



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESCALADO DE UN SISTEMA DE
RECIRCULACIÓN DE AGUA CON CAPACIDAD
DE 8000 LITROS PARA EL CULTIVO DE PECES
*SYMPHYSODON DISCUS***

Mariana Montoya Naranjo

Jhoan David Reina Gil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Programa de Bioingeniería

Medellín, Colombia

2021



**ESCALADO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA
CON CAPACIDAD DE 8000 LITROS PARA EL CULTIVO DE PECES
*SYMPHYSODON DISCUS***

Mariana Montoya Naranjo

Jhoan David Reina Gil

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Bioingeniero(a)

Asesores:

Ana María Torres López

Ingeniera Química, M. Sc. en Ingeniería, Ph. D

César Augusto Vásquez Ruiz

Ingeniero Químico, M. Sc. en Ingeniería

Línea de Investigación:

Biotecnología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Programa de Bioingeniería

Medellín, Colombia

2021

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	2
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Acuicultura y piscicultura	4
2.1.1 Piscicultura ornamental en Colombia.....	4
2.2 Calidad de agua	5
2.2.1. Peces discos y requerimientos de calidad de agua	5
2.3 Ciclo del nitrógeno.....	6
2.4 Métodos de medición	7
2.4.1 Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS)	7
2.4.2 Método del electrodo selectivo.....	8
2.4.3 Cromatografía de iones	8
2.5 Sistema de recirculación de agua (RAS).....	9
2.5.1 Remoción de sólidos	9
2.5.2 Filtración biológica.....	10
2.5.3 Filtración química.....	12
2.5.4 Desgasificación y aireación/oxigenación	12
2.5.5 Sistema de circulación.....	14
3. ANTECEDENTES	15
4. METODOLOGÍA.....	17

4.1 Implementación de un sistema RAS de 150 L.....	17
4.1.1 Determinación de biomasa para un volumen de 150 L.....	17
4.1.2 Construcción del prototipo de sistemas RAS de 150 L.....	17
4.2 Evaluación experimental de los sustratos del filtro biológico	20
4.2.1. Inoculación de bacterias e incorporación de biomasa.....	21
4.2.2. Protocolo de alimentación y cambio de agua.....	22
4.2.3. Determinación de NAT, nitritos y nitratos.....	22
4.3 Dimensionamiento de un sistema hidráulico para prototipo RAS de 8000 L. 24	
4.3.1 Dimensionamiento del biofiltro.....	25
4.3.2 Aireador.....	27
4.3.3 Dimensionamiento de la red de distribución y selección de bomba	30
5. RESULTADOS	37
5.1 Implementación de un sistema RAS de 150 L.....	37
5.2 Evaluación experimental de los sustratos del filtro biológico	39
5.3 Dimensionamiento de sistema hidráulico para prototipo RAS de 8000 L.....	44
5.3.1 Dimensionamiento del biofiltro.....	45
5.3.2 Dimensionamiento del aireador.....	46
5.3.3 Selección de difusores	46
5.3.4 Selección de la bomba y dimensionamiento de la red de distribución.....	47
6. CONCLUSIONES.....	58
7. REFERENCIAS	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua en un RAS.	6
Tabla 2. Composición nutricional del alimento Tetra Color	25
Tabla 3. Especificaciones para sistema RAS de 150 L	37
Tabla 4. Dimensiones del tanque del sistema RAS de 150 L	37
Tabla 5. Concentración de nitratos con ambos sustratos medida con el Test Kit	44
Tabla 6. Cálculo de la biomasa del sistema RAS de 8000 L	45
Tabla 7. Área requerida para el biofiltro y volumen necesario de sustrato	45
Tabla 8. Caudal de aire requerido y demanda de oxígeno.....	46
Tabla 9. Configuración propuesta de difusores	47
Tabla 10. Distribución de caudales y número de Reynolds en la ruta crítica.....	48
Tabla 11. Pérdidas de energía en ruta crítica	48
Tabla 12. Cabezas de presión ajustadas y caudales de salida a los tanques tipo1....	50
Tabla 13. Cabezas de presión ajustadas y caudales de salida a los tanques tipo 2...	51
Tabla 14. Valores de cabeza de presión en los nodos.....	53
Tabla 15. Caudales para los tanques tipo 2.....	54
Tabla 16. Caudales para los tanques tipo 2.....	55
Tabla 17. Resumen de componentes del sistema de distribución.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del nitrógeno.....	7
Figura 2. Arreglo de guatas como filtro mecánico.....	10
Figura 3. Comportamiento de la concentración de NAT, nitritos y nitratos en el tiempo	11
Figura 4. Filtración mecánica, biológica y química	12
Figura 5. Sistema de filtración implementado por Soto.....	15
Figura 6. Materiales para el filtro mecánico.....	18
Figura 7. (a) sustrato Xport NO ₃ (b) sustrato biopellet.....	19
Figura 8. Cultivo de peces disco en sistema RAS 150 L	21
Figura 9. Escala de medición del Test Kit.....	22
Figura 10. Curva para la selección del aireador de la empresa	29
Figura 11. Distribución de tanques en diseño a escala de 8000 L para sistema RAS	31
Figura 12. Curva característica de la bomba marca HIDROMAC.....	35
Figura 13. Dimensiones del tanque de cultivo del prototipo de sistema RAS de 150L.....	38
Figura 14. (a) sistema de filtración con sustrato Xport NO ₃ (b) sistema de filtración con sustrato biopellets.....	38
Figura 15. Concentración media de NAT durante la evaluación del sustrato Xport NO ₃	40
Figura 16. Concentración media de NAT durante la evaluación del sustrato Biopellets.....	40
Figura 17. Concentración media de nitritos durante la evaluación del sustrato Xport NO ₃ ..	41
Figura 18. Concentración media de nitritos durante la evaluación del sustrato Biopellets....	42
Figura 19. Concentración media de nitratos durante la evaluación de los sustratos Xport NO ₃ y Biopellets.....	43
Figura 20. Ruta crítica seleccionada en el sistema de tuberías.....	47
Figura 21. Simulación en Epanet de la red de distribución.....	52

GLOSARIO

Acuario: es un tanque u otro recipiente adecuado donde se pueden mantener peces u otros organismos acuáticos (FAO, 2021).

Acuicultura: cultivo de organismos acuáticos en áreas continentales o costeras, que implica por un lado la intervención en el proceso de crianza para mejorar la producción y por el otro la propiedad individual o empresarial del stock cultivado (FAO, 2021).

Filtro: dispositivo poroso para extraer impurezas o material particulado de los fluidos (FAO, 2021).

Biofiltro: componente de las unidades de tratamiento de un sistema de cultivo, donde tiene lugar la extracción de la materia orgánica y donde son convertidos (en general por oxidación) los subproductos metabólicos disueltos como resultado de la actividad microbiológica. Los procesos más importantes son la degradación de materia orgánica mediante bacterias heterotróficas y la oxidación de los amoníacos que pasan de nitritos a nitratos (FAO, 2021).

NAT: todo el nitrógeno que existe como ion amonio (NH_4^+) o en el equilibrio (Sawyer, 2001).

RAS: por sus siglas en inglés *Recirculating Aquaculture System*. Sistema de cultivo total o parcialmente cerrado, en el cual el agua evacuada del sistema se trata de manera tal que pueda ser reutilizada (FAO, 2021).

Tramos: secciones de tubería entre nodos en la red de distribución de agua.

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Definición	Unidades
%PC	Porcentaje de peso corporal	
kg proteína /día	Kilogramos de proteína al día	kg/día
g N/día	Gramos de nitrógeno al día	g/día
g NAT/día	Gramos de nitrógeno amoniacal total al día	g/día
g NAT/m²	Gramos de NAT por metro cuadrado de sustrato	g/m ²
CFM	Pies cúbicos por minuto	CFM
DO₂	Demanda de oxígeno	kg
E.A.	Eficiencia de aireación	
rpm	Revoluciones por minuto	rpm
Tanque tipo 1		cm
Tanque tipo 2		cm
T1	Tanque filtro	
T2 a T21	Tanques tipo 1	
T22 a T41	Tanques tipo 2	
Re	Número de Reynolds	
H	Altura de columna de agua	m
G	Gravedad	m/s ²
$\frac{P}{\gamma}$	Cabeza de presión	m
Z	Cabeza de elevación	m
$\frac{v^2}{2g}$	Cabeza de velocidad	m
h_w	Cabeza de energía ganada	m
h_{Lij}	Cabeza de energía pérdida desde el punto i hasta el j	m

V_{ij}	Velocidad del fluido entre el nodo i y el nodo j	m/s
D_{ij}	Diámetro interno de la tubería entre el nodo i y el nodo j	m
ν	Viscosidad cinemática del fluido	m ² /s
ϵ	Rugosidad	mm
D_{ij}	Diámetro interno de la tubería entre el nodo i y el nodo j	m
Re_{ij}	Número de Reynolds en el tramo de tubería entre el nodo i y el nodo j	
K_{ij}	Coefficiente de resistencia del nodo i al nodo j	
f_{Tij}	Factor de fricción en zona de completa turbulencia entre el nodo i y el nodo j	
$\frac{L_{e_{ij}}}{D_{ij}}$	Longitud equivalente entre el nodo i y el nodo j	m
P	Presión atmosférica	Pa
P_v	Presión de vapor del agua	Pa
Z_{succ}	Altura de succión	m
$h_{L_{succ}}$	Cabeza de energía perdida en la succión	m
γ	Peso específico del agua	N/m ³
FD	Factor de dilución	
N	Número de peces	
pp	Peso promedio de peces	kg
dc	Densidad de cultivo	kg/m ³
V	Volumen de agua	m ³
AbsNAT	Absorbancia de NAT	
AbsNO₂	Absorbancia de nitritos	
Abs220nm	Absorbancia de nitratos y materia orgánica a 220nm	
Abs275nm	Absorbancia de materia orgánica a 275nm	

FD	Factor de dilución	
C_{NAT}	Concentración de NAT	mg/L
C_{NO₂}	Concentración de nitritos	mg/L
C_{NO₃}	Concentración de nitratos	mg/L
Alimento	Cantidad de alimento a suministrar al día	kg
Biomasa	Peso vivo	kg

RESUMEN

Un sistema de recirculación de agua en acuicultura (RAS) es una tecnología implementada para intensificar los cultivos; y entre las principales ventajas de su implementación se encuentran el ahorro de agua y un mejor control de los parámetros de calidad de agua en términos de la concentración de nitrógeno amoniacal total (NAT), nitritos (NO_2), nitratos (NO_3).

En el presente trabajo se implementaron tres sistemas RAS de 150 L para el cultivo de la especie *Symphysodon discus* y se evaluaron dos tipos de sustratos como biofiltros: Xport NO_3 y *biopellets*, por un período de 10 días. Con el objetivo de conocer el comportamiento del prototipo propuesto en cuanto a producción de nitrógeno amoniacal total (NAT), nitritos y nitratos se determinó experimentalmente la concentración de estos empleando un método cualitativo (Test Kit API) y por espectrofotometría UV-vis. Se encontró que el sustrato Xport NO_3 presentó mejor desempeño como biofiltro, debido a que la concentración de NAT y nitritos se mantuvo en niveles inferiores a los alcanzados al emplear los *biopellets*. La concentración de NAT fue de 0.08 mg/L, la de nitritos de 0.05 mg/L y en nitratos se obtuvieron concentraciones hasta 10 mg/L al día 10 del cultivo. Dichos resultados se encuentran dentro de los rangos reportados en acuicultura, para el NAT concentraciones menores a 0.2 mg/L, nitritos valores menores a 0.3 mg/L, y para nitratos concentraciones no mayores a 50 mg/L. Finalmente, con base en los resultados experimentales obtenidos se realizó el escalado del sistema RAS propuesto para una capacidad total de 8000 litros. El diseño teórico estuvo fundamentado en el modelado del flujo de agua a través de un sistema de redes de tuberías ramificadas con múltiples salidas, basado en la ecuación general de energía. La solución de las ecuaciones matemáticas se realizó en Excel y la herramienta Solve. Los resultados obtenidos analíticamente fueron comparados con la simulación realizada en el software libre para la simulación de redes y distribución de flujo de tuberías Epanet, lo que validó que la metodología empleada fue adecuada para el dimensionamiento hidráulico del sistema RAS de 8000 L.

En el desarrollo del presente trabajo se cumplió satisfactoriamente con la implementación de un prototipo RAS de 150 L y el dimensionamiento de un sistema RAS

de 8000 L, cumpliendo con los requerimientos técnicos exigidos para el cultivo de peces *Symphysodon discus*.

Palabras clave: sistema RAS, peces disco, biofiltro, diseño hidráulico

ABSTRACT

An aquaculture water recirculation system (RAS) is a technology implemented to intensify crops; and among the main advantages of its implementation are the saving of water and a better control of the water quality parameters respect to the concentration of total ammonia nitrogen (NAT), nitrites (NO_2), nitrates (NO_3).

In the present work, three 150 L RAS systems were implemented for the cultivation of the *Symphysodon discus* species and two types of substrates were evaluated as biofilters: Xport NO_3 and biopellets, for a period of 10 days. In order to know the behavior of the proposed prototype in terms of production of total ammonia nitrogen (NAT), nitrites and nitrates, the concentration of these was experimentally determined using a qualitative method (API Test Kit) and by UV-vis spectrophotometry. It was found that the Xport NO_3 substrate presented better performance as a biofilter, because the concentration of NAT and nitrites remained at levels lower than those reached when using the biofilters. The concentration of NAT was 0.08 mg/L, that of nitrites 0.05 mg/L and in nitrates concentrations up to 10 mg/L were obtained on day 10 of the culture. These results are within the ranges reported in aquaculture, for NAT concentrations less than 0.2 mg/L, nitrite values less than 0.3 mg/L, and for nitrates concentrations not greater than 50 mg/L. Finally, based on the experimental results obtained, the proposed RAS system was scaled for a total capacity of 8000 liters. The theoretical design was based on the modeling of the water flow through a system of branched pipe networks with multiple outlets, based on the general energy equation. The solution of the mathematical equations was done in Excel and the Solve tool. The analytical results were compared with the simulation carried out in the free software for the simulation of networks and distribution of flow of pipes Epanet, which validated that the methodology used was adequate for the hydraulic dimensioning of the 8000 L RAS system.

