

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño de un sistema de recirculación acuícola (RAS) a pequeña escala
para el proceso de crecimiento de tilapias rojas en la comunidad de
Paipayales, Santa Lucía en Ecuador

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería Química

Presentado por:

Leonardo Daniel Serrano Basurto

Nicole Pamela Zhirzhan Paredes

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para mis padres, mis hermanos, mi familia y mis amigos más cercanos, ya que ellos han sido en muchas ocasiones los pilares sobre los cuales he podido reflexionar, recibir un consejo y tomar fuerzas para seguir adelante durante este proceso. De igual manera, va dedicado para todas las personas que en algún momento han esperado grandes cosas de mí, espero que este logro les haga saber que siempre va a existir mucho esfuerzo de mi parte para lograr todo lo que me proponga. Para Pamela, la que me ha acompañado desde tercer semestre, han sido largos días y noches de estudio, trabajo, estrés y risas que los recordaré toda la vida, sin duda alguna, el mejor complemento que la carrera y la vida me pudo dar. Finalmente, se lo dedico a ese chico que entró hace 5 años al pre con la esperanza de aprobar, solo puedo decir, lo lograste.

Leonardo Daniel Serrano Basurto

DEDICATORIA

A mis padres, mis hermanos, mi sobrinito, mi cuñada y Pepo los cuales han sido un soporte a lo largo de mi vida, me han dado diversos consejos, han sido ejemplo de lo que quiero llegar a ser, sobre todo por la paciencia y el amor que me han demostrado. También va dedicado a dos personas muy importantes. Ale y Mareos por estar en todos esos momentos de estudio, tristeza y diversión, con su ayuda y su compañía he podido llegar a esta etapa de mi vida. Puede que en algún momento perdía las esperanzas de llegar aquí, sin embargo, todas estas personitas nunca dudaron de mi ni por un segundo. Por último, pero esencial se lo dedico al mejor compañero, Leonardo, quien es también mi compañero de tesis y uno de mis mejores amigos, formar equipo contigo desde tercer semestre fue la mejor decisión que puede haber tomado. Por todo lo lindo que me han sabido dar, este logró se los dedico a todos ellos con mucho amor y esfuerzo.

Nicole Pamela Zhirzhan Paredes

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios por permitirnos llegar a esta etapa y tener un logro más en nuestras vidas. También agradecemos a nuestra tutora MSc. Lorena Quinchuela y catedra de materia MSc Suanny Mosquera por darnos las pautas necesarias para la realización de nuestro proyecto integrador, adicional agradecemos al Ingeniero Julio por los consejos y ayuda presentada en la realización de las pruebas experimentales. Y por último, a nuestros amigos que nos han apoyado y brindado de su tiempo en toda la carrera.

Leonardo Serrano y Pamela Zhirzhan

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Leonardo Serrano y Pamela Zhirzhan*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Leonardo Serrano

Pamela Zhirzhan

EVALUADORES

Suanny Mosquera

PROFESOR DE LA MATERIA

Lorena Quinchuela

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La finalidad de este estudio es diseñar un sistema de recirculación acuícola (RAS) para la comunidad Paipayales de la provincia del Guayas, la cual ha desarrollado como actividad emergente el engorde de Chame. Sin embargo, se piensa realizar un cambio de cultivo hacia la tilapia roja y se ha visto que cada vez el recurso hídrico es menor para el abastecimiento de las piscinas de su cultivo. Por lo que, el proyecto se enfocó en realizar un diseño para el tratamiento y recirculación de agua a través de un filtro físico y biológico para la remoción de tres contaminantes (sólidos suspendidos, dióxido de carbono y nitrógeno amoniacal). Se construyó el diseño para una piscina de tierra de 130.9 m² con una profundidad de 0.7 m, de tal modo que se midió pH, temperatura, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, dióxido de carbono y nitrógeno amoniacal total para calcular las dimensiones requeridas de los equipos de filtración. En el caso del filtro físico se obtuvo que es necesario un sedimentador de flujo radial con un 0.6 y 0.8 m de diámetro y profundidad respectivamente, con un tiempo de retención de 17.4 minutos, lo cual da una eficiencia de remoción de sólidos del 75%. De igual manera, se determinó para el biofiltro que se requiere 0,418 m³ del material filtrante con un área transversal de 0,48 m² y una altura de empaque de 0,87 m. El medio filtrante seleccionado fue la piedra pómez, debido a que tiene una alta tasa de nitrificación y un bajo precio de adquisición. Finalmente, se realizó un análisis económico para determinar la viabilidad del proyecto, en la cual se obtuvo un TIR y un VAN del 76% y \$936,93 respectivamente, dando como conclusión que el proyecto es tanto atractivo como rentable para su aplicación en una microempresa, pero para la comunidad no debido a su limitación económica.

Palabras Clave: Sistema de recirculación acuícola, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, dióxido de carbono, nitrógeno amoniacal total, sedimentador, biofiltro, piedra pómez.

ABSTRACT

This study aims to design a recirculation aquaculture system (RAS) for a community in the province of Guayas with low water availability. The project focused on designing both a physical and biological filter for the removal of the main contaminants for tilapia, such as suspended solids and total ammonia nitrogen. The design was based on the measurement of parameters such as pH, temperature, total suspended solids, dissolved oxygen, carbon dioxide, and total ammonia nitrogen in samples taken from the pond. The initial concentration of each parameter was determined by different methods and, using heuristics, the outlet concentration of the RAS was calculated. For the physical filter, a sedimentation area of 0.28 m² is required with a height of 0.80 m and a retention time of 0.29 hours, obtaining a solids removal efficiency of 75%. Likewise, it was determined that 0.418 m³ of filtering material was required for the biofilter, which represents 0.48 m² of cross-sectional area and 0.87 m of depth. The filter media selected was pumice stone, due to the high nitrification rate and low market value. Finally, an economic analysis was performed to determine the feasibility of the project, in which an IRR and NPV of 76% and \$936.93 respectively were obtained, concluding that the project is both attractive and profitable for implementation for a microenterprise scale, but not for the community due to its economic limitation.

Keywords: aquaculture recirculation system, total suspended solids, dissolved oxygen, carbon dioxide, total ammonia nitrogen, settler, biofilter, pumice.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	7
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Acuicultura, tipos y tecnologías de producción.....	5
1.4.2 Generalidades de la Tilapia y su cultivo	6
1.4.3 Sistemas de tratamiento de aguas	7
1.4.4 Sistema de recirculación acuícola.....	8
1.4.5 Sistemas de recirculación acuícola con humedales	8
1.4.6 Sistemas acuapónicos	9
1.4.7 Parámetros de diseño	9
CAPÍTULO 2	11
2. Metodología.....	11

2.1	Investigación primaria.....	11
2.2	Investigación secundaria	12
2.3	Muestreo y análisis.....	12
2.3.1	Recolección de muestras de agua	12
2.3.2	Pruebas In-situ.....	13
2.3.3	Determinación de CO ₂ disuelto	13
2.3.4	Determinación de SST	14
2.3.5	Determinación de NAT.....	15
2.4	Diseño del RAS	16
2.4.1	Sedimentador de flujo radial.....	16
2.4.2	Biofiltro.....	19
CAPÍTULO 3		24
3.	Resultados Y ANÁLISIS	24
3.1	Selección del sistema de recirculación	24
3.2	Resultados de los parámetros fisicoquímicos	25
3.2.1	Sólidos suspendidos totales.....	26
3.2.2	Oxígeno disuelto	27
3.2.3	Dióxido de Carbono	27
3.2.4	Nitrógeno Amoniacal Total.....	28
3.3	Dimensiones y capacidades de los equipos	29
3.3.1	Densidad de cultivo.....	29
3.3.2	Sedimentador.....	29
3.3.3	Biofiltro.....	32
3.4	Análisis económico.....	36
CAPÍTULO 4		39
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	39

4.1	Conclusiones	39
4.2	Recomendaciones	40
	BIBLIOGRAFÍA	42
	APÉNDICES.....	47

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
RAS	Sistema de Recirculación Acuícola
SST	Sólidos Suspendidos Totales
OD	Oxígeno Disuelto
NAT	Nitrógeno Amoniacal Total
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
CPE	Código de Práctica Ecuatoriano

SIMBOLOGÍA

g	gramos
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
mL	Mililitro
mg	Miligramos
°C	Grados Celcius
K	Grados Kelvin
NH ₃ -N	Amonio
NO ₂ -N	Nitrito
NO ₃ -N	Nitrato
CO ₂	Dióxido de Carbono

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1 : Metodología.....	11
Ilustración 2.2. Sedimentador de flujo radial	16
Ilustración 2.3 : Filtro percolador.....	19
Ilustración 2.4: Balance de materia en la piscina	19
Ilustración 3.1: Salida de los sólidos del sedimentador	31
Ilustración 3.2: Diagrama del diseño.....	35
Ilustración 4.1 : Eficiencia de remoción vs velocidad de sedimentación (Pretorius & Goosen, 2020).....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Tipos de tecnologías de producción (Cruz Bautista, 2021)	5
Tabla 1.2: Parámetros más importantes en el cultivo de Tilapia Roja (Betancur, 2019; Ladino-Orjuela, 2011; Legua, 2013; Yanzapanta, 2015).....	6
Tabla 2.1 : Especificaciones del cultivo y la piscina (Comunidad Paipayales,2022)..	11
Tabla 3.1: Resultados de los análisis de parámetros de la piscina y rango óptimo (Betancur, 2019; Ladino-Orjuela, 2011; Legua, 2013; Yanzapanta, 2015).....	25
Tabla 3.2: Heurísticas a considerar para el dimensionamiento del sedimentador (Timmons & Ebeling, 2010)	30
Tabla 3.3: Condiciones del sedimentador de flujo radial.....	30
Tabla 3.4 Producción diaria de cada parámetro dentro de la piscina.....	32
Tabla 3.6 Concentración de cada parámetro a la entrada y salida del biofiltro	33
Tabla 3.7 Caudal requerido para la eliminación de cada uno de los parámetros	34
Tabla 3.8 Dimensiones del biofiltro	35
Tabla 3.9: Descripción de la inversión	36
Tabla 3.10: Flujo de caja del proyecto	36
Tabla 3.11: Factores económicos.....	37
Tabla 4.1 : Tasa de alimentación diaria de la tilapia roja	47
Tabla 4.2: Datos de diseño del sedimentador en función de la eficiencia	49
Tabla 4.3: Resultados de los sólidos suspendidos totales de la piscina	50
Tabla 4.4: Resultados de la concentración de dióxido de carbono en el agua	50
Tabla 4.5: Resultados de la concentración de nitrógeno amoniacal total.....	50
Tabla 4.6:Resultados de los caudales teóricos con los tres primeros parámetros	51
Tabla 4.7: Precio de los materiales del sedimentador	52
Tabla 4.8: Precio de los materiales del biofiltro.....	52
Tabla 4.9: Costos en inversión de equipos y mobiliarios	53
Tabla 4.10: Detalles de inversión.....	53
Tabla 4.11: Cálculo de costo de oportunidad.....	54
Tabla 4.12: Estado de resultado	54

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Durante los últimos años, la acuicultura ha ido abriéndose camino como una nueva actividad económica en el Ecuador, principalmente con el camarón (Acebo, Álvarez, Marcillo, Rodríguez, & Menéndez, 2018). Sin embargo la cría y venta de tilapia no se queda atrás, debido a la necesidad de diversificar especies para poder llegar a diferentes mercados del mundo (Schwarz, 2022).

Las condiciones climáticas presentes en ciertas regiones del territorio ecuatoriano se prestan para que el proceso y la actividad acuícola sea factible de realizarse (Sánchez, Vayas, Mayorga, & Freire, 2020). Provincias como el Guayas resultan muy atractivas para realizar ese tipo de actividades gracias a su gran cantidad de hectáreas disponibles para el desarrollo de la cría (Schwarz, 2022).

De acuerdo con esto, la comunidad de Paipayales del cantón Santa Lucía tiene como una de las actividades económicas emergentes la cría y engorde de alevines de tilapia a pequeña escala (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC, 2018). Sin embargo, se tiene la particularidad de que en los últimos años se han presentado problemas para solventar la necesidad del recurso hídrico (B, Cortez,2022).

El problema yace en que, para la realización de esta actividad en las 2 piscinas, la comunidad necesita alrededor de 91 y 150 m³ de agua respectivamente. Además, se necesita de un reabastecimiento de agua cada 3 días para obtener los niveles requeridos para la crianza (Delgado & Valdez, 2021). Sin embargo, la fuente hídrica principal de la comunidad son pozos de 20 a 30 metros de profundidad (aguas subterráneas), los cuales han ido reduciendo su disponibilidad a lo largo de los años (B, Cortez,2022).

Los principales problemas de la comunidad de Paipayales son la escasez de agua y la falta de capital económico para tratar el agua de desecho que se producen durante esta operación/operaciones. Los procesos de tratamiento pueden involucran la utilización de equipos de altos costos. No obstante, una de las limitaciones que tiene la comunidad es

que no cuentan con un capital significativo para financiar un sistema de tratamiento de aguas de alta gama como se realiza comúnmente en operaciones a gran escala (Tom, Jayakumar, Biju, Somarajan, & Ibrahim, 2021). Por estas razones, existe la necesidad de diseñar un sistema de recirculación acuícola (RAS) que permita reutilizar el agua tratada, generando un proceso sostenible tanto productiva como económicamente.

Para realizar el diseño de un sistema de recirculación se deben tener en cuenta ciertas restricciones y requerimientos. Por ejemplo, de acuerdo con la disponibilidad de agua, la escala del proceso y la cantidad de alevines de tilapia contenidos en las piscinas, se deben dimensionar los equipos para que operen dentro de los rangos pertinentes de los parámetros físico-químicos y salvaguardar la calidad de vida del pez.

El Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) contenido en el agua influye directamente al diseño, ya que, dependiendo de la concentración inicial se debe agregar una cantidad de bacterias para que se degrade este compuesto (Losordo & Delong, 2018). Asimismo, la temperatura del efluente del sistema debe estar entre 28 y 32°C, puesto que si el valor se encuentra muy por fuera de los límites, puede afectar directamente al crecimiento del pez (Sierra & Jenaro, 2019).

Las restricciones referentes al ámbito legal se dan por la existencia de la normativa CPE INEN-CODEX CAC/RCP 52 “PESCADO Y LOS PRODUCTOS PESQUEROS” en la cual se establecen los principales criterios normalizados para la cría, recolección, manipulación, producción, elaboración, almacenamiento, transporte y venta al por menor de pescado (INEN, 2013).

