

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

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

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

Andrea Cristina Delgado Guerrero

Celia María Valdez Delgado

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Primero a Dios porque es el pilar fundamental en mi vida y a mis padres Paul Delgado y Patricia Guerrero por apoyarme en cada etapa y motivarme a cumplir todas las metas planteadas. Su apoyo ha sido fundamental en los momentos más difíciles y lograron que día a día de mi mayor esfuerzo para culminar mi carrera universitaria. Por último, a mi hermano Paul por ser un ejemplo para mí y demostrarme que todo es posible si nos esforzamos.

Andrea Cristina Delgado Guerrero

DEDICATORIA

A mis padres Celinda Delgado que siempre nos apoyó e hizo todo lo que estaba a su disposición por velar por nuestro bienestar, todos mis logros son por ti, a mi padre Rodolfo Valdez por todo su esfuerzo y por brindarme constantemente su apoyo incondicional en cada paso que doy durante mi vida estudiantil no cabe duda de que son un pilar fundamental y a mis hermanos por siempre alentarme y darme consejos en los momentos que más lo necesité ustedes son el ejemplo de que con esfuerzo todo es posible alcanzar.

Celia María Valdez Delgado

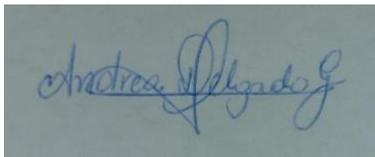
AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros profesores que nos han otorgado su conocimiento a lo largo de la carrera, a nuestro tutor MSc. Lorena Quinchuela y catedra de materia Ing. Nadia Flores por guiarnos en el presente estudio, al Ingeniero Blacio que a pesar de ser un agente externo estuvo predispuesto a ayudarnos en la investigación realizada y finalmente a nuestros amigos por su apoyo que fue incondicional en todo momento.

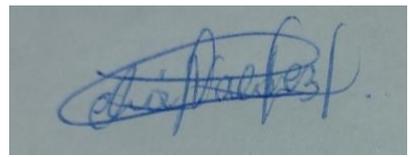
Andrea Delgado y Celia Valdez

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Andrea Cristina Delgado Guerrero* y *Celia María Valdez Delgado* 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"



Andrea Cristina Delgado
Guerrero



Celia María Valdez
Delgado

EVALUADORES

NADIA
MAGALY
FLORES
MANRIQUE

Firmado
digitalmente por
NADIA MAGALY
FLORES MANRIQUE
Fecha: 2021.09.22
15:24:48 -05'00'



Firmado electrónicamente por:
**LORENA JACQUELINE
QUINCHUELA CARRERA**

Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA

Lorena Quinchuela

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las actividades de piscicultura generan desechos biológicos o macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que son descartados sin aprovechar sus beneficios, por lo que se considera necesario la implementación de sistemas de tratamiento de residuos. El objetivo del proyecto será proponer métodos de manejo de desechos provenientes de las actividades de acuicultura que permitan la obtención de abono orgánico. La investigación se enfoca en el diseño de un modelo a escala del sistema acuapónico y vermicompostaje que pueden llevarse a cabo en la comunidad de Paipayales, Santa Lucía-Ecuador. La metodología empleada fue bibliográfica y de campo para la obtención de valores que permitan el cálculo de algunos parámetros de interés. Los principales resultados obtenidos comprenden: la identificación de los parámetros fisicoquímicos como la temperatura y el pH son importantes para el sistema acuapónico (18-30°C) y el vermicompostaje (10-35°C); con respecto al sistema acuapónico, el sedimentador diseñado tiene la capacidad de remoción de 94.64g/día al 70% de rendimiento y el biofiltro convierte 18.64 g de nitrógeno amoniacal al día en 18.19 g de NO₃/día para la producción de 175 lechugas al cultivar 100 chame; con el vermicompostaje, se puede obtener 250kg de abono orgánico al emplear 20000 lombrices. La implementación del sistema acuapónico es más factible por permitir aprovechar los recursos y mejorar la producción de peces y plantas; pero si no se cuenta con el presupuesto para su dimensionamiento; se puede tomar en cuenta la práctica del vermicompostaje. Ambos sistemas de tratamiento de desechos requieren el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos.

Palabras Claves: Sistemas de tratamiento de desechos, acuaponía, piscicultura, abono orgánico.

ABSTRACT

Fish farming activities generate biological waste or macronutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium, which are discarded without taking advantage of their benefits, so the implementation of waste treatment systems is considered necessary. The objective of the project will be to propose waste management methods from aquaculture activities that allow obtaining organic fertilizer. The research focuses on the design of a scale model of the aquaponics and vermicomposting system that can be carried out in the community of Paipayales, Santa Lucía-Ecuador. The methodology used was bibliographic and field to obtain values that allow the calculation of some parameters of interest. The main results obtained include: the identification of physical-chemical parameters such as temperature and pH are important for the aquaponic system (18-30 ° C) and vermicomposting (10-35 ° C); With respect to the aquaponic system, the designed settler has the removal capacity of 94.64g / day at 70% yield and the biofilter converts 18.64 g of ammoniacal nitrogen per day into 18.19 g of NO₃ / day for the production of 175 lettuces by farming 100 chame; with vermicomposting, 250kg of organic compost can be obtained by using 20,000 worms. The implementation of the aquaponic system is more feasible because it allows to take advantage of the resources and improve the production of fish and plants; but if you do not have the budget for its sizing; the practice of vermicomposting can be considered. Both waste treatment systems require monitoring of physicochemical parameters.

Keywords: Waste treatment systems, aquaponics, fish farming, organic compost.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	6
RESUMEN	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS	v
SIMBOLOGÍA.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	ix
TABLAS DE APÉNDICES	x
FIGURAS DE APÉNDICES.....	x
CAPÍTULO 1	10
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Descripción del problema	10
1.2 Justificación del problema.....	11
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Marco teórico.....	13
1.4.1 Acuicultura	13
1.4.2 Potencial acuícola del <i>Dormitator Latinfrons</i> (Chame).....	14
1.4.3 Sistemas acuapónicos	15
1.4.3.1 Componentes de un sistema de recirculación acuícola.....	16
1.4.3.2 Calidad del agua en los sistemas de recirculación acuícola.....	18
1.4.4 Vermicompost.....	18

1.4.4.1 Parámetros que se deben considerar en el vermicompost.....	19
CAPÍTULO 2	20
2. METODOLOGÍA	20
2.1 Investigación de campo	20
2.2 Investigación bibliográfica.....	21
2.3 Selección de métodos.....	22
2.3.1 Sistema acuapónico	23
2.3.1.1 Diseño del sedimentador de flujo radial.....	25
2.3.1.2 Diseño del biofiltro	27
2.3.2 Alternativa de tratamiento de residuos generados por peces	31
2.3.2.1 Vermicompostaje	31
CAPITULO 3	32
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	32
3.1 Selección de métodos de tratamiento de residuos acuícolas	32
3.2 Balance de materia del sistema acuapónico.....	34
3.3 Análisis del desempeño del sedimentador.....	37
3.4 Análisis del desempeño del biofiltro	38
3.4 Análisis de costo y beneficio.....	40
3.5 Viabilidad y factibilidad de ambos sistemas	42
CAPÍTULO 4	44
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1 Conclusiones.....	44
4.2 Recomendaciones.....	45
BIBLIOGRAFÍA	46
APÉNDICES	51

ABREVIATURAS

SRA	Sistema de recirculación acuapónico
NA	Nitrógeno Amoniacal
SS	Sólidos Sedimentables
SD	Sólidos disueltos
CD	Concentración deseada de amonio en el estanque
CS	Concentración de salida de amonio
CE	Concentración de amonio de entrada
SVI	Índice volumétrico de lodos
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto

SIMBOLOGÍA

cm	Centímetro
mm	Milímetro
°C	Grado Celsius
g	Gramo
mg	Miligramo
kg	Kilogramo
%	Porcentaje
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
L	Litro
h	Hora
min	Minutos
s	Segundos
d	Días
HP	Caballos de fuerza
kW	Kilovatios
W	Vatios
C	Carbono
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
P	Fósforo
NO ₃	Nitrato
NO ₂	Nitrito
O ₂	Oxígeno molecular

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Algoritmo empleado en la metodología	20
Figura 2.2 Porcentaje de nutrientes que son asimilados y desechados por los peces.	23
Figura 2.3 Tanque sedimentador de flujo radial	25
Figura 2.4 Estructura interna del sedimentador.....	27
Figura 3.1 Selección del método para tratar residuos acuícolas	33
Figura 3.2 Diagrama de bloque del sistema de recirculación acuapónico	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros característicos del Dormitatos Latinfrons	14
Tabla 2.1 Datos obtenidos de la actividad acuícola	21
Tabla 2.2 Parámetros de diseño para el biofiltro	28
Tabla 3.1 Parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas	32
Tabla 3.2 Parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas	33
Tabla 3.3 Resultados del dimensionamiento tanque sedimentador	38
Tabla 3.4 Parámetros de diseño de la tubería interna del sedimentador	38
Tabla 3.5 Resultados del dimensionamiento del Biofiltro acuapónico.....	40
Tabla 3.6 Costos de implementación de un SRA.....	41
Tabla 3.7 Costos de inversión de la práctica del vermicompostaje	41
Tabla 3.8 Ganancias por ventas de producción en un SRA	42
Tabla 3.9 Flujo de caja por semestre.....	42

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice A: Cálculos del balance de masa	51
Apéndice B: Cálculos del diseño del sedimentador y biofiltro.....	56
Apéndice C: Diseño de la bomba.....	60
Apéndice D: Rugosidad absoluta de materiales.....	61
Apéndice E: Cálculos económicos del proyecto.....	62
Apéndice F: Propuesta del diseño del sistema acuapónico y diagrama de flujo	65

TABLAS DE APÉNDICES

Tabla A1 Datos de alimentación del pez	51
Tabla A2 Cantidad de componentes en alimento con 100% de proteína	51
Tabla A3 Cantidad de componentes en alimento con 32% de proteína.....	51
Tabla A4 Corriente de entrada al sistema acuapónico	52
Tabla A5 Porcentaje de nutrientes asimilados por los peces	52
Tabla A6 Cantidad de componentes asimilados por los peces	52
Tabla A7 Cantidad de desechos que son eliminado por los peces	53
Tabla A8 Porcentaje de nutrientes que se convierten sólidos disueltos.....	53
Tabla A9 Flujo de Componentes que se convierten en sólidos disueltos	53
Tabla A10 Porcentaje de nutrientes que se convierten en sólidos sedimentables	54
Tabla A11 Flujo de componentes que se convierten en sólidos sedimentables	54
Tabla A12 Flujo de salida del sedimentador de flujo radial.....	55
Tabla A13 Componentes no sedimentados.....	55
Tabla A14 Corriente de entrada al biofiltro	55
Tabla D1 Rugosidad absoluta de algunos materiales.....	61
Tabla E1 Costos de materiales de construcción.....	62
Tabla E2 Costos de construcción del sistema acuapónico	62
Tabla E3 Capital de trabajo	63
Tabla E4 Ingresos por venta de productos	63
Tabla E5 Ganancia acumulada en 24 meses	63
Tabla E6 Resultado del TIR en 18 meses	64

FIGURAS DE APÉNDICES

Figura F1 Diseño del sistema acuapónico.....	65
Figura F2 Diagrama de flujo del sistema acuapónico	65

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La acuicultura comprende el cultivo de plantas o animales acuáticos en agua salobre, dulce o marina mediante condiciones establecidas por el ser humano; se considera importante esta actividad porque abarca la producción de varias especies para fines alimenticios y fomenta el progreso socioeconómico porque genera empleos en el sector agricultor de países en vías de desarrollo (M. Muñoz, 2012).

El crecimiento del sector pesquero depende de la acuicultura desde hace 30 años, debido a la disminución de la pesca de captura; la implementación de tecnologías de producción en este sector permitirá el desarrollo sustentable de esta actividad, cumpliendo con la demanda de estos productos, para ello se debe optimizar la producción de peces porque un error en el proceso generaría un impacto ambiental en términos de desecho y uso de agua (Hernández & Aguirre, 2009).