In the development of the work, the implementation of a 150 L RAS prototype and the sizing of an 8000 L RAS system were satisfactorily fulfilled, complying with the technical requirements demanded for the culture of *Symphysodon discus* fish.

Keywords: RAS system, discus fish, biofilter, hydraulic design

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La piscicultura es el conjunto de actividades y conocimientos que se ponen en práctica para la reproducción, crianza y engorde de peces ornamentales o de consumo, mediante técnicas adecuadas en ambientes naturales (lagos) o artificiales (estanques o acuarios) y bajo el control de los parámetros de agua requeridos por cada especie (AUNAP, 2014). No obstante, las instalaciones donde se cultivan peces ornamentales tienen cada vez mayores exigencias debido al aumento de la biomasa y a la necesidad de tener un adecuado control de la calidad del agua; convirtiéndose este último, en una variable crítica al momento de realizar el cultivo de peces a gran escala.

Una de las tecnologías de acuicultura más reconocidas y altamente implementada en países como Japón, Estados Unidos, Israel, entre otros, es el sistema de recirculación de agua (RAS). Esta tecnología consiste en recircular agua a través de una red de distribución y un sistema de filtración en continuo, reflejando una disminución en el consumo de agua fresca, un control adecuado de parámetros de calidad del agua, disminución del impacto ambiental, independencia de instalaciones locativas de gran tamaño y conservando en todo momento la calidad del cultivo (Ministerio de Agricultura, 2017).

En Colombia, la tecnología RAS para el cultivo de peces no es comúnmente empleada debido a que requiere un alto costo de inversión inicial y las fluctuaciones del mercado en muchas situaciones no hacen viable el retorno de la inversión en el corto y mediano plazo. Por otro lado, el cultivo tradicional o de sistemas abiertos es ampliamente usado debido a su baja inversión inicial y a la alta disponibilidad de terrenos y fuentes hídricas, no obstante, el método convencional o sistema abierto genera un alto impacto negativo en ecosistemas vitales debido a la alta tasa de contaminantes expulsados a ríos, lagos e incluso mares. (Ministerio de Agricultura, 2017).

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Escalar un sistema de recirculación de agua (RAS) para el cultivo de peces ornamentales de la especie *Symphysodon discus*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema RAS con capacidad de 150 L.
- Evaluar dos tipos de materiales (*biopellets* y Xport NO₃) para el desarrollo de un sistema de filtración biológica.
- Dimensionar el sistema hidráulico para un prototipo RAS de 8000 L.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Acuicultura y piscicultura

La acuicultura se define como el cultivo y la cría de organismos acuáticos bajo condiciones específicas, es un concepto amplio que no solo abarca los peces sino también otras especies como reptiles, anfibios, algas, moluscos, crustáceos, entre otros. La piscicultura es la acuicultura de peces, es decir, es el cultivo de peces bajo condiciones controladas o semicontroladas (Rodríguez, 2007).

Para que una variedad de peces pueda ser cultivada es indispensable conocer requerimientos básicos como el proceso de adaptación al confinamiento, alimentación, crecimiento y reproducción (Rodríguez, 2007).

2.1.1 Piscicultura ornamental en Colombia

La piscicultura en Colombia se practica principalmente con especies cultivadas para el consumo humano, como la cachama, tilapia, trucha; entre otros, mientras que para fines ornamentales el desarrollo es muy limitado debido en gran medida al desconocimiento de la biología y el manejo zootécnico adecuado de las especies, dificultad para lograr la reproducción en cautiverio y a los requerimientos en los altos estándares de calidad de agua (SENA, 2020).

Colombia exporta cada mes 12 toneladas de peces para acuario a destinos como Estados Unidos, Londres, Tokio, Shangai y Beijing, de los cuales el 80% son extraídos de los ríos de las regiones del Orinoco y la Amazonía (Semana, 2019). Países como Malasia, Indonesia y Singapur invierten millones de dólares en investigación y desarrollo de técnicas para la cría de especies foráneas de peces ornamentales, mientras que en nuestro país la inversión en el sector es mínima o nula, propagando el atraso y daño del recurso natural existente (Parada, 2012).

2.2 Calidad de agua

La supervivencia y el correcto crecimiento de los organismos acuáticos depende principalmente de la calidad del agua. En acuicultura los parámetros que tienen mayor relevancia en la preservación de esta son: temperatura, pH, concentración de amonio, nitritos, nitratos, CO_2 , O_2 ; entre otros. Es importante resaltar que los rangos de tolerancia a los parámetros anteriormente mencionados varían según la especie (Feest, 2018).

En un sistema de recirculación (RAS) el manejo de la calidad del agua es fundamental, ya que se trata de un sistema semicerrado o cerrado, donde el recambio de agua es mínimo y las deposiciones son constantemente acumuladas; por lo tanto, si los procesos de tratamientos de agua no son controlados de forma adecuada, pueden ocasionar un deterioro en la calidad del agua, provocando el crecimiento inadecuado de los peces, aumento del estrés, riesgo de enfermedades y en consecuencia pérdidas en el proceso productivo (AUNAP, 2014).

2.2.1. Peces discos y requerimientos de calidad de agua

El pez disco (*Symphysodon*) es un género de pez de la familia de los cíclidos. Es originario de las zonas bajas del río Amazonas y sus afluentes, donde las aguas son lentas, sin fuertes corrientes, pero pobladas de depredadores como las pirañas, por lo que es asustadizo y prefiere las zonas con abundante vegetación, raíces o ramas de árboles sumergidos, que utiliza como refugio (Friese, 2004).

En la Tabla 1 se presentan los niveles adecuados de los parámetros de calidad de agua (Urbano, 2020).

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua en un RAS.

Parámetro	Rango
Temperatura (°C)	(26 - 30) °C
pH	7.0 – 8.0
Amonio total (mg/L)	< 0.2
Nitrito (mg/L)	< 0.3
Nitrato (mg/L)	< 50
Oxígeno (mg/L)	> 4.0

2.3 Ciclo del nitrógeno

Cuando los peces son alimentados, como producto del catabolismo de proteínas se producen compuestos nitrogenados que son excretados por difusión e intercambio iónico a través de las branquias, orina y heces, principalmente en forma de amoníaco no ionizado (NH_3), como se presenta en la etapa 1 y 2 de la Figura 1. El amoníaco en el agua se presenta en dos estados, no ionizado (NH_3) e ionizado (amonio NH_4^+) la concentración de ambos se conoce como nitrógeno amoniacal total (NAT) y está dada en función del pH, temperatura y salinidad del agua (Galli, 2007). Las colonias bacterianas que colonizan el sustrato realizan la oxidación del amoníaco para llevarlo a su estado menos tóxico, el nitrato (NO_3^-), para esto las bacterias nitrificantes en su mayoría *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* se encargan de oxidar el amoníaco para convertirlo en nitritos (NO_2^-), y los nitritos en nitratos (NO_3^-), tal y como se representa en las etapas 3 y 4 de la Figura 1 (Arboleda, 2005). En resumen, las variables que permiten evaluar el desempeño de un medio filtrante son las concentraciones de NAT, NO_2^- y NO_3^- .



*Figura 1. Ciclo del nitrógeno
(Aquazen, 2017)*

2.4 Métodos de medición

A continuación, se presentan algunos métodos para determinar la concentración de compuestos en soluciones:

2.4.1 Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS)

Es una técnica analítica que se encarga de medir la absorción de radiación electromagnética de una sustancia, luego del paso de luz a través de una muestra, existiendo una relación lineal entre la absorbancia y la concentración. Para hacer este tipo de estudios se hace uso de un espectrofotómetro, en el cual se elige una longitud de onda en el rango del ultravioleta y el visible (220 - 550 nm).

Cuando la luz pasa a través de una sustancia coloreada, una parte del rango de las longitudes de onda es absorbida y otra parte es reflejada. Este fenómeno da lugar al color de los cuerpos y es el principio en el que se basa la espectrofotometría UV-VIS (Díaz, 2015).

2.4.2 Método del electrodo selectivo

Los electrodos selectivos son sensibles a la concentración de un ion específico. El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en la diferencia de potencial que se genera en una membrana, que es puesta en contacto con soluciones de diferente concentración del ion. Esta diferencia de potencial permite cuantificar su concentración (González, 2010).

2.4.3 Cromatografía de iones

Es una técnica que permite la separación y determinación de iones según sus propiedades de carga eléctrica y su afinidad por el relleno de una columna cromatográfica. La solución que se inyecta al estudio es llamada “muestra” y los componentes separados individualmente son llamados “analitos” (Rohner, 2018).

Cuando la muestra atraviesa la columna cromatográfica, los iones se separan y son retenidos debido a la interacción que tienen con esta. Una vez separadas, la muestra pasa por un medidor de conductividad, donde registra la señal obtenida respecto al tiempo de retención. Como resultado se obtiene un cromatograma donde la posición de los máximos indica el ion presente y el área del pico indica su concentración (Rohner, 2018).

Las técnicas anteriormente mencionadas son algunas de las que se emplean para hacer estudios de aguas, pero es importante mencionar que los principales problemas que se presentan durante la medición de las variables de desempeño son la presencia de sustancias o partículas

suspendidas que interfieren en la medición, los rangos limitados de concentración dependiendo la técnica usada y la complejidad de algunos procedimientos (Castro, 2017).

2.5 Sistema de recirculación de agua (RAS)

Hoy en día, es una de las tecnologías que permite el cultivo de peces a mayor densidad de cultivo. En los cultivos tipo RAS los parámetros fisicoquímicos del agua son controlados generando bienestar y buen desarrollo de los peces. Su funcionamiento radica en que el agua circula a través del sistema pasando por varias etapas de filtración y solo un pequeño porcentaje de ésta es reemplazado periódicamente (Everis, 2019).

La concentración de desechos orgánicos e inorgánicos producto de la alimentación y metabolismo de los peces hace que la calidad del agua disminuya; por lo tanto, el proceso de filtración y remoción de contaminantes juega un papel fundamental. Este proceso se divide en varias etapas dependiendo del tipo de desecho a eliminar las cuales se exponen a continuación (Jimenez, 2016).

2.5.1 Remoción de sólidos

Consiste en remover desechos o sólidos en el agua como comida o heces. Es la primera etapa del filtro y evita la saturación o taponamiento de las etapas posteriores. El mercado ofrece una gran variedad de materiales y equipos como: tanques tipo tambor, tubos de sedimentación, pantallas, guatas, espumas; entre otros, que pueden ser usados como filtro mecánico. Para arreglos de guatas y espumas lo recomendado es ubicarlas de mayor a menor porosidad, de forma que los sólidos sean capturados progresivamente, como se representa en la Figura 2.

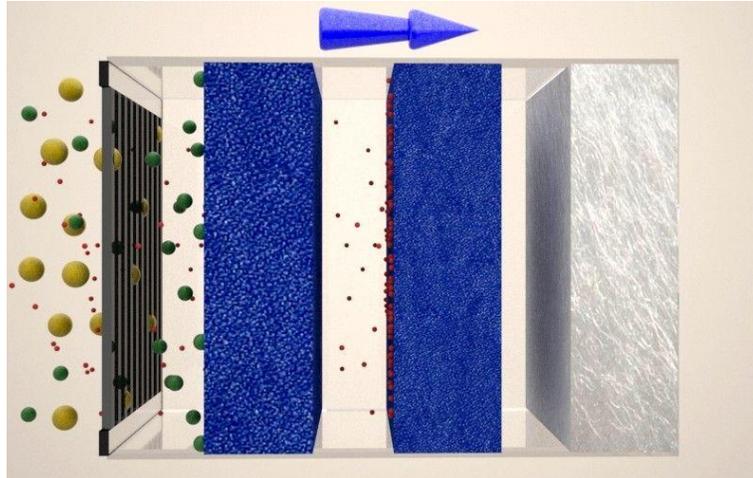


Figura 2. Arreglo de guatas como filtro mecánico

(Cárceles, 2017)

2.5.2 Filtración biológica

Se entiende como filtro biológico al sustrato y a la colonia bacteriana que prolifera en él; estas bacterias transforman el nitrógeno amoniacal total (NAT) en nitritos y finalmente en nitratos. Cuando el sustrato es usado por primera vez es necesario realizar el proceso de ciclado, que consiste en inocular bacterias en el sustrato y esperar a su proliferación o maduración. El proceso de ciclado se da por finalizado una vez la concentración de NAT y nitritos se estabiliza con tendencia a valores de cero. Este proceso es importante ya que el NAT y nitritos son los compuestos que representan mayor toxicidad para la salud y bienestar de los peces. El comportamiento descrito por dichas sustancias se observa en la Figura 3.

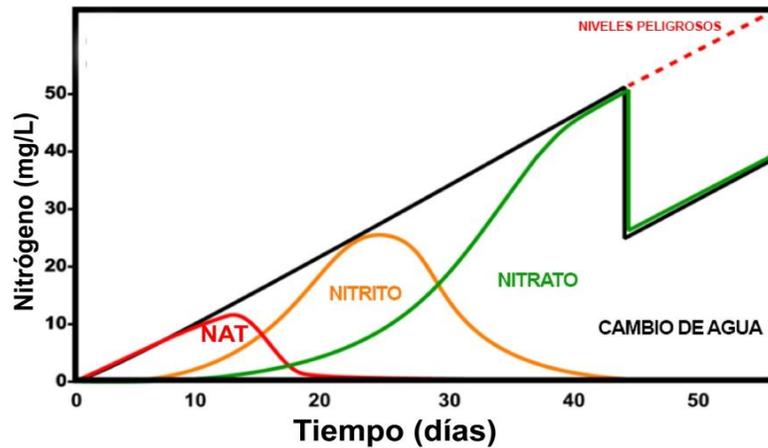


Figura 3. Comportamiento de la concentración de NAT, nitritos y nitratos en el tiempo (Monti, 2015)

Comercialmente, se ofrecen diferentes tipos de sustratos para la filtración biológica, entre los que se encuentran: medio *kaldnes*, microesferas, canutillos, plásticos corrugados, biobolas, biobarriles, lechos fluidizados, sustratos ultraporosos; entre otros. Los sustratos usados para el desarrollo del presente estudio son de tipo microesferas y ultraporosos.

