. Biochem. Biophys.	J. Dairy Sci.	Steroids
Aust. J. Agric. Res.	J. Food Compos. Anal.	Theor. Appl Genet.
Aust. J. Biol. Sci.	J. Gen. Physiol.	Theriogenology
Aust. J. Exp. Agric. Anim. Hub.	J. Hered.	Toxicol. Appl. Pharmacol.
Biochem. J.	J. Nutr.	Trans. Am. Soc. Agric. Eng.
Biochemistry	J. Nutr. Biochem.	Vet. Rec.
Biochim. Biophys. Acta	J. Physiol (Lond.)	Vet. Res. Commun.
Biol. Reprod.	J. Physiol. (Paris)	Vitam. Horm
Biometrics	J. Range Manage.	World Anim. Rev.
Biometrika	J. Reprod. Fertil	Z. Tierz. Zuechtungsbiol.
Blood	J. Sci. Food. Agric.	Zentralbl. Veterinaermed. Reihe A
Br. J. Nutr.	Journ. Rech. Porcine Fr.	Veterinaermed. Reihe A

**Tabla 0-2** Abreviaturas de empleo común en español

A	Amperio	etc.	etcétera
Á	Angström	EV	electronvoltio
a. C.	antes de Cristo	Estr.	estratigrafía
a.l.	años luz	F	faradio
Ac.	Acústica	°F	grado Fahrenheit
Aeron.	Aeronáutica	f.c.e.m.	fuerza contra-electromotriz
Agr.	Agricultura	f.e.m.	fuerza electromotriz
Álg.	Álgebra	Farmacol.	farmacología
An.mat	análisis matemático	fig.	figura
Anat.	Anatomía	Fís. gral.	física general
Anat.comp.	Anatomía comparada	Fisiol.	fisiología
Antr.	antropología	Fisiol. an.	fisiología animal
Arit.	aritmética	Fisiol.gral.	fisiología general
Arm.	armamento	Fisiol. veg.	fisiología vegetal
Arq.	arquitectura	Fitosoc.	fitosociología
Art.gr.	artes gráficas	Fot.	fotografía
Art. y of.	artes y oficios	G	gramo
Astr.	astronomía	Genét.	genética
Astron.	astronáutica	Geod.	geodinámica
Atm.	atmósfera	Geof.	geofísica
Atom.	atomística	Geogr.	geografía
Biol. gral.	biología general	Geol.gral.	geología general
Bioq.	bioquímica	Geol.hist.	geología histórica
Bot.des.	botánica descriptiva	Geom.	geometría
Bot. sist.	botánica sistemática	Geoq.	geoquímica
Brom.	bromatología	GeV	gigaelectronvoltio
C	centígrado (s)	CHz	gigahertz

°C	grado centígrado	H	hora
c.a.	corriente alterna	Ha	hectárea
cal	caloría	Ha	hectárea (s)
Cal	kilocaloría	Hb	hemoglobina
c.d.g.	centro de gravedad	Histol.an.	histología animal
cg	centigramo	Histol.veg.	histología vegetal
Cin.	cinematografía	HP	caballo de fuerza
Cir.	cirugía	Hz	hertz
Citol.	citología	Ind.	industria
cl	centilitro	Ind. alim.	industria alimentaria
cm	centímetro	Ing. gral.	ingeniería general
Const.	construcción	J	joule (s)
Crist.	cristalografía	°K	grado Kelvin
d. C.	después de Cristo	Kcal	kilocaloría
d.d.p.	Diferencia de potencial	KeV	kiloelectronvoltio
Diag.	Diagnóstico	kg.	kilogramo
Dib.	Dibujo	KHz	kilohertz
E.	Este	Km	kilómetro
Ecol.	Ecología	km <sup>2</sup>	kilómetro cuadrado
Edaf.	Edafología	km <sup>3</sup>	kilómetro cúbico
Electrón.	Electrónica	Kp	kilopondio
Electrot.	Electrotecnia	Kpm	kilopondímetro
Embriol.	Embriología	Kw	kilowatio
Entom.	entomología	Kwh	kilowatio hora
Est.	estadística	L	litro
lat.	latitud	Pat.	patología
Ln	logaritmo neperiano	Pat. veg.	patología vegetal
log	logaritmo base 10	Petr.	petrografía
log <sub>a</sub>	logaritmo base a	Petroq.	petroquímica
mw	miliwatio	Ppm	partes por millón

Mw	megawatio	Protoz.	protozoología
mμ	Milimicra	Psic.	psicología
N.	Norte	Psiq.	psiquiatría
n.a.	Número atómico	Qm	quintal métrico
NE.	Nordeste	Quím.an.	química analítica
ng	nanogramo (s)	Quím.apl.	química aplicada
m	metro	Quím.fís.	química física
m <sup>2</sup>	metro cuadrado	Quím.gral.	química general
m <sup>3</sup>	metro cúbico	Quím.inorg.	química inorgánica
MA	megaamperio	Quím.org.	química orgánica
Mar.	marina	r.p.m.	revoluciones por minuto
Mastoz.	mastozoología	r.p.s.	revoluciones por segundo
mb	milibar	S.	Sur
Mcal	megacaloría (s)	SE.	Sudeste
Mec.	mecánica	Seg	segundo
Mec.apl.	mecánica aplicada	SO.	Sudoeste
Met.	metalurgia	Tecnol.	tecnología
Meteor.	meteorología	Tect.	tectónica
Metrol.	metrología	Terap.	terapéutica
MeV	megaelectrovoltio	Termol.	termología
mg	miligramo	Tm	tonelada métrica
MHz	megahertz	TND	total de nutrientes digestibles
Microb.	microbiología	Top.	topografía y geodesia
min.	minuto	Torr	torricelli (mmHg)
Min.	minería	Trig.	trigonometría
MJ	megajoule (s)	UI	unidades internacionales
ml	mililitro (s)	V	voltio
mm	milímetro	Vet.	veterinaria
Morf.veg.	morfología vegetal	vol.	volumen

msnm	metros sobre el nivel del mar	Vs	versus
mV	milivoltio	W	watio
MV	megavoltio	Zool.gral.	zoología general
n.m.	número de masa	$\mu$	micra
NO.	Noroeste	$\mu\text{g}$	microgramo (s)
Un	nanomicra	$\mu\text{m}$	micrómetro (s) (micras(s))
O.	Oeste	$\mu\text{l}$	microlitro (s)
Ocean.	oceanografía	$\Omega$	ohmio
Ópt.	óptica	o' " , ,	grados, minutos y segundos de arco
p	página	%	tanto por ciento
pp	páginas	$\text{‰}$	tanto por mil
p.a.	peso atómico	→	véase
p.e.	peso específico		
p.eb.	punto de ebullición		
p. ej.	por ejemplo		
p.f.	punto de fusión		
p.mol.	peso molecular		
Paleont.	paleontología		
Parasit.	parasitología		