Uno de los desafíos que enfrenta el cultivo de peces o piscicultura es el manejo de los desechos que surgen de estas actividades que pueden afectar su sustentabilidad. La piscicultura produce diariamente material residual denominado "lodo" que corresponde a las heces de los peces y restos de alimentos no consumidos, que deberán ser sedimentados para su extracción (P. Ramírez & Veloz, 2018).

Por otro lado, otro aspecto muy interesante de las actividades de piscicultura comprende la generación de residuos ricos en materia orgánica como nitrógeno, fósforo, calcio, azufre, entre otros; esos desechos o lodos de piscicultura se emplean con frecuencia como vertederos o rellenos sanitarios, descartando sus múltiples beneficios como fertilizantes, abono orgánico y ser la base principal del cultivo de lombrices o actividad de vermicompost (SEA, 2012).

A nivel local, surge la problemática porque la comunidad de Paipayales del cantón de Santa Lucía se dedica a la piscicultura de chame desde hace poco tiempo, por lo que los habitantes desconocen el proceso técnico de esta actividad; además, se evidencia un factor ambiental que corresponde a una menor disponibilidad de agua por la

reducción del caudal en los pozos. Se considera de valiosa importancia, la implementación de sistemas de tratamiento de desechos que permitan el desarrollo sostenible de la comunidad, proponiendo un sistema acuapónico que no solo permite el aprovechamiento de los nutrientes que se encuentran en los lodos sino también el ahorro del agua y por otro lado, mediante la filtración adecuada de los sólidos sedimentados es posible la obtención de abono orgánico denominado “test de compost” o la práctica del vermicompostaje (Delgado & Peralta, 2020)

1.2 Justificación del problema

Este proyecto se basa en el tratamiento de los desechos que surgen de la acuicultura, por ser un producto transferible que puede comercializarse entre las empresas que se dedican a la crianza de peces para el consumo, porque todas generan desechos en mayor o menor escala en función de su nivel de producción.

La implementación de un sistema de tratamiento de agua basado en acuicultura de las actividades de piscicultura influye de forma positiva en la productividad y crecimiento del país. El sistema acuapónico mejora las condiciones del agua por lo que la calidad de los peces será mucho mejor, siempre que el sistema elimine de gran manera los desechos biológicos o macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio; que servirán de abono orgánico (F. Muñoz, 2013).

La acuaponía permite el cultivo de animales acuáticos y plantas de una forma amigable con el ambiente, consiste en la reutilización del agua permitiendo el ahorro de este recurso produciendo peces a mayor intensidad. Otra forma de aprovechar los desechos orgánicos de este proceso es que pueden ser la materia prima del vermicompost; en el cual se obtiene como producto, un abono rico en nutrientes, lo que puede representar una fuente de ingresos adicional para la comunidad (SAGPyA, 2006).

El origen de la acuaponía no se ha podido establecer, pero se considera que su aparición estuvo a cargo de civilizaciones de América y Asia; algunos autores refieren que la acuaponía fue diseñada por los aztecas (1150-1350 a.C), a través de las “chinampas” que eran básicamente unas islas artificiales donde se realizaba los cultivos y estaban rodeadas por canales para la crianza de peces; se podría

considerar como los primeros sistemas de acuaponía de grandes dimensiones que permitieron el desarrollo de la cultura azteca en México (Formo, 2012).

Los hermanos John y Nancy Todd junto a William Mc Larney crearon el Instituto “New Alchemy” de Estados Unidos en 1969, son considerados como los pioneros de la acuaponía moderna por las investigaciones realizadas sobre la agricultura orgánica y acuicultura sostenible, además del diseño de los “bio-refugios” que comprenden invernaderos con ecosistemas en equilibrio (Formo, 2012).

En el año de 1970, surge mayor interés por investigaciones sobre acuaponía, por lo que en estos años se registran algunas publicaciones sobre el tema, como la de los filósofos Sneed y Ellis en 1975 sobre un sistema integrado de acuicultura e hidroponía o la de Zweig en 1980 sobre la integración de la práctica de acuicultura en el crecimiento de vegetales. En 1985, surgió un avance muy importante en la Universidad de Carolina del Norte a cargo de Marck Mc Murtry y Doug Sanders por la creación de un sistema de recirculación de agua para peces y vegetales sobre filtros de arena, además que esta institución permanece publicando artículos sobre acuaponía hasta la actualidad y se han sumado a la investigación otras Universidades como la de Arizona y Arkansas (López, 2020).

Otro aporte para el desarrollo de la acuaponía que debe mencionarse es el del Dr. James Rakocy, que tomó como referencia los resultados de Carolina del Norte; creando en la Universidad de las Islas Vírgenes de EEUU, un sistema de cultivo acuapónico “UVI System” que utiliza tilapias y vegetales, que funciona hasta la actualidad y se considera como el primer sistema comercial que pudo demostrar rentabilidad y valiosos resultados para esta industria (D. Ramírez et al., 2008).

El propósito de la investigación será diseñar un modelo a escala de un sistema acuapónico y de vermicompostaje que pueda ser implementado en la comunidad Paipayales del cantón Santa Lucía, como alternativas de tratamiento de los desechos de la piscicultura con la finalidad de mejorar la productividad del pez chame en este sector y la obtención de abono orgánico que tendrá muchos beneficios para la agricultura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer métodos para el manejo de desechos provenientes de las actividades acuícolas que permitan la obtención de abono orgánico.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los parámetros fisicoquímicos que deben analizarse para el diseño de sistemas de tratamiento de residuos provenientes de acuicultura.
2. Diseñar los métodos de acuaponía y vermicompostaje a pequeña escala detallando los procesos involucrados.
3. Elaborar un análisis de beneficio-costos basados en los sistemas propuestos de acuaponía y vermicompostaje.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Acuicultura

La acuicultura se conceptualiza como el conjunto de actividades o técnicas de cultivo y comercialización de especies acuáticas vegetales o animales que habitan en zonas de agua dulce o salobre. Se considera como una actividad de alta rentabilidad económica; además que permite la utilización eficaz de los recursos naturales, la seguridad alimentaria y disminuye la pesca de especies en peligro de extinción. (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-DINARA, 2010).

El 62.5% de la producción de peces a nivel mundial proviene de la explotación de estanques de agua dulce que en la mayoría de los casos, mantiene e intercambian el agua que contiene nutrientes o productos que le sirven de alimento a los peces y hace posible la cría y la productividad de esta industria (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-DINARA, 2010).

Uno de los aspectos fundamentales en la cría de peces es la adecuación y fabricación de manera óptima de los estanques ya que es una parte vital que se debe considerar si se desea obtener una piscicultura eficiente. Para que un estanque sea considerado eficiente y de calidad debe contar con las siguientes especificaciones: bajo costo de construcción, fácil mantenimiento y que beneficie

al medio ambiente a través de la reutilización de recursos naturales (Tkachuk, 2007).

1.4.2 Potencial acuícola del Dormitator Latinfrons (Chame)

Llamado científicamente “Dormitatos Latinfrons”, es un pez que se caracteriza por habitar en aguas dulces y saladas. Debido a sus características físicas tiene la capacidad de adaptarse en ambientes húmedos en un determinado tiempo, por esta razón es considerado uno de los peces con alta capacidad de supervivencia abiótica. Además, este pez presenta la ventaja de poseer un gran metabolismo permitiéndole ganar peso en corto tiempo a diferencia de otros, favoreciendo su producción y venta en el país (Freire, 2016).

El chame es considerado un pez estuarino, es decir prefiere regiones donde desemboca un curso de agua de gran caudal en el océano, con las siguientes características:

- Alta capacidad de supervivencia en hábitat que presente variaciones de salinidad y temperatura.
- Resistencia en ambientes acuáticos que no tengan suficiente oxígeno disuelto.

A continuación, se describen algunos parámetros característicos del chame:

Tabla 1.1 Parámetros característicos del Dormitatos Latinfrons

[Freire, 2016]

Factores abióticos	Rango aceptable	Rango óptimo
<i>Oxígeno</i>	0,4 -12 ppm	8,5 – 9 ppm
<i>pH</i>	6,4 a 9,4	7 – 8
<i>Dióxido de carbono</i>	15 a 90 ppm	-
<i>Salinidad</i>	0 – 50 partes por mil	12 partes por mil
<i>Temperatura</i>	18 – 30 °C	24 – 27 °C
<i>Turbidez</i>	En finales de verano tiene la capacidad de sobrevivir en áreas pantanosas con niveles de oxígeno de 0 ppm, semienterrados en el lodo.	

Cultivo de chame

El chame se distribuye desde California hasta el Norte del Perú en las costas del Pacífico. El cultivo del chame en el Ecuador se lo realiza a través de métodos artesanales que no requieren de mucho tecnicismo, sin embargo, en la actualidad se plantea el desarrollo de nuevas alternativas que favorezcan el aumento de su producción por medios piscícolas (Castro et al., 2005).

El cultivo del chame es considerada una de las alternativas acuícolas que permiten la variación y diversificación de las comunidades rurales costeras debido a que este pez posee alta capacidad de resistencia a enfermedades, sus costos de producción no son elevados a diferencia del camarón y la tilapia, tienen menor impacto ambiental ya que suelen alimentarse de la energía proveniente del detritus (residuos sólidos que se originan de la descomposición de la materia orgánica) (Loor & Mendoza, 2018)

1.4.3 Sistemas acuapónicos

La acuaponía se define como un sistema de acuicultura en recirculación, generalmente está diseñado como una combinación entre la acuicultura e hidroponía. La implementación de sistemas acuapónicos en la piscicultura busca aprovechar los desechos orgánicos producidos por un organismo acuático para ser transformados en nitratos y otros componentes que sirven de nutrientes para las plantas, a través de la acción bacteriana. Al alimentarse las plantas de estos nutrientes se genera un valor agregado a los desechos producidos ya que, éstas purifican el agua actuando como filtro biológico (D. Ramírez et al., 2008).

El uso de sistemas acuapónicos presentan como ventajas sobre los sistemas convencionales: una menor cantidad de nitrógeno emitido en las descargas de aguas, minimizan los costos debido a reutilización, no existe desperdicio del agua y se evita el uso de químicos y fertilizantes (García et al., 2005).

Un modelo acuapónico que se debe mencionar corresponde al de balsas o raíces flotantes, que mantiene las bandejas flotantes sobre el agua de cultivo de peces y deja a las raíces sumergidas en agua con nutrientes, lo que beneficia el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estos sistemas tienen la ventaja de

mantener gran superficie de contacto entre las bandejas sumergidas dando paso al asentamiento de bacterias nitrificantes (Bioaquafloc, 2019).

1.4.3.1 Componentes de un sistema de recirculación acuícola

Para que un sistema de recirculación acuícola sea considerado eficiente debe de proporcionar un ambiente adecuado para las especies, para lo que se debe tomar en cuenta los siguientes procesos o componentes del sistema:

- **Remoción de sólidos:** Para el tratamiento complementario de las aguas residuales es necesario añadir una etapa que ayude a eliminar de manera eficiente la materia orgánica y partículas que generen los peces (Maigual et al., 2012).

La sedimentación es considerada una operación física en la que interviene la fuerza de la gravedad permitiendo que una partícula se vuelva más densa que el agua y tenga un recorrido descendente, depositándose en el fondo del sedimentador (SAGPyA, 2006).

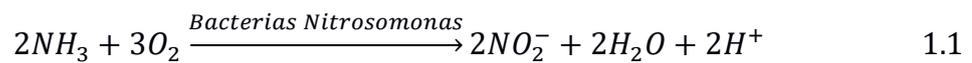
Algunos expertos han realizado diversos estudios sobre la configuración geométrica e hidrodinámica que facilite la eliminación de los desechos, reportando que los tanques de sedimentación circular son los más ideales porque permiten la remoción de sólidos de gran tamaño y a mayor velocidad de sedimentación (Castillo & Laurent, 2016).