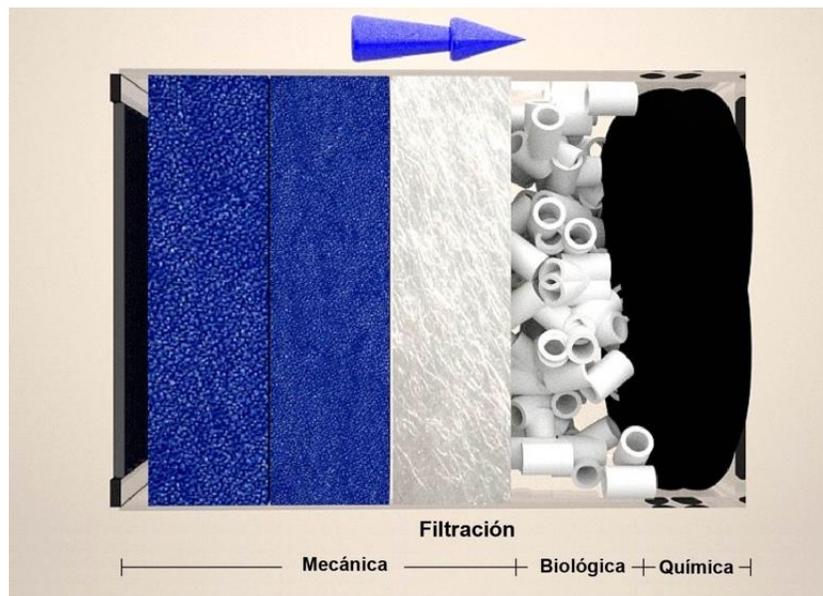
Microesferas: son pequeñas esferas generalmente poliméricas que según su composición sirven como asentamiento para la colonia bacteriana y ocasionalmente, como alimento inicial para las mismas. Su pequeño tamaño permite disponer de una amplia superficie, lo cual es ideal para la proliferación de la flora bacteriana (Galindo, 2015).

Ultraporosos: son materiales generalmente cerámicos altamente porosos que permiten tener mayor área aprovechable en el menor volumen posible y de esta forma aumentar el asentamiento de colonias bacterianas con un máximo de aprovechamiento del espacio requerido para la etapa de filtración biológica (Galindo, 2015).

2.5.3 Filtración química

Esta etapa consiste en la remoción de iones, metales pesados y medicamentos en el agua que pueden afectar la salud y bienestar de los peces. El mercado ofrece materiales porosos como el carbón activo o resinas de intercambio iónico (Infante, 2017).

En la Figura 4 se representa esquemáticamente las etapas de filtración: mecánica (espumas), biológica (canutillos) y química (carbón activo).



*Figura 4. Filtración mecánica, biológica y química
(Cárceles, 2017)*

2.5.4 Desgasificación y aireación/oxigenación

El proceso de desgasificación del agua en el cultivo de peces se debe a dos fenómenos: el intercambio de oxígeno de los peces a través de sus branquias y la nitrificación bacteriana. La

respiración de los peces genera como subproducto el aumento en la concentración de CO₂; por otro lado, como resultado de la desnitrificación se libera nitrógeno gaseoso (N₂). Estos gases deben ser retirados del sistema antes de ingresar de nuevo a los tanques de cultivo ya que pueden ser perjudiciales para la salud de los peces. Este proceso es conocido como desgasificación y se lleva a cabo al mismo tiempo que el agua es oxigenada mediante la aireación.

Cuando el agua está en contacto con el aire, los gases disueltos en el agua tienden a equilibrarse con las presiones parciales de los gases en la atmósfera. Los factores que influyen en la velocidad de transferencia de un gas son el área de la interfaz gas-líquido, la diferencia entre la concentración (presión parcial) en la atmósfera y la concentración existente del gas en el agua (Timmons, 2002).

La velocidad total de transferencia de gas depende de la concentración del gas disuelto y de una constante de proporcionalidad o coeficiente de transferencia de gas, que representa las condiciones en un sistema de transferencia de gas específico. Este término incluye el coeficiente de difusión del gas, el espesor de la película líquida y el área de la interfaz gas-líquido (Timmons, 2002).

Los aireadores y compresores son las fuentes de aire más usadas en acuicultura. Sus principales diferencias son los requisitos de presión y el volumen de descarga. Los aireadores administran grandes volúmenes de aire a baja presión, mientras que los compresores suministran pequeños volúmenes de aire a alta presión. Al especificar el tipo de fuente de aire, es necesario determinar dos parámetros de diseño: la presión y el volumen de aire requeridos. La presión de funcionamiento está determinada por la presión del agua a superar a la profundidad del difusor, las pérdidas por fricción de la tubería y la resistencia del difusor a los flujos de aire. Para una aplicación típica de piedras aireadoras en un tanque poco profundo (1 m), la presión del agua es aproximadamente de 13800 a 20700 Pa. Es importante tener en cuenta que en tanques más profundos o con difusores que requieren presiones más altas; es decir, aquellos con burbujas más pequeñas o poros obstruidos, este valor podría ser considerablemente mayor (Timmons, 2002).

2.5.5 Sistema de circulación

En acuicultura la recirculación del agua se realiza por medio de bombas hidráulicas las cuales permiten llevar el agua a un nivel más alto; también, incrementar la presión en el sistema para hacer posible la filtración y aireación.

En la actualidad el mercado ofrece una gran variedad de bombas con diferentes características, siendo las más utilizadas en los sistemas de recirculación a pequeña escala las bombas centrífugas autoaspirantes, con prefiltro incorporado, destinadas a mover grandes cantidades de agua (Huerta, 2017).

3. ANTECEDENTES

En los últimos años, los sistemas RAS se han destacado en el cultivo de peces ornamentales. Las ventajas competitivas respecto a los cultivos intensivos tradicionales han motivado un estudio más profundo de los cultivos RAS. En este sentido, áreas de la ingeniería como la mecánica de fluidos se ha vuelto una fuerte aliada de la acuicultura y la zootécnica, principalmente. Las investigaciones recientes se han enfocado en la convergencia de estudios de diversos materiales para la construcción de sistemas RAS y la incorporación de tecnologías de automatización del cultivo. En el año 2010, la propuesta presentada por Soto (Soto, 2010) se orientó en el desarrollo de un prototipo de sistema RAS con un colector de sedimento integrado. Este último consiste en un filtro de grava y arena, un biofiltro y un aclarador. El colector de sedimentos y el filtro de grava y arena son un filtro mecánico para atrapar sólidos y partículas suspendidas en el agua impidiendo de esta manera la saturación por altas concentraciones de materia orgánica en el biofiltro. El sustrato del biofiltro fue realizado con trozos de tubería de PVC y en este se fijaron las bacterias nitrificantes. Finalmente, el aclarador contiene carbón activado y un módulo de esterilización ultravioleta. El sistema de filtración diseñado y construido por Soto se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5. Sistema de filtración implementado por Soto

(Soto, 2010)

El sistema RAS fue probado en un ciclo de producción de tilapia con duración de siete meses. Los resultados obtenidos con respecto a la producción fueron menores en 8.5%; además, se logró un ahorro de agua de 95% comparado con el sistema carente de RAS.

Por otro lado, Valenzuela y colaboradores (Valenzuela et al., 2018) realizaron una evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en la producción de tilapia roja. El objetivo fue analizar el comportamiento de los parámetros de la calidad del agua, como potencial de hidrógeno, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio total, demanda bioquímica y química de oxígeno. El sistema RAS estuvo compuesto por un tanque de 500 L, dos filtros de arena, 20 biobolas, y dos bombas de 60 W. Los peces se alimentaron tres veces al día con el 2% de su peso promedio, durante 3 meses. Con el sistema implementado se logró un ahorro de agua en un 98% comparado con los sistemas de cultivo tradicionales; además, se identificó que la maduración del sistema se logró cuando el nitrógeno amoniacal total (NAT) se mantuvo en valores menores a 0.2 mg/L, siendo un rango adecuado para el cultivo de peces. La eficiencia de remoción del filtro para remover turbiedad fue de 71.49%, para amonio 66.67% y para nitritos 25.7%.

4. METODOLOGÍA

4.1 Implementación de un sistema RAS de 150 L

A continuación, se describe la metodología seguida para implementar un sistema RAS de 150 L, por triplicado.

4.1.1 Determinación de biomasa para un volumen de 150 L

De acuerdo con las recomendaciones del criadero de peces *Fishart Discus*, ubicado en la ciudad de Medellín y quien proporcionó los insumos e información técnica necesaria para el desarrollo del presente estudio; propone una densidad de cultivo adecuada para la especie *Symphysodon discus* de 6.67 kg/m³ y un peso promedio por pez adulto de 100 g. La cantidad de peces que se pueden alojar en el prototipo de 150 L estará definida por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{dc * V}{pp} \quad (1)$$

dc: densidad de cultivo

V: volumen de agua

pp: peso promedio por pez

4.1.2 Construcción del prototipo de sistemas RAS de 150 L

De acuerdo con los criterios expresados en la sección 2.6 donde se abarcaron los diferentes aspectos relacionados con el proceso de filtración, el prototipo de 150 L se diseñó con las siguientes etapas: filtración mecánica, filtración biológica y filtración química. La disposición de cada una de estas etapas obedece al sentido del flujo en la que debe disponerse el fluido de tal manera que la primera etapa sea la mecánica, luego la biológica y por último la química. Para la

adecuada circulación del agua a tratar por cada una de estas etapas de filtración fue requerida una unidad de bombeo.

Se diseñó el sistema para que el agua ingresara por el compartimento del filtro mecánico, y una vez inundado por rebose pasa al filtro biológico y del mismo modo al filtro químico y finalmente al compartimento que aloja la bomba, la cual hace recircular el agua al tanque donde están los peces.

4.1.2.1. Selección de materiales para el filtro mecánico

El filtro mecánico fue elaborado en guata y espuma de fibras de poliamida debido a que son materiales de bajo costo, fácil adquisición y sencilla limpieza. El filtro la conforman tres capas de diferentes porosidades cada una para aumentar la capacidad de retención de sólidos. Finalmente, se empleó una malla plástica para soportar los materiales y facilitar la circulación del agua. En la Figura 6 se presentan los materiales que conforman el filtro mecánico.



Figura 6. Materiales para el filtro mecánico

4.1.2.2. Selección de materiales para el filtro biológico

Los sustratos seleccionados para la construcción del filtro biológico de los tres sistemas RAS de 150 L son: Xport NO₃ de la marca *Brightwell Aquatics* y *biopellets*. Estos materiales se eligieron debido a que el primero es un material comercial que destaca por su alta porosidad y que puede permanecer húmedo durante días, permitiendo que las bacterias sigan siendo viables después de una falla del sistema (ICA, 2019); por otra parte, los biopellets son un material genérico de fácil adquisición y de tipo microesferas, que por su pequeño tamaño ofrece una gran superficie para el asentamiento de colonias bacterianas. En la Figura 7 se presentan ambos modelos de sustratos para filtros biológicos.

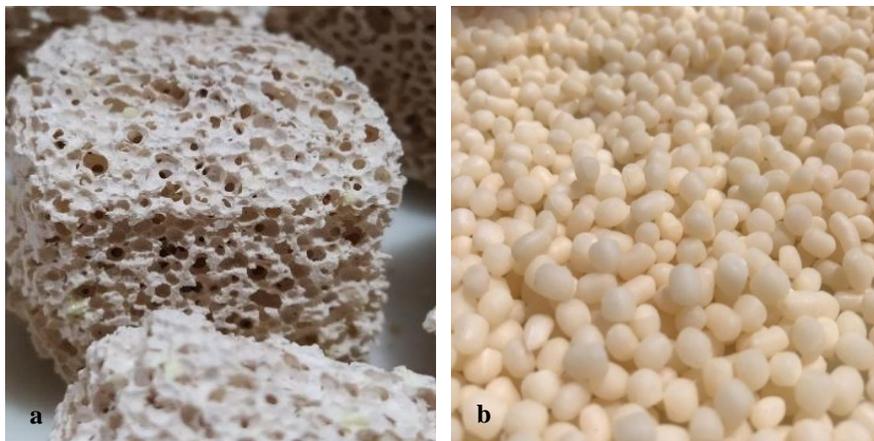


Figura 7. (a) sustrato Xport NO₃ (b) sustrato biopellet.

Para determinar la cantidad adecuada de Xport NO₃ se revisó la ficha técnica del producto y se determinó que para 150 L de agua son requeridos 200 g de sustrato. Este mismo criterio fue empleado con los *biopellets*.

4.1.2.3. Selección de material para el filtro químico

Para la fabricación del filtro químico se emplearon 200 g de carbón activo en cada sistema, se eligió este material por su excelente superficie de filtración y por su gran capacidad de absorción y retención de productos químicos y contaminantes en el agua (Infante, 2017).

4.1.2.4. Sistema de bombeo

En literatura se reporta que por lo general un sistema RAS debe ser capaz de recircular el volumen total de agua de 1.5 a 3 veces (Timmons, 2002), así que se seleccionó la bomba comercial de acuario que más se ajustó a los requerimientos, una sp1100L marca Resun de 8 W para un caudal de 500 L/h (Resun, s.f.).

4.2 Evaluación experimental de los sustratos del filtro biológico

Para que en el sistema RAS no haya acumulación de compuestos nitrogenados tóxicos que impidan el correcto desarrollo de los peces, es importante hacer una buena elección del sustrato ya que, dependiendo de sus características, como la porosidad, rugosidad, tipo de material, entre otros; permitirá la proliferación de bacterias nitrificantes que favorecerán la oxidación de estos compuestos a formas menos tóxicas como el nitrato.