1.2 Justificación del problema

Durante los últimos años, la acuicultura, ha sido una de las actividades que ha ido ganando terreno en la producción de especies marinas, debido a la alta demanda global de productos acuáticos en el mercado oriental (Acebo et al., 2018). Tomando en cuenta la urgencia de la preservación de la fauna silvestre, el mercado de la explotación de recursos marinos ha disminuido considerablemente, dando cabida a la producción de peces mediante piscinas manejadas por el hombre (Acebo et al., 2018).

La industria acuícola tiene como finalidad solventar la disminución de la capacidad de los cuerpos marinos para producir especies potencialmente exportables, siendo estos, crustáceos, moluscos, peces o plantas (Acebo et al., 2018). Varias de las ventajas que permite la acuicultura son: un mejor control en los parámetros de calidad, aumento del valor nutritivo de la especie, alta eficiencia y gran producción de los especímenes (Cruz Bautista, 2021)

La tilapia es una especie considerablemente demandada en el mercado nacional, mientras que en el internacional está posicionado en segundo lugar, luego de las carpas¹. Entre los varios tipos que se tiene de esta especie se encuentra la Tilapia Roja (híbrida), que tiene muchas ventajas en comparación con otras especies, como ausencia de espinas intramusculares, crecimiento rápido, gran adaptabilidad y gran tamaño del filete (Ordoñez, 2008). Por lo cual, la tilapia se ha ubicado tanto en el mercado nacional como internacional como un producto de alto nivel por los grandes beneficios saludables que presenta (Pesquera, 2021).

Tanto la ubicación geográfica como las condiciones climáticas del país, se prestan para potenciar esta actividad económica y que se convierta en una importante fuente de ingresos para el Ecuador (Sánchez et al., 2020). La acuicultura demanda ciertas necesidades, tales como factores climáticos, gran cantidad de recursos hídricos, implementación de áreas de cría y considerables inversiones económicas para solventar los gastos pertinentes (Acebo et al., 2018).

El gobierno del Ecuador se ha encargado de generar planes para promover la acuicultura en el país, mediante proyectos que engloban tanto el aprovisionamiento como la venta de alevines a los productores artesanales para empezar la producción (Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca, 2020). Esto se ve reflejado en los reportes de producción de los últimos 4 años, en los cuales las provincias de Guayas, Manabí y Santa Elena son aquellas con una mayor contribución a la producción de peces (Sánchez et al., 2020).

¹ Son conocidas como carpas Koi o carpas chinas los cuales son peces de agua dulce originarias de China.

Adicionalmente, al tratarse de una actividad que involucra costos considerables durante su operación y de utilizar agua como un participante principal, se tiene un gran interés en diseñar sistemas que permitan ahorrar o aprovechar de mejor manera los recursos. Por lo tanto, existen nuevas tecnologías las cuales involucran un sistema de tratamiento de aguas para tratar los desechos y poder reutilizar el agua en el proceso de producción (Acebo et al., 2018).

Una de las tecnologías utilizadas en esta actividad es el Sistema de Recirculación Acuícola (RAS), la cual proporciona control en la cantidad de producción, en los parámetros requeridos para la supervivencia del pez, asimismo como una mejor predicción en los tiempos de cosecha para lograr el peso y crecimiento deseado (Arescurenaga & Álvaro, 2016). Además, permite un gran porcentaje de ahorro del recurso hídrico al implementarlo.

Por lo tanto, se propone realizar el diseño del RAS en la comunidad de Paipayales del Cantón Santa Lucía de la provincia del Guayas, con el fin de promover un sistema de producción sustentable. El RAS consta tanto de un tratamiento físico como biológico del agua de las piscinas de tilapias para poder recircularla nuevamente a la operación, disminuyendo el gasto desmesurado del recurso hídrico, al igual que la reducción de costos de la actividad acuícola (Tom et al., 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de recirculación acuícola a pequeña escala para la crianza de Tilapias Rojas en la comunidad de Paipayales por medio de investigación bibliográfica y la obtención de parámetros específicos del cultivo a través de visitas de campo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las distintas tecnologías de tratamiento acuícola mediante revisión bibliográfica.

- Determinar las capacidades y dimensiones de los equipos involucrados en el sistema de recirculación acuícola por medio del análisis de diferentes parámetros físico-químicos del agua de las piscinas de las tilapias.
- Realizar un análisis económico para la determinación de la rentabilidad del diseño propuesto.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Acuicultura, tipos y tecnologías de producción

Se define como el cultivo de especies marinas en un cuerpo de agua, ya sea natural o artificial, el cual es controlado por medio de distintas técnicas. En el Ecuador esta actividad se empezó a realizar aproximadamente en 1980, además que existen varias características como los recursos y las condiciones ambientales que permitieron potenciar la acuicultura en el país.

Entre los tipos de esta actividad se tiene la industrial y artesanal. La industrial como su nombre lo dice, es manejado por empresas que vinculan sistemas de jaulas flotantes y de producciones super intensivas. En el caso de la artesanal, es realizado por habitantes de la zona rural, donde el índice comercial es menor en comparación al industrial. Asimismo, consta de piscinas con superficies entre 20 a 300 m², siendo estas de tierra (bajo costo) y se manejan con producciones extensivas o semi-intensivas (Cruz Bautista, 2021).

Existen 3 tipos de tecnologías de producción, las cuales se diferencian de acuerdo con la superficie y el porcentaje del volumen de recambios de agua por día. A continuación, se muestra una tabla con las características de cada tipo.

Tabla 1.1: Tipos de tecnologías de producción (Cruz Bautista, 2021)

	Superficie (hectáreas)	% de volumen del sistema (recambios por día)
Extensivo	Máximo 100	5%
Semi-Intensiva	1-20	5% y 20%
Intensiva	Máximo 2	25 y 100%

1.4.2 Generalidades de la Tilapia y su cultivo

La tilapia es un pez originario de África, característico de climas cálidos. Esta especie tiene varios tipos, siendo la más cultivada la Tilapia Roja. A su vez, este tipo se lo considera como un tetrahíbrido, debido a la fusión con tres tipos de origen africano (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis mossambicus* y *Oreochromis hornorum*) y uno israelí (*Oreochromis aureus*) (Ordoñez, 2008). La combinación permitió un pez con características favorables como son: resistencia a enfermedades, gran porcentaje de masa muscular, mayor tamaño de filete, gran adaptabilidad, rápido crecimiento, coloración con mayor aceptación del cliente, entre otros (Ordoñez, 2008).

En el caso de la reproducción esta especie se caracteriza por el cuidado de la madre al momento de fertilizar los huevos y en las primeras semanas de nacidas. Por lo general, el macho crea los nidos, la hembra incuba de 1 a 2 huevos por gramo de peso y una vez que el macho los fertiliza, esta los lleva en su boca hasta cuando las crías puedan inflar su vesícula natatoria (Kubitza, 2003).

Luego de haber nacido y ser independientes de su madre alcanzan una madurez sexual entre los 5 o 6 meses con un peso aproximado de 150 g, todo esto depende de la alimentación que se le brinde a la especie. Dentro de sus parámetros fisicoquímicos, este tipo tiene una alta tolerancia a temperaturas cálidas, bajos niveles de oxígeno, alta concentración de amoníaco y salinidad alta; sin embargo no tiene mucha adaptabilidad respecto a climas fríos o temperaturas bajas (Kubitza, 2003). Por lo tanto, los parámetros más importantes se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1.2: Parámetros más importantes en el cultivo de Tilapia Roja (Betancur, 2019; Ladino-Orjuela, 2011; Legua, 2013; Yanzapanta, 2015)

Parámetros	Mínimo	Rango óptimo	Máximo
pH	4.5	6.0-8.5	10.5
Temperatura (°C)	18	28-30	38
Nitritos (ppm)	0	0	5
Nitratos (ppm)	0	0	300-400
Amonio (TAN) (ppm)	0	0	2
Sólidos Suspendidos (SST) (ppm)	0	25	100
Oxígeno Disuelto (OD) (ppm)	1.6	>5	-
Dióxido de Carbono (ppm)	9	9-30	60

En su alimentación existe una gran variedad de ítems que pueden consumir, lo cuales pueden ser plancton, detritus, larvas de peces, materia orgánica en descomposición, y muchas más (Kubitza, 2003).

En la mayoría de los cultivos se realizan cuatro etapas: reproducción, producción, pre-engorde y engorde; aunque existen otros tipos de cultivos en los que sólo se focalizan en el engorde, es decir, se realiza la compra de los alevines y el respectivo engorde para su posterior valor comercial. En el caso de realizarse las cuatro etapas existe un problema con la sobrepoblación, por lo que una de las alternativas es realizar una reversión sexual de los alevines para que así crezcan y funcionen reproductivamente como machos (Kubitza, 2003). De tal forma, que se puede controlar la cantidad de peces en cada piscina.

1.4.3 Sistemas de tratamiento de aguas

De acuerdo con La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, para el año 2020, aproximadamente 2200 millones de personas habitaban en sectores con una escasez de agua considerada como extrema, y este número va en aumento (UNESCO, 2020). Por lo que, una de las principales actividades impulsadas por estas organizaciones se vincula con la recirculación y el tratamiento de aguas (Tom et al., 2021).

La fomentación del uso de sistemas de tratamiento de aguas va de la mano con el incremento de la población mundial y el cambio climático(UNESCO, 2020). El uso de sistemas que no solo se encarguen de eliminar los componentes contenidos en el agua que puedan llegar a contaminar cuerpos hídricos de mayor tamaño, sino que también se reutilice y genere un sistema sostenible son altamente requeridos (Tom et al., 2021).

Actualmente, entre las principales tecnologías disponibles para procesos de acuicultura se tienen: sistemas de recirculación acuícola, sistemas de recirculación acuícola con humedales y sistemas acuapónicos (Tom et al., 2021). Los cuales se detallan a continuación.

1.4.4 Sistema de recirculación acuícola

El Sistema de Recirculación Acuícola o RAS por sus siglas en inglés, es un diseño de reutilización de agua que se fundamenta en los sistemas tradicionales de suministro de agua para cría de peces, en los que se extrae agua de un cuerpo hídrico cercano y se la transporta hasta el lugar en el que se lo necesita (Tom et al., 2021).

Sin embargo, la fuente de agua de este sistema no es un cuerpo externo, ya que se bombea la misma agua utilizada en la piscina de cría para realizar el tratamiento y hacerla recircular al mismo estanque, cumpliendo con los parámetros físico-químicos requeridos para la vida de los peces (Tom et al., 2021).

Este sistema cuenta con dos componentes esenciales, el filtro físico y el filtro biológico (Sal & Merino, 2007). Estos filtros se utilizan para la remoción de materia que puede llegar a ser contraproducente para la cría de peces, tales como: materia orgánica, sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal total y dióxido de carbono (Tom et al., 2021).

El filtro físico del sistema representa una parte muy importante del proceso, ya que mientras mejor sea la remoción de los sólidos suspendidos totales de la primera parte, la eficiencia del biofiltro aumentará (Timmons & Ebeling, 2010). La incorporación de un biofiltro desnitrificante reduce los costos de operación del sistema RAS hasta en un 10%, además de reducir la eficiencia energética y aumentar la eficiencia global del procesos de recirculación de agua para las piscinas de peces (Tom et al., 2021).

1.4.5 Sistemas de recirculación acuícola con humedales

Los sistemas de recirculación acuícola con humedales son una de las variantes del RAS previamente mencionado. Este, aparte de contar con un estanque para peces, requiere de un estanque con especies vegetales, creando un sistema simbiótico peces-plantas en el cual se eliminará en mayor porcentaje los compuestos ricos en nitrógeno, siendo esta la mayor ventaja del diseño (Tom et al., 2021).

Entre las principales características de diseño, se tiene que, para eliminar el gran porcentaje de compuestos nitrogenados se requiere un gran tiempo de retención en el humedal, ya que el único factor que trabaja en este punto, son las plantas (Srivastava,

Yadav, Garaniya, & Abbassi, 2018). De igual manera, se debe tener la consideración de que, para que el proceso sea efectivo, el estanque de especies vegetales debe ser como mínimo 2.7 veces más grande que la piscina de peces, lo cual puede dificultar la operación en términos de costos (Tom et al., 2021).

1.4.6 Sistemas acuapónicos

Por otro parte, los sistemas acuapónicos tienen la particularidad de que en este proceso se juntan la acuicultura con la hidroponía para la producción tanto de peces como de alimento de origen vegetal (Tom et al., 2021). Esto se debe a la simbiosis entre las dos especies, ya que el agua de las piscinas que contiene diferentes compuestos tóxicos para los peces, es transportada hacia el estanque de plantas, en la cual estos compuestos hacen las veces de nutrientes para las especies de origen vegetal (Lennard & Goddek, 2019).

El proceso de nitrificación en este diseño se da mediante el metabolismo de las plantas, eliminando el amoníaco antes de ser recirculado hacia el estanque de peces (Lennard & Goddek, 2019). Por lo que, un sistema de recirculación además de funcionar para la eliminación de los compuestos contaminantes del agua también sirve para producir dos especies diferentes en un sistema simbiótico.

Sin embargo, el escenario de cultivar dos especies completamente diferentes involucra un alto costo de diseño, instalación, costo y mantenimiento (Tom et al., 2021). Además de que al ser una tecnología relativamente nueva, las investigaciones han sido realizadas de forma que se utilizan plantas emergentes, subacuáticas y flotadoras, lo cual involucra una mayor demanda de agua para el proceso de cultivo (Lennard & Goddek, 2019).

1.4.7 Parámetros de diseño

Para poder realizar el diseño de un sistema de tratamiento de aguas en piscinas de peces, es de vital importancia determinar las condiciones iniciales del sistema, en este caso, las concentraciones de ciertos parámetros fisicoquímicos que son útiles para la identificación del método de recirculación.

Entre los parámetros necesarios a determinar para realizar el diseño del sistema de tratamiento de aguas, se tiene la determinación de: temperatura, pH, sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto (OD), dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno amoniacal total (NAT)(Timmons & Ebeling, 2010). Para la implementación de cualquiera de los sistemas de recirculación previamente mencionados el tratamiento de los sólidos es esencial, ya que de esto depende que los sólidos no se sedimenten dentro de las tuberías y se produzca un taponamiento de los ductos de transporte (Timmons & Ebeling, 2010; Tom et al., 2021).

En cuanto al OD y el CO_2 , se conoce que la tilapia es una especie de pez que es muy resistente a estas variables, sin embargo, es importante mantener el sistema en constante monitoreo para no exceder los niveles de dióxido de carbono permitido, ni tener una concentración muy baja de oxígeno disuelto en el agua (Lennard & Goddek, 2019). Al llegar a estas condiciones límites en el sistema, el pez puede caer en un estado de estrés y morir en cualquier etapa del proceso (Timmons & Ebeling, 2010).