Los tanques de sedimentación circular se basan en un patrón de flujo radial, estos sistemas pueden ser de alimentación central o periférica. Los tanques de alimentación central se caracterizan por permitir el ingreso del agua en el centro de un pozo circular, construido de esa manera con el fin de que permita el abastecimiento de agua equitativamente en todas las direcciones. En cambio, el tanque de alimentación periférica posee un deflector circular suspendido permitiendo un espacio anular por el que se descarga el afluente de las aguas residuales en dirección tangencial. El agua es dirigida en forma de espiral alrededor del tanque, debajo del reflector y el agua clarificada es recogida en un vertedero central (Rumana, 2013).

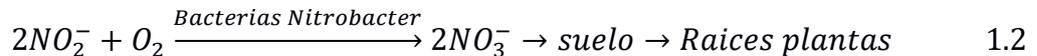
- **Filtros biológicos (Biofiltración):** Para el área ambiental de la acuicultura, una preocupación importante es el nitrógeno por ser un componente de los residuos generados por la crianza de peces. Los peces excretan nitrógeno residual por mecanismo de difusión e intercambio iónico a través de las branquias, heces y orina. La descomposición del nitrógeno es importante para los sistemas de recirculación de acuicultura, por la alta toxicidad del amoníaco, nitrito y el nitrato (Vásquez, 2014).

El proceso de remoción de nitrógeno amoniacal en un filtro biológico se denomina “nitrificación” y consiste en la oxidación del amoníaco a nitrato. La nitrificación consta de dos etapas; la primera fase en que el amonio se oxida y se transforma en nitrito por acción bacteriana del género Nitrosomas (Ec. 1.1). La otra fase se da cuando las bacterias del género Nitrobacter se encargan de la oxidación de nitrito a nitrato (Ec. 1.2) (Jiménez, 2015).

Primera reacción



Segunda reacción



La mayoría de los diseños de filtros biológicos empleados en acuicultura, constan de un área grande para que sea posible la colonización bacteriana; estos filtros tienen un lecho estacionario o un lecho móvil de material, pueden ser elaborados en madera, piedra o plástico cumpliendo con los siguientes aspectos: autolimpieza de alto grado, no causa la pérdida de volúmenes considerables de agua en la limpieza y no necesita mucha energía o mano de obra para su funcionamiento (Derwent Group, 2019).

- **Desgasificación:** Este proceso consiste en retirar la mayor parte de los gases disueltos en el agua. La etapa de desgasificación en un sistema de recirculación acuapónico sirve como medio para eliminar todo el dióxido de carbono que se encuentra acumulado en el sistema. La desgasificación se la puede realizar mediante procesos atmosféricos, térmicos y químicos. El dióxido de carbono puede ser tratado por medio de torres de relleno, o uso de membranas (Jiménez, 2015).

1.4.3.2 Calidad del agua en los sistemas de recirculación acuícola

Preservar la calidad del agua en los sistemas de recirculación acuícola es un factor decisivo en el desarrollo de los entornos acuáticos. La calidad del agua está definida como el conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que sirven como indicador para verificar si el proceso se encuentra dentro de las normas establecidas por cada ente gubernamental.

La temperatura es considerada como la variable que rige el comportamiento de los demás parámetros fisicoquímicos tales como pH, evaporación y solubilidad de gases. Además, es importante mencionar que los peces no poseen la capacidad de controlar su temperatura corporal siendo así que ésta depende del medio acuático en el que habitan (Rodríguez & Anzola, 2014).

El aumento de la temperatura tiene una influencia sobre la concentración de oxígeno disuelto y en consecuencia los peces se vuelven susceptibles a enfermedades, parásitos o morir. Además, cuando se está trabajando con temperaturas elevadas y un pH básico, la concentración de amonio en su forma tóxica suele aumentar. EL pH es otro factor importante que permite catalogar al agua como dura o blanda que es importante para el desarrollo de los organismos acuáticos, generalmente la presencia de dióxido de carbono en el agua provoca la disminución del pH y en consecuencia a algunos peces se les vuelve ácida la sangre y se irritan sus branquias (Rodríguez & Anzola, 2014).

1.4.4 Vermicompost

Una alternativa para aprovechar la mayoría de los desechos sólidos de las actividades de acuicultura, que son eliminados en la etapa de remoción a través de sedimentadores es darles un tratamiento a estos residuos con el fin de aprovechar al máximo los nutrientes que aun poseen y evitar desperdiciarlos por completo (Sink & Masabni, 2015).

Este tratamiento es denominado “vermicompostaje” y consiste en la conversión de residuos orgánicos sólidos en un producto de valor agregado que sea más amigable con el ambiente. Esta técnica se basa en la biooxidación y estabilización de desechos como producto de las interacciones entre los microorganismos

presentes y las lombrices bajo condiciones aerobias y mesófilas por medio del cual se obtiene un producto final más estable (Córtes & Méndez, 2019).

Para llevar a cabo esta metodología se utiliza la lombriz roja californiana, estas lombrices aceleran el proceso de degradación de la materia orgánica ya que necesitan de altas concentraciones de residuos para alimentarse. Como producto final se obtiene un humus que posee grandes atributos indispensables para las plantas permitiendo el aporte de nutrientes fitorreguladores que mejoran la fertilidad del suelo (Villegas & Laines, 2017).

1.4.4.1 Parámetros que se deben considerar en el vermicompost

Debido a que la producción de compostaje es un proceso biológico, los parámetros que influyen en los microorganismos son los mismos que deberán ser regulados a lo largo de la producción del vermicompost.

Relación C/N: Para iniciar correctamente el proceso de desarrollo del compostaje se debe tener una apropiada relación C/N, expertos aseguran que el valor óptimo de esta relación debería encontrarse en un rango de 25-35:1 puesto que los microorganismos generalmente necesitan 30 partes de carbono por cada unidad de nitrógeno (Campitelli, 2010).

Temperatura: El proceso de compostaje se compone de cuatro etapas: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración. Esta variable actúa de acuerdo con la etapa en que se encuentre. Inicialmente se encuentra a temperatura ambiente y va incrementando su valor a medida que ocurre cada proceso. Algunos autores aseguran que el rango óptimo de esta variable debería ser de 10-35°C siendo el óptimo 25°C (Campitelli, 2010).

Humedad: El contenido de agua de estos residuos oscila entre 70% a 85%.

pH: Al iniciar el proceso el pH suele disminuir como consecuencia de la actividad bacteriana y a medida que se da el proceso se neutralizan los ácidos orgánicos produciendo un aumento en el potencial de hidrógeno (Camiletti, 2016).

Nitrógeno total: El contenido de nitrógeno presente es indispensable en los desechos, sin embargo, éste no debe pasar de 0,5 mg/g (Camiletti, 2016).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Partiendo del problema que surge en la comunidad de Paipayales del cantón Santa Lucía, sobre los desechos generados de la actividad acuícola, el presente proyecto se centra en el estudio de técnicas que permitan tratar dichos residuos con el fin de aprovechar sus nutrientes ya sea por medio del ahorro de recursos, como el agua en un proceso o dándole un valor agregado a éstos.

El diseño del proyecto fue de tipo documental-investigativo, con un enfoque cuantitativo que tiene como finalidad comparar técnicas que permitan el aprovechamiento de los desechos generados en la comunidad, analizar su rendimiento y su factibilidad. La Figura 2.1 resume el algoritmo empleado para alcanzar los objetivos planteados en el presente estudio.

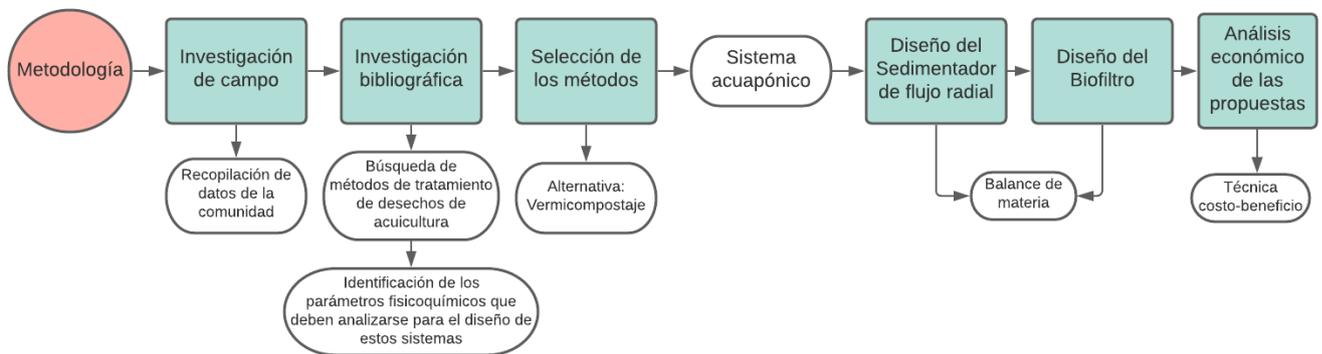


Figura 2.1 Algoritmo empleado en la metodología

[Elaboración propia]

2.1 Investigación de campo

El estudio se inició con la recopilación de datos, que fueron proporcionados por la comunidad Paipayales, los cuales son detallados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos obtenidos de la actividad acuícola

[Comunidad Paipayales, 2021]

Generalidades de la actividad acuícola en Paipayales	
Cantidad de peces por metro cuadrado	500
Cantidad de peces para el estudio	100
Alimento	Comida para camarón al 32% de proteína
Peso del pez	70-260 gramos
Ración de comida	4% del peso diariamente
Dimensiones de la piscina	
Largo	2 m
Ancho	4 m
Profundidad	1.5 m

2.2 Investigación bibliográfica

Para dar una solución viable a la comunidad se realizó una búsqueda bibliográfica de los posibles métodos que permitan tratar los residuos generados por la actividad acuícola en el sector. Se encontró en la literatura las alternativas que se puedan implementar para aprovechar los nutrientes y demás recursos que son desechados producto de la actividad acuícola:

- **Sistema de recirculación acuícola:**

El agua es uno de los recursos de mayor influencia en este sistema porque es el medio en el que se transportan todos los nutrientes hacia el sistema hidropónico, y también se considera como el medio a través del cual los peces captan el oxígeno. Por esta razón este sistema requiere de condiciones ideales que permitan la interacción entre los peces, microorganismos y las plantas. (Bañuelos, 2017).

- **Producción de abono orgánico por medio de la práctica del Vermicompost.**

Debido a que el proceso de producción de compostaje es un proceso biológico en el que intervienen una variedad de microorganismos es necesario controlar el medio donde se encuentran por medio de mediciones fisicoquímicas (Camiletti, 2016).

- **Aplicación directa de los lodos**

Para la aplicación directa de lodos se debe cuantificar los nutrientes que serán aportados al suelo y los compuestos dañinos que deben ser eliminados. Para el adecuado manejo de lodos, se analiza su composición química incluyendo la concentración de metales pesados y el contenido de microorganismos patógenos que posean (Amador et al., 2015).

2.3 Selección de métodos

Uno de los métodos que se propone en el presente estudio es la aplicación de un sistema de recirculación acuícola por poseer la ventaja de permitir la producción de alimentos de origen animal y vegetal. El diseño del sistema acuapónico se basa en el dimensionamiento de un sedimentador de flujo radial, el diseño de un biofiltro, la identificación de los parámetros fisicoquímicos y criterios de diseño que permitan dimensionar el sistema acuapónico (D. Ramírez et al., 2008).

Como alternativa también se plantea la obtención del abono orgánico por medio de la práctica del vermicompostaje, ya que, por medio de esta práctica también se le puede dar un tratamiento a los residuos que se generan en el cultivo de peces. Además, también se consideró que la práctica del vermicompost puede contribuir significativamente a la mejora en la fertilidad del suelo y así lograr un aumento sostenible en la cosecha de los agricultores de la comunidad (Villegas & Laines, 2017).