A continuación, se describe la metodología realizada en el laboratorio para la evaluación de Xport NO₃ y de *biopellets* como sustratos para el filtro biológico.

4.2.1. Inoculación de bacterias e incorporación de biomasa

Se realizó la inoculación de bacterias nitrificantes a cada sustrato por inmersión en Quick Start (API, s.f.) durante 48 horas, siendo este un medio líquido que contiene cepas de bacterias nitrificantes como *nitrosomonas* y *nitrobacter*. Luego se dio inicio al proceso de maduración, que es cuando crece de forma progresiva la colonia bacteriana en el sustrato de estudio. Pero, al no tener un biofiltro maduro los peces podrían estar expuestos a niveles tóxicos de NAT y nitritos; así que, por seguridad, inicialmente se incorporó el 30% de la biomasa durante 4 semanas. Posteriormente se incorporó el total de la biomasa para iniciar la toma de muestras una vez el filtro biológico alcanzó la maduración, esto se verificó cuando la concentración de nitritos y nitratos registraron valores cercanos a 0 mg/L.

A continuación, se presentan los peces empleados para el presente estudio en un sistema RAS de 150 L en funcionamiento, luego de finalizar la etapa de maduración y empezar la toma de muestras.



Figura 8. Cultivo de peces disco en sistema RAS 150 L

4.2.2. Protocolo de alimentación y cambio de agua

Durante la maduración del sistema y la toma de muestras, se implementó un protocolo de alimentación diario, correspondiente al 3% de la biomasa, con el concentrado comercial Tetra Color (Tetra, s.f.). El estudio se realizó por 10 días, donde transcurridos 5 días de la toma de muestras se reemplazó el 10% del volumen de agua del sistema por agua fresca, y se realizó la limpieza del filtro mecánico.

4.2.3. Determinación de NAT, nitritos y nitratos

La determinación de la concentración de NAT, nitritos y nitratos se realizó cada 24 horas por dos métodos diferentes: análisis cualitativo por medio de un test rápido y por espectrofotometría UV-VIS, usando el equipo UV/VIS 3200PC MAPADA disponible en el laboratorio de Biomateriales de la Universidad de Antioquia. En la figura 9 se presenta la escala cualitativa de medición de parámetros del Test Kit de la marca API.

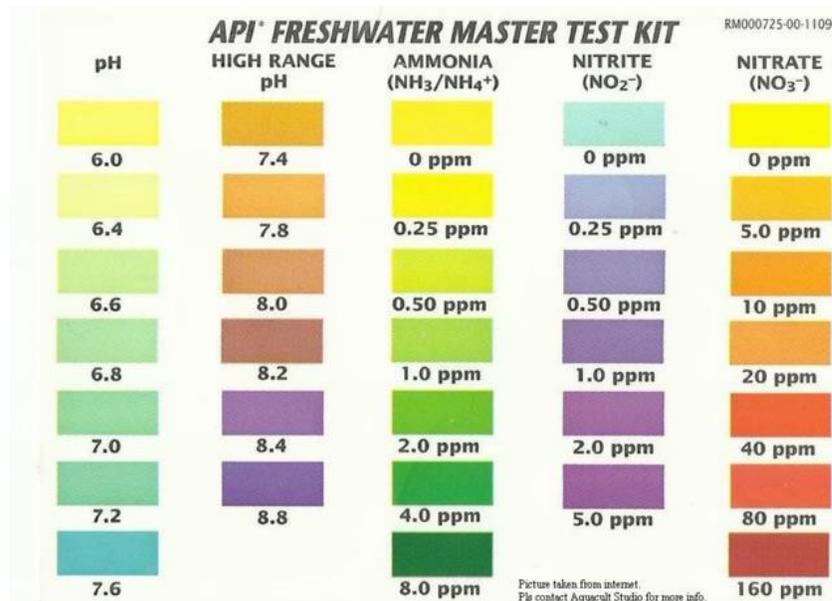


Figura 9. Escala de medición del Test Kit

(API, s.f.)

4.2.3.1. Determinación cuantitativa de NAT, nitritos y nitratos por espectrofotometría UV- Vis

La determinación cuantitativa de NAT, nitritos y nitratos se realizó con base en el método estipulado por el laboratorio de Calidad Ambiental y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (IDEAM, 2007) (IDEAM, 2009).

Para realizar las mediciones en este equipo se siguieron las guías publicadas por el IDEAM y realizadas por el grupo de laboratorio de Calidad Ambiental y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (IDEAM, 2007) (IDEAM, 2009). Allí se detallan los reactivos necesarios, el procedimiento para la preparación de las soluciones estándares para la curva de calibración y el procedimiento para la toma de muestras, medición de absorbancia y cálculo de concentración.

La absorbancia del NAT fue medida a una longitud de onda de 410 nm y su concentración se determinó a partir de ecuación (2).

$$C_{NAT} = (AbsNAT - 0.0002) * \frac{1}{0.1691} \quad (2)$$

AbsNAT: absorbancia del NAT

Para la concentración de nitritos se empleó una longitud de onda de 543 nm.

$$C_{NO_2} = (AbsNO_2 - 0.0002) * \frac{1}{0.8535} \quad (3)$$

FD: factor de dilución

AbsNO₂: absorbancia nitritos

La concentración de nitratos se realizó a dos longitudes de onda: 220 nm y 275 nm. Debido a que la materia orgánica disuelta también puede absorber a 220 nm y que el NO₃ no absorbe a 275 nm, se usa una segunda medición a 275 nm para corregir el valor de NO₃. El factor de dilución fue igual a 2.

$$C_{NO_3} = \left(\frac{(Abs_{220nm} - (2 * Abs_{275nm}))}{FD} - 0.000005 \right) * \frac{1}{0.0489} \quad (4)$$

FD: factor de dilución

Abs_{220nm}: absorbancia de los nitratos y materia orgánica a 220nm

Abs_{275nm}: absorbancia de materia orgánica a 275nm

Para el análisis de los resultados obtenidos con el espectrofotómetro, se promediaron los valores de concentración por día y se calculó la desviación estándar con un número de muestras n=3. Ambos métodos fueron comparados y analizados.

4.3 Dimensionamiento de un sistema hidráulico para prototipo RAS de 8000 L

A continuación, se presenta la metodología propuesta para el dimensionamiento teórico de un sistema RAS de 8000 L.

4.3.1 Dimensionamiento del biofiltro

Para dimensionar el biofiltro con el sustrato seleccionado en la evaluación experimental descrita anteriormente, debe calcularse la biomasa total en el momento de mayor carga del sistema y la cantidad de alimento a suministrar, para posteriormente realizar la estimación de área superficial requerida del sustrato y el volumen de este (Timmons, 2002).

4.3.1.1 Cálculo de biomasa y cantidad de alimento

El momento de mayor requerimiento de biofiltración del sistema, es cuando el cultivo alcanza el mayor peso promedio requerido por pez (100 g), se cultiva a la densidad máxima recomendada por el criadero *Fishart Discus* (6.67 kg/m^3) y se suministra la cantidad diaria de alimentación, correspondiente al 3% del peso corporal de los peces.

El alimento a suministrar es Tetra Color (alimento seco), cuya composición se presenta en la Tabla 2 (Tetra, s.f.).

Tabla 2. Composición nutricional del alimento Tetra Color

Contenido nutricional Tetra COLOR	
Proteína cruda mínima	47.5%
Grasa cruda mínima	6.5%
Fibra cruda máxima	2.0%
Humedad máxima	6.0%
Fósforo mín.	1.5
Ácido ascórbico mín.	100 mg/kg

Para determinar la cantidad la biomasa del sistema en kg, se hizo uso de la ecuación 1, y para determinar la cantidad de alimento en kg a suministrar diariamente, se hizo uso de la siguiente ecuación.

$$\text{Alimento} = \%PC * \text{Biomasa} \quad (5)$$

%PC: porcentaje de peso corporal

Biomasa: peso vivo

4.3.1.2 Área superficial y volumen del biofiltro

Acorde al aporte en nutrientes presentado en la Tabla 2 y a la cantidad de alimento calculado, fue posible conocer el valor de proteína proporcionado diariamente al sistema (kg proteína/día) y a partir de este, se determinó la cantidad de nitrógeno suministrado (g N/día), considerando que es aproximadamente el 16% de la proteína; es decir, cada 100 g de proteína contiene 16 g de nitrógeno (Timmons, 2002).

De acuerdo al valor de nitrógeno diario estimado, se consideró que el 50% de este se transforma en NAT (g NAT/día) (Timmons, 2002); para luego, con la obtención del NAT diario que ingresa al sistema y haciendo uso del valor reportado para la tasa de remoción de NAT diaria para un biofiltro de lecho de biomasa fija: 0.14 g NAT/m²día (Pedersen, 2015), se calculó el área superficial requerida por el biofiltro, al dividir el NAT diario ingresado al sistema (g NAT/día) sobre la tasa de remoción de NAT al día (g NAT/m²día) (Timmons, 2002).

Una vez conocida el área superficial el sustrato seleccionado, se procedió a revisar sus especificaciones técnicas para conocer la relación área/volumen y por medio de una regla de tres simple conocer el volumen que ocupará el sustrato en el tanque del biofiltro.

4.3.2 Aireador

El dimensionamiento del aireador debe ser acorde a la demanda de oxígeno del sistema, debe tenerse en cuenta principalmente la demanda del metabolismo de los peces y el requerimiento de oxígeno por parte de las bacterias involucradas en la nitrificación. A continuación, se presenta la metodología planteada para la determinación del oxígeno demandado por el sistema y la selección del aireador.

4.3.2.1 Demanda de oxígeno

Para el dimensionamiento del aireador se debe conocer la demanda de oxígeno que exigirá el sistema en pleno funcionamiento. El primer paso fue calcular el requerimiento de oxígeno disuelto tanto para los peces como para el biofiltro; este es a menudo un parámetro difícil de determinar y debe basarse en el rendimiento del sistema o estimarse a partir de datos de literatura.

Comúnmente, el requerimiento de O_2 para el metabolismo de los peces se estima en 250 g O_2 /kg de alimento, para el biofiltro 140 g de O_2 /kg de alimento. Este valor no incluye el requerimiento de oxígeno para las bacterias heterótrofas, que va desde 140 a 500 g O_2 /kg de alimento; por lo tanto, para efectos prácticos la demanda total de oxígeno es de aproximadamente 0,50 kg de O_2 por cada kg de alimento (Timmons, 2002).

4.3.2.2 Selección del aireador

Para calcular el requerimiento de flujo en CFM (pies cúbicos por minuto) fue necesario conocer el requerimiento de oxígeno y la eficiencia de aireación, y con estos valores es posible conocer el caudal de oxígeno requerido por medio de la siguiente ecuación (Ministerio de Agricultura, 2017) dada en unidades del sistema inglés.

$$Q_{aire} = \frac{DO_2 \left(\frac{\text{libras}}{h} \right)}{1.033 * E.A./100} \quad (6)$$

E.A.: Eficiencia de aireación en fracción a partir de un valor de porcentaje

DO₂: Demanda de oxígeno.

Conociendo el caudal de aire requerido para oxigenar el sistema, teniendo en cuenta que la altura de columna de agua en cada tanque no supera los 50 cm y suponiendo un difusor en el fondo de cada tanque se estimó la presión de columna de agua que requiere vencer el aireador en el sistema. Para ello se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$P = 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * H * g \quad (7)$$

H: altura de columna de agua

g: gravedad

Con los valores de caudal de aire y presión estimados se realizó la selección del aireador a utilizar, se empleó el catálogo de la empresa PENTAIR para seleccionar el equipo (PENTAIR, s.f.)

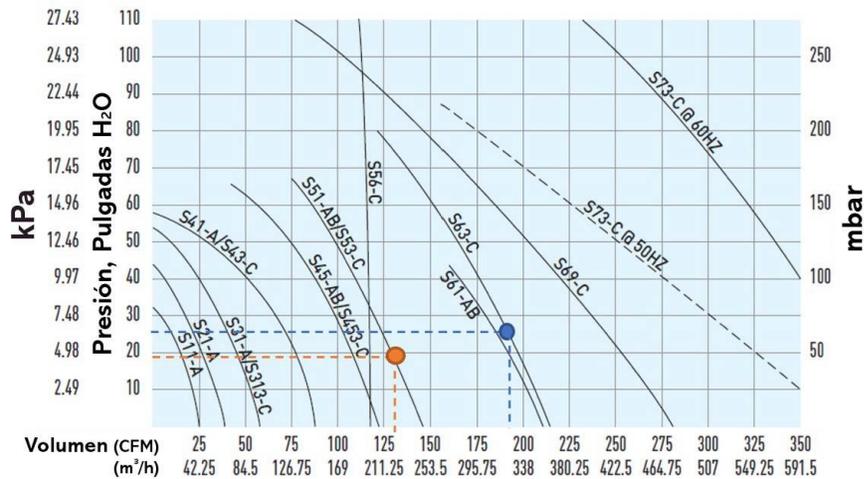


Figura 10. Curva para la selección del aireador de la empresa (PENTAIR, s.f.)

Para seleccionar el aireador se tuvo en cuenta las pérdidas de potencia por altitud sobre el nivel mar, que puede alcanzar el 4% del caudal y potencia del motor cada 300 m.s.n.m. Además, se reporta que en tubería se tiene una pérdida aproximada del 2% cada 4 m de tubería desde el aireador (PENTAIR, s.f.), por lo tanto, conociendo que la altitud de la ciudad de Medellín es de 1495 m.s.n.m y la tubería del conducto de aireación para el sistema en cuestión es de aproximadamente 23.3 m, se tendría una pérdida de potencia y caudal en el aireador de 31.55%. Así entonces, el caudal y la presión requerida se sobredimensionó en 31.55%.

4.3.2.3 Selección difusores

Una vez definido el aireador y conociendo el caudal y la presión de trabajo, fue posible hacer una selección de los difusores en función de la distribución de tanques y del requerimiento de caudal de cada difusor. Para el presente estudio se realizó una selección de difusores en el catálogo comercial de la empresa PENTAIR (PENTAIR, s.f.).