Finalmente, el nitrógeno amoniacal total es un compuesto altamente tóxico para los peces, ya que si este llega a niveles muy altos provoca que estos se muevan con menor rapidez, con falta de energía y finalmente lleguen a su muerte (McDermand, 2022). Este compuesto se elimina en el filtro biológico mediante el proceso de nitrificación que se da gracias a las bacterias nitrificantes contenidas en el medio por el cual pasa el agua (Gallego Alarcón & García Pulido, 2017).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El proyecto se enfoca en un diseño de recirculación para tener un buen aprovechamiento del agua, exista un menor consumo y que se mantenga la calidad del agua. El diseño de recirculación se lo realiza por medio de criterios de diseño, investigación bibliográfica de sistemas implementados en otras regiones y por medio de experimentación en la adquisición de los parámetros iniciales de la piscina sin tratamiento. De tal forma que la metodología que se siguió para el diseño es la siguiente:

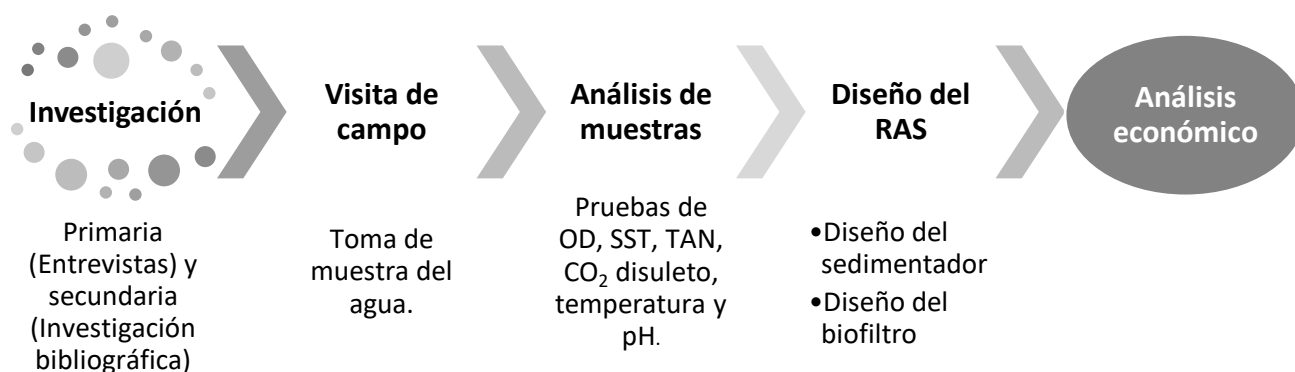


Ilustración 2.1 : Metodología

[Elaboración propia]

2.1 Investigación primaria

En cuanto a la investigación primaria, se realizaron tres entrevistas a los habitantes de la comunidad, los cuales tuvieron diferentes roles en el proceso de engorde de los peces. De tal manera que se tomó la información más relevante con respecto al cultivo y las características del mismo para el diseño.

Estas entrevistas fueron realizadas en dos partes. La primera parte fue una entrevista telefónica con una de las personas encargadas del cultivos mientras que la segunda parte fue realizada en persona, la cual se dio en la primera visita de campo realizada a la comunidad.

Tabla 2.1 : Especificaciones del cultivo y la piscina (Comunidad Paipayales,2022)

Tipo de cultivo

Semi-intensivo

Especie para cultivar	Tilapia Roja
Tipo de piscina	En tierra
Forma de la piscina	Triangular
Dimensiones de los lados (m)	19x19x15
Profundidad de la piscina (m)	0.70
Volumen de piscina (m³)	91.6
Densidad de cultivo (kg/m³)	2.5
Cantidad de peces (peces/m³)	5
Peso comercial deseado (g)	500
Tasa de alimento por biomasa	1.1%-10%
Porcentaje de proteína en el alimento	35%

2.2 Investigación secundaria

En cuanto a la investigación secundaria, se realizó una revisión bibliográfica tanto de textos que tratan temas de cultivo acuícola como publicaciones en revistas científicas que brindaron información sobre los sistemas de recirculación de agua. Por lo tanto, se buscó la mayor cantidad de información necesaria para obtener ecuaciones de diseño, heurísticas de dimensionamiento de los equipos y valores estándar de los parámetros de cultivos. Teniendo más información de autores como Timmons, Kubitza, Baird y Davidson.

Por lo tanto, de acuerdo con el análisis realizado de la información obtenida, se pudo seleccionar el sistema de recirculación acuícola que mejor se adapte a las condiciones de la comunidad de Paipayales.

2.3 Muestreo y análisis

2.3.1 Recolección de muestras de agua

Para la toma de las muestras utilizadas para los parámetros de SST, CO₂ y NAT se tomaron un total de 4 muestras en botellas de vidrio de 500 mL; se realizó la toma por duplicado en la orilla y en medio de la piscina, todas ellas a una profundidad media (GreenLab, 2012).

La preservación de la muestras se lo realizó de acuerdo al manual “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” de Rodger Baird, el cual mencionaba que

para la preservación de muestras destinadas a análisis de CO₂ disuelto y SST solo debían ser refrigeradas a un máximo de 4°C, mientras que para análisis de NAT las muestras debe acidificarse con un pH menor a 2, para posteriormente refrigerarlas a un máximo de 4°C (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

2.3.2 Pruebas In-situ

Tres de los seis parámetros fueron medidos in-situ, siendo pH, temperatura y OD. Estos análisis fueron realizados por medio del equipo multiparámetro HACH HQ440d, el cual tenía dos sondas, una medía OD (LDO101) y la otra el pH (PHC281), adicionalmente marcaba la temperatura con ambas.

Para las mediciones de estos tres parámetros se tomaron muestras por duplicado, las cuales fueron del medio y de la orilla derecha. Cabe mencionar, que antes de las mediciones se calibraron las sondas con un día de anterioridad según las instrucciones del fabricante. En el caso de la sonda de pH se realizó la mediciones con las soluciones indicadoras dadas por el proveedor de pH 4, 7 y 10, mientras que en OD se lo realizó saturando con oxígeno una botella de agua con la mitad del contenido (HACH, 2021, 2022).

2.3.3 Determinación de CO₂ disuelto

En el caso del análisis de CO₂ disuelto en las muestras era necesario realizarlas lo más pronto posible debido a la volatilidad del gas y asimismo se evitó cualquier tipo de agitación brusca al momento de realizar la prueba para que el gas no se escape. Los pasos que se siguieron fueron de acuerdo al método 4500-CO₂ C (Baird et al., 2017) , por lo que una vez llevada la muestra al laboratorio fue ambientada, para posteriormente tomar una muestra de 100 mL en un matraz Erlenmeyer, colocar 4 gotas de fenolftaleína y finalmente titular con Na(OH) al 0.02 N hasta el viraje. Una vez llegado a ese punto, se obtuvo la cantidad consumida de la solución titulante y se calculó la cantidad de CO₂ disuelto en la muestra por medio del siguiente cálculo:

$$C_{CO_2} = \frac{A * N * 44000}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

C_{CO_2} : Concentración de CO₂ disuelto ($\frac{mg}{L}$)

A : Volumen consumido de Na(OH) (mL)

N: Normalidad de Na(OH)

V: Volumen de la muestra usado (mL)

Esto se realizó por cada una de las muestras, haciendo un total de 4 pruebas, debido a que para una mayor exactitud en los resultados se analizaron por duplicado tanto la muestra de la orilla como la del medio.

2.3.4 Determinación de SST

Para la determinación de sólidos suspendidos totales se utilizó el método 2540-D del libro "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" de Rodger Baird.

Como primer paso se realizó el secado del filtro de fibra de vidrio durante 1 hora utilizando un horno a 103 °C, el cual posteriormente fue colocado durante 30 minutos en un desecador de gel de sílice para luego poder pesarlo en una balanza analítica y obtener el peso inicial. Una vez que se tuvo listo el papel filtro, se homogenizó el contenido de los frascos que contenían las muestras de agua de la piscina de tilapia y se tomaron dos alícuotas de 50 mL de cada una para realizar el análisis por duplicado (Baird et al., 2017).

El equipo utilizado para realizar la filtración fue una bomba de vacío, un Kitasato y un vaso de precipitación sobre el cual se colocó el filtro previamente mencionado. Una vez armado el sistema se roció la alícuota uniformemente sobre la superficie del papel filtro y se encendió la bomba para empezar el filtrado. Cuando culminó el proceso, se colocó a secar el papel filtro con la muestra durante 1 hora y 30 minutos utilizando el horno a 103 °C, el cual posteriormente fue colocado durante 30 minutos en un desecador de gel de sílice para luego poder pesarlo en una balanza analítica y obtener el peso final (Baird et al., 2017).

La fórmula que se utilizó para calcular la concentración de sólidos suspendidos totales se detalla a continuación:

$$C_{SST} = \frac{(A - B) * 1000}{V_{alícuota}} \quad (2.2)$$

Donde:

C_{SST}: Concentración de Sólidos Suspendidos totales $\left(\frac{mg}{L}\right)$

A: Peso del papel filtro + muestra seca (mg)

B: Peso del papel filtro (mg)

$V_{alícuota}$: Volumen de la muestra de agua de la piscina (mL)

2.3.5 Determinación de NAT

Para la determinación del nitrógeno amoniacal total se utilizó el método 4500-NH₃C del libro “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” de Rodger Baird.

Como primer paso, se tomaron dos alícuotas de 50 mL de cada frasco de agua y se los colocó en un vaso de precipitación para realizar el análisis por duplicado, además se utilizó 50 mL de agua destilada como un blanco para el proceso. A cada muestra se le añadió 3 mL de una solución de buffer de boratos y posteriormente, con una solución de hidróxido de sodio, Na(OH) 6N, se llevó el pH a un valor de 9.5 (Baird et al., 2017).

La mezcla realizada se colocó en un tubo de Kjeldahl para luego pasar a la destilación en el equipo de destilación Kjeldahl. En un matraz Erlenmeyer se colocan 10 mL de ácido bórico y unas gotas de una solución indicadora de azul de metileno y rojo de metileno. Este matraz fue colocado en el destilador Kjeldahl para empezar la destilación de la muestra, el proceso culmina una vez que se recolecta un volumen de 100 mL en el matraz y la muestra se torne de color verde (Baird et al., 2017).

Luego de la recolección de los 100 mL se lleva el matraz debajo de una bureta donde empezará la titulación con ácido sulfúrico, H₂SO₄. El proceso termina una vez que la muestra titulada cambie de color verde a un morado intenso, se anota el volumen consumido del ácido y se realiza el cálculo utilizando la siguiente fórmula:

$$C_{NH_3-N} = \frac{(A - B) * 280}{V_{alícuota}} \quad (2.3)$$

Donde:

C_{NH_3-N} : Concentración de nitrógeno amoniacal $\left(\frac{mg}{L}\right)$

A: Volumen de H₂SO₄ consumido en la titulación de la muestra (mL)

B: Volumen de H₂SO₄ consumido en la titulación del blanco (mL)

$V_{alícuota}$: Volumen de la muestra de agua de la piscina (mL)

2.4 Diseño del RAS

Como fue mencionado en el capítulo 1, los principales componentes de un sistema de recirculación acuícola son el filtro físico y el filtro biológico (Tom et al., 2021). A nivel industrial, estos equipos son diseñados para tratar grandes volúmenes de agua, sin embargo, la adquisición de estos equipos es muy complicada tanto por las dimensiones del equipo como los altos costos de adquisición. Por lo tanto, a partir de las medidas de las piscinas de la comunidad y una exhaustiva revisión bibliográfica se realizó un diseño a pequeña escala de estos equipos. Para la filtración física se diseñó un sedimentador de flujo radial y para la filtración biológica se realizó un filtro percolador.

2.4.1 Sedimentador de flujo radial

La implementación de un equipo de sedimentación en el sistema de recirculación acuícola se da para poder remover la mayor cantidad de sólidos posibles de las piscinas de tilapia (Arescurenaga & Álvaro, 2016). Si bien es cierto que se requiere de cierta turbidez en el agua de la piscina para disminuir el estrés de la especie, se debe mantener regulada la concentración de este parámetro, ya que una gran concentración de estos produce una disminución de la concentración del oxígeno disuelto en el agua (Legua, 2013).

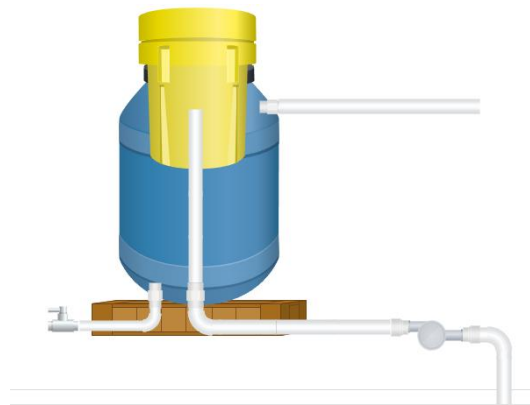


Ilustración 2.2. Sedimentador de flujo radial

Adaptado de *Recirculating Aquaculture* (p.183) por M. Timmons, 2010

Se escogió el sedimentador de flujo radial sobre uno rectangular o uno tangencial principalmente porque tienen un mayor porcentaje de remoción al ser aplicados en sistemas de pequeña escala de cultivo de tilapia (Davidson & Summerfelt, 2005).

Las restricciones de diseño del equipo se basaron en las condiciones de las piscinas de la comunidad, específicamente en el volumen de agua contenido en el estanque, la

disponibilidad de una bomba sumergible adquirida para la comunidad y un tanque de agua de alrededor de 200 litros que servirá para la sedimentación de las partículas de la piscina. Se consideró el bajo capital de la comunidad, por lo que el diseño del equipo tiene que adecuarse a la disponibilidad de los habitantes de la comunidad.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se debe estimar una velocidad de carga superficial que sea lo suficientemente efectiva para alcanzar entre un 70-80% de la remoción de las partículas de las piscinas de tilapia (Pretorius & Goosen, 2020; Timmons & Ebeling, 2010). A partir de este valor, y el caudal a utilizar, se pudo determinar el área superficial necesaria para alcanzar la velocidad a partir de la siguiente ecuación (Riffat, 2013):

$$V_0 = \frac{Q}{A_s} \quad (2.4)$$

Donde:

V_0 : Velocidad de carga superficial $\left(\frac{m^3}{m^2h}\right)$

A_s : Área superficial (m^2)

Q : Caudal $\left(\frac{m^3}{h}\right)$

A partir del área superficial, se obtuvo el diámetro requerido del sedimentador por medio de la ecuación del área de un círculo.