Finalmente se encontró que la aplicación directa de lodos se puede emplear en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo gracias al aporte de los tres principales compuestos como el nitrógeno y fósforo, que se generan como consecuencia de la actividad de los peces en las piscinas.

2.3.1 Sistema acuapónico

Para llevar a cabo el dimensionamiento del sistema acuapónico se realizó una investigación bibliográfica con el fin de identificar los parámetros fisicoquímicos que permitan la interacción entre los peces, microorganismos y plantas.

Para iniciar el diseño del sistema de recirculación acuapónico es necesario identificar las corrientes de entrada y salida, a través de un balance de materia global y por componentes como nitrógeno, fósforo y carbono. Mediante la revisión documental, se obtuvo los valores porcentuales de los componentes y desechos que son consumidos y eliminados por los peces, cuando son alimentados con comida para camarón al 100% de proteína (Figura 2.2) (León, 2018).

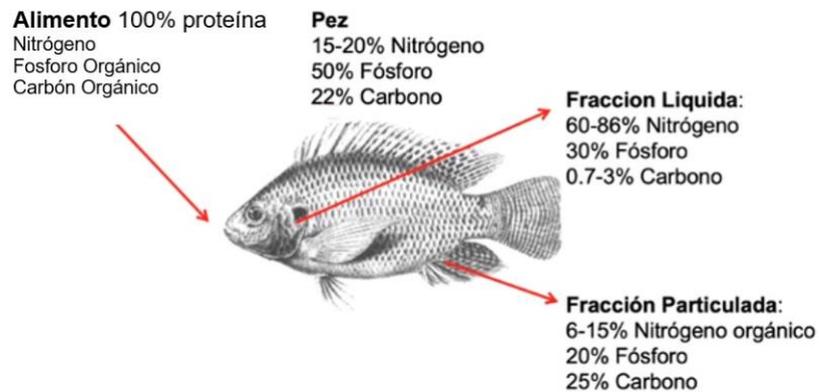


Figura 2.2 Porcentaje de nutrientes que son asimilados y desechados por los peces

[León, 2018]

Los datos bibliográficos permitieron establecer las relaciones para determinar el balance de materia del sistema acuapónico cuando se alimenta a los peces con alimento al 32% de proteína. El balance de materia se lo realizó siguiendo la siguiente ecuación:

$$C_{n0} = C_{n \text{ asimilado}} + C_{n \text{ desechado}} ; n = N, P, C, \text{ otros componentes} \quad 2.1$$

Donde:

C_{n0} = Componente que ingresa al sistema

$C_{n \text{ asimilado}}$ = Componente asimilado por los peces

$C_{n \text{ desechado}}$ = Componente excretado por los peces

N= nitrógeno orgánico

P= fósforo orgánico

C= carbono orgánico

Otros componentes= restos de nitritos, nitratos y otros nutrientes.

El Apéndice A presenta con mayor detalle la resolución del balance de materia del sistema acuapónico.

También se propone un balance específico de carbono con el fin de identificar la cantidad de dióxido de carbono que se convierte por acción metabólica de los peces.

Partiendo del balance global:

$$D_g = E_A - A_a \quad 2.2$$

Donde:

D_g = Cantidad de desechos generados por los peces en el estanque.

E_A = Entrada de alimento al sistema.

A_a = Cantidad de alimento consumido por los peces.

Los desechos se los calculan a través de la siguiente ecuación:

$$C_D = F_{C_1} - F_{C_5} \quad 2.3$$

Donde:

C_D = Carbono desechado

F_{C_1} = Flujo de carbono en la de entrada al sistema.

F_{C_5} = Flujo de carbono en que es consumido por los peces.

La cantidad de carbono convertido en dióxido de carbono se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_{CO_2} = C_D - C_{SD} - C_{SS} \quad 2.4$$

Donde:

C_{CO_2} = Cantidad de carbono que se convierte en CO_2

C_D = Carbono que se desecha

C_{SD} = Cantidad de carbono que se desecha en forma de sólidos disueltos.

C_{SS} = Cantidad de carbono que se desecha en forma de sólidos sedimentables.

2.3.1.1 Diseño del sedimentador de flujo radial

Un sedimentador debe garantizar el desempeño satisfactorio en la remoción de sólidos del sistema acuapónico, por esta razón se eligió un sedimentador de flujo radial ya que, éstos pueden tener una eficiencia del 50% al 70% de los sólidos en suspensión y son ideales para este tipo de sistemas (Rumana, 2013). Para diseñar el tanque sedimentador se tomó en cuenta las medidas de la piscina que se tiene en la comunidad (Tabla 2.1). Este estudio se llevó a cabo con una muestra de 100 peces, debido a que los peces tenían pesos diferentes se seleccionó una muestra para facilitar los cálculos, esto permitirá tener un control de las variables que se estudian para el diseño del sistema y del balance de materia que se debe realizar. Se eligió la cantidad de peces que tenían el mayor peso, el cual era de 260 gramos, porque serán los que generen mayor cantidad de desechos y se eligió un tanque circular plástico de 55 galones de capacidad que son los que se encuentran normalmente en el mercado y la comunidad podrá conseguirlo fácilmente. La ilustración 2.3 muestra la propuesta de diseño del sedimentador de flujo radial (Bob, 2020).

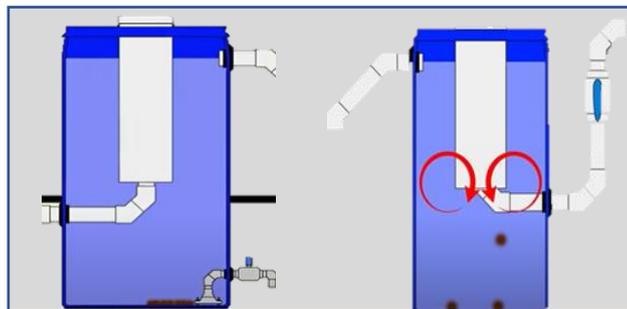


Figura 2.3 Tanque sedimentador de flujo radial

[Rob's Aquaponic & Bacyard Farm]

Cálculo de la velocidad de carga superficial

Los cálculos para determinar los parámetros de diseño característicos en un sedimentador se detallan a continuación:

En primer lugar, se determinó la velocidad de carga superficial mediante la siguiente ecuación (Mackenzie L., 2010).

$$V_o = \frac{Q}{A} \quad 2.5$$

Donde,

V_o = Velocidad de carga superficial (m/min).

Q = Flujo de agua (m³/min).

A = Área transversal por donde fluye el fluido (m²).

Cálculo de la velocidad de sedimentación

Con la finalidad de identificar la rapidez a la que descienden las partículas, se calculó la velocidad de sedimentación de lodos a través de la siguiente relación (Rumana, 2013).

$$V_s / V_o = e \quad 2.6$$

Donde,

V_s = Velocidad de sedimentación (m³/m²h)

V_o = Velocidad de carga superficial (m³/m²h)

e = Eficiencia de remoción del sedimentador (%)

Para lograr remover la mayor cantidad de sólidos sedimentables en el sistema acuapónico se debe tener en cuenta, que se asume una eficiencia de remoción para el sedimentador de 70%.

Cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo que el fluido permanece en el tanque sedimentador, se lo determinó con la siguiente ecuación (Mackenzie L., 2010).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad 2.7$$

Donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulica (d)

V = Volumen del tanque sedimentador (m³)

Q = Caudal (m³/d)

Para diseñar el sedimentador, se propone la implementación de tubería interna con el fin de disminuir la velocidad de los desechos sólidos al momento de

sedimentarse en el fondo del tanque. (Bob, 2020) propone como regla general seguir esta ronda alrededor del 50% y eso dará una masa bastante grande de agua sin gas en el fondo y así lograr disminuir la velocidad del fluido que sale del tubo 2, la figura 2.4 ilustra de qué manera son colocados los tubos en el sedimentador.

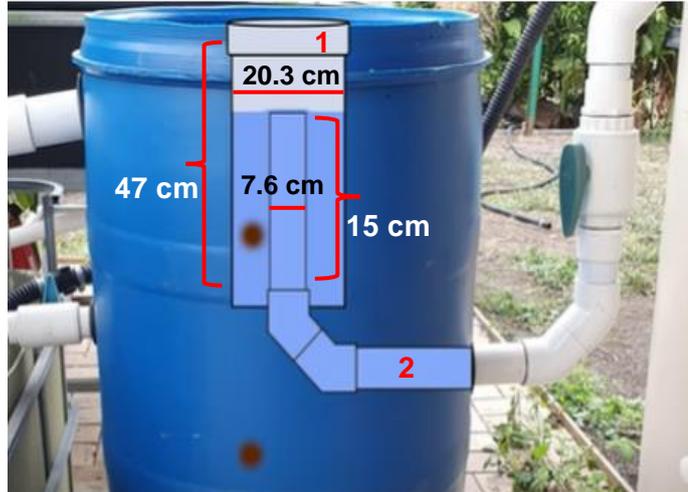


Figura 2.4 Estructura interna del sedimentador

[Rob's Aquaponic & Bacyard Farm]

Se siguió la misma metodología de cálculo de la velocidad de carga superficial y TRH en los tubos dentro del sedimentador, teniendo en cuenta que su área transversal será diferente porque tienen distintas dimensiones.

2.3.1.2 Diseño del biofiltro

Se tomó como referencia la metodología propuesta por (Herrera, 2019) para el diseño del biofiltro. Los parámetros necesarios para llevar a cabo esta etapa se detallan a continuación en la Tabla 2.4.

Tabla 2.2 Parámetros de diseño para el biofiltro

[Herrera, 2019]

Parámetro	Valor
Nitrógeno amoniacal que se produce en 1 kg de alimento que tiene 100% de proteína	0.092 kg Nitrógeno amoniacal (NA)
Remoción de NA por cada m ²	0.00085 g amonio/día
Superficie específica del biomedio (tapa rosca)	108 m ² /m ³
Producción de Nitrato por Kg de Nitrógeno Amoniacal	0.976 kg NO ₃
Concentración de salida máxima de amonio para los peces	3 mg/L
Cantidad de lechugas por m ²	25 plantas/m ²
Área para cultivos de bajo porte sin fruto	399 m ²

Cálculo de la cantidad de Nitrógeno amoniacal a tratar

Teniendo en cuenta que por cada kg de alimento para camarón (100% proteína) se producen 0.092 kg de NA, se procede a determinar la cantidad de NA cuando se tiene alimento al 32% de proteína, tal como se describe a continuación:

$$P_{NA} = \frac{32}{100} \times NA \text{ producido (100\% proteína)} \quad 2.8$$

La ecuación 2.9 permite determinar la cantidad de nitrógeno amoniacal que se produce al día.

$$F_{NA} = P_{NA} \times F_3 \quad 2.9$$

Donde:

F_{NA} = Cantidad de NA producido por día.

P_{NA} = Producción de NA cuando se alimenta a los peces con proteína (32%)

F_3 = Flujo total que ingresa al biofiltro.

Finalmente se calcula la cantidad de nitrato que se forma en el sistema teniendo en cuenta que por cada kg de NA tratado en el filtro se produce 0.976 kg NO₃ (Tabla 2.4).

$$N_p = nt \times F_{NA} \quad 2.10$$

Donde:

N_p = Nitrato producido en el sistema.

nt = Producción de Nitrato por cada NA tratado en el filtro (Tabla 2.4)

F_{NA} = Cantidad de NA producido por día (Ec. 2.9).

Cálculo del volumen del material filtrante

Se planteó el uso de tapas plásticas como soporte interior del biofiltro para que se fijen las bacterias nitrificantes y se pueda dar la conversión de NA en nitrato. El cálculo de la cantidad de tapas a usar en el sistema acuapónico se detalla en el Apéndice B.