4.3.3 Dimensionamiento de la red de distribución y selección de bomba

Para dimensionar el sistema hidráulico del sistema RAS de 8000 L, se definió una configuración de tanques y un sistema de distribución de agua sobre el cual se realizó un balance de energía para estimar las características de la bomba a seleccionar, en el catálogo comercial de la empresa HIDROMAC (HIDROMAC, 2010).

El caudal requerido por el sistema fue estimado bajo la generalidad de que la bomba debe tener la capacidad de recircular el agua de todo el sistema más de 1.5 veces por hora, esto teniendo en cuenta las pérdidas por fricción que presenta la red la distribución hidráulica (Timmons, 2002). Por tanto, se definió un caudal requerido de 260 L/min para el sistema.

A continuación, se presenta la metodología seguida para dimensionar la red de distribución y seleccionar la bomba.

4.3.3.1. Dimensionamiento de tanques

A continuación, se presenta el diseño a escala de 8000 L del sistema RAS para el cultivo de peces disco. En la Figura 11 se puede apreciar la distribución de tanques propuesta los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

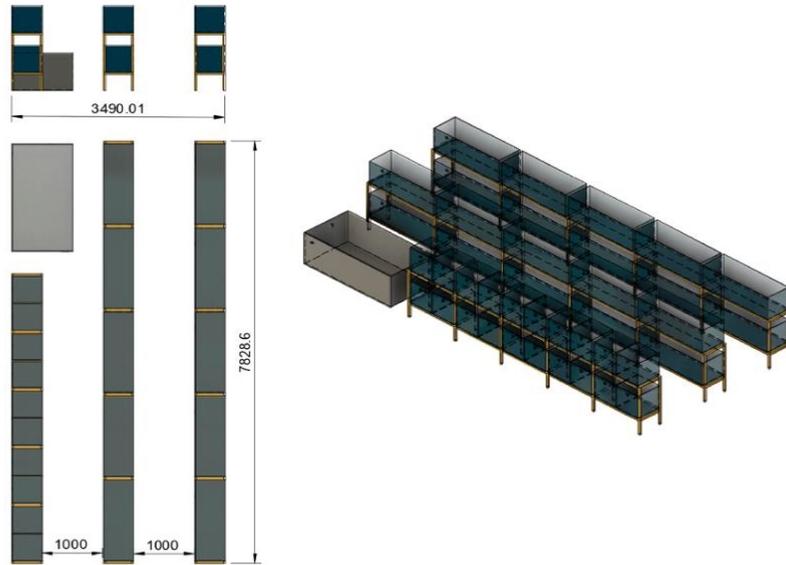


Figura 11. Distribución de tanques en diseño a escala de 8000 L para sistema RAS

El sistema se conforma de 40 tanques, distribuidos en 20 tanques (los cuales llamaremos tipo 1) de 100 L con dimensiones de 50x50x50 cm y 20 tanques rectangulares de 300 L (los cuales llamaremos tipo 2) con dimensiones de 150x50x50 cm. Para fines prácticos a continuación se explica la nomenclatura definida para la designación de los tanques:

T1: corresponde al tanque filtro

T2 a T21: tanques tipo 1 para cultivo de peces

T22 a T41: tanques tipo 2 para cultivo de peces

En total, los 20 tanques tipo 1 permiten almacenar 2000 litros de agua y los tanques tipo 2 6000 litros de agua lo cual permite obtener 8000 litros de agua.

4.3.3.2 Balance de energía

Se determinó una ruta crítica del sistema, entendiéndose esta como la sección de tubería que transporta mayor caudal y las tuberías de mayor recorrido. Posteriormente, se planteó la ecuación general de energía (8) desde el tanque T1 hasta el final de la ruta crítica, teniendo en cuenta la distribución de flujos en cada nodo.

$$\frac{P_i}{\gamma} + Z_i + \frac{V_i^2}{2g} + h_w - h_{L_{ij}} = \frac{P_j}{\gamma} + Z_j + \frac{V_j^2}{2g} \quad (8)$$

$\frac{P}{\gamma}$: cabeza de presión

Z : cabeza de elevación

$\frac{V^2}{2g}$: cabeza de velocidad

h_w : cabeza de energía ganada

$h_{L_{ij}}$: cabeza de energía pérdida desde el punto i hasta el j

4.3.3.3 Estimación de pérdidas de energía

Las pérdidas de energía totales comprenden las pérdidas de carga por fricción en tuberías y las pérdidas menores debidas a la presencia de accesorios, expresadas en la siguiente ecuación.

$$h_{L_{ij}} = h_{f_{ij}} + h_{a_{ij}} \quad (9)$$

$h_{f_{ij}}$: pérdidas por fricción en tubería entre el nodo i y el nodo j

$h_{a_{ij}}$: pérdidas por accesorios entre el nodo i y el nodo j

Para el cálculo de las pérdidas por fricción se hizo uso de la ecuación propuesta por Darcy Weisbach (Rocha, 2007) (10).

$$h_{f_{ij}} = \sum f_{ij} \frac{L_{ij}}{D_{ij}} \frac{V_{ij}^2}{2g} \quad (10)$$

f_{ij} : factor de fricción en tubería del nodo i al nodo j

L_{ij} : longitud de tubería del nodo i al nodo j

V_{ij}^2 : velocidad del fluido entre el nodo i y el nodo j

D_{ij} : diámetro interno de la tubería entre el nodo i y el nodo j

g : gravedad

Para el cálculo del factor de fricción se hizo uso de la ecuación (11) propuesta por Haaland, la cual es válida para régimen de flujo turbulento (Anaya, 2014).

$$f_{ij} = \frac{1}{\left(-1.8 \log \left(\frac{\epsilon/D_{ij}}{3.7} + \frac{6.9}{Re_{ij}} \right)\right)^2} \quad (11)$$

ϵ : rugosidad

D_{ij} : diámetro interno de la tubería entre el nodo i y el nodo j

Re_{ij} : número de Reynolds en el tramo de tubería entre el nodo i y el nodo j

La estimación de pérdidas menores de energía por presencia de accesorios está dada por la ecuación (12) (Ponce, 2006).

$$h_{a_{ij}} = \sum K_{ij} \frac{V_{ij}^2}{2g} \quad (12)$$

K_{ij} : coeficiente de resistencia del nodo i al nodo j

V_{ij}^2 : velocidad del fluido entre el nodo i y el nodo j

g : gravedad

En la ecuación (13) se presenta la expresión matemática para la estimación del coeficiente de resistencia (K) (Ponce, 2006).

$$K_{ij} = f_{Tij} \frac{Le_{ij}}{D_{ij}} \quad (13)$$

f_{Tij} : factor de fricción en zona de completa turbulencia entre el nodo i y el nodo j

$\frac{Le_{ij}}{D_{ij}}$: longitud equivalente entre el nodo i y el nodo j

4.3.3.4 Selección de bomba

Una vez estimada la energía transferida al fluido por la bomba (h_w) a partir del balance de energía (ecuación 6) y considerando el caudal requerido por el sistema (260 L/min), de un catálogo comercial de bombas (HIDROMAC) se seleccionó la bomba que mejor se ajustó a estos requerimientos por medio de la siguiente gráfica.

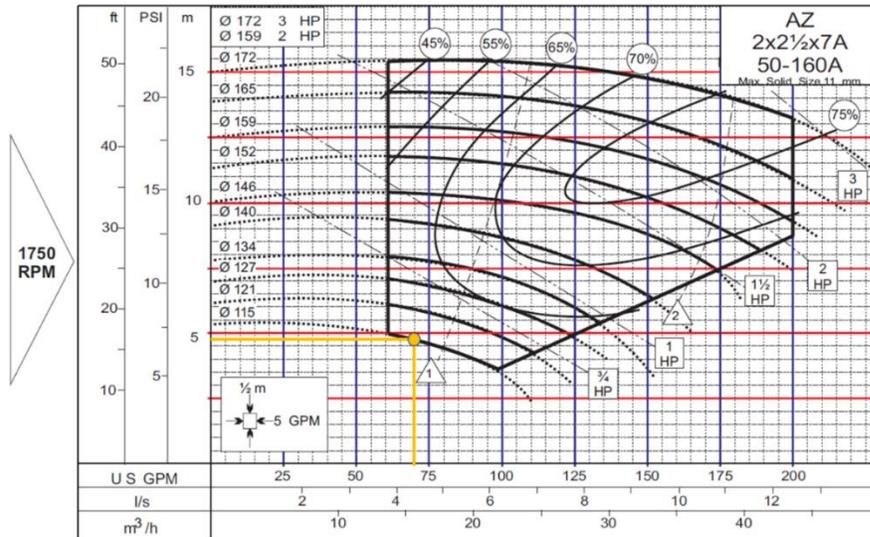


Figura 12. Curva característica de la bomba marca HIDROMAC
(HIDROMAC, 2010)

La ecuación (14) permitió determinar la cabeza neta de succión positiva disponible. El valor de la cabeza neta de succión positiva requerida fue suministrado por el fabricante de la bomba.

$$NPSH_d = \frac{P - P_v}{\gamma} + Z_{succ} - h_{L_{succ}} \quad (14)$$

P : presión atmosférica

P_v : presión de vapor del agua

Z_{succ} : altura de succión

$h_{L_{succ}}$: pérdidas de energía en la succión

γ : peso específico del agua

4.3.3.5 Proceso de iteración y simulación en software Epanet

Luego de seleccionar la bomba y analizar los resultados obtenidos, se realizó un proceso de iteración de una de las variables sobre las que se puede tener control, con el propósito de ajustar el sistema RAS a los requerimientos establecidos de flujo, presión, dimensiones comerciales de tuberías y accesorios. En el proceso de iteración se ajustó la apertura de válvulas por medio de la herramienta Solve de Excel.

Para validar los resultados obtenidos se simuló el sistema de flujo en el software libre Epanet desarrollado por la U.S. *Environmental Protection Agency* (Epanet, s.f.). El software permitió simular el arreglo de tuberías y obtener flujos y presiones.

5. RESULTADOS

5.1 Implementación de un sistema RAS de 150 L

Se construyeron tres sistemas RAS de 150 L. En la tabla 3 se presentan cada una de las especificaciones.

Tabla 3. Especificaciones para sistema RAS de 150 L

Especificación	Cantidad	Descripción
Número de peces	10 peces	Cantidad de peces en 150 L de agua
Filtro mecánico	35 g	Guatas de poliamida
Filtro químico	200 g	Carbón activo
Sustrato Xport NO ₃	200 g	Sustrato estudio para filtro biológico
Sustrato <i>biopellets</i>	200 g	Sustrato estudio para filtro biológico
Bomba	1	Bomba de acuario sp1100L marca Resun de 8 W - 500 L/h

En la tabla 4 se presentan las especificaciones de diseño del tanque de cultivo RAS de 150.

Tabla 4. Dimensiones del tanque del sistema RAS de 150 L

Medida	Longitud [cm]
Largo	110
Ancho	40
Alto	45

Las dimensiones de los compartimentos del sistema se presentan en la Figura 13.

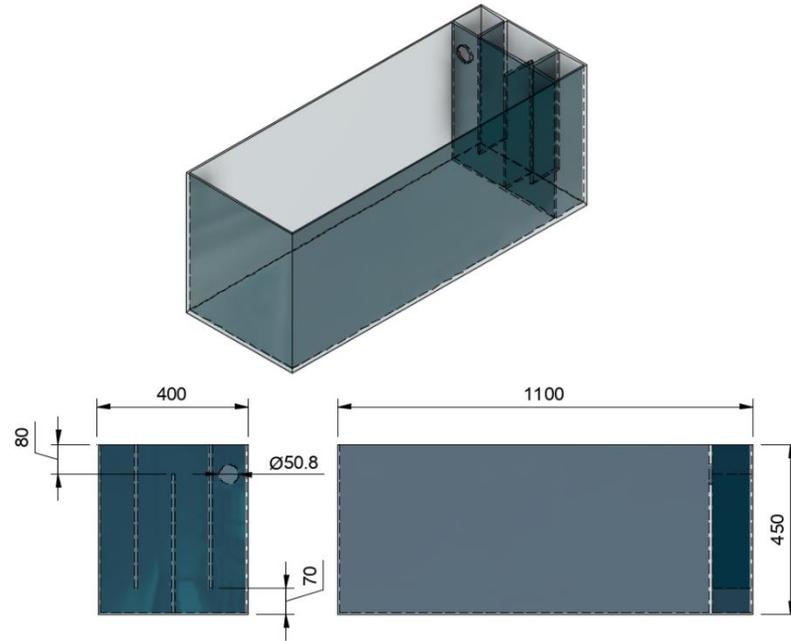


Figura 13. Dimensiones del tanque de cultivo del prototipo de sistema RAS de 150L

En la Figura 14 se presenta el sistema de filtración de los prototipos RAS de 150 L con los sustratos Xport NO₃ y *biopellets*.



Figura 14. (a) sistema de filtración con sustrato Xport NO₃ (b) sistema de filtración con sustrato *biopellets*.

5.2 Evaluación experimental de los sustratos del filtro biológico

La evaluación de los materiales se inició el día 35 de maduración, cuando se verificó que la concentración de NAT y nitritos registraron valores cercanos a 0 mg/L y se evidenció un aumento en la concentración de nitratos. Comportamiento que nos indicó que el filtro ya había madurado.

Los valores medios de la concentración de NAT, medidos por espectrofotometría UV-VIS para ambos sustratos se presentan en las Figuras 15 y 16. Las curvas muestran una leve tendencia a aumentar la concentración en el tiempo ya que los valores para el estudio del Xport NO₃ permanecieron entre 0.077 y 0.087 mg/L durante el tiempo de estudio, es decir el aumento fue de 0.01 mg/L. Para los *biopellets*, los valores oscilaron entre 0.76 y 0.77 mg/L, manteniéndose por encima a los del primer material en 0.68 mg/L. Los resultados experimentales permiten demostrar que la concentración de NAT en el material Xport NO₃ se encuentra dentro del rango de concentraciones permisibles para un sistema de cultivo tipo RAS (valores inferiores a 0.02 mg/L) (Urbano, 2020). Sin embargo, los resultados obtenidos de concentración de NAT para los *biopellets* mostraron una desviación de 0.57 mg/L por encima del rango de concentración permisible para un cultivo tipo RAS.