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.5)$$

Donde:

d : Diámetro del sedimentador (m)

A_s : Área superficial (m^2)

De igual manera, de acuerdo con estudios realizados en sistemas sedimentación de cultivo de tilapia a pequeña escala, se tiene como una de las principales reglas de diseño, que el tiempo de retención hidráulica, TRH, sea entre 15 a 30 minutos para aumentar la eficiencia de remoción de sólidos del sistema (Summerfelt, Mathisen, Holan, & Terjesen, 2016; Timmons & Ebeling, 2010). Por lo tanto, para calcular la altura requerida del sedimentador de flujo radial se utilizó la siguiente ecuación (Riffat, 2013):

$$t_D = \frac{V}{Q} \quad (2.6)$$

Donde:

t_d : *Tiempo de retención hidráulica (h)*

V : *Volumen del sedimentador (m^3)*

Q : *Caudal ($\frac{m^3}{h}$)*

Una vez que se calculó el volumen requerido del sedimentador, se determinó la altura necesaria del equipo a partir de la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V = A_S * H \quad (2.7)$$

Donde:

V : *Volumen del sedimentador (m^3)*

A_S : *Área superficial (m^2)*

H : *Altura (m)*

Una vez determinadas la dimensiones y diferentes parámetros para el diseño del sedimentador, es necesario determinar la concentración de sólidos que no son removidos por el sedimentador y pasan hacia el proceso de biofiltración. Este valor se calculó con la siguiente expresión (Riffat, 2013):

$$M_{\text{sólidos al filtro biológico}} = Q_{\text{total,out}} * C_{\text{SST,in}} * (1 - \% \text{Remoción}) \quad (2.8)$$

Donde:

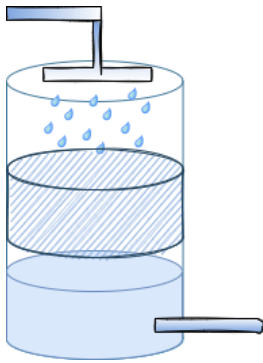
$Q_{\text{total,out}}$: *Caudal total que sale del tratamiento primario ($\frac{m^3}{h}$)*

$C_{\text{SST,in}}$: *Concentración de sólidos suspendidos totales que ingresa al tratamiento primario ($\frac{mg}{L}$)*

$\% \text{Remoción}$: *Porcentaje de remoción del filtro primario*

2.4.2 Biofiltro

Una vez culminado el proceso de remoción de la mayor cantidad de sólidos suspendidos totales, el efluente de este equipo pasa al proceso de biofiltración. El principal objetivo del biofiltro es realizar la remoción de contaminantes nocivos para la cría de peces, en este caso el nitrógeno amoniacal total, también conocido como NAT (Timmons & Ebeling, 2010). Sin embargo, también existe remoción de dióxido de carbono, una cantidad pequeña de sólidos y la oxigenación del agua (Timmons & Ebeling, 2010).



Para realizar el diseño del filtro biológico de tipo percolador, se requirió conocer las concentraciones de los parámetros mencionados para calcular el caudal de recirculación necesario y asegurar un correcto funcionamiento del sistema (Pretorius & Goosen, 2020). Por lo tanto, se realizó un balance de materia global, el cual incluye tanto el estanque de peces como los equipos de tratamiento que se pueden apreciar en la Ilustración 2.4.

Ilustración 2.3 :

Filtro percolador

Adaptado de
*Recirculating
Aquaculture* (p.309)
por M. Timmons,
2010

Cabe recalcar que en la Ilustración 2.4, el componente denominado “Equipo de tratamiento” incluye tanto el filtro físico como el biológico implementados para el sistema de recirculación acuícola. El balance de materia se realizó considerando que el sistema alcanzó el estado estacionario, es decir, para la determinación del caudal, se asume que la acumulación de cada componente es despreciable (Pretorius & Goosen, 2020; Timmons & Ebeling, 2010):

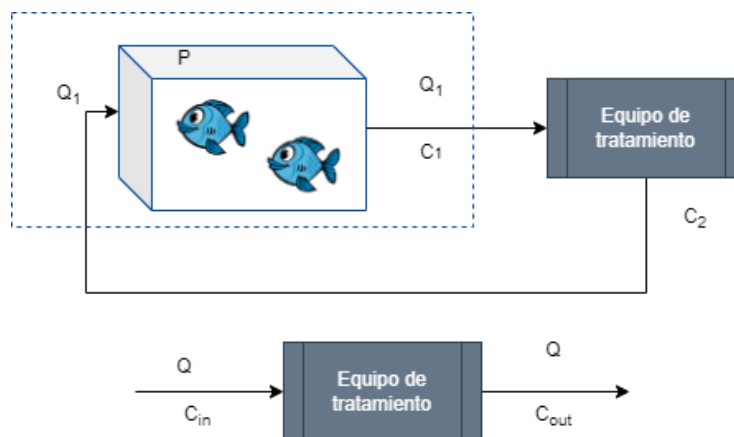


Ilustración 2.4: Balance de materia en la piscina

Adaptado de *Recirculating Aquaculture* (p.80) por M. Timmons, 2010

$$Q * C_{i,out} \pm P_i = Q * C_{i,in} \quad (2.9)$$

Donde:

Q : Caudal recirculado desde el biofiltro hacia la piscina $\left(\frac{m^3}{h}\right)$

$C_{i,in}$: Concentración de entrada al biofiltro del componente i $\left(\frac{mg}{L}\right)$

$C_{i,out}$: Concentración de salida del biofiltro del componente i $\left(\frac{mg}{L}\right)$

P_i : Producción del componente i en el estanque $\left(\frac{mg}{L}\right)$

En la expresión anterior se desconocen tanto los términos de producción como la concentración de salida de cada uno de los componentes. Para la determinación de la concentración de salida se usó la siguiente expresión (Pretorius & Goosen, 2020; Timmons & Ebeling, 2010):

$$C_{i,out} = C_{i,in} + \frac{T_i}{100} (C_{i,best} + C_{in}) \quad (2.10)$$

Donde:

$C_{i,out}$: Concentración de salida del biofiltro del componente i $\left(\frac{mg}{L}\right)$

$C_{i,in}$: Concentración de entrada al biofiltro del componente i $\left(\frac{mg}{L}\right)$

$C_{i,best}$: Mejor concentración posible del componente i en un biofiltro $\left(\frac{mg}{L}\right)$

T_i : Eficiencia de remoción del componente i

Mientras que para los términos de producción se utilizaron las siguientes expresiones, las cuales están en términos de la cantidad de alimento suministrado para las tilapias de las piscinas.

Oxígeno disuelto (OD)

$$P_{O_2} = \left(\frac{Kg \text{ alimento}}{\text{día}}\right) \left(0.50 \frac{kg O_2}{Kg \text{ alimento}}\right) \left(\frac{10^6 mg}{Kg}\right) \quad (2.11)$$

El segundo término de la ecuación hace referencia a que, de acuerdo con Timmons y Pretorius, se consume $0.25 \frac{kg O_2}{Kg \text{ alimento}}$ tanto por parte de los peces como por las bacterias heterotróficas pertenecientes a la fauna de la piscina de cría de las especies,

dando como valor resultante $0.50 \frac{kg O_2}{Kg alimento}$ (Pretorius & Goosen, 2020; Timmons & Ebeling, 2010)

Nitrógeno amoniacal total (NAT)

$$P_{TAN} = \left(\frac{Kg alimento}{día} \right) \left(0.35 \frac{Kg proteína}{Kg de alimento} \right) \left(0.092 \frac{kg TAN}{Kg proteína} \right) \left(\frac{10^6 mg}{Kg} \right) \quad (2.12)$$

El segundo término de la ecuación hace referencia al contenido de proteína del alimento que se le da a los peces, este valor puede cambiar de acuerdo con el alimento con el cual se alimente a la tilapia (Timmons & Ebeling, 2010).

El tercer término de la ecuación hace referencia a un cálculo estimado de la producción de Nitrógeno Amoniacal Total y proviene del siguiente cálculo:

$$0.092 = 0.16 * 0.80 * 0.80 * 0.90$$

- Donde:
- 0.16 (16% de la proteína es nitrógeno)
- 0.80 (80% del nitrógeno es asimilado)
- 0.80 (80% del nitrógeno asimilado es excretado)
- 0.90 (90% del nitrógeno es excretado como TAN)

Dióxido de Carbono (CO₂)

$$P_{CO_2} = \left(\frac{kg de alimento}{día} \right) \left(0.50 \frac{kg O_2}{kg alimento} \right) \left(1.375 \frac{kg CO_2}{kg CO_2 consumido} \right) \left(\frac{10^6 mg}{kg} \right) \quad (2.13)$$

El segundo término se da debido al consumo de oxígeno por las baterías y el metabolismo de los peces. El tercer término es dado de forma estequiométrica (Timmons & Ebeling, 2010).

Sólidos suspendidos totales (SST)

$$P_{SST} = \left(\frac{kg de alimento}{día} \right) \left(0.25 \frac{kg SST}{kg alimento} \right) \left(\frac{10^6 mg}{kg} \right) \quad (2.14)$$

El segundo término hace referencia a que de acuerdo con Timmons el 25% del alimento que se da a los peces se excretan de diferentes maneras o simplemente no es consumido (Timmons & Ebeling, 2010).

Una vez que se realizó el cálculo de cada uno de los caudales requeridos, de acuerdo con Timmons, se debe escoger el mayor caudal de todos, puesto que esta es la situación que nos asegura la máxima remoción del contaminante de acuerdo a la efectividad requerida sin dejar de lado los requerimientos de los otros parámetros (Timmons & Ebeling, 2010). Sin embargo, es importante recalcar que los valores que se determinan por medio de estos cálculos son referenciales y en algunas ocasiones se los modifica de acuerdo al caso real (Timmons & Ebeling, 2010).

Finalmente, con los valores previamente determinados se pudo realizar el cálculo del área media del biofiltro utilizando la siguiente expresión (Timmons & Ebeling, 2010):

$$A_{media} = \frac{P_{TAN}}{ATR} \quad (2.15)$$

Donde:

A_{media} : Área media del filtro percolador (m^2)

ATR : área de la tasa de conversión de TAN ($\frac{g}{m^3d}$)

P_{TAN} : Producción de TAN ($\frac{mg}{L}$)

Luego se determinó el volumen medio del biofiltro:

$$V_{media} = \frac{A_{media}}{SSA} \quad (2.16)$$

Donde:

- V_{media} : Volumen del medio del filtro percolador (m^3)
- A_{media} : Área media del filtro percolador (m^2)
- SSA : Área específica superficial ($\frac{m^2}{m^3}$)

Posteriormente se determinó la sección transversal del equipo:

$$A_{bed} = \frac{Q_{tank}}{HLR} \quad (2.17)$$

Donde:

- A_{bed} : Área de la sección transversal del equipo (m^2)
- Q_{tank} : Caudal del tanque ($\frac{m^3}{h}$)
- HLR : Tasa de carga hidráulica ($\frac{m^3}{m^2d}$)

Una vez que se calculó el área de la sección transversal del equipo se puede determinar las demás dimensiones o se podría utilizar un filtro en forma rectangular, debido a que es un biofiltro casero que usó cajones de plástico, por lo tanto, se procedió a calcular la cantidad de filtros necesarios para tener el área transversal deseada, mediante la siguiente fórmula:

$$\#Filtros = \frac{A_{trans-cajones}}{A_{bed}} \quad (2.18)$$

Donde:

A_{bed} : Área de la sección transversal del equipo (m^2)

$A_{trans-cajones}$: Área transversal de la cajonera (m^2)

Finalmente, se calculó la profundidad del biofiltro utilizando la siguiente expresión:

$$Profundidad_{medio} = \frac{V_{medio}}{A_{medio}} \quad (2.19)$$

Donde:

Profundidad_{medio}: Profundidad del medio del filtro percolador (m)

V_{media} : Volumen del medio del filtro percolador (m^3)

A_{media} : Área media del filtro percolador (m^2)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Selección del sistema de recirculación

Por medio de la investigación realizada se determinó que las tecnologías más prometedoras eran dos, las cuales son: el sistema acuapónico y el RAS. En etapas anteriores de investigación del proyecto de producción de peces en la comunidad de Paipayales llevado a cabo por estudiantes de ESPOL, se realizó un sistema acuapónico a pequeña escala para examinar la viabilidad de la implementación de este sistema en la comunidad.

Este sistema se diseñó utilizando 3 especies diferentes de peces, los cuales fueron: tilapia, pez tigre y pez cebrá, como biomasa animal. Mientras que la lechuga era la especie vegetal del sistema que completaba la simbiosis del proceso. Al finalizar la experimentación, se obtuvo un aumento de la masa animal, sin embargo, la cantidad de ejemplares disminuyó debido a la mezcla de especies en un mismo hábitat que desencadenó en canibalismo (Álvarez & Guevara, 2021).

En el escenario de la producción del alimento vegetal se obtuvieron resultados no muy favorables, ya que varias lechugas se descompusieron y otras se marchitaron. Por lo tanto, se determinó que el sistema acuapónico no resulta favorable de implementar en la costa ecuatoriana debido a las condiciones ambientales de la región (Álvarez & Guevara, 2021).

De igual manera, de acuerdo con lo establecido por Koirala y Marsh, la acuaponía se encuentra muy limitada en cuanto a disponibilidad de cultivos vegetales. En la actualidad, en los sistemas acuapónicos se utilizan únicamente dos siembras, siendo estas de lechuga y pepino, las cuales en Ecuador, únicamente se producen en la región interandina, imposibilitando su implementación en Paipayales, por su ubicación en la región costa (Koirala, 2021; Marsh, 2020).

Por ejemplo, la lechuga tiene su desarrollo óptimo en un rango de temperaturas de entre 15-18 °C aunque el proceso puede suscitarse a partir de los 5 °C (Proain Tecnología Agrícola, 2020). De igual manera, un proceso de horticultura en el cual se cultive lechuga requiere entre 120-150 litros de agua para humedecer únicamente el sustrato que posee la semilla, siendo esta una cantidad elevada en relación con la cantidad de agua disponible en la comunidad (Fueyo, Arrieta, & Feito, 1998).

Es así como, por medio de la experimentación realizada y la revisión bibliográfica se escoge la tecnología de recirculación RAS, por su escalabilidad, ahorro de agua y mejor control en la calidad de esta.