Para la determinación del volumen del biofiltro se halló el valor del área de nitrificación del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$A_n = \frac{F_{NA}}{\text{Remoción por } m^2} \quad 2.11$$

Una vez determinada el área de nitrificación, se procede a calcular el volumen del biofiltro:

$$V_B = \frac{A_n}{S_B} \quad 2.12$$

Donde:

V_B = Volumen del material filtrante (m^3).

A_n = área de nitrificación (m^2).

S_B = superficie que ocupan las tapas por unidad de volumen (m^2/m^3) (Tabla 2.4).

Se va a considerar un 65% más del volumen del biofiltro debido al crecimiento de la actividad bacteriana en el interior de éste (Herrera, 2019).

Cálculo del caudal que ingresa al biofiltro

Para poder determinar el caudal requerido en el biofiltro se debe realizar un balance de materia con el fin de conocer la cantidad de amoníaco que regresa

al estanque y que no se logra remover del sistema. La concentración de amonio a la entrada se determina con la siguiente ecuación (Herrera, 2019)

$$CE = CS + [E(CD - CS)] \quad 2.13$$

Una vez obtenido estos parámetros, se procede a calcular el caudal de ingreso al sistema, tal como indica la ecuación a continuación (Herrera, 2019):

$$Q = \frac{F_{NA}}{CS - CE} \quad 2.14$$

Donde:

CD: Concentración deseada en el estanque de peces (se asume 0 mg/L).

CS: Concentración de salida del sistema (Tabla 2.4).

E: Eficiencia del biofiltro (35%).

CE: Concentración de amonio que regresa al biofiltro (mg/L)

F_{NA} : Producción de amonio al día (g/d)

Cantidad de plantas que requiere el sistema acuapónico

Se seleccionaron semillas de lechuga para el cultivo hidropónico porque son plantas pequeñas que no requieren de condiciones de vida exigentes y sus costos de producción son bajos.

La cantidad de lechugas que se requiere en el SRA se lo determina a partir de la siguiente ecuación:

$$A_c = N_p \times B_c \quad 2.15$$

Donde:

A_c = Área de cultivo

N_p = Nitrato producido en el sistema (Ec. 2.10)

B_c = Base de cultivo (Tabla 2.4)

Finalmente, la cantidad de lechugas a calcular se lo determina de la siguiente manera:

$$\#Plantas = A_c \times L_{m^2} \quad 2.16$$

Donde:

A_c = Área de cultivo

L_{m^2} = Cantidad de lechuga que se puede cultivar por cada m^2

2.3.2 Alternativa de tratamiento de residuos generados por peces

2.3.2.1 Vermicompostaje

Como alternativa a implementar en la comunidad, se propone el tratamiento de los lodos que se generan producto del cultivo y cría de peces, a través de la práctica del vermicompostaje. Se realizó revisión bibliográfica de los parámetros fisicoquímicos indispensables que permitan la obtención de abono orgánico en caso de aplicarlo en la comunidad.

Se propone el uso de lombriz californiana para que aceleren el proceso de degradación de la materia orgánica y el uso de fibra de cáscaras de coco como lecho (Morales et al., 2020).

CAPITULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Selección de métodos de tratamiento de residuos acuícolas

Por medio de literatura se encontró que una de las técnicas que impulse al desarrollo económico de la comunidad, es el sistema de recirculación acuapónica debido a las ventajas que posee ya que, es un proceso que permite el aprovechamiento de recursos dado que, se puede cultivar peces al mismo tiempo que se producen plantas en el huerto hidropónico. Por otra parte, se plantea también brindar como alternativa a la comunidad, la práctica del vermicompostaje ya que es una actividad económica y de fácil aplicación.

Una vez propuesto los métodos para tratar desechos sólidos producidos en estanques acuícolas, se determinaron los parámetros fisicoquímicos más importantes a tomar en cuenta para la calidad del agua de dichos estanques. Por medio de bibliografía se determinó que los parámetros más influyentes en la calidad del agua en un sistema de recirculación acuícola son los que se detallan en la Tabla 3.1 (Bañuelos, 2017).

Tabla 3.1 Parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas

[Bañuelos, 2017]

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	18-30
pH	6-7
Amoniaco (mg/L)	<1
Nitrito (mg/L)	<1
Nitrato (mg/L)	5-150
OD (mg/L)	<5

Los parámetros más importantes encontrados en la literatura para la producción de abono orgánico fueron los siguientes (Camiletti, 2016):

Tabla 3.2 Parámetros de calidad del agua en estanques acuícolas

[Camiletti, 2016]

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	10-35
pH	7
Humedad (%)	70-80
Amonio (mg/L)	0,5 mg/g
C/N	25-35:1
Concentración de sales (dS m ⁻¹)	<8

Se descartó la aplicación directa de lodos debido a la dificultad de su aplicación y a sus efectos sobre el suelo a mediano y largo plazo. La Figura 3.1 ilustra el algoritmo que se usó para poder elegir los métodos de mayor conveniencia para la comunidad.

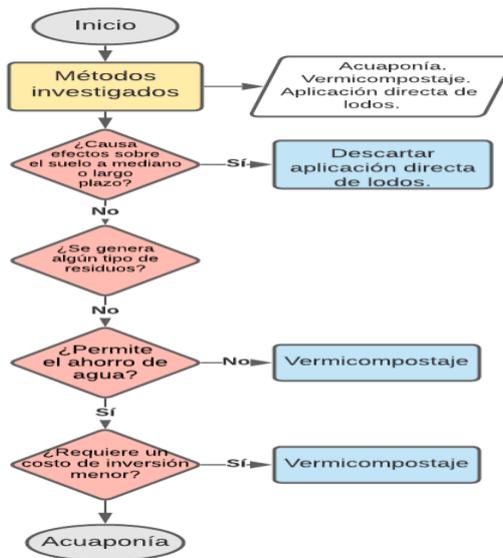


Figura 3.1 Selección del método para tratar residuos acuícolas

[Elaboración propia]

3.2 Balance de materia del sistema acuapónico

El balance de materia permitió identificar las corrientes presentes en el sistema acuapónico, tomando como base de cálculo 1 día, se observó que para una muestra de 100 peces de Chame que tienen un peso de 260 gramos se requiere un total de 1040 g/d de alimento con proteína al 32%. Fue posible cuantificar las corrientes de entrada y salida del sedimentador y del biofiltro, lo cual fue útil para el dimensionamiento de dichos sistemas. Por medio de esto se identificó que el sedimentador tendrá la capacidad de remover 94.64 gramos en un día, además a través de datos experimentales se aprecia que el biofiltro puede disminuir la concentración del nitrógeno amoniacal porque su concentración pasa de 26.62 g/d a 5.325 g/d.

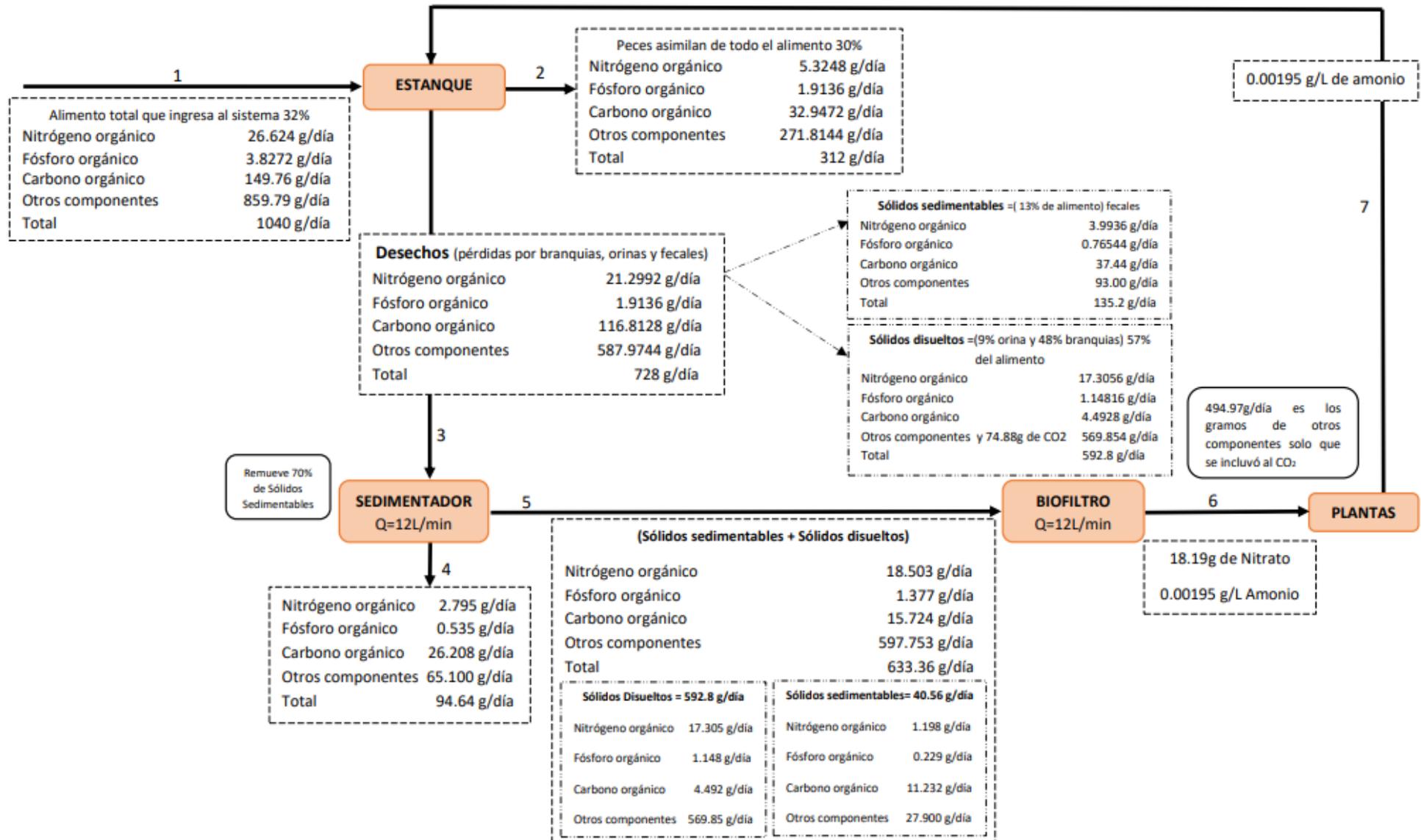
En los sistemas de cultivos de agua dulce, el dióxido de carbono se produce principalmente por acción metabólica de los peces. En condición ideal el agua oxigenada pasa a través del epitelio branquial, propagando el oxígeno disuelto pasivamente a través del epitelio celular de las lamelas secundarias hacia el torrente sanguíneo (Godoy, 2015).

Por medio del balance de materia global se pudo estimar la cantidad de carbono que se pierde en el sistema en forma de dióxido de carbono, dando como resultado un valor de 74.88 g de CO₂ que se produce por día (Figura 3.2). En términos generales, por medio del balance de carbono se puede identificar cuáles son los componentes en los que se puede convertir cuando se disuelve en el agua, uno de ellos es el dióxido de carbono, este compuesto es considerado tóxico para los peces porque reduce su capacidad en la sangre para transportar oxígeno (Ladino, 2011). El chame tiene la capacidad de soportar de 15 a 90 ppm de CO₂ (Tabla 1.1), por lo cual se considera que el balance de carbono es un aspecto indispensable que permite estimar la cantidad de dióxido de carbono que se genera en el sistema y a través de esto llevar un seguimiento mediante pruebas fisicoquímicas de sus niveles de concentración y de esta manera mantener los organismos vivos en el estanque.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques del sistema acuapónico con sus respectivas corrientes (Figura 3.2). Las corrientes 6 y 7 no fueron especificadas

completamente porque para determinar los componentes de dichas corrientes es necesario realizar pruebas experimentales.

Figura 3.2 Diagrama de bloque del sistema de recirculación acuapónico



3.3 Análisis del desempeño del sedimentador

Mediante cálculos fue posible dimensionar el sedimentador de flujo radial que se puede emplear para remover los residuos sólidos del sistema, en el cual se adaptó tuberías interiores al tanque para poder representar su función, ya que comprar el equipo resultaría costoso y fuera del alcance para los habitantes de la comunidad.