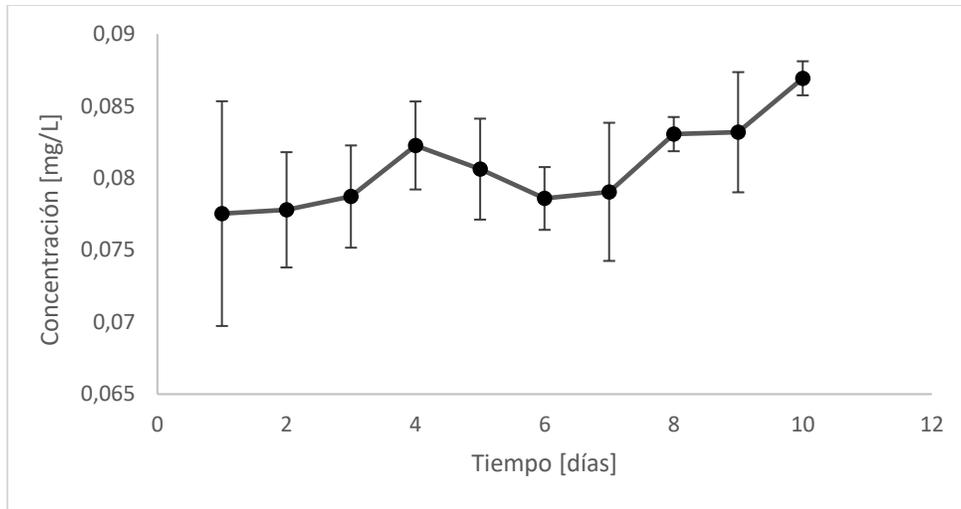


Figura 15. Concentración media de NAT durante la evaluación del sustrato Xport NO₃.

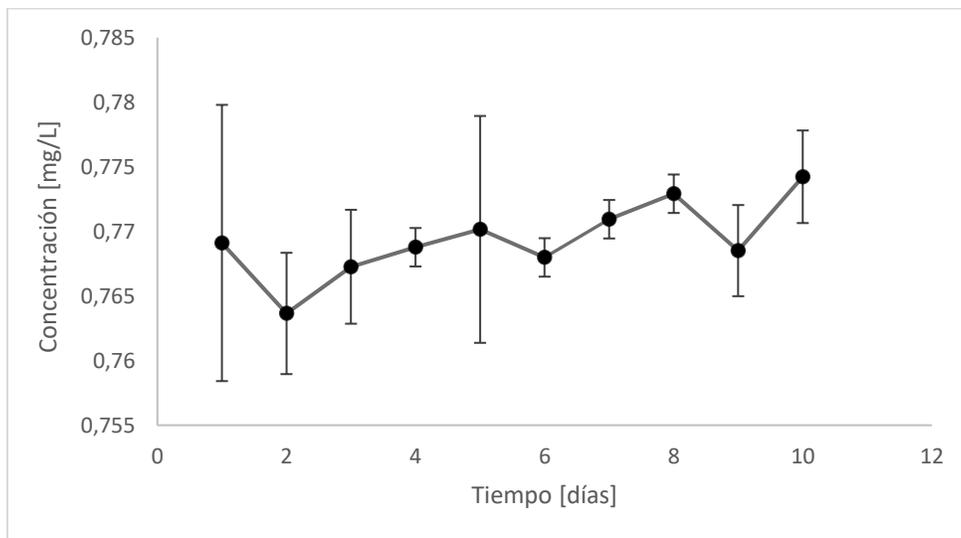


Figura 16. Concentración media de NAT durante la evaluación del sustrato Biopellets

Como se aprecia en las Figuras 17 y 18, la concentración de nitritos tiene un comportamiento similar al del NAT, un mínimo aumento en el tiempo y valores muy cercanos a 0 mg/L. Los valores registrados experimentalmente para el Xport NO₃ se encontraron entre 0.047 y 0.051 mg/L, el cual se encuentra en el rango de concentración de nitritos menores a 0.3 mg/L, siendo valores adecuados para un sistema RAS (Urbano, 2020). La concentración experimental de

nitritos con los biopellets registró valores entre 0.64 y 0.65 mg/L y superó en 0.35 mg/L los valores recomendados para sistemas RAS.

El aumento en la concentración de NAT y nitritos en los *biopellets* pudo deberse a diferencias físicas entre estos materiales. El Xport NO₃ es un material ultraporoso que cuenta con mayor área superficial que los *biopellets*, siendo este último un material sólido y de superficie lisa, este factor pudo influir en el correcto asentamiento y proliferación bacteriana.

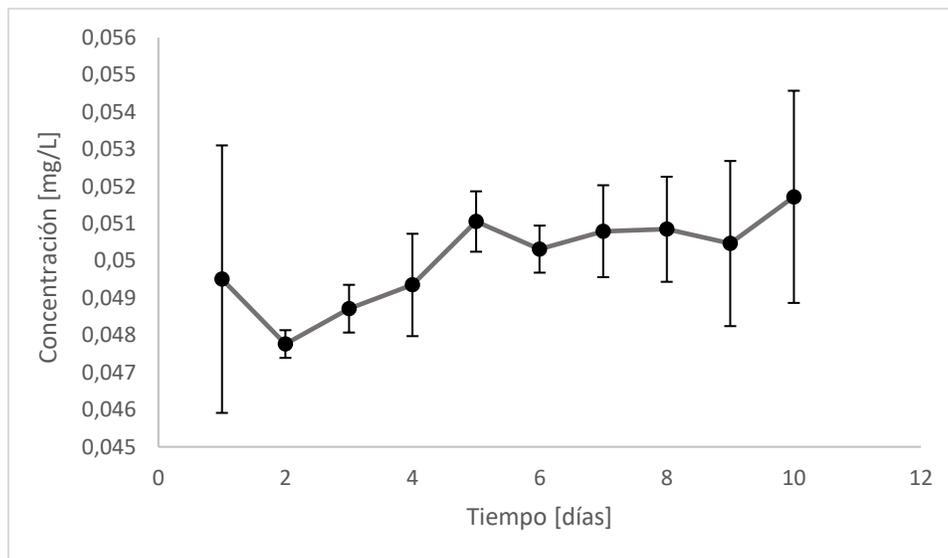


Figura 17. Concentración media de nitritos durante la evaluación del sustrato Xport NO₃

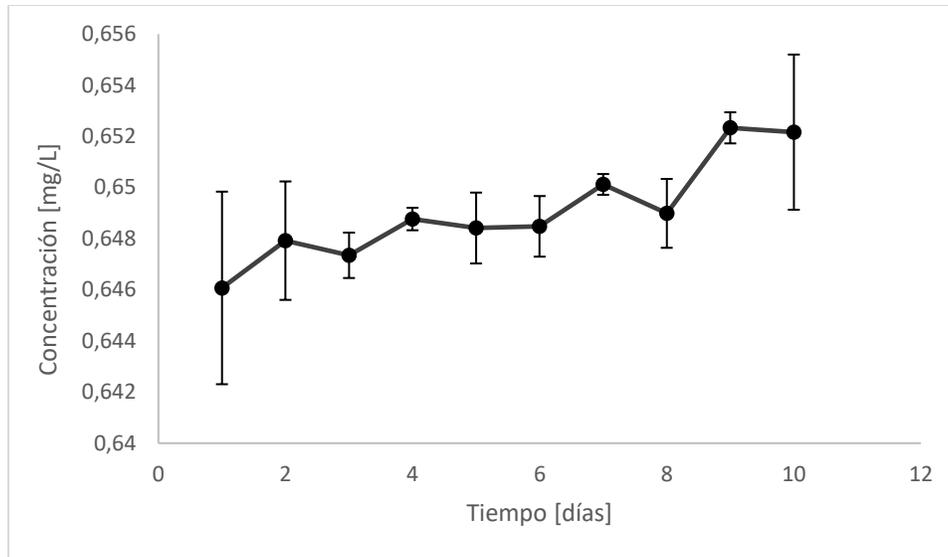


Figura 18. Concentración media de nitritos durante la evaluación del sustrato Biopellets

Los resultados experimentales correspondientes a la evaluación de concentración de nitratos demostraron un aumento para ambos sustratos objeto de estudio. En la evaluación del sustrato Xport NO_3 se determinaron concentraciones entre 2.3 y 12.7 mg/L. Para los *biopellets* la concentración de nitratos fue de 3.5 a 10.2 mg/L. En ambos casos se presentó una disminución de concentración en el día 5, como se muestra en la Figura 19. Este fenómeno de disminución en la concentración de nitratos en ambos sustratos puede estar relacionada con la renovación del agua en el sistema. Las concentraciones obtenidas en ambos materiales están dentro del rango de valores sugerido, menores a 50 mg/L (Urbano, 2020).

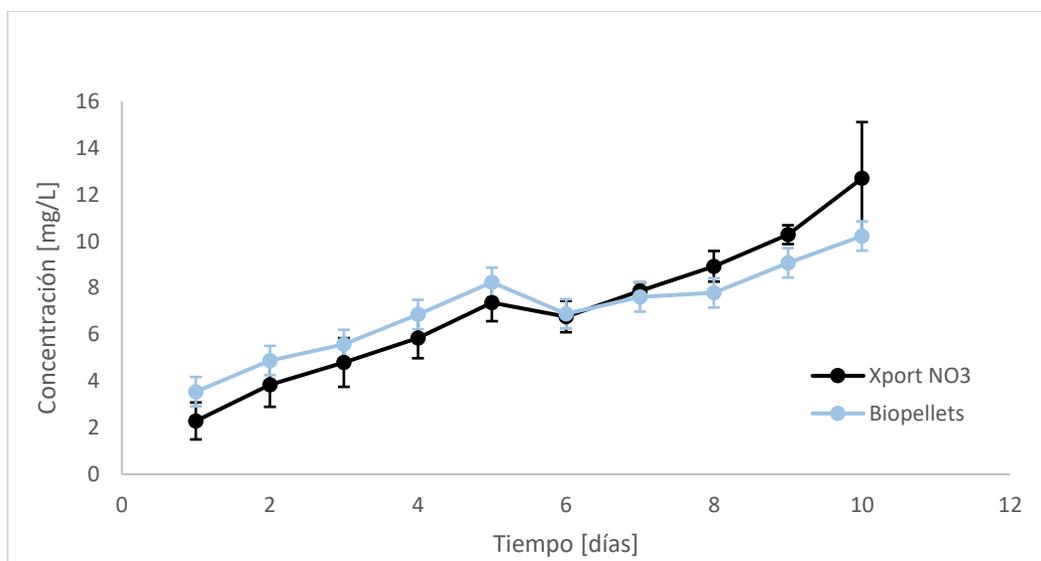


Figura 19. Concentración media de nitratos durante la evaluación de los sustratos Xport NO₃ y Biopellets.

El análisis estadístico realizado a los resultados experimentales correspondientes a las concentraciones de NAT, nitritos y nitratos se representan esquemáticamente con las barras de desviación estándar de las Figuras 15 a 19, para un total de 3 muestras por cada parámetro evaluado ($n = 3$). Debido a la naturaleza de los experimentos realizados, las concentraciones de NAT, nitritos y nitratos se pueden ver ligeramente afectadas debido a que los organismos vivientes presentes generan un factor de no homogeneidad tal y como puede apreciarse en las desviaciones estándar obtenidas a partir de los resultados experimentales.

La determinación de concentración de NAT, nitritos y nitratos empleando el Test Kit de API permitió determinar que la concentración de NAT y nitritos en el material de soporte Xport NO₃ son cercanos a 0 mg/L. Para el caso de las concentraciones de estos parámetros con los *biopellets* se encuentran entre 0.5 y 1 mg/L. Realizando un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por la técnica de espectrofotometría UV-VIS y los del Test Kit se encuentran similitud en los valores de concentración de estos parámetros.

En la Tabla 5 se presenta un análisis comparativo de los resultados de concentración de nitratos, determinados con el Test Kit, para ambos sustratos evaluados. Se puede apreciar un incremento en la concentración de nitratos, de 10 mg/L. Esta concentración se encuentra dentro del rango aceptable de los parámetros de un sistema RAS que corresponde a valores menores de 50 mg/L (Urbano, 2020).

Tabla 5. Concentración de nitratos con ambos sustratos medida con el Test Kit

Concentración de NO ₃ (mg/L)						
Xport NO ₃				Biopellets		
Día	Acuario 1	Acuario 2	Acuario 3	Acuario 1	Acuario 2	Acuario 3
1	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5
2	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5	0 a 5
3	0 a 5	0 a 5	0 a 5	5	5	5
4	5	5	5	5 a 10	5 a 10	5 a 10
5	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10
6	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10
7	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10
8	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10
9	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10

Por lo expuesto anteriormente, se seleccionó el Xport NO₃ como sustrato para el dimensionamiento del biofiltro en el sistema RAS de 8000 L, presentado en la siguiente sección.

5.3 Dimensionamiento de sistema hidráulico para prototipo RAS de 8000 L

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el dimensionamiento hidráulico de un sistema RAS de 8000 L.

5.3.1 Dimensionamiento del biofiltro

En la Tabla 6 se presentan los resultados correspondientes a la estimación de la cantidad de biomasa requerida en el sistema RAS de 8000 L.

Tabla 6. Cálculo de la biomasa del sistema RAS de 8000 L

Biomasa	
Número de peces levante	350
Número de peces en parejas	40
Peso promedio levante (g)	90
Peso promedio parejas (g)	100
Total biomasa (kg)	35.5

En la tabla 7 se presentan los resultados de los parámetros estimados para determinar el área del biofiltro y el volumen del sustrato.