3.2 Resultados de los parámetros fisicoquímicos

De acuerdo con la metodología mencionada en el capítulo 2, se obtuvieron los resultados de 6 parámetros muy importantes para el desarrollo del diseño del RAS. Por lo que a continuación se presenta una tabla con los valores obtenidos de la piscina de forma triangular con dimensiones de 19x19x15 m en sus lados y una profundidad de 0.70 m, teniendo un volumen de 91.6 m³:

Tabla 3.1: Resultados de los análisis de parámetros de la piscina y rango óptimo (Betancur, 2019; Ladino-Orjuela, 2011; Legua, 2013; Yanzapanta, 2015)

Parámetros	Medio 1	Medio 2	Orilla 1	Orilla 2	Rango óptimo
pH	6,63	6,63	6,82	6,82	6.0-8.5
Temperatura (°C)	26,9	26,9	26,6	26,6	28-30
Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) (ppm)	0,56	1,12	2,8	1,12	0-2
Sólidos Suspendidos (SST) (ppm)	118	112	152	158	25-10
Oxígeno Disuelto (OD) (ppm)	14,43	14,43	14,42	14,42	>5
Dióxido de Carbono (ppm)	8,8	4,4	2,64	2,64	9-30

[Elaboración propia]

Con respecto a los valores obtenidos de pH, se puede notar que la tendencia tanto en el medio como en la orilla son valores muy cercanos a 7, lo cual no representa una cifra alarmante debido a que recientemente fue realizada una reposición de agua. Sin embargo, hay que mencionar que existe una ligera diferencia en el medio de la piscina la cual es un poco mayor y de acuerdo con varios estudios este aumento en la acidez es

consecuencia de mayor cantidad de gas carbónico en esa sección de la piscina (Saavedra, 2006). Este ácido se debe en gran parte a la respiración del pez, ya que aumentar su concentración en la piscina y combinarse con el agua produce una reacción dando como resultado el ácido carbónico (Ladino-Orjuela, 2011). Viendo así que a la larga si no se realiza un tratamiento óptimo se podría volver más ácida esa sección (Saavedra, 2006). Por otro lado, también se puede decir que hay mayor frecuencia de peces en esa sección de la piscina.

En el caso de la temperatura los valores están dentro del rango óptimo en el que se desarrolla la tilapia (ver **Tabla 1.2: Parámetros más importantes en el cultivo de Tilapia Roja** (Betancur, 2019; Ladino-Orjuela, 2011; Legua, 2013; Yanzapanta, 2015)), aunque hay que tomar en cuenta que en la actual temporada el clima está un poco más fresco y podría incrementar un poco más la temperatura del agua, pero esto no significaría ningún riesgo hacia el pez que de acuerdo con estadísticas la máxima temperatura del agua en la costa ecuatoriana puede ser de 29.4°C (Info, 2022a).

3.2.1 Sólidos suspendidos totales

Ahora bien, analizando el valor obtenido de la concentración de SST se pudo notar que este estaba por encima del límite máximo aceptado para el cultivo de tilapia. Si bien es cierto que este pez es muy fuerte y capaz de adaptarse a condiciones límite, un alto nivel de sólidos suspendidos pueden afectar de sobremanera su desarrollo (Cruz Bautista, 2021).

La alta concentración de este parámetro es inversamente proporcional a la concentración de oxígeno disuelto en el agua y directamente proporcional a la temperatura del medio (Fondriest Environmental, 2014). Al haber una mayor cantidad de partículas suspendidas, estas absorben una mayor cantidad de calor por radiación que el calor absorbido por el agua, el cual, a su vez, se transfiere por conducción al agua, disminuyendo los niveles de oxígeno disuelto en el medio (Fondriest Environmental, 2014).

Es decir, a medida que la concentración de sólidos suspendidos totales aumenta en el agua, se produce un incremento de la temperatura de esta mediante mecanismos de

transferencia de calor. Y de acuerdo con el principio de la solubilidad de los gases en líquidos, a medida que se aumenta la temperatura, los gases se desprenden, porque disminuye la solubilidad (Brown, LeMay, Burnsten, & Murphy, 2003).

Por lo tanto, de acuerdo con el resultado obtenido, es de vital importancia diseñar un equipo de filtración física que tenga la capacidad de remover los sólidos suspendidos totales del agua, previniendo bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua.

3.2.2 Oxígeno disuelto

El OD es un factor muy importante en la vida de la tilapia o de cualquier pez, y de acuerdo con los resultados mostrados los valores superan los 14 ppm (valor máximo establecido por Kubitzka), no obstante, esta cantidad puede contener ciertas interferencias por la reposición reciente. Hay que destacar que este valor está ligado al desarrollo correcto del pez porque si no existe la cantidad suficiente de oxígeno el pez deja de alimentarse produciendo que no exista una buena tasa de crecimiento, y desencadenando un decaimiento en los parámetros mencionados anteriormente, produciendo que sea muy vulnerables a diversas enfermedades que podrían provocar la muerte de todo el cultivo (Saavedra, 2006). Adicionalmente, la concentración de este va a depender de la temperatura a la que se encuentre, ya que, si la temperatura incrementa a más de 30°C, será mucho más difícil mantener el oxígeno, teniendo como consecuencia un metabolismo muy lento con estrés y posibilidades a una alta tasa de mortalidad.

3.2.3 Dióxido de Carbono

Como tercer parámetro se analizó la concentración de CO₂ en el agua. Tomando en cuenta el valor obtenido durante la experimentación y el límite inferior para el cultivo de tilapia, se puede notar que este se encuentra por debajo de 9 ppm la cual es la concentración mínima requerida. Sin embargo, cabe recalcar que hubo una reposición de agua en las piscinas, lo cual pudo haber afectado los parámetros analizados.

Un punto a favor es que la tasa de mortalidad de la tilapia no se ve muy influenciada por este parámetro. Sin embargo, el CO₂ debilita al pez, haciendo vulnerable hacia enfermedades que afectan las condiciones de vida (Kaya, Hisar, Yilmaz, Gürkan, & Hisar, 2016).

Al tener una prolongada exposición de los peces a altas concentraciones de CO₂ se evidencia una disminución en la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre de los ejemplares, lo cual puede llegar a sofocarlos y llevarlos a estresarse (Kaya et al., 2016). Este fenómeno se produce así se tenga una gran concentración de oxígeno disuelto en el agua, ya que la capacidad de transporte de OD se reduce considerablemente por parte del mismo organismo (Fried, 2022; Kaya et al., 2016). Por lo tanto, la mortalidad no se evidencia inmediatamente, esta se manifiesta a largo plazo.

En síntesis, la exposición de las tilapias a altos niveles de CO₂ provoca una condición de vida poco favorable para la especie, por lo que se requiere un método de eliminación de este gas. El diseño de un biofiltro por goteo tiene la característica de ser muy efectivo en cuanto a la eliminación de gases contaminantes se refiere, por lo que es el diseño más adaptable a las condiciones del proyecto.

3.2.4 Nitrógeno Amoniacal Total

El cuarto parámetro es el NAT, estos dieron valores un poco alarmantes, siendo uno de ellos mayor 2 mg/L, que de acuerdo con el reporte realizado por Kubitza este valor es el límite máximo que puede soportar esta especie. Por lo que está fuera de rango y podría provocar la muerte o la susceptibilidad de enfermedades en el cultivo. Esto se debe a que al existir una mayor concentración de esta sustancia provoca que disminuya la cantidad de oxígeno que se transporta por la sangre del pez, de tal manera que perjudica el bienestar y el crecimiento de este (Timmons & Ebeling, 2010).

Por otro lado, el resultado arrojado se podría deber a que la mayor fuente de NAT es por las excreciones de las tilapias, asimismo el alimento que se encuentra en el fondo de la piscina, algas muertas, los cuales se descomponen y producen estos niveles. De tal manera que el punto clave es el tratamiento y eliminación de este parámetro, ya que la cantidad que está teniendo y con la reposición reciente no debería encontrarse en ese valor.

A su vez la combinación de estos parámetros con el cambio brusco de temperatura produciría la ralentización del metabolismo de la tilapia; también importante señalar que produciría un cambio radical en el pH. De tal modo que este parámetro es el que tiene

mayor peso dentro de la tasa de mortalidad de la tilapia por involucrar directamente su desarrollo (Carvajal, 2014).

3.3 Dimensiones y capacidades de los equipos

3.3.1 Densidad de cultivo

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 2, se elaboró un diseño para un sistema de recirculación con un cultivo de 2.5 kg del peso del pez por m³ de agua debido a que se está realizando un tipo semi-intensivo con una piscina de tierra. De tal forma que es destinada exclusivamente para la etapa de pre-engorde y engorde, por lo tanto, el pez se desarrollará en la piscina desde los 2 g hasta los 500 g (talla deseada), con una tasa de alimentación máxima de 3.02 kg de alimento por día. Esto fue determinado de acuerdo con varias fuentes, las cuales aseguran un buen crecimiento de la tilapia y a su vez mencionan los m³ necesarios para una buena calidad de vida, teniendo así un completo desarrollo (Carvajal, 2014; Legua, 2013; Saavedra, 2006)

Cabe mencionar que esta producción se lleva a cabo con alevines machos (reversión sexual) para así evitar problemas con sobrepoblación y tener un mayor control en los parámetros de calidad del agua.

3.3.2 Sedimentador

El proceso de recirculación inicia con el agua en la piscina, la cual va a contener restos de comida, excreciones de peces y algas muertas en su mayoría. Por lo tanto, esta piscina contiene un alto porcentaje de sólidos, los cuales de no ser removidos podrían disminuir la cantidad de oxígeno disuelto y provocar el cambio brusco de la temperatura, haciendo que el pez sea vulnerable a varias enfermedades.

De manera que el sistema propuesto inicia con el bombeo del agua de la piscina hacia un tanque sedimentador de flujo radial, el cual permite que se forme un remolino en el centro del tanque. Este fenómeno ayuda a que exista una amortiguación de la turbulencia, es decir, que permite que los sólidos puedan sedimentar de forma más eficiente (Davidson, John; Summerfelt, 2005). Y de acuerdo con los textos consultados, al tratarse de cultivo de tilapias la mejor manera de tener una buena remoción en cultivos semi-intensivo es utilizando este tipo de sedimentador, ya que la velocidad del agua baja y se puede disminuir aún más el caudal de entrada al tanque (Timmons & Ebeling, 2010).

Por consiguiente, el flujo de agua ingresa por debajo del tanque de PVC hacia el centro superior a través de una tubería, chocando con un balde plástico, el cual tiene un diámetro más pequeño al del tanque (ver **Ilustración 2.2. Sedimentador de flujo radial**). Esto produce que el agua forme el flujo circular y tienda a ser mucho más laminar, produciendo una mejor velocidad de sedimentación.

De acuerdo con las heurísticas planteadas por Timmons se obtuvo que los límites mínimos de dimensionamiento son los siguientes. Cabe mencionar que, de acuerdo con Timmons y Tom, estas reglas de diseño pueden ser utilizadas para sistemas de recirculación de baja densidad de cultivo, como es el caso de esta investigación.

Tabla 3.2: Heurísticas a considerar para el dimensionamiento del sedimentador (Timmons & Ebeling, 2010)

<i>Área teórica (m²)</i>	0,2750
<i>Diámetro (m)</i>	0,59

[Elaboración propia]

De modo, que se utilizó como referencia estos valores para que se pueda obtener una buena eficiencia teórica y por medio de estudios realizado de sólidos suspendidos se analizó una gráfica de la tendencia de eficiencia de remoción de sólidos (ver **Apéndice B – Ilustración 4.1**). Gracias a la elección de un caudal menor, las dimensiones del sedimentador pueden entrar en los componentes reales que posee a disponibilidad la comunidad, lo cuales son tanques de agua de 200 litros.

Es así como se presenta la siguiente tabla con las dimensiones, eficiencia, tiempo de retención para sedimentar la máxima cantidad de solidos suspendidos, entre otros:

Tabla 3.3: Condiciones del sedimentador de flujo radial

<i>Eficiencia</i>	75%
Velocidad de sedimentación (cm/s)	0,08
Velocidad de sedimentación (m/h)	2,81
Diámetro (m)	0,60
Área de sedimentación (m²)	0,28
Caudal (m³/h)	0,79
Altura (m)	0,80
td (h)	0,285

Caudal (lph)	794,94
C_out_SST (mg/L)	38,75

[Elaboración propia]

Es importante mencionar que el caudal tan pequeño juega un papel fundamental dentro del sedimentador, debido a que si el flujo es mucho más laminar es mejor la remoción de este parámetro; por lo que esa sería una gran ventaja del diseño.

Muy aparte de los valores de diseño, hay que mencionar que siempre existen diferencias entre los valores reales y los experimentales, de modo que el resultado de la remoción del diseño puede variar hasta un 48% de eficiencia como mínimo (Info, 2022b).

Una vez que el agua llegue al tanque es primordial que se tenga un tiempo de sedimentación de alrededor de 17-18 minutos. Hay que mencionar que en el arranque del diseño es importante dejar que el tanque se llene, una vez esto suceda se puede continuar como un proceso continuo, teniendo tiempo de operación diarios de 12 horas.

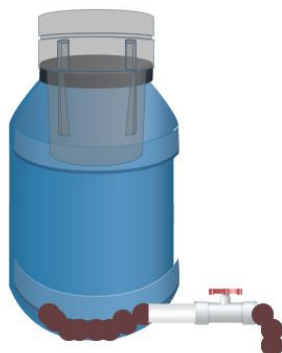


Ilustración 3.1: Salida de los sólidos del sedimentador

[Elaboración propia]

Por otro lado, estos sólidos que se almacenan en la parte inferior del tanque son extraídos a través de una válvula o llave colocada en la salida, como se puede apreciar en la Ilustración 3.1. Se debe tener en cuenta que su mantenimiento debe ser ejecutado como mínimo cada 4 meses, de tal forma que se evite cualquier tipo de contaminación o taponamiento (Sal & Merino, 2007).

Finalmente, en esta etapa el agua es extraída por la parte superior del tanque sedimentador hacia un tanque de almacenamiento con las mismas dimensiones con la finalidad de mantener una reserva constante para el biofiltro.

3.3.3 Biofiltro

Después de pasar por el sedimentador, el agua se dirige mediante una bomba hacia el filtro biológico, el cual es del tipo de torre de goteo. El principal contaminante removido en el biofiltro es el NAT, utilizando bacterias nitrificantes y un medio que promueva el crecimiento de estas mediante una gran área superficial específica y una alta tasa de nitrificación (Timmons & Ebeling, 2010).