Se realizaron los cálculos asumiendo el sistema como un proceso en estado estacionario y que el sedimentador tiene una eficiencia del 70%. También se determinó el caudal asumiendo que tanto en el sedimentador y en el biofiltro será constante, el cual fue calculado mediante la ecuación 2.9, dando como resultado un valor de 12.33 L/min. Este caudal fue calculado en base al biofiltro ya que es el que permitirá mantener los niveles de amoníaco que no sean tóxicos para los peces.

Se obtuvo que la velocidad de carga superficial es menor en el tanque con un valor de 3 m/h y en las tuberías interiores es mayor debido al área de cada pieza, las tuberías ubicadas en el centro del sedimentador minimizan la suspensión de los sólidos capturados en el fondo y el tiempo de retención hidráulica para el tanque sedimentador fue de 18.77 min, es decir al fluido le tomará aproximadamente 19 minutos en entrar y salir del tanque, se considera un valor aceptable ya que, al tratarse de una propuesta de diseño a pequeña escala, no se trabaja con grandes masas de agua (Tilley et al., 2010).

Según la bibliografía consultada, cualquier partícula que presente una velocidad de sedimentación mayor que la velocidad de carga superficial, será removida en un 100%, caso contrario se eliminarán en una relación de la ecuación 2.6 (Rumana, 2013). Dado que se toma una eficiencia de remoción del 70% y en base a la velocidad de carga superficial se calculó la velocidad de sedimentación de la partícula, el cual debe ser de 2.103 m/h, este valor se determina experimentalmente en el laboratorio de acuerdo al tamaño de la partícula de los sólidos sedimentables (*índice volumétrico de lodos (IVL)*), en el presente proyecto no se pudo realizar esta práctica pero es necesario que para futuros proyectos de la puesta en marcha de este sistema acuapónico propuesto se realice este IVL y si no se cumple con el valor de la velocidad de sedimentación se puede redimensionar el sedimentador y utilizar un tanque de mayor diámetro (Rumana, 2013).

Tabla 3.3 Resultados del dimensionamiento tanque sedimentador

Parámetro		Valor
Q (L/min)	Flujo de agua	12.33
V ₀ (m/h)	Velocidad de carga superficial	3.004
V _s (m/h)	Velocidad de sedimentación	2.103
TRH (min)	Tiempo de retención hidráulica	18.77
X _{ss} (g/L)	Composición de sólidos sedimentables	0.0113

Se determinó el tiempo que le toma a la partícula sedimentable entrar y salir de la tubería interna del sedimentador, dando como resultado 1.0430 y 0.0610 minutos para la tubería 1 y 2 respectivamente.

Tabla 3.4 Parámetros de diseño de la tubería interna del sedimentador

Parámetro		Tubería 1	Tubería 2
V ₀ (m/h)	Velocidad de carga superficial	27.04	147.20
TRH (min)	Tiempo de retención hidráulica	1.0430	0.0610

De manera general se considera que si se emplea un sedimentador con estas características se logrará remover la mayoría de los sólidos sedimentables ya que, de los 728 g de desechos generados en el estanque por los peces, 135 g corresponden a los sólidos sedimentables y con una remoción del 70% se logra eliminar 94.64 g de SS y solo el 40.36 g de ellos se vuelven a recircular en el sistema, todo esto en un tiempo de 16.22 h que es lo que tarda en circular toda el agua del estanque por el sedimentador.

3.4 Análisis del desempeño del biofiltro

Para este sistema en específico se determinó que la cantidad de amonio cuando se alimenta al pez con 32% de proteína es de 29.44 g/día generando un flujo másico de amonio de 18.64 g/día. Es decir, se debe diseñar el biofiltro de tal manera que pueda tratar mínimo dicha cantidad de amonio por día. La cantidad de nitrato convertido en

el sistema fue de 18.19 g /d, esa será la cantidad de nutrientes que van a ser absorbidas por las lechugas y así favorecer su crecimiento.

Para este sistema se consideraron tapas de botellas plásticas como biomedio, que sirve como fijador de bacterias nitrificantes, se determinó que se necesitan en total 10968 tapas (Apéndice B) y se necesita un área de 21 m² aproximadamente para que las bacterias puedan llevar a cabo el proceso de nitrificación.

Una vez determinada el área de nitrificación se calculó la capacidad volumétrica del material filtrante, donde se obtuvo como resultado que se requieren aproximadamente 0.335 m³ de capacidad para convertir los 29.44 g de amonio al día en nitratos. Este valor incluye el 65% añadido debido a la actividad bacteriana que ocurre en la parte interna del biofiltro con el fin de degradar la materia orgánica y, en consecuencia, se producen bacterias heterótrofas, las cuales tienen una velocidad de crecimiento mucho mayor en comparación con las bacterias nitrificantes demandando una mayor capacidad para que se pueda llevar a cabo la nitrificación sin ningún inconveniente. También se determinó que el sistema acuapónico requiere de una bomba de 5.65 V para impulsar el fluido en todo el proceso (Apéndice C). La tabla 3.5 resume los resultados de diseño más importantes para dimensionar el biofiltro acuapónico.

Se determinó que la cantidad de amonio que sale del biofiltro es de 1.95 mg/L, idealmente se espera que esta concentración no supere los 3 mg/L para evitar que afecte a la salud de los peces (Herrera, 2019). Finalmente, se establece que con 18.19 g de nitratos producidos por día se puede obtener alrededor de 175 plantas de lechuga por cada m².

Tabla 3.5 Resultados del dimensionamiento del Biofiltro acuapónico

Parámetro	Valor
P_{NA} (producción de NA cuando se alimenta con 32% proteína)	29.44 g NA
F_{NA} (flujo de NA producido por día)	18.64 g NA/d
N_P (Nitrato producido)	18.19 g NO_3/d
A_n (área de nitrificación)	21.93 m^2
V_B (volumen del biofiltro)	0.335 m^3
CE (amonio que regresa al biofiltro)	0.00195 g/L
Q (caudal requerido)	12.33 min/L
Plantas requeridas	175 lechugas/ m^2
Potencia de la bomba requerida	5.65 V

3.4 Análisis de costo y beneficio

Para analizar la factibilidad de las alternativas propuestas en el presente estudio, se realizó un análisis de costo y beneficio que permite identificar cuál es la solución más viable para tratar los desechos sólidos al mismo tiempo que mejora el desarrollo sostenible de la comunidad.

Los resultados obtenidos muestran que para llevar a cabo la construcción de un sistema de recirculación acuapónica (SRA) en la comunidad Paipayales, se necesita de un presupuesto de \$450.36. Este monto de inversión incluye: costos por materiales necesarios para la recirculación del sistema, costos de diseño del huerto hidropónico y los costos de producción por cosecha, teniendo en cuenta que en la comunidad Paipayales se cultiva el chame cada 6 meses. Los resultados obtenidos son detallados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Costos de implementación de un SRA

Costos de construcción del sistema acuapónico	
Costo total por materiales (tuberías, estanque, bomba, etc.)	\$221,4
Costos de construcción de huerto hidropónico	\$44,84
Costo total	\$266
Inversión requerida por cosecha	
Alevines chame	\$6
Alimento para peces	\$174
Costo de energía kW h	\$2,23
Semillas para cultivo	\$2,13
Costo total	\$184,36
Costos de implementación de un SRA	
Costos de construcción	\$266
Costos de producción	\$184,36
Costo total	\$450,36

A continuación, se exponen los costos de inversión si se desea emplear un sistema de tratamiento de residuos sólidos basado en el vermicompost (Tabla 3.7). Para producir abono orgánico se requiere un total de \$78,00, la práctica de vermicompostaje no requiere de mayor gasto de inversión y su implementación no genera dificultades. Sin embargo, se debe tener en cuenta que además de los costos de inversión y producción, existen los costos que permiten realizar un seguimiento de los parámetros fisicoquímicos a través de pruebas en el laboratorio que requieren ambos métodos.

Tabla 3.7 Costos de inversión de la práctica del vermicompostaje

Materiales	Costo unitario	Cantidad	Gasto
Recipientes plásticos	6.00 \$	3	\$18.00
Lombriz californiana	0.02 \$	500	\$10.00
Materiales para lecho	Material reciclado	1/3	\$0.00
Humus de lombriz	8.00 \$	6 meses	\$48.00
Grifos	2.00 \$	1	\$2.00
Total			\$78.00

El análisis de costo-beneficio permitió identificar la conveniencia de la implementación de un sistema de recirculación acuapónico en la comunidad de Paipayales en el cantón Santa Lucía. Los cálculos de beneficio-costos se detallan con mayor profundidad en el Apéndice E.

3.5 Viabilidad y factibilidad de ambos sistemas

Para determinar la viabilidad y factibilidad de la implementación de un SRA en la comunidad Paipayales, se realizó un análisis de viabilidad empleando el TIR y el VAN. Se inicia el análisis determinando los ingresos generados por venta del chame y de la lechuga orgánica siendo así que se obtiene una ganancia de \$447.00 por cosecha (6 meses), es decir que lo obtenido está cerca de recuperar la inversión en el sistema que es de \$450.36.

La máxima tasa de descuento que se puede tener del proyecto para que sea rentable es de 2.8%, con esta tasa de retorno se pudo obtener un VAN a los 18 meses de \$728.16, se refleja una cantidad mayor a cero, es decir, que la implementación de un sistema acuapónico en la comunidad Paipayales sería rentable, generando ingresos para los habitantes y beneficiando el desarrollo sostenible.

Tabla 3.8 Ganancias por ventas de producción en un SRA

Producto	Precio de venta	Cantidad para producir por cosecha	Ingresos
Chame	1.8	100	\$180
Lechuga orgánica	0.5	534	\$267
Total			\$447

Tabla 3.9 Flujo de caja por semestre

TIR	0.028
TIR (%)	2.8%
Flujo de caja en 18 meses	
6 meses	\$0
12 meses	\$248.52
18 meses	\$241.75
VAN (18 meses)	\$490.28

En términos económicos, la implementación de un sistema de tratamiento de residuos basado en el vermicompostaje no es muy complicada y no requiere muchos recursos financieros; sin embargo, el sistema que genera mayor aprovechamiento de recursos es el sistema acuapónico debido a que en este sistema se generan dos productos: el chame y la lechuga orgánica, que su comercialización mejoraría los ingresos en la comunidad, y mediante el sistema de recirculación se pueden aprovechar los nutrientes y el agua, que es un recurso muy indispensable en la actualidad.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se concluye que la identificación de parámetros fisicoquímicos es un factor indispensable tanto en los sistemas acuapónicos como en la producción de abono orgánico debido a que permiten mantener las condiciones de calidad del agua en el SRA y preservar las condiciones de vida de los organismos encargados de degradar la materia orgánica en el proceso de producción de compost. Los parámetros más importantes que se miden en estos sistemas son la temperatura con un rango de 18-30°C en sistemas acuapónicos y de 10-35°C en la práctica de vermicompostaje. El pH es otro factor influyente en ambos sistemas por lo tanto se concluye que mantener este parámetro en un valor neutro garantiza un ambiente de seguridad tanto para los peces y plantas en el sistema acuapónico, como para los microorganismos en la práctica de vermicompost.
- Se pudo llevar a cabo el dimensionamiento del sistema en estado estacionario. Los resultados mostraron que el sedimentador tiene la capacidad de remover alrededor de 94,64 g/día de sólidos sedimentables cuando se asume una eficiencia del 70% y el biofiltro puede llegar a convertir 18.64 g de nitrógeno amoniacal al día en 18.19 g de NO₃/día para producir alrededor de 175 plantas de lechugas cuando se cultivan 100 peces chames.
- La implementación del sistema acuapónico requiere \$450.36, con unas ganancias de \$447 por cosecha con un flujo de caja de \$490.28 a 18 meses; en comparación, con el vermicompostaje que solo necesitaría \$78.00 resulta un valor más accesible, pero esta práctica requiere de un estudio a profundidad en laboratorio para comercializar un producto de calidad. En ese sentido, la práctica de vermicompostaje es una opción viable y económica, sin embargo, implementar un sistema acuapónico en la comunidad permitiría obtener mayores ingresos a través del cultivo de planta y cría de peces.