Tabla 7. Área requerida para el biofiltro y volumen necesario de sustrato

Área requerida para el biofiltro	
Alimento 3% * biomasa (kg alimento/día)	1.065
Proteínas diarias (kg proteína/día)	0.506
Nitrógeno diario (kg nitrógeno/día)	0.081
Nitrógeno amoniacal total diario (g NAT/día)	40.470
Tasa remoción NAT del biofiltro (g NAT/m ² * día)	0.14
Área requerida para el biofiltro (m ²)	289.07
Volumen del sustrato para el biofiltro	
Volumen del sustrato Xport NO ₃ (L)	43.825

5.3.2 Dimensionamiento del aireador

En la Tabla 8 se presentan los resultados correspondientes al caudal de aire requerido en función de la demanda de oxígeno.

Tabla 8. Caudal de aire requerido y demanda de oxígeno

Demanda de oxígeno (Kg O_2 /día)	17.75
Qaire requerido (CFM)	131.259
Qaire requerido (m^3/h)	223.010
Presión requerida (kPa)	4.9
Qaire ajustado (CFM)	192.176
Qaire ajustado (m^3/h)	326.515
Presión ajustada (kPa)	7.16

De acuerdo con los criterios de selección de aireadores explicados en la sección 4.3.2.2 correspondiente a la metodología, se determinó que es necesario un aireador de 3.5 Hp de potencia el cual corresponde a un equipo de la serie S63-C de la empresa PENTAIR.

5.3.3 Selección de difusores

Dado que se requiere inyectar 131.259 CFM de caudal de aire, se explora el catálogo de la empresa PENTAIR (PENTAIR, s.f.) de donde se obtiene el difusor de referencia AS30L que tiene un requerimiento de 1 CFM, por lo que para satisfacer el sistema se requieren 131 piedras difusoras. De acuerdo con los requerimientos técnicos de los difusores, a continuación, se presentan las cantidades de difusores necesarias para cumplir con las necesidades del sistema RAS de 8000 L.

Tabla 9. Configuración propuesta de difusores

Configuración de difusores	Cantidad de difusores
Tanques tipo 1	20
Tanques tipo 2	80
Tanque filtro	31
Total	131

5.3.4 Selección de la bomba y dimensionamiento de la red de distribución

A continuación, se presenta el diseño de la red de tubería y abastecimiento de agua para cada uno de los tanques que componen el sistema RAS de 8000 L. En la figura 20 se encuentran especificados los nodos donde la línea roja representa la tubería de abastecimiento (ruta crítica) y las líneas azules representan las líneas secundarias y de distribución a cada tanque.

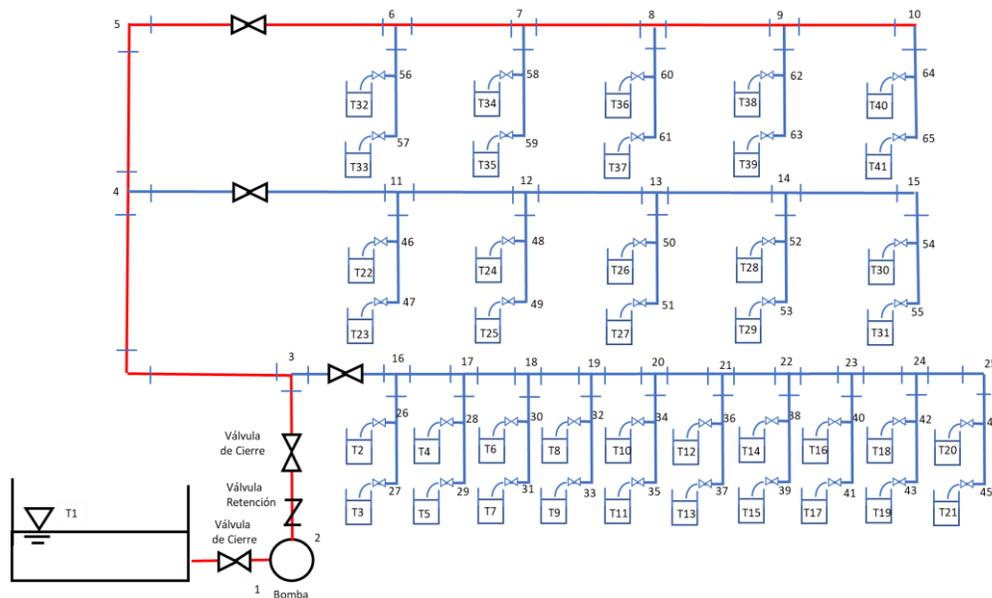


Figura 20. Ruta crítica seleccionada en el sistema de tuberías

En la tabla 10 se presenta un resumen de los caudales estimados en cada uno de los tramos de tubería que componen la red de suministro hidráulico para el sistema RAS de 8000 L.

Tabla 10. Distribución de caudales y número de Reynolds en la ruta crítica

Caudales por tramos	Caudales		Velocidad		Tipo de flujo
	L/mín	m ³ /s	(m/s)	Re	
QT1-2	260	4.33E-03	2.041	125649.66	Turbulento
Q2-3	260	4.33E-03	1.431	105193.65	Turbulento
Q3-4	200	3.33E-03	1.101	80918.20	Turbulento
Q4-5	100	1.67E-03	0.550	40459.10	Turbulento
Q5-6	100	1.67E-03	0.550	40459.10	Turbulento
Q6-7	80	1.33E-03	0.440	32367.28	Turbulento
Q7-8	60	1.00E-03	0.330	24275.46	Turbulento
Q8-9	40	6.67E-04	0.220	16183.64	Turbulento
Q9-10	20	3.33E-04	0.110	8091.82	Turbulento

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las pérdidas de energía por fricción, pérdidas menores, y totales, en la ruta crítica.

Tabla 11. Pérdidas de energía en ruta crítica

Tramos	$h_{f_{ij}}$ (m)	$h_{a_{ij}}$ (m)	$h_{L_{ij}}$ (m)
T1-2	0.070	0.229	0.299
2-3	0.050	1.787	1.836
3-4	0.063	0.058	0.121
4-5	0.008	0.010	0.018
5-6	0.005	0.721	0.726
6-7	0.006	0.005	0.010
7-8	0.003	0.003	0.006
8-9	0.002	0.001	0.003
9-10	0.001	0.001	0.001

Con los resultados anteriores se estimó la cabeza de energía ganada (h_w) bajo las restricciones de flujo anteriormente mencionadas, dando por resultado un $h_w = 4.73 \text{ m}$. Por lo tanto, la bomba a seleccionar debe ofrecer un caudal de 260 L/min (equivalente a 68.68 gal/min) y una cabeza de 4.73 m. De acuerdo con los criterios de selección de bombas explicados en la sección 5.3.4 correspondiente a la metodología, se determinó que el sistema hidráulico del sistema RAS de 8000 L requiere una bomba de tipo centrífuga autoaspirante de $\frac{1}{2}$ Hp. De acuerdo con la carta de bombas de la marca HIDROMAC, este equipo corresponde a una bomba de la serie AZ de 2X2 1/2X7 y un $NPSH_r = 1 \text{ m}$.

Con la bomba seleccionada y el $NPSH_r$ entregado por el fabricante se estimó la $NPSH_d$, dando por resultado un $NPSH_d = 10.1 \text{ m}$, cumpliendo que $NPSH_d > NPSH_r$; con lo cual se garantiza que no se producirá el fenómeno de cavitación al interior de la bomba.

Estas bombas funcionan por autocebado y deben ser llenadas con líquido antes de la puesta en marcha. Una vez esté en funcionamiento, la bomba introduce aire o gas por la tubería de aspiración debido a la presión negativa que genera el impulsor, este aire es mezclado con el líquido y la fuerza centrífuga impulsa la mezcla hacia la cámara de cebado, donde esta pierde velocidad y el aire escapa por la tubería de impulsión. Una vez todo el aire ha sido expulsado, la bomba está cebada y funciona como una bomba centrífuga (Marchegiani, 2004).

A continuación, en las tablas 12 y 13 se presentan los resultados obtenidos en el proceso de iteración para la estimación de cabezas de presión y caudales de salida en cada uno de los tanques tipo 1.

Tabla 12. Cabezas de presión ajustadas y caudales de salida a los tanques tipo I.

Tanque	P_t/γ Iterado(m)	P_t/γ Requerido (m)	Q (L/min)
T2	0.454	0.459	3.93
T3	0.454	0.459	3.93
T4	0.454	0.457	3.59
T5	0.454	0.457	3.59
T6	0.454	0.456	3.29
T7	0.454	0.456	3.29
T8	0.454	0.454	3.06
T9	0.454	0.454	3.06
T10	0.454	0.453	2.88
T11	0.454	0.453	2.88
T12	0.454	0.453	2.77
T13	0.454	0.453	2.77
T14	0.454	0.453	2.71
T15	0.454	0.453	2.71
T16	0.454	0.453	2.69
T17	0.454	0.453	2.69
T18	0.454	0.453	2.69
T19	0.454	0.453	2.69
T20	0.454	0.453	2.70
T21	0.454	0.453	2.70

Tabla 13. Cabezas de presión ajustadas y caudales de salida a los tanques tipo 2.

Tanque	P_t/γ Iterado (m)	P_t/γ Requerido (m)	Q (L/min) promedio
T22	0.5000	0.504	10.25
T23	0.5000	0.504	10.25
T24	0.5000	0.500	9.97
T25	0.5000	0.500	9.97
T26	0.5000	0.498	9.86
T27	0.5000	0.498	9.86
T28	0.5000	0.498	9.87
T29	0.5000	0.498	9.87
T30	0.5000	0.498	9.91
T31	0.5000	0.498	9.91
T32	0.470	0.476	10.35
T33	0.470	0.476	10.35
T34	0.470	0.471	10.08
T35	0.470	0.471	10.08
T36	0.470	0.469	9.97
T37	0.470	0.469	9.97
T38	0.470	0.470	9.97
T39	0.470	0.470	9.97
T40	0.470	0.470	10.02
T41	0.470	0.470	10.02

Dando como resultado una apertura de 16.28° para una válvula tipo mariposa de $\frac{1}{2}$ pulgada para los tanques tipo 1 superiores. Una apertura de 13.4° para una válvula tipo mariposa de $\frac{1}{2}$ pulgada, para los tanques tipo 1 inferiores. Mientras que para los tanques tipo 2 superiores se encontró una apertura de 38% con válvula tipo compuerta de $\frac{1}{2}$ pulgada y para los tanques tipo 2 inferiores una apertura de 23% para el mismo tipo de válvula.

Como resultado de la simulación se obtuvo el arreglo presentado en la Figura 21, en la cual se presentan los caudales en las líneas y las cabezas de presión en los nodos.

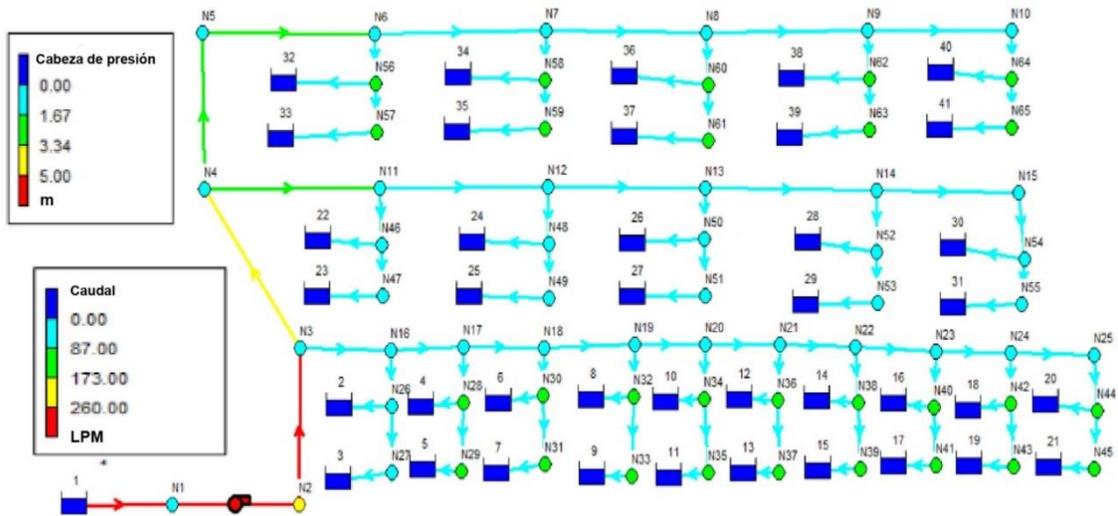


Figura 21. Simulación en Epanet de la red de distribución.

En la Tabla 14 se muestran los resultados calculados y simulados para las cabezas de presión en los nodos principales y el error asociado. Se observa que, para la mayoría de los nodos, la diferencia entre el valor de la presión obtenida con el método analítico y por simulación es pequeña.

Tabla 14. Valores de cabeza de presión en los nodos.

Nodos de líneas Principales	P_t/γ Analítico (m)	P_t/γ Simulado (m)
2	4.66	4.86
3	1.25	1.33
4	1.17	1.20
5	1.20	1.18
6	0.48	0.45
7	0.47	0.44
8	0.47	0.43
9	0.47	0.43
10	0.47	0.43
11	0.50	0.48
12	0.50	0.47
13	0.50	0.46
14	0.50	0.46
15	0.50	0.46
16	0.46	0.44
17	0.46	0.44
18	0.46	0.44
19	0.45	0.44
20	0.45	0.44
21	0.45	0.43
22	0.45	0.43
23	0.45	0.43
24	0.45	0.43
25	0.45	0.43

En las Tablas 15 y 16 se reportan los valores de caudal calculados analíticamente y los simulados para los tanques tipo 2 y tipo 1 respectivamente. Se observa que los caudales requeridos por cada tipo de tanque son similares tanto en el método analítico como en la simulación, por lo que permite validar el método analítico empleado y sus resultados.

Tabla 15. Caudales para los tanques tipo 2.