Utilizando las ecuaciones planteadas en el capítulo 2, se calculó la producción o consumo estimado de cada parámetro, los cuales dependen de la cantidad de alimento suministrado a los ejemplares de tilapia. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3.4 Producción diaria de cada parámetro dentro de la piscina

Parámetro	Producción (mg/L)
Nitrógeno amoniacal total (NAT)	97386,997
Sólidos Suspendidos (SST)	756110,222
Oxígeno Disuelto (OD)	-1512220,443
Dióxido de Carbono (CO₂)	2079303,109

[Elaboración propia]

Cabe recalcar que la concentración de oxígeno disuelto tiene signo negativo ya que este parámetro no se produce durante el cultivo de peces, en cambio, este valor es consumido tanto por los ejemplares como por las bacterias encontradas dentro de la piscina. Es decir, a medida que transcurre el tiempo, esta concentración va disminuyendo.

De igual manera, al realizar las mediciones de los parámetros de las piscinas se obtuvieron 4 resultados por cada uno. Por cuestiones de diseño, se seleccionaron los resultados que representen el escenario menos favorable para los peces de la piscina.

Con estos resultados obtenidos y utilizando las heurísticas planteadas en el capítulo 2, se pudo calcular las concentraciones a la salida del filtro en las cuales se esperaba tener unas concentraciones más altas o bajas de acuerdo con lo que el parámetro requiera. Por ejemplo, el oxígeno disuelto debe incrementar a medida que pasa a través del

biofiltro, mientras que los otros parámetros deben disminuir su concentración. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 3.5 Concentración de cada parámetro a la entrada y salida del biofiltro

Parámetro	Concentración de ingreso (mg/L)	Concentración de salida (mg/L)	Rango óptimo (mg/L)
Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)	2,8	1,4	0-2
Sólidos Suspendidos (SST)	38,75	3,875	25-10
Oxígeno Disuelto (OD)	14,43	15,84	>5
Dióxido de Carbono (CO₂)	8,8	3,82	9-30

[Elaboración propia]

Analizando los valores de las concentraciones de salida de cada uno de los parámetros se pudo notar que con las heurísticas y los balances de materia planteados, se obtuvieron concentraciones dentro de los rangos de cultivo.

La concentración de sólidos suspendidos totales descendió considerablemente al pasar por ambos filtros, reduciendo el problema de la disminución del oxígeno disuelto debido al aumento de la temperatura por la transferencia de calor por las partículas suspendidas. De igual manera, el dióxido de carbono también presentó un decrecimiento, presentando una mejoría en la calidad del agua del estanque.

En términos de nitrógeno amoniacal, se realizó un análisis exhaustivo de diferentes medios filtrantes que promuevan la eliminación del NAT del agua, entre los cuales se tuvo como posibles opciones los anillos Kaldnes, anillos Norton y piedra pómez. Se decidió utilizar el último tipo de empaque, ya que este cuenta con una mayor tasa de nitrificación, así como un menor costo de adquisición para el proyecto (Pungrasmi, Phinitthanaphak, & Powtongsook, 2016).

Para este parámetro se evidenció una minoración de la concentración, la cual se debe a la tasa de nitrificación y a la alta eficiencia del material del empaque del equipo, reduciendo la posibilidad de mermar la vida de los peces. Por último, la concentración

de OD aumentó, la cual es una de las principales características de la utilización de este tipo de filtros.

De igual manera, se determinaron los caudales requeridos para realizar la remoción de cada uno de los parámetros, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 3.6 Caudal requerido para la eliminación de cada uno de los parámetros

Parámetro	Caudal requerido (m³/h)
Amonio (TAN)	2,89
Sólidos Suspendidos (SST)	0,90
Oxígeno Disuelto (OD)	44,59
Dióxido de Carbono (CO₂)	17,39

[Elaboración propia]

Si bien es cierto que se tuvo que haber seleccionado el mayor caudal entre los resultados anteriores para asegurar la remoción de esos contaminantes, el diseño se centró en el caudal obtenido para la remoción del NAT. Esto se fundamentó en el tipo de biofiltro seleccionado, las torres de goteo, son muy utilizadas en sistemas en los cuales se dificulta la adquisición de equipos desgasificadores o en sistemas de aireación del agua (Eding, Kamstra, Verreth, Huisman, & Klapwijk, 2006; Timmons & Ebeling, 2010).

Entre las principales ventajas de utilizar una torre de goteo se tiene que el proceso de desgasificación o en este caso, eliminación del CO₂ y la oxigenación se suscitan a medida que el agua va cayendo por gravedad en el filtro como si de una cascada se tratase (Eding et al., 2006). Es decir, si el biofiltro es colocado sobre la piscina, a medida que al agua va cayendo, se produce la compensación de estos parámetros de cultivo, lo cual permite centrarse en la remoción del NAT.

Con los datos del balance de materia y la selección del caudal pertinente se realizó el dimensionamiento de los equipos utilizando las ecuaciones previamente establecidas en el capítulo 2. Los resultados del dimensionamiento se presentan a continuación:

Tabla 3.7 Dimensiones del biofiltro

Dimensión del equipo	Valor
Área del medio (m ²)	93,64
Volumen del medio (m ³)	0,418
Área transversal del biofiltro (m ²)	0,48
Profundidad del tanque (m)	0,87
Cantidad de biofiltros	2
Caudal de la bomba (m ³ /h)	3

[Elaboración propia]

Tomando en cuenta los cálculos realizados, se evidenció que el área transversal del biofiltro era muy grande para fabricar un equipo con esas características, por lo que se optó por dividir el área en dos recipientes que sean más fáciles de adquirir, manteniendo la efectividad del proceso de remoción (Timmons & Ebeling, 2010).

Por lo tanto, utilizando las dimensiones calculadas para los equipos, con el volumen del material filtrante y un caudal de la bomba adecuado para el proceso, se promueve el proceso de nitrógeno amoniacal total de la piscina.

Por lo que, el resultante del diseño planeado es el siguiente esquema:

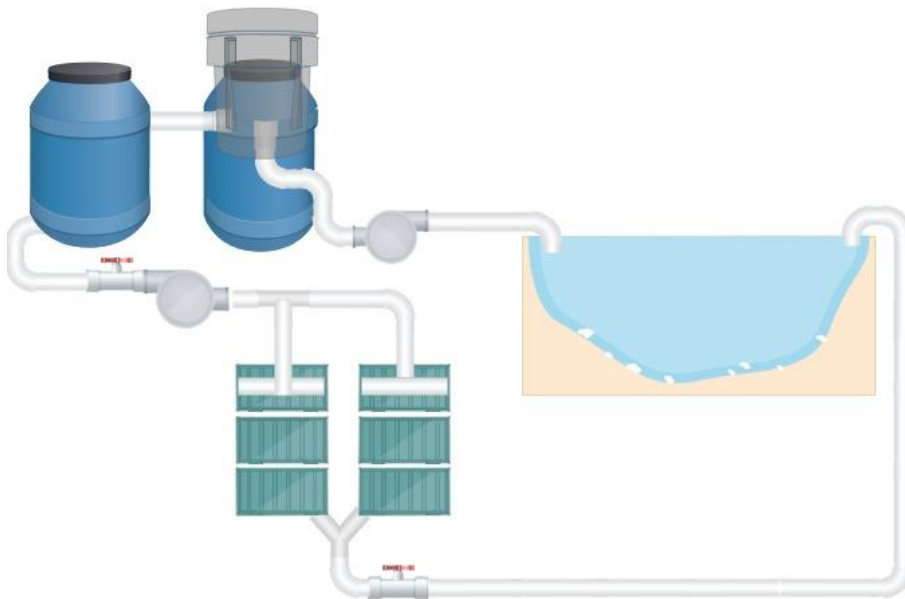


Ilustración 3.2: Diagrama del diseño

[Elaboración propia]

3.4 Análisis económico

Para el diseño planteado se realizó un análisis económico contemplando los factores más significativos para el proyecto. El primer paso fue la determinación de la inversión, el cual considera todas las maquinarias, los costos de instalación, es decir, todos los costos involucrados para el arranque del proyecto. Por lo tanto, la siguiente tabla considera que la inversión inicial es de \$1.032,13.

Tabla 3.8: Descripción de la inversión

DETALLE DE INVERSIONES	Valor
1.1 Inversión en equipos y mobiliarios	\$553,49
1.2 Costos de materiales de instalación	\$ 50,00
1.3 Costos de protección de bombas	\$ 40,00
1.4 Activos intangibles	\$100,00
Capital de trabajo	\$288,64
Total de Inversión	\$1.032,13

[Elaboración propia]

Por otro lado, se considera que la tilapia al llegar a la talla deseada será vendida en un valor aproximado de \$1.80, costo esperado por cada ejemplar, considerando que existan dos cultivos al año. Por consecuencia se proyectó un periodo de vida de 7 años del proyecto, es decir, que el flujo de caja del diseño se programó con esa cantidad de años, al igual que diversos costos de interés, inflación, amortización y depreciación de los activos tanto tangibles como intangibles. Asimismo, se consideraron los mantenimientos y los costos de nuevo material de empaque en el caso del biofiltro, limpieza y reposiciones de diversos materiales, entre otros valores. De tal forma, que se presenta el siguiente flujo de caja del proyecto diseñado:

Tabla 3.9: Flujo de caja del proyecto

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7
INGRESOS								
Ingresos por venta		\$1.530,00	\$1.440,00	\$2.220,00	\$1.292,00	\$1.350,00	\$1.942,50	\$1.225,00
TOTAL DE INGRESOS		\$1.530,00	\$1.440,00	\$2.220,00	\$1.292,00	\$1.350,00	\$1.942,50	\$1.225,00
EGRESOS OPERATIVOS								
Costo directo por la alimentación		\$374,00	\$374,00	\$374,00	\$391,00	\$425,00	\$510,00	\$425,00
Costos de materiales para reparación y mantenimiento		\$30,00	\$35,00	\$40,00	\$35,00	\$38,00	\$39,00	\$40,00
Mano de obra externa		\$100,00	\$10,00	\$10,00	\$10,00	\$10,00	\$10,00	\$10,00
Gastos de servicios		\$71,00	\$76,00	\$77,00	\$79,00	\$80,00	\$82,00	\$85,00
Mano de obra en reparaciones y mantenimientos		\$30,00	\$35,00	\$40,00	\$35,00	\$38,00	\$39,00	\$40,00
Gastos de venta		\$150,00	\$172	\$217	\$169	\$178	\$227	\$184
IMPUESTOS		\$39,22	\$39,22	\$39,22	\$39,22	\$39,22	\$ 19,21	\$ 15,30

TOTAL DE EGRESOS OPERATIVOS	\$794,22	\$741,22	\$797,22	\$758,22	\$08,22	\$ 926,21	\$ 799,30	
FLUJO OPERATIVO INVERSIONES	\$735,78	\$698,78	\$1.422,78	\$533,78	\$541,78	\$1.016,29	\$425,70	
1.1 Inversión en equipos y mobiliarios	\$553,49							
1.2 Costos de materiales de instalación	\$50,00							
1.3 Costos de protección de bombas	\$40,00							
1.4 activos intangibles	\$100,00							
Capital de trabajo	\$288,64							
FLUJO DE CAJA ECONÓMICO	\$-1.032	\$735,78	\$698,78	\$1.422,78	\$533,78	\$541,78	\$1.016,29	\$425,70

[Elaboración propia]

Uno de los puntos a recalcar, es que los ingresos por ventas van variando, esto es debido a que no siempre se va a lograr vender el mismo porcentaje de especímenes. Alguna de las razones es por factores medio ambientales y el crecimiento de este negocio, lo cual hace que disminuya el porcentaje de venta estimados de las 1000 tilapias esperadas. Además de que es común que no todo el 100% de la colocadas en su etapa inicial lleguen hasta el final con el peso deseado (500g), sin embargo esto sería alrededor de un 10 o 15% (McDermand, 2022; Pesquera, 2021)

Por otro lado, los valores de la sección de flujo de caja económico muestran que existe un periodo menor a tres años de recuperación, determinando así desde un primer punto la rentabilidad de la producción de tilapias, teniendo en cuenta que se proyectó una tasa de mortalidad máxima del 20% de acuerdo con distintos estudios; es decir, que aún que exista esa cantidad de peces muertos se tiene una ganancia notable (McDermand, 2022).

Adicional a esto por experiencia de la comunidad al practicar la producción sin el sistema presentado la tasa de mortalidad fue entre un 50 y 60% de la población inicial. Por lo que, se consideró un valor superior al 20% dicho por la investigación, dando como resultado un análisis asumiendo condiciones límites; por consiguiente, es claro que se esperen ganancias con más incremento debido a que de forma real las condiciones proyectadas no excederán y la tasa será menor al 20%.

Tabla 3.10: Factores económicos

VAN	\$ 936,93
------------	-----------

TIR	76%
Costo de Oportunidad (COK)	36%

[Elaboración propia]

Gracias al flujo de caja y los valores anteriores expuestos se determinó el VAN (valor actual neto) el cual mide si el proyecto supera o no la inversión realizada en comparación con las ganancias, de manera que al dar un valor mayor a cero representa que se está consiguiendo ganancias con la inversión realizada. Teniendo como resultado que muy aparte de retornar el valor de la inversión se están consiguiendo ganancias extras a lo aportado.

Por otro lado, se tiene el TIR (tasa interna de retorno) el cual está muy ligado a los resultados del VAN. Este parámetro mide de forma directa la rentabilidad del proyecto al comprarlo con la tasa de descuento (COK), la cual tiene un valor de 36%, es decir, que si el valor del TIR es superior al COK el proyecto representa gran rentabilidad; de modo que arroja el mismo resultado de rentabilidad que el anterior parámetro analizado.