4.2 Recomendaciones

- En caso de implementar un sistema de recirculación acuapónico, se debería realizar un plan de análisis de costos de mantenimiento. Por ejemplo; en el caso del sedimentador, se recomienda la puesta en marcha de dos equipos para evitar paros en el sistema debido al mantenimiento de estos, lo que previene pérdidas de producción.
- Es recomendable realizar pruebas en el laboratorio sobre los parámetros fisicoquímicos de los lodos, previo a ser tratados por medio del vermicompostaje para determinar la cantidad de materia orgánica que deben estabilizar los microorganismos y las lombrices californianas.
- En caso de no contar con una cantidad elevada de tapas proponer el uso de otro tipo de biomedio tal como mallas plásticas, gravas u otras opciones como sustrato fijador de bacterias nitrificantes.
- Realizar tomas manuales de la temperatura en todo el sistema con el fin de llevar un control y reportar alguna anomalía puesto que, se encuentra en un ambiente cálido y los cambios abruptos de temperaturas podrían alterar las condiciones de vida de los peces.
- Se recomienda seguir un control en la medición del pH en el sistema para evitar que ocurra el fenómeno de “bloqueo de nutrientes”, a través de mediciones diarias que permitan llevar un control y tomar precauciones cuando se presente alguna anomalía.

BIBLIOGRAFÍA

- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*. 26(1). <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Bañuelos, J. (2017). *Acuapónia: Parámetros básicos de diseño* [Tesis de Grado, Universidad Autónoma Agraria «Antonio Narro»]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8341/JOSE%20ROBERTO%20BA%c3%91UELOS%20JAUREGUI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bioaquafloc. (2019, agosto). *Tipos de modelos acuapónicos*. <https://www.bioaquafloc.com/acuaponia/tipos-de-modelos-acuaponicos/>
- Bob, R. (2020). *Aquaponics & Backyard Farm*. <https://www.youtube.com/watch?v=crKjqCJmIV0&list=LL&index=2&t=396s>
- Camiletti, J. (2016). *Estudio del Vermicompostaje de compost de residuos orgánicos de distinta naturaleza*. [Tesis de Grado, Universidad Miguel Hernández]. <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2820/1/TFM%20Camiletti%20Morales%20C%20Justin.pdf>
- Campitelli, A. (2010). *Calidad de Compost y Vermicompost para uso como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4726/Campitelli%20C%20Paola.%20Calidad%20de%20compost%20y%20vermicompuestos%20para%20su%20uso...%20.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Castillo, M., & Laurent, I. (2016). *Propuesta de diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales especiales generadas en las plantas de concreto del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón del Instituto Costarricense de Electricidad*,

- Siquirres, Limón, Costa Rica*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional].
<https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/13494/Proyecto%20de%20Graduaci%20c3%b3n%20Melissa%20C%20Ignacio%20L.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, R., Aguilar, G., & Hernández, J. (2005). *Conversión alimenticia en engordas puras y mixtas de Popoyote (Dormitator latifrons Richardson) en estanques de cemento*. 23(45-52), 9.
- Córtés, J., & Méndez, C. (2019). *Propuesta para el aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes del cultivo de trucha arcoiris mediante la técnica de vermicompostaje para la obtención de abono orgánico*. [Tesis de Grado, Universidad La Salle].
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2138&context=ing_ambiental_sanitaria
- Delgado, E., & Peralta, J. (2020). *Levantamiento de las condiciones del habitat en el marco de comunidades sostenibles del Recinto Paipayales del Cantón Santa Lucía*. 1-10. http://www.laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP583.pdf
- Derwent Group. (2019). *Sistemas de filtrado en acuicultura*. derwent.es.
<https://derwent.es/sistemas-de-filtrado-en-acuicultura/>
- Formo, E. (2012). *Historia de la acuaponia*. <https://acuaponia-argentina.blogspot.com/2012/01/historia-de-la-acuaponia.html>
- Freire, C. (2016). *Experiencias en el manejo del chame (Dormitator Latifrons) en la Cuenca del Río Guayas, Ecuador*. (Primera). <https://anyflip.com/mqwx/zgur/basic>
- García, M., Hernández, F., & León, C. (2005). *Evaluación de un sistema experimental de Acoponía*. 9(1). <https://www.redalyc.org/pdf/837/83709105.pdf>

- Godoy, M. (2015). *Hipercapnia y CO2 en Agua Dulce*.
https://www.marcosgodoy.com/index.php?option=com_content&view=article&id=111:hipercapnia-y-co2-en-agua-dulce&catid=167:sistema-cardiovascular&Itemid=505&lang=en
- Hernández, C., & Aguirre, G. (2009). *Sistemas de producción de acuicultura con recirculación de agua para la región norte, noreste y noroeste de México*. 25, 117-130.
- Herrera, J. (2019). *Acuaponía: Fórmulas y Cálculos para un sistema exitoso* (Vol. 1).
- Jiménez, J. (2015). *Sistemas de recirculación en acuicultura: Una visión y retos diversos para Latinoamérica*. 1(1).
http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf
- Ladino, G. (2011). *Dinámica del Carbono en estanques de peces*. 15(1).
<http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v15n1/v15n1a06.pdf>
- León, C. (2018). *Sistemas acuapónicos*. <https://bofish.online/p/cursointro>
- Loor, G., & Mendoza, R. (2018). *Sistema acuapónico a escala piloto con chame (Dormitator Latifrons) lechuga (Lactuca Sativa) para producción de alimentos, comunidad casas viejas, Cantón Bolívar*. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí].
<http://repositorio.espam.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/42000/896/TMA180.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, J. (2020). *Cultivo acuapónico: Guía especializada*.
<https://www.cifalmalaga.org/web/wp-content/uploads/2020/04/2019.11.07-LIBRO-ACUAPONIA.pdf>
- Mackenzie L., D. (2010). *Waster and Wastewater Engineering. Design Principles and Practice* (1 era, Vol. 1). Mc. Graw Hill.

- Maigual, Y., Sánchez, I., & Matsumoto, T. (2012). *Desempeño de tanques decantadores de sólidos en un sistema de recirculación para producción de tilapia*. 18(2). <http://www.scielo.org.co/pdf/mvz/v18n2/v18n2a10.pdf>
- Ministerio de Ganaderia, Agricultura y Pesca-DINARA. (2010). *Manual básico de Piscicultura en estanques*. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/manual_piscicultura_estanques.pdf
- Morales, D., Campo, A., Sallaberry, N., & Uberetagoena, U. (2020). *Manual del Vermicompostaje*. <https://ecompostaje.com/>
- Muñoz, F. (2013). *Montaje y análisis de un sistema de tratamiento de aguas utilizadas en la piscicultura a escala real*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20900/u246057.pdf?sequence=1>
- Muñoz, M. (2012). *Sistema de recirculación acuapónicos*. 76, 123-129.
- Ramírez, D., Jiménez, P., & Hurtado, H. (2008). *La Acuaponía: Una alternativa Orientada al Desarrollo Sostenible*. 4(1), 32-51.
- Ramírez, P., & Veloz, E. (2018). *Estudio estratégico para el desarrollo sostenible de la acuicultura de agua dulce*. 30(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202018000100009
- Rodriguez, H., & Anzola, E. (2014). *La calidad del agua y productividad de un estanque en acuicultura*. <https://1library.co/document/qmjwkj5q-calidad-agua-productividad-estanque-acuicultura.html>
- Rumana. (2013). *Fundamental of wastewater treatment and engineering*. (Vol. 1). CRC Press Taylor & Francis Group. IWA Publishing.

- SAGPyA. (2006). *Sistemas de recirculación en acuicultura- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca Argentina*. https://produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/37-sistemas_recirculacion.pdf
- SEA. (2012). *Sistemas de recirculación para la acuicultura (SRA)-Sociedad Española de Acuicultura*. https://www.observatorio-acuicultura.es/sites/default/files/images/adjuntos/libros/hoja_divulgativa2.pdf
- Sink, T., & Masabni, J. (2015). *¿Qué es Acuaponía?* Servicio de extensión Agrilife de Texas A&M Texas A&M University. <https://docplayer.es/33767344-Soluciones-de-extension-agrilife-que-es-acuaponia-producido-por-el-servicio-de-extension-de-texas-a-m-agrilife.html>
- Tilley, E., Ulrich, L., & Reymond, P. (2010). *Sedimentador*. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/sedimentador>
- Tkachuk, J. (2007). *Construcción para criar peces en pequeños estanques*. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/92-estanques.pdf
- Vásquez, L. (2014). *Sistemas de recirculación de agua (RAS) en Piscicultura*.
- Velasquez, J., & Osuna, M. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de clarificador de manto de lodos* [Tesis de Grado, Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14481/1/TESIS%20CLAIFICADOR%20DE%20AGUA_V3.pdf
- Villegas, V., & Laines, J. (2017). *Vermicompostaje: II avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos*. 8(2). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000200407

APÉNDICES

APÉNDICE A

CÁLCULOS DEL BALANCE DE MATERIA

Tabla A1 Datos de alimentación del pez

Muestra:	100	peces
Peso del pez	260	g
Biomasa total	26000	g
Comida	10,4	g/día por pez
Total, de comida (32% proteína)	1,04	Kg/día
% de proteína	32	%

Tabla A2 Cantidad de componentes en alimento con 100% de proteína

Alimento ingresa (100%proteína)	1000	g
Nitrógeno orgánico	80	g
Fósforo orgánico	11,5	g
Carbono orgánico	450	g
Otros componentes	458,5	g

- Cantidad de alimento a dar con proteína 32%.

$$Componentes_{32\%} = 0.32 \times Componentes_{100\%}$$

Tabla A3 Cantidad de componentes en alimento con 32% de proteína

Alimento ingresa (32%proteína)	1000	g
Nitrógeno orgánico	25,6	g
Fósforo orgánico	3,68	g
Carbono orgánico	144	g
Otros componentes	826,72	g

- Ecuación para determinar la corriente de 1 de entrada al estanque.

$$Componente_{entrada} = \frac{Alimento\ total\ que\ ingresa\ (32\%) \times Componentes_{32\%}}{Alimento\ ingresa\ (32\%\ proteina)}$$

Ejemplo:

$$N_{org. entrada} = \frac{1040 \times 25,6}{1000} = 26,624$$

Se hace lo mismo para el resto de los componentes

Tabla A4 Corriente de entrada al sistema acuapónico

Alimento total que ingresa al sistema (32%)	1040	g/día
Nitrógeno orgánico	26,624	g/día
Fósforo orgánico	3,8272	g/día
Carbono orgánico	149,76	g/día
Otros componentes	859,79	g/día

- Alimento asimilado por los peces sabiendo que retienen el 30% del alimento.

$$Flujo_{asimilado} = 0,30 \text{ Alimento que ingresa al sistema (32\%)}$$

$$Flujo_{asimilado} = 0,30(1040) = 312 \text{ g}$$

- Cantidad de nutrientes asimilados por los peces.

Tabla A5 Porcentaje de nutrientes asimilados por los peces

Nutrientes asimilados	%
Nitrógeno orgánico	20
Fósforo orgánico	50
Carbono orgánico	22

$$N_{asimilado} = \%_{asimilan} \times N_{entrada} = 0,20(26.624) = 5.3248$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes (P y C) teniendo en cuenta el porcentaje que es asimilado por el pez. Los otros componentes se determinan restando el flujo total menos cada componente.