Tanques	Q (L/min) Analítico	Q (L/min) Simulado
T22	10.35	10.17
T23	10.35	10.06
T24	10.08	10.09
T25	10.08	10.03
T26	9.97	10.05
T27	9.97	10.01
T28	9.97	10.03
T29	9.97	10.00
T30	10.02	10.02
T31	10.02	10.00
T32	10.25	10.18
T33	10.25	10.07
T34	9.97	10.10
T35	9.97	10.03
T36	9.86	10.05
T37	9.86	10.01
T38	9.87	10.03
T39	9.87	10.00
T40	9.91	10.02
T41	9.91	10.00

Tabla 16. Caudales para los tanques tipo 2.

Tanques	Q (L/min) Analítico	Q (L/min) Simulado
T2	3.93	3.05
T3	3.93	3.04
T4	3.59	2.99
T5	3.59	2.99
T6	3.29	2.98
T7	3.29	2.99
T8	3.06	2.98
T9	3.06	2.99
T10	2.88	2.98
T11	2.88	2.99
T12	2.77	2.97
T13	2.77	2.99
T14	2.71	2.97
T15	2.71	2.99
T16	2.69	2.97
T17	2.69	2.99
T18	2.69	2.97
T19	2.69	2.99
T20	2.70	2.97
T21	2.70	2.98

En la Tabla 17 se presentan los principales componentes requeridos para la implementación de un sistema RAS con capacidad de 8000L con sus respectivas características.

Tabla 17. Resumen de componentes del sistema de distribución

Elementos	Características y cantidad
<p>Válvulas de Compuerta de ½ in, 2 ½ in y 2 in.</p> 	<p>Válvula en PVC de ½ in, para las descargas en los tanques tipo 2. Las válvulas que abastecen los tanques de la parte superior deben tener una apertura de 38% y las que abastecen los tanques inferiores, apertura de 23%. Cantidad: 20 unidades.</p> <p>Antes de la bomba se ubica una válvula de 2 in con apertura del 75% Cantidad: 1 unidad.</p> <p>Después de la bomba se ubica una válvula de 2 ½ in, con una apertura del 25%. Cantidad: 1 unidad.</p>
<p>Válvulas Mariposa de 2 ½ in y ½ in</p> 	<p>La válvula de 2 ½ in regulan el flujo que llega a las líneas principales de los tanques tipo 1 y tipo 2. Para las 2 líneas de los tanques tipo 2, tiene una apertura de 22.5° y para la línea de los tanques tipo 1 una apertura de 18°. Cantidad: 3 unidades.</p> <p>Las válvulas de ½ in regulan el flujo que va a cada uno de los tanques tipo 1 con apertura de 16.28° para los tanques del nivel superior y 13.4° en los tanques del nivel inferior. Cantidad: 20 unidades.</p>
<p>Bomba marca HIDROMAC, Modelo AZ de 2X2 1/2X7A</p> 	<p>Bomba para manejar un caudal de 70 gpm, con diámetro de rodete de 115 mm. La cabeza altura ofrecida por la bomba es de 4.75 m, con una eficiencia cercana al 55%, potencia de 1/2 HP y un $NPSH_r = 1 m$.</p>
<p>Codos de 2 ½ in, 2 in, ½ in en PVC</p> 	<p>Antes de la bomba se tiene una tubería desde el tanque filtro de 2 in, el arreglo requiere codo. Cantidad: 1 unidad.</p> <p>Después de la bomba se tiene una red de distribución principal de 2 ½ in, el arreglo requiere codos. Cantidad: 5 unidades.</p> <p>Las tuberías secundarias que descargan en los tanques de cultivo requieren codos de ½ in. Cantidad: 60 unidades.</p>
<p>Tuberías 2 ½ in, 2 in, ½ in en PVC</p> 	<p>Antes de la bomba se tiene una tubería desde el tanque filtro de 2 in. Cantidad: 1 m.</p> <p>Después de la bomba se tiene una red de distribución principal de 2 ½ in. Cantidad: 27.4 m.</p> <p>Las tuberías secundarias que descargan en los tanques de cultivo son de ½ in. Cantidad: 33.6m.</p>

<p>Tes de 2 ½ in, ½ in en PVC</p> 	<p>Después de la bomba se tiene una red de distribución principal de 2 ½ in, el arreglo requiere tes. Cantidad: 19 unidades.</p> <p>Las tuberías secundarias que descargan en los tanques de cultivo requieren tes de ½ in. Cantidad: 20 unidades.</p>
<p>Aireador PENTAIR S63-C</p> 	<p>Aireador con capacidad de caudal de 192.18 CFM y presión de 7.16 kPa, con una potencia de 3.5 Hp.</p>
<p>Difusores PENTAIR AS30L</p> 	<p>Difusores con capacidad de 1 CFM. Cantidad: 131 unidades.</p>
<p>Dimensiones Biofiltro</p> 	<p>43.825 L de sustrato XPORT NO_3 en un tanque de 1 metro cúbico, para satisfacer los requerimientos hidráulicos del sistema.</p>

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de NAT, nitritos y nitratos, demuestran que el prototipo de sistema RAS de 150 L implementado cumplió satisfactoriamente con los requerimientos técnicos exigidos para el cultivo de peces *Symphysodon discus*.

Para las condiciones experimentales evaluadas se concluye que el Xport NO₃ es más adecuado como sustrato para filtro biológico, ya que mantuvo los parámetros de calidad de agua estudiados (NAT, NO₂, NO₃) en los rangos apropiados para un sistema RAS.

Se escaló un sistema de recirculación de agua (RAS) para el cultivo de peces ornamentales de la especie *Symphysodon discus*, logrando establecer las dimensiones y componentes del sistema hidráulico requerido para un prototipo de 8000 L.

El desarrollo de este trabajo constituye un precedente de investigación en el área de cultivo de peces *Symphysodon discus* empleando un sistema RAS.

7. REFERENCIAS

- Anaya, A. (2014). *Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 15 de diciembre de 2020, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v25n2/v25n2a7.pdf>
- API. (s.f.). *Bacterias nitrificantes inicio rápido*. Recuperado el 15 de enero de 2021, de <https://apifishcare.com/product/quick-start>
- API. (s.f.). *Kit de prueba maestro de agua dulce*. Recuperado el 15 de enero de 2021, de <https://apifishcare.com/product/freshwater-master-test-kit>
- Aquazen. (2017). *Ciclo del nitrógeno*. Recuperado el 7 de julio de 2020, de <https://www.aquazen.cl/ciclo-del-nitrogeno/>
- Arboleda, D. (2005). Calidad del agua y mantenimiento de acuarios. Revista Electrónica de Veterinaria. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, VI, 1-11. Recuperado el 12 de junio de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/636/63612822016.pdf>
- AUNAP. (2014). *Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia*. Recuperado el 12 de junio de 2020, de <https://www.aunap.gov.co/wp-content/uploads/2016/04/Plan-Nacional-para-el-Desarrollo-de-la-Acuicultura-Sostenible-Colombia.pdf>
- Cárceles, R. (2017). Filtración mecánica, química y biológica. *Scientific big data*. Obtenido de <https://www.scientificbigdata.com/article.php?QFkQpvtVu8ZeekPL4YsFkYPBcCPXcX/oDueImz4OzA4=>
- Castro, F. A. (2017). *Nuevas tendencias en las técnicas analíticas de las aguas*. Recuperado el 18 de enero de 2021, de http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/5_nuevas.pdf
- Díaz, N. (2015). *Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Recuperado el 18 de enero de 2021, de https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf

- Epanet. (s.f.). *Simulación de redes de distribución*. Recuperado el 30 de diciembre de 2020, de <https://epanet.es/descargas/epanet2-es/>
- Everis. (2019). *¿Por qué invertir en los sistemas de recirculación en acuicultura (RAS)?* Recuperado el 22 de noviembre de 2020, de <https://everisingeneria.com/servicio/acuicultura-y-acuarios/>
- FAO. (2021). *Definición FAO - Acuicultura glosario*. Recuperado el 17 de enero de 2020, de <http://www.fao.org/faoterm/es/?defaultCollId=14>
- Feest, P. (2018). Indicadores para una salmonicultura más sustentable. *SalmonExpert*, 10. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/328430476_Calidad_de_agua_en_Sistemas_de_Recirculacion
- Friese, E. (2004). *Discus Health [Salud de los discos]*. Sydney: T.F.H Publications.
- Galindo, A. (2015). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *ION*, 29, 39-50. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342050982004.pdf>
- Galli, O. (2007). *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*. Recuperado el 3 de agosto de 2020, de https://magyp.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/otros/_archivos//000003-Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20de%20agua.pdf
- González, M. (2010). *Electrodo ion selectivo*. Recuperado el 18 de enero de 2021, de <https://quimica.laguia2000.com/enlaces-quimicos/electrodo-ion-selectivo>
- HIDROMAC. (2010). *Catálogo técnico Hidromac*. Recuperado el 8 de enero de 2021, de https://issuu.com/edarvico/docs/catalogo_hidromac__1_de_2
- Huerta, A. (2017). *Selección y dimensionamiento de las unidades de tratamiento de agua para un sistema de recirculación*. Recuperado el 20 de noviembre de 2020, de http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-2500/UCC2844_01.pdf
- ICA. (2019). *Ladrillo antinitratos*. Recuperado el 22 de agosto de 2020, de <https://www.icasa.com/producto/xport-no3-de-brightwell-aquatics-1-brick/>

- IDEAM. (2007). *Medición de nitratos en agua*. Recuperado el 4 de junio de 2020, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrato+en+agua+por+Espectrofotometr%C3%ADa+UV.pdf/ee058d7c-98fd-4d6c-924c-b4e5864c2d32>
- IDEAM. (2009). *Medición de nitritos en agua*. Recuperado el 4 de junio de 2020, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrito+en+agua+por+Espectrofotometr%C3%ADa.pdf/4775634c-c6ba-4c95-8e98-0696ace02c03>
- Infante, D. (2017). *Carbón activo granular, en la mejora de la calidad del agua potable*. Recuperado el 9 de agosto de 2020, de Universidad Privada del Norte: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12672>
- Jimenez, A. (2016). *Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para Latinoamérica*. Recuperado el 21 de septiembre de 2020, de http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf
- Marchegiani, A. (2004). *Bombas centrífugas*. Recuperado el 28 de enero de 2021, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54214212/bombas.pdf?1503455196=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD_NACIONAL_DEL_COMAHUE_BOMBAS.pdf&Expires=1612138937&Signature=TmgOYIAGxk0ZcBGWkG8wD60Mk5LGCKQBQp4z~MiHAmx0JBhKulU6mOZtpCK7xn
- Ministerio de Agricultura. (2017). *Minagricultura Argentina*. Recuperado el 2 de enero de 2021, de <https://sioc.minagricultura.gov.co/DocumentosContexto/A881-INFORME%20TECNICO%20SISTEMA%20DE%20AIREACI%C3%93N%2013%20FEBRERO%202017.pdf>
- Monti. (2015). *Ciclo o madurez*. Recuperado el 21 de septiembre de 2020, de <http://blog.coralwonders.com/en/ciclas-o-maduras/>
- Parada, S. (2012). *Experiencias sobre cultivo de peces ornamentales en la Cooperativa COOPESCA*. Recuperado el 12 de agosto de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v16s1/v16s1a10.pdf>

- Pedersen. (2015). Rendimiento de nitrificación y robustez de biofiltros de lecho fijo y móvil que tienen elementos portadores idénticos. *ScienceDirect*, 37-45. Recuperado el 6 de enero de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860914000971>
- PENTAIR. (s.f.). *Aireadores para acuicultura*. Recuperado el 7 de diciembre de 2020, de <https://pentairaes.com/regenerative-blowers-aquaculture-duty.html>
- PENTAIR. (s.f.). *Piedras difusoras*. Recuperado el 10 de enero de 2021, de <https://corporacions3.com/product/piedras-difusoras-sweetwater/>
- Ponce, F. (2006). *Manual para ensayo de pérdidas de energía en accesorios de tubería del laboratorio de hidráulica*. Recuperado el 18 de diciembre de 2020, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2668_C.pdf
- Resun. (s.f.). *Bombas para acuario*. Recuperado el 5 de octubre de 2020, de <http://www.resun-china.com/en/product/detail/id-265.html>
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales* (1 ed.). Lima. Obtenido de https://www.academia.edu/9746328/HIDR%C3%81ULICA_DE_TUBER%C3%8DAS_Y_CANALES
- Rodríguez, N. (2007). *Comercio de peces ornamentales en Colombia*. Recuperado el 2 de septiembre de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v13n1/v13n1a2.pdf>
- Rohner, P. (2018). *Métodos cromatográficos aplicados al análisis de aguas de consumo residuales*. Recuperado el 10 de diciembre de 2020, de http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Prohner/Rohner_Hernandez_Pablo_TFM.pdf
- Sawyer, C. (2001). *Química para ingeniería ambiental 4ta Edición*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Semana. (2019). *Colombia exporta cada mes 12 toneladas de peces para acuario*. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de <https://www.semana.com/pais/articulo/como-es-el-negocio-de-exportar-peces-para-acuario-desde-colombia/271710/>
- SENA. (2020). *Ambientes de aprendizaje en acuicultura*. Recuperado el 11 de noviembre de 2020, de <http://mujeresdegestion.blogspot.com/p/la-piscicultura-y-la-acuicultura.html>

- Soto, G. (2010). *Sistema integral de automatización para sistemas de producción intensiva acuícola*. Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperado el 5 de diciembre de 2020, de <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/833/1/RI003795.pdf>
- Tetra. (s.f.). *Granulos tropical XL*. Recuperado el 7 de diciembre de 2020, de <http://www.tetrafish.com/products/nutrition/tetracolor-tropical-granules.aspx>
- Timmons, M. (2002). *Recirculating aquaculture systems [Sistemas de recirculación en acuicultura]* (2nd ed.). (C. A. Ventures, Ed.) Estados Unidos. Recuperado el 10 de octubre de 2020
- Urbano, T. (2020). *Sistemas de recirculación en acuicultura*. Recuperado el 1 de septiembre de 2020, de Agrotendencia: <https://agrotendencia.tv/agropedia/ras-sistemas-de-recirculacion-de-agua-en-acuicultura/>
- Valenzuela, R. (2018). *Evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en la producción de tilapia roja*. Recuperado el 20 de diciembre de 2020, de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6661887.pdf>