Sin embargo, hay que aclarar que el valor inicial para empezar la operación está muy arriba de las probabilidades de la comunidad, por lo que es rentable si se lo aplica a una microempresa más no para la comunidad, debido a que se necesitaría de un inversor externo para el capital inicial. Es decir, que no es aplicable para los pobladores de Paipayales sin un inversionista.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Con la finalidad de determinar el sistema de recirculación que mejor se adapta para la comunidad de Paipayales se realizó tanto un análisis bibliográfico como la determinación de ciertos parámetros fundamentales para el correcto desarrollo de la tilapia. A partir de esta premisa se pudo concluir lo siguiente respecto al caso:

- Partiendo de la revisión bibliográfica realizada sobre las diferentes tecnologías de recirculación, las cuales son: RAS, sistemas de recirculación con humedales y acuaponía, se concluyó que el RAS es la opción más favorable. Esto se determinó, debido a que si se considera una recirculación de humedades se debería involucrar un desarrollo de plantas acuáticas dentro de la piscina que contiene las tilapias para poder realizar el proceso de nitrificación, el cual requiere condiciones ambientales de climas fríos, eliminando la esta opción. Por otro lado, en el caso de la acuaponía, se realizó una experimentación previa usando especies vegetales para formar una relación simbiótica, esto dio como resultado la muerte de ambos individuos, descartando completamente esta tecnología. Es así, como se escogió el RAS debido a que se adapta a las condiciones climáticas y permite un máximo ahorro de agua. Por lo tanto, se decidió realizar el diseño de los equipos necesarios para el RAS, los cuales son un sedimentador y un biofiltro.
- Se realizaron análisis fisicoquímicos a las muestras de agua tomadas de las piscinas de los peces para poder conocer las condiciones iniciales del sistema y determinar las dimensiones de los equipos. De los seis parámetros analizados, los dos que representan una mayor amenaza para la cría de los peces son los sólidos suspendidos totales y el nitrógeno amoniacal total.
- Para el sedimentador se determinó mediante los cálculos que se requiere un tanque cuya capacidad sea de 55 galones, con un área de sedimentación de 0,28 m², una altura de 0,80 m y un tiempo de retención de 0,29 horas, disminuyendo considerablemente la concentración de SST. Por otro lado, para el filtro biológico

se requiere 0,418 m³ del material filtrante, lo cual representa 0,48 m² de área transversal del equipo y 0,87 m de profundidad del empaque. Este filtro se encarga principalmente de la eliminación del nitrógeno amoniacal total mediante la utilización de bacterias nitrificantes y su diseño se realizó para que el empaque esté contenido en una cajonera de aproximadamente 0,3 m³ de volumen.

- Finalmente, tomando en cuenta el análisis económico realizado, se determinó que con una inversión inicial de \$1.032,13 y un tiempo menor a 3 años, utilizando el flujo de caja, se espera recuperar el capital invertido. De igual manera, se espera lograr comercializar en un gran porcentaje las tilapias cosechadas al terminar su tiempo de cría y que estas puedan vender a alrededor de \$1.80. En relación con los indicadores económicos como el TIR se puede apreciar que el porcentaje de la tasa interna de retorno es del 76% lo que hace que el proyecto sea altamente atractivo a la inversión. Asimismo, el valor del VAN al ser mayor a 0, representa que con las proyecciones realizadas, se consiguen ganancias sobre la inversión realizada de \$936.93, lo cual resulta atractivo a la inversión del capital solicitado. Por último, tomando en cuenta el valor del COK, se puede notar que este es inferior al valor del TIR, lo cual representa una alta rentabilidad del proyecto.

4.2 Recomendaciones

De acuerdo con el diseño planteado y la investigación realizada en este proyecto se tienen las siguientes recomendaciones al momento de implementar y comprobar los resultados mostrados:

- Debido a que se ha basado en una serie de estudios y cálculos es muy probable que, al momento de implementar el sistema los resultados de las eficiencias varíen en el caso del sedimentador, es decir que pueden dar resultados de eficiencia menores, debido a que su velocidad de sedimentación puede variar, dependiendo del tamaño y densidad de la partícula. Una alternativa puede ser la compra de una bomba que tenga como máximo el caudal calculado, para así poder disminuir este flujo y mejorar la sedimentación. Cabe mencionar que los factores más influyentes en el sedimentador son el caudal y el tiempo de retención, dando buenos resultados de sedimentación al tener un bajo caudal y un buen tiempo de sedimentación.

- En el caso del biofiltro si existe un mayor capital se puede realizar un empaque mezclado, el cual contenga tanto la piedra pómez con el anillo mencionado en el análisis, de tal manera que sumaría un porcentaje pequeño en la inversión sin embargo la remoción de nitrógeno será mucho mayor. Dando como resultado niveles más bajo de retorno de nitrógeno y un ambiente óptimo para la especie.
- Es recomendable que al momento de arrancar con el proyecto exista un periodo de maduración del biofiltro, teniendo en cuenta que se debe adicionar nitrógeno para que así puedan empezar a desarrollarse las colonias de bacterias. El tiempo de maduración como mínimo es de 22 días, este es el mínimo que se requiere para que se establezca la tasa de remoción de nitrógeno.

BIBLIOGRAFÍA

- Acebo, M., Álvarez, M., Marcillo, F., Rodríguez, J., & Menéndez, S. (2018). Industria de Acuicultura. *Espae-Espol*, 3. Retrieved from <http://www.espae.espol.edu.ec/publicaciones/>
- Álvarez, D., & Guevara, M. (2021). *Diseño experimental Acuaponía*. Guayaquil: ESPO.
- Arescurenaga, O., & Álvaro, F. (2016). *Diseño de los componentes hidráulicos de un sistema de recirculación acuícola y el diseño estructural de los tanques de cultivo*. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS (UPC).
- Baird, R., Eaton, A., & Rice, E. (2017). Standard methods: For the examination of water and waste water. In L. Bridgewater (Ed.), *Analytical Biochemistry* (23rd editi, Vol. 1). Washington: American Public Health Association. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(90\)90598-4](https://doi.org/10.1016/0003-2697(90)90598-4)
- Betancur, E. M. (2019). *Evaluación de variables de calidad en Tilapias (Oreochromis sp) alimentadas con probióticos nativos microencapsulados*. 1–84.
- Brown, LeMay, Burnsten, & Murphy. (2003). Química La ciencia central. In *Química La ciencia central*. <https://doi.org/10.1097/BLO.0b013e3181576080>
- Carvajal, J. (2014). Comparación de Parámetros zootécnicos y de calidad de agua de tres sistemas de precría de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) en el Municipio de Puerto Triunfo. *Corporacion Universitaria Lasallista, Repositorio Digital*, 1–53. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparación-de-Parámetros-zootécnicos-y-de-calidad-Echeverri-Pablo./3ac1f8fdf253ea5dca3b473a5df261646c92f04d>
- Cruz Bautista, M. F. (2021). *Desarrollo de un prototipo de cultivo acuícola basado en el aprovechamiento del recurso hídrico con sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos para la etapa de engorde de Tilapia Roja (Oreochromis sp) en la Sabana de Bogota*. Universidad El Bosque.
- Davidson, John; Summerfelt, S. (2005). Settler evaluation: Radial flow vs tangential flow. Retrieved from Global Aquaculture Advocate website: <https://www.globalseafood.org/advocate/settler-evaluation-radial-flow-vs-tangential-flow/#:~:text=In a trial%2C radial-flow,oxygen demand of the system.>
- Davidson, J., & Summerfelt, S. T. (2005). Solids removal from a coldwater recirculating system - Comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering*, 33(1), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.002>
- Delgado, A., & Valdez, C. (2021). *Diseño de sistemas de tratamiento de desechos de*

acuicultura provenientes de las actividades de piscicultura realizadas en la comunidad Paipayales para la obtención de abono orgánico. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., & Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 234–260. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.007>
- Fondriest Environmental, I. (2014). Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity. Retrieved from <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/#:~:text=In terms of water quality,the surrounding water by conduction>.
- Fried, N. (2022). Aquarium Water Quality: Carbon Dioxide. Retrieved from <https://www.fdacs.gov/Consumer-Resources/Recreation-and-Leisure/Aquarium-Fish/Aquarium-Water-Quality-Carbon-Dioxide>
- Fueyo, M., Arrieta, A., & Feito, I. (1998). Producción de lechuga. Semilleros para la producción de planta de calidad. Conceptos para el manejo eficiente del riego. CIATA. Retrieved from <http://www.serida.org/pdfs/271.pdf>
- Gallego Alarcón, I., & García Pulido, D. (2017). Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(1), 81–93. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-06>
- GreenLab. (2012). *Muestreo De Aguas Para Análisis Microbiológico*. 1–5. Retrieved from <http://analisisgreenlab.com.mx/gu-a-de-muestreo.html>
- HACH. (2021). *PHC281*.
- HACH. (2022). *LDO101*.
- INEN. (2013). *PESCADO Y LOS PRODUCTOS PESQUEROS (CODEX ALIMENTARIUS CAC/RCP 52:2003, IDT)*.
- Info, S. (2022a). Temperatura del agua en Guayaquil. Retrieved from <https://seatemperature.info/es/guayaquil-temperatura-del-agua-del-mar.html><https://seatemperature.info/es/guayaquil-temperatura-del-agua-del-mar.html>
- Info, S. (2022b). Temperatura del agua en Guayaquil.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC. (2018). Ficha de cifras generales del Cantón Santa Lucía. *INEC*, 5. Retrieved from http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/Portal SNI 2014/FICHAS F/0918_SANTA LUCIA_GUAYAS.pdf
- Kaya, H., Hisar, O., Yilmaz, S., Gürkan, M., & Hisar, Ş. A. (2016). The effects of elevated

- carbon dioxide and temperature levels on tilapia (*Oreochromis mossambicus*): Respiratory enzymes, blood pH and hematological parameters. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 44, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.05.003>
- Koirala, B. (2021). 14 Pros and Cons of Aquaponics. Retrieved from https://honestproscons.com/pros-and-cons-of-aquaponics/#Cons_of_Aquaponics
- Kubitza, L. (2003). *Cultivo De Tilapia Nilotica Y Tilapia Roja*. 16. Retrieved from https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/especies/_archivos/000008-Tilapia/071201_Acerca del Cultivo de Tilapia Roja o Del Nilo.pdf
- Ladino-Orjuela, G. (2011). Dinámica del Carbono en estanques de peces. *Orinoquia*, 15(1), 48. <https://doi.org/10.22579/20112629.42>
- Legua, C. de la. (2013). Manual de crianza Tilapia. *Nicovita*, 49. Retrieved from <http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual de crianza de tilapia.pdf>
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). *Aquaponics : The Basics*.
- Losordo, T. M., & Delong, D. P. (2018). Estimating biofilter size for RAS systems « Global Aquaculture Advocate. *Global Aquaculture Alliance*, (August 2015).
- Marsh, J. (2020). Top Pros and Cons of Aquaponics. Retrieved from <https://environment.co/pros-and-cons-of-aquaponics/>
- McDermid, L. (2022). La comprensión del amoníaco en los estanques acuícolas. Retrieved from International Aquafeed website: <https://aquafeed.co/entrada/la-comprensi-n-del-amon-aco-en-los-estanques-acu-colas-20354/#:~:text=Una vez que el amoníaco,altos niveles provocando la muerte.>
- Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca. (2020). Proyecto de inversión: “Mejora en la competitividad del sector acuícola y pesquero .” *Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca*, 274.
- Ordoñez, J. (2008). *Análisis económico de la producción de tilapia de Ecuador y de la demanda de tilapia de Estados Unidos*. 53. Retrieved from <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/104/1/AGN-2008-T014.pdf>
- Pesquera, I. (2021). *Es poco probable que el mercado de exportación de tilapia de Ecuador se recupere a niveles anteriores*. Retrieved from <https://www.pescaconciencia.com/2021/07/17/es-poco-probable-que-el-mercado-de-exportacion-de-tilapia-de-ecuador-se-recupere-a-niveles-anteriores/>
- Pretorius, R., & Goosen, N. J. (2020). *Design and modeling of an experimental tilapia and African catfish recirculating aquaculture system*. (March). Retrieved from <https://scholar.sun.ac.za>

- Proain Tecnología Agrícola. (2020). MANEJO DEL RIEGO EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA. Retrieved from <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/manejo-del-riego-en-la-produccion-de-lechuga>
- Pungrasmi, W., Phinitthanaphak, P., & Powtongsook, S. (2016). Nitrogen removal from a recirculating aquaculture system using a pumice bottom substrate nitrification-denitrification tank. *Ecological Engineering*, 95, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.094>
- Riffat, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering* (First edit; R. Riffat, Ed.). Boca Raton: IWA Publishers.
- Saavedra, M. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. Managua, Nicaragua. *Manejo Del Cultivo De Tilapia*, 1–27.
- Sal, F. M., & Merino, O. G. (2007). *Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua*.
- Sánchez, A. M., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (2020). Pesca Y Acuicultura en Ecuador. *Universidad Técnica de Ambato*, 1–4.
- Schwarz, L. (2022). National Aquaculture Sector Overview - Ecuador. Retrieved May 31, 2022, from FAO website: <https://www.fao.org/fishery/en/countrysector/ec/es>
- Sierra, C., & Jenaro, J. (2019). Estrategias de manejo para mejorar la producción piscícola en un sistema de jaulas flotantes con Tilapia roja (*Oreochromis sp*), en Montería, Córdoba. *Zootecnia*, 56. Retrieved from <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1461&context=zootecnia>
- Srivastava, P., Yadav, A. K., Garaniya, V., & Abbassi, R. (2018). Constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: Development and potential applications. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00042-X>
- Summerfelt, S. T., Mathisen, F., Holan, A. B., & Terjesen, B. F. (2016). Survey of large circular and octagonal tanks operated at Norwegian commercial smolt and post-smolt sites. *Aquacultural Engineering*, 74(July), 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.07.004>
- Timmons, M., & Ebeling, J. (2010). Recirculating Aquaculture. In *Aquaculture* (Second edi). New York: USDA.
- Tom, A. P., Jayakumar, J. S., Biju, M., Somarajan, J., & Ibrahim, M. A. (2021). Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus*, 4(November), 100022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022>
- UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los*

Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático. París. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>

Yanzapanta, B. (2015). *PLAN DE MANEJO DE VERTIDOS LÍQUIDOS DE LOS ESTANQUES DE TILAPIA EN LA ESTACIÓN BIOLÓGICA PINDO MIRADOR, CANTÓN MERA, PROVINCIA DE PASTAZA*.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Tabla 4.1 : Tasa de alimentación diaria de la tilapia roja
(Saavedra, 2006)

PESO	% BIOMASA	KG/DIA ALIMENTO
0,12	40	0,02
4,70	10	0,22
50,00	5	1,15
100,00	3	1,37
150,00	2	1,37
200,00	1,8	1,65
275,00	1,7	2,14
325,00	1,6	2,38
400,00	1,5	2,75
450,00	1,4	2,89
500,00	1,3	2,98
550,00	1,2	3,02
600,00	1,1	3,02

APÉNDICE B

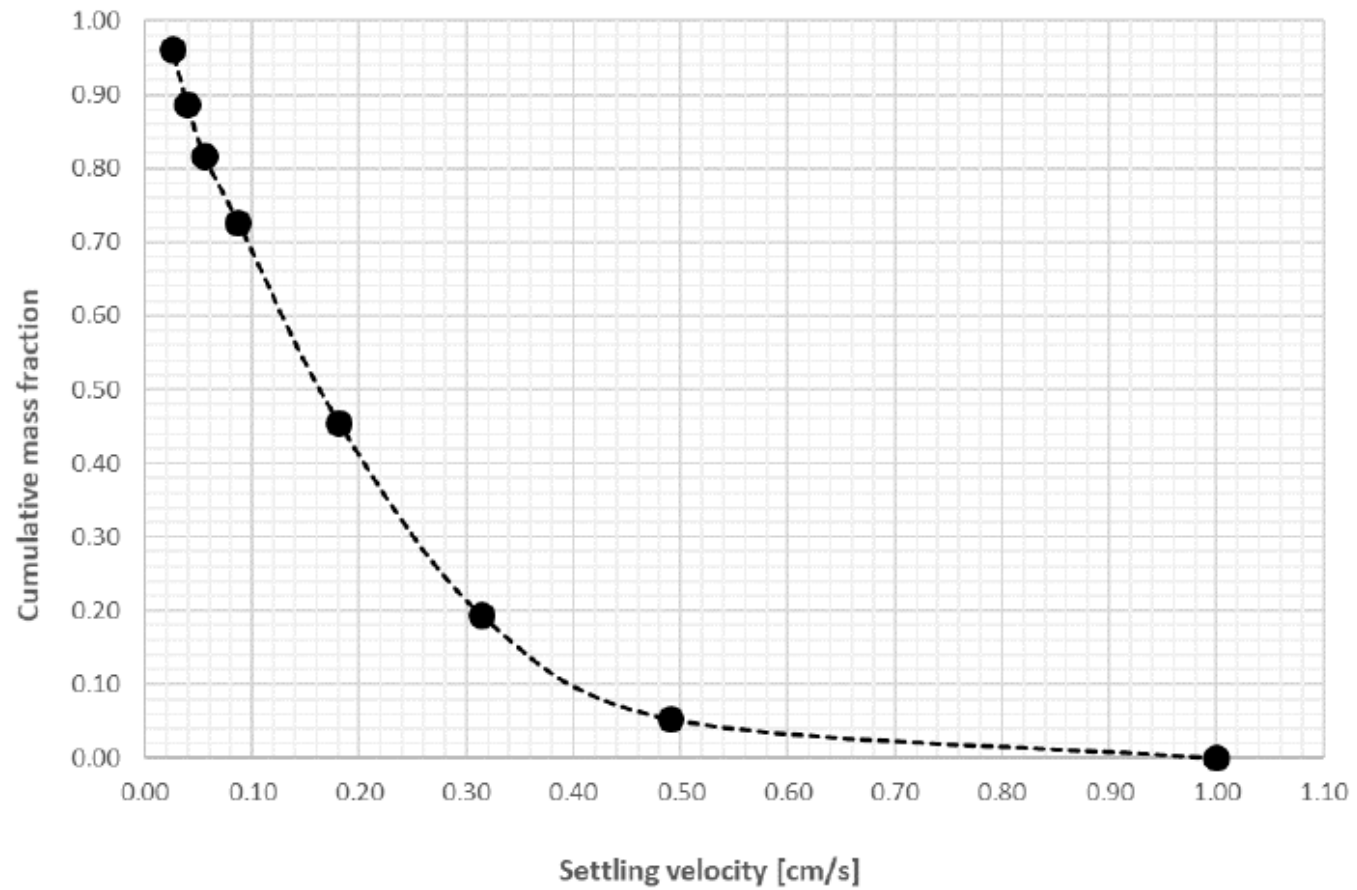


Ilustración 4.1 : Eficiencia de remoción vs velocidad de sedimentación (Pretorius & Goosen, 2020)

Tabla 4.2: Datos de diseño del sedimentador en función de la eficiencia

ICIEN CIA	SETTLING VELOCITY (CM/S)	SETTLING VELOCITY (M/H)	DIÁMETR O (M)	A_SETTLER (M2)	CAUDAL (M ³ /H)	ALTURA (M)	TD (H)	CAUDAL (LPH)	C_OUT_SST (MG/L)	DIÁMETRO PVC (M)	VELOCIDAD TUBE (M/H)	VELOCIDAD TUBE (M/S)	RE
10%	0,40	14,40	0,60	0,2827	4,07	0,80	0,06	4071,50	139,5	0,05	2073,60	0,58	3526,83
16%	0,34	12,24	0,60	0,28	3,46	0,80	0,07	3460,78	130,2	0,05	1762,56	0,49	2997,81
20%	0,31	11,16	0,60	0,28	3,16	0,80	0,07	3155,42	124	0,05	1607,04	0,45	2733,29
26%	0,27	9,61	0,60	0,28	2,72	0,80	0,08	2717,73	114,7	0,05	1384,13	0,38	2354,16
30%	0,25	8,82	0,60	0,28	2,49	0,80	0,09	2493,80	108,5	0,05	1270,08	0,35	2160,18
36%	0,22	7,92	0,60	0,28	2,24	0,80	0,10	2239,33	99,2	0,05	1140,48	0,32	1939,76
40%	0,21	7,56	0,60	0,28	2,14	0,80	0,11	2137,54	93	0,05	1088,64	0,30	1851,59
46%	0,18	6,48	0,60	0,28	1,83	0,80	0,12	1832,18	83,7	0,05	933,12	0,26	1587,07
50%	0,16	5,76	0,60	0,28	1,63	0,80	0,14	1628,60	77,5	0,05	829,44	0,23	1410,73
56%	0,14	5,04	0,60	0,28	1,43	0,80	0,16	1425,03	68,2	0,05	725,76	0,20	1234,39
60%	0,130	4,68	0,60	0,28	1,32	0,80	0,17	1323,24	62	0,05	673,92	0,19	1146,22
66%	0,11	3,96	0,60	0,28	1,12	0,80	0,20	1119,66	52,7	0,05	570,24	0,16	969,88
70%	0,09	3,24	0,60	0,28	0,92	0,80	0,25	916,09	46,5	0,05	466,56	0,13	793,54
75%	0,08	2,88	0,60	0,28	0,81	0,80	0,28	814,30	38,75	0,05	414,72	0,12	705,37
75%	0,08	2,81	0,60	0,28	0,79	0,80	0,285	794,94	38,75	0,05	404,86	0,11	688,59
80%	0,06	2,16	0,60	0,28	0,61	0,80	0,37	610,73	31	0,05	311,04	0,09	529,02

[Elaboración propia]

APÉNDICE C

Tabla 4.3: Resultados de los sólidos suspendidos totales de la piscina

	<i>Medio</i>		<i>Orilla</i>	
	Peso 1 (mg)	Peso 2 (mg)	Peso 1 (mg)	Peso 2 (mg)
Filtro	114,8	114,5	115,8	115,3
Filtro y SST	120,7	120,1	123,4	123,2
VOLUMEN (mL)	50			

[Elaboración propia]

Tabla 4.4: Resultados de la concentración de dióxido de carbono en el agua

	<i>Medio</i>		<i>Orilla</i>	
V_cons (mL)	1	0,5	0,3	0,3
V_muestra (mL)	100			
Normalidad (N)	0,02			
CO₂ (mg/L)	8,8	4,4	2,64	2,64

[Elaboración propia]

Tabla 4.5: Resultados de la concentración de nitrógeno amoniacal total

	<i>Medio</i>		<i>Orilla</i>	
V_cons (mL)	0,2	0,3	0,6	0,3
Temperatura (K)	300,05		299,75	
V_cons_blan(mL)	0,1			

Alicuota (mL)	50			
C_{NH3-N} (mg/L)	0,56	1,12	2,8	1,12

[Elaboración propia]

Materiales	Cantidad	Precio unidad	Precio Total
Tanque Economico 55 Galones – Plastigama	1	\$40,22	\$40,22
Balde De 5 Galones Blanco 1063	1	\$8,32	\$8,32
NEPLO POLIPR. CORRIDO 2"	4	\$3,30	\$13,20
Tubo Desague EC 050 mm x 3 m – Plastigama	4	\$5,70	\$7,60
Unión de conectores de tubería de Pvc	2	\$3,10	\$6,20
Codo Desagüe Makrotubo 2" (50 mm) x 90 PVC	3	\$0,45	\$1,35
Bomba de agua de diafragma de 12 V con interruptor de presión, 3.5 Gpm 45 Psi bomba de 12 voltios autocebante con filtro	1	\$63,00	\$63,00
Pallet de 1.00 x 1.20 m con tacos 0.80 x 1.20 m	1	\$16,00	\$16,00

Tabla 4.6: Resultados de los caudales teóricos con los tres primeros parámetros

	OD	CO₂	SST
C_{IN} (mg/L)	14,43	8,8	38,75
Eficiencia	90	60	90
PRODUC (mg X/d)	-1512220,443	2079303,109	756110,2215
C_{BEST} (mg/L)	16	0,5	0
C_{OUT} (mg/L)	15,843	3,82	3,875
Q (L/d)	1070219,705	417530,7448	21680,57983

[Elaboración propia]

APÉNDICE D

Tabla 4.7: Precio de los materiales del sedimentador

[Elaboración propia]

Tabla 4.8: Precio de los materiales del biofiltro

Material	Cantidad	Precio unidad	Precio Total
<i>Piedra Pómez (unidad: litros)</i>	10	\$ 3,00	\$ 31,35
<i>SH-CHEN Electric Pump 220-240v 45W 3000LPH 3 Nozzles Submersible Pump Ultra Quiet Fountain Water Pump Valve</i>	1	\$ 96,11	\$ 96,11
<i>Cajonera Peces Blanco/Celeste 5 Pisos</i>	2	\$ 80,00	\$ 158,33
<i>Tubo Desague EC 050 mm x 3 m – Plastigama</i>	6	\$ 5,70	\$ 11,40
<i>Unión de conectores de tubería de Pvc</i>	1	\$ 3,10	\$ 3,10
<i>Codo Desagüe Makrotubo 2" (50 mm) x 90 PVC</i>	3	\$ 0,45	\$ 1,35
<i>Neplo en T</i>	2	\$ 1,42	\$ 2,84
<i>Bacterias nitrificantes Seachem Pristine</i>	1	\$ 8,19	\$ 8,19

[Elaboración propia]

APÉNDICE D

Tabla 4.9: Costos en inversión de equipos y mobiliarios

<i>Equipo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo total</i>	<i>Vida Útil (años)</i>
<i>Tanque de PCV de 55Galones</i>	2	\$ 40,22	\$80,44	20
<i>Balde de PCV de 5 Galones</i>	1	\$ 8,32	\$ 8,32	20
<i>NEPLO POLIPR. CORRIDO 2"</i>	4	\$ 3,30	\$ 13,20	20
<i>Tubo Desague EC 050 mm x 3 m – Plastigama</i>	4	\$ 5,70	\$ 22,80	20
<i>Unión de conectores de tubería de Pvc</i>	2	\$ 3,10	\$ 6,20	20
<i>Codo Desagüe Makrotubo 2" (50 mm) x 90 PVC</i>	3	\$ 0,45	\$ 1,35	20
<i>Bomba de agua de diafragma de 12 V con interruptor de presión, 3.5 Gpm 45 Psi bomba de 12 voltios autocebante con filtro</i>	1	\$ 63,00	\$ 63,00	5
<i>Pallet de 1.00 x 1.20 m con tacos 0.80 x 1.20 m</i>	1	\$ 16,00	\$ 16,00	4
<i>Válvula</i>	2	\$ 1,85	\$ 3,70	20
<i>Piedra Pómez</i>	10	\$ 3,00	\$ 31,35	4
<i>SH-CHEN Electric Pump 220-240v 45W 3000LPH 3 Nozzles Submersible Pump Ultra Quiet Fountain Water Pump Valve</i>	1	\$ 96,11	\$ 96,11	5
<i>Cajonera Pekes Blanco/Celeste 5 Pisos</i>	2	\$ 80,00	\$ 158,33	20
<i>Tubo Desague EC 050 mm x 3 m – Plastigama</i>	6	\$ 5,70	\$ 34,20	20
<i>Unión de conectores de tubería de Pvc</i>	1	\$ 3,10	\$ 3,10	20
<i>Codo Desagüe Makrotubo 2" (50 mm) x 90 PVC</i>	3	\$ 0,45	\$ 1,35	20
<i>Neplo en T</i>	2	\$ 1,42	\$ 2,84	20
<i>Bacterias nitrificantes Seachem Pristine</i>	1	\$ 8,19	\$ 8,19	4
<i>Espanja de filtro de espuma industrial reciclable</i>	1	\$ 3,00	\$ 3,00	20

[Elaboración propia]

Tabla 4.10: Detalles de inversión

<i>1.1 Inversión en equipos y mobiliarios</i>	\$ 553,49
---	-----------

1.2 Costos de materiales de instalación	\$ 50,00
1.3 Costos de protección de bombas	\$ 40,00
1.4 activos intangibles	\$ 100,00
Capital de trabajo	\$ 288,64
Total	\$ 1.032,13

[Elaboración propia]

Tabla 4.11: Cálculo de costo de oportunidad

TEA préstamo	19%
Tasa de Utilidad deseada	10%
Tasa de inflación	3%
Costo de Oportunidad (COK)	36%

[Elaboración propia]

Tabla 4.12: Estado de resultado

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	TOTAL
Ventas Netas	\$ 1.530,00	\$ 1.440,00	\$ 2.220,00	\$ 1.292,00	\$ 1.350,00	\$ 1.942,50	\$ 1.225,00	\$ 10.999,50
Costo de ventas	\$ 150,00	\$ 172,00	\$ 217,00	\$ 169,00	\$ 178,00	\$ 227,00	\$ 184,00	\$ 1.297,00
UTILIDAD BRUTA	\$ 1.380,00	\$ 1.268,00	\$ 2.003,00	\$ 1.123,00	\$ 1.172,00	\$ 1.715,50	\$ 1.041,00	\$ 9.702,50
Gastos operacionales	\$ 475,00	\$ 485,00	\$ 491,00	\$ 505,00	\$ 543,00	\$ 631,00	\$ 550,00	\$ 3.680,00
Amortización + Depreciación	\$ 166,37	\$ 166,37	\$ 166,37	\$ 166,37	\$ 28,00	\$ 10,00	\$ 10,00	\$ 713,49
UTILIDAD OPERATIVA	\$ 738,63	\$ 616,63	\$ 1.345,63	\$ 451,63	\$ 601,00	\$ 1.074,50	\$ 481,00	\$ 5.309,01
Intereses	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 39,22	\$ 274,54

UTILIDAD DE PERIODO | \$ 699,41 \$ 577,41 \$ 1.306,41 \$ 412,41 \$ 561,78 \$ 1.035,28 \$ 441,78 \$ 5.034,47

[Elaboración propia]