Tabla A6 Cantidad de componentes asimilados por los peces

Peces asimilan de todo el alimento (30%)	312 g/día
Nitrógeno orgánico	5,3248 g/día
Fósforo orgánico	1,9136 g/día
Carbono orgánico	32,9472 g/día
Otros componentes	271,8144 g/día

- Alimento desechado por los peces

$$Flujo_{Desechado} = Flujo_{entrada} - Cantidad_{Asimilada}$$

$$Flujo_{desechado} = 1040 - 312 = 728 \text{ g/día}$$

- Cantidad de nutrientes asimilados por los peces

$$N_{desechado} = N_{entrada} \times N_{asimilado} = 26,624 - 5,3248 = 21.299 \text{ g/día}$$

Tabla A7 Cantidad de desechos que son eliminado por los peces

Desechos (pérdida por branquias, orina y fecales)	728 g/día
Nitrógeno orgánico	21,2992 g/día
Fósforo orgánico	1,9136 g/día
Carbono orgánico	116,8128 g/día
Otros componentes	587,9744 g/día

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes (P y C). Los otros componentes se determinan restando el flujo total menos cada componente.

- Cantidad de solidos disueltos sabiendo que 57% se convierte en sólidos y se desecha en la orina y branquias

$$Flujo_{SD} = 0,57(Flujo_{entrada}) = 0,57(1040) = 592,8 \text{ g/día}$$

- Cantidad de nutrientes que se transforman en solidos disueltos.

Tabla A8 Porcentaje de nutrientes que se convierten sólidos disueltos

Nutrientes convertidos en SD	%
Nitrógeno orgánico	65
Fósforo orgánico	30
Carbono orgánico	3

$$N_{SD} = \%_{SS} \times N_{entrada} = \frac{0.65(1040)}{100} = 17,3056 \text{ g/día}$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes (P y C) teniendo en cuenta el porcentaje que es se convierte en SD. Los otros componentes se determinan restando el flujo total menos cada componente.

Tabla A9 Flujo de Componentes que se convierten en sólidos disueltos

Sólidos disueltos (9% orina y 48% branquias) 57% del alimento	592,800 g/día
Nitrógeno orgánico	17,306 g/día
Fósforo orgánico	1,1482 g/día
Carbono orgánico	4,493 g/día
Otros componentes y 74.88g de CO2	569,853 g/día

- Cantidad de sólidos sedimentables sabiendo que el 13% se sedimenta por medio de las heces fecales.

$$Flujo_{SD} = 0,57(Flujo_{entrada}) = 0,13(1040) = 135,2 \text{ g/día}$$

- Cantidad de nutrientes que se transforman en sólidos sedimentables.

Tabla A10 Porcentaje de nutrientes que se convierten en sólidos sedimentables

Nutrientes convertidos en SD	%
Nitrógeno orgánico	15
Fósforo orgánico	20
Carbono orgánico	25

$$N_{SD} = \%_{SS} \times N_{entrada} = \frac{0.15(1040)}{100} = 135,2 \text{ g/día}$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes (P y C) teniendo en cuenta el porcentaje que es se convierte en SS. Los otros componentes se determinan restando el flujo total menos cada componente.

Tabla A11 Flujo de componentes que se convierten en sólidos sedimentables

Sólidos sedimentables 13% de alimento (fecales)	135,2 g/día
Nitrógeno orgánico	3,9936 g/día
Fósforo orgánico	0,76544 g/día
Carbono orgánico	37,44 g/día
Otros componentes	93,00096 g/día

Cálculos de balance en el sedimentador:

- Corriente de sólidos eliminados del sedimentador.

$$N_{sedimenta} = 0,7 \times N_{sedimentable}$$

$$N_{sedimenta} = 0,7 \times 3,9936 = 2,79552 \text{ g/día}$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes y la suma de todos será el flujo de sólidos que puede eliminar el sedimentador.

Tabla A12 Flujo de salida del sedimentador de flujo radial

Sólidos sedimentables (r=70%)	
Nitrógeno orgánico	2,79552 g/día
Fósforo orgánico	0,535808 g/día
Carbono orgánico	26,208 g/día
Otros componentes	65,100672 g/día
Flujo de solidos removidos	94,64 g/día

➤ Sólidos sedimentables que no son removidos y pasan al biofiltro.

$$N_{NO\ sedimenta} = 0,7 \times N_{sedimentable}$$

$$N_{sedimenta} = 0,3 \times 3,9936 = 1,1980 \text{ g/día}$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes y la suma de todos será el flujo de sólidos que no son removidos e ingresan al biofiltro.

Tabla A13 Componentes no sedimentados

Sólidos no sedimentables	
Nitrógeno orgánico	1,19808 g/día
Fósforo orgánico	0,229632 g/día
Carbono orgánico	11,232 g/día
Otros componentes	27,900288 g/día
Total	40,56 g/día

Cálculos de balance en el biofiltro:

Corriente que ingresa al biofiltro.

$$N_{biofiltro} = N_{no\ sedimentable} + N_{Solidos\ Disueltos}$$

$$N_{biofiltro} = 1,19808 + 17,3056 = 18.50368 \text{ g/día}$$

Se aplica la misma ecuación para el resto de los componentes.

Tabla A14 Corriente de entrada al biofiltro

Entrada al biofiltro	633,36 g/día
Nitrógeno orgánico	18,5036 g/ día
Fósforo orgánico	1,37779 g/ día
Carbono orgánico	15,7248 g/ día
Otros componentes y 74.88g de CO ₂	597,75 g/ día

APÉNDICE B

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

- Cálculo del área transversal del sedimentador:

Primero se calcula el área transversal tomando en cuenta las diferentes dimensiones de los tanques:

- Parte externa del sedimentador.

$$A_{\text{círculo}} = \pi r^2$$
$$A_{\text{círculo}} = \pi(0.28)^2 = 0.246 \text{ m}^2$$

- Tanque interno del sedimentador:

$$A_{\text{círculo}} = \pi r^2$$
$$A_{\text{círculo}} = \pi(0.0933)^2 = 0.0274 \text{ m}^2$$

- Tubería interna del sedimentador.

$$A_{\text{círculo}} = \pi r^2$$
$$A_{\text{círculo}} = \pi(0.04)^2 = 0.00503 \text{ m}^2$$

- Cálculo de la velocidad de carga superficial:

Aplicando la ecuación 2.5 se procede a determinar las velocidades para las diferentes dimensiones.

- Parte externa del sedimentador.

$$V_o = \frac{Q}{A}$$
$$V_o = \frac{17.76 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0.246 \text{ m}^2} = 72.10 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 3.004 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

- Tanque interno del sedimentador.

$$V_o = \frac{Q}{A}$$
$$V_o = \frac{17.76 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0.0274 \text{ m}^2} = 648.90 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 27.04 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

- Tubería interna del sedimentador.

$$V_o = \frac{Q}{A}$$

$$V_o = \frac{17.76 \frac{m^3}{d}}{0.00503 m^2} = 3532.883 \frac{m}{d} = 147.20 \frac{m}{h}$$

- Cálculo de la velocidad de sedimentación:

Se aplica la ecuación 2.6 para determinar la velocidad en que se sedimentan los lodos en el sedimentador. Se asumió una eficiencia de remoción de 70%.

$$\frac{V_s}{V_o} = e$$

$$V_s = e * V_o = 0.7 * \left(\frac{3.004m}{h} \right) = \frac{2.103m}{h}$$

- Cálculo del volumen del cilindro:

Se aplica la ecuación del volumen de un cilindro para las distintas dimensiones.

$$V = A * h$$

- Parte externa del sedimentador:

$$V = (0.246)(0.94) = 0.232 m^3$$

- Tanque interno del sedimentador:

$$V = (0.00503)(0.15) = 0.00075 m^3$$

- Tubería interna del sedimentador:

$$V = (0.0274)(0.47) = 0.0129 m^3$$

- Cálculo del tiempo de retención hidráulica:

Utilizando la ecuación 2.7 se calcula el TRH de las diferentes dimensiones.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

- Parte externa del sedimentador:

$$TRH = \frac{0.232 m^3}{17.76 \frac{m^3}{d}} = 0.01304 d = 18.77 min$$

- Tanque interno del sedimentador:

$$TRH = \frac{0.00075 \text{ m}^3}{17.76 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.000724 \text{ d} = 1.043 \text{ min}$$

- Tubería interna del sedimentador:

$$TRH = \frac{0.0129 \text{ m}^3}{17.76 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.061 \text{ min}$$

- Cálculo del tiempo de llenado del sedimentador al estanque de peces:

Se determina el volumen del estanque:

$$V = \text{ancho} * \text{largo} * \text{profundidad}$$

$$V = 4 * 2 * 1.5 = 12 \text{ m}^3$$

$$T_{\text{llenado}} = \frac{12 \text{ m}^3}{17.76 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 973.047 \text{ d} = 16.22 \text{ h}$$

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL BIOFILTRO

Cálculo de la cantidad de tapas para el medio filtrante

- Cálculo del área específica del medio filtrante.

$$\text{Área}_{\text{sup especific}} = \text{Área}_{\text{bases tapas}} + \text{Área}_{\text{cilindro}}$$

$$\text{Área}_{\text{sup especific}} = \pi r^2 + 2\pi r h$$

$$\text{Área}_{\text{sup especific}} = \pi(1,5 \text{ cm})^2 + 2\pi(1,5 \text{ cm})(1 \text{ cm}) = 33 \text{ cm}^2$$

- Cálculo del área de las tapas en el biofiltro.

$$\text{Áreas}_{\text{tapas}} = \text{Área de las tapas en un } m^3 \times \text{Volumen de material filtrante}$$

$$A_{\text{tapas}} = 108 \frac{m^2}{m^3} \times 0,335 m^3 = 36.19 m^2$$

- Cálculo del # de tapas.

$$\#tapas = \frac{\text{Área de las tapas en el biofiltro}}{\text{Área específica del medio filtrante}}$$

$$\#tapas = \frac{36.19 m^2}{0.0033 m^2} = 10968,30 \text{ tapa}$$

Cálculo de la altura de la corriente de salida del biofiltro.

$$V = \pi r^2 h$$

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{0.335 m^3}{\pi(0,43)^2} = 0.577 m^2$$

Dimensiones del tanque usado para el biofiltro:

<http://plastigama.com/wp-content/uploads/2019/05/Tanques-Triptico-2019.pdf>

APÉNDICE C

DISEÑO DE LA BOMBA

- Cálculo de la potencia de la bomba:

$$Potencia = Caudal \times Presión$$

$$Potencia = Q \times \rho gh$$

$$Potencia = 0,000206 \text{ m}^3 \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1,97 \text{ m}$$

$$Potencia = 3,9561 \text{ W} \approx 5,65 \text{ V}$$

Cotización de una bomba con esa potencia:

<https://www.amazon.com/-/es/diafragma-autoimprimaci%C3%B3n-presi%C3%B3n-interruptor-ajustable/dp/B07S7YQKMZ>

- Pérdidas por fricción de la bomba:

Cálculo del número de Reynolds.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,04088 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,672 \text{ m}}{1,005 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 3,094 \times 10^4$$

Rugosidad del material (Apéndice D) = 0,0015 mm

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015 \text{ mm}}{762 \text{ mm}} = 1,968 \times 10^{-6}$$

Ecuación del factor de fricción de Coolebrook para pérdidas primarias.

$$f = \frac{1,325}{\left\{ -\text{Ln} \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right\}^2}$$

$$f = 0,006348$$

Cálculo de la pérdida de fricción:

$$hf = 0,826 \times f \times \frac{Q^5}{D^2} \times L$$

$$hf = 5,1987 \times 10^{-14} \approx 0$$

APÉNDICE D

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES

Tabla D1 Rugosidad absoluta de algunos materiales

Material	ϵ (mm)
Acero comercial	0.0460
Fundición asfaltada	0.1220
Hierro forjado	0.0500
PVC, plástico, cobre, latón, vidrio	0.0015

APÉNDICE E

CÁLCULOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO

Tabla E1 Costos de materiales de construcción

MATERIALES	Costo por unidad	Cantidad	Gasto
TANQUE 55 GALONES	\$60,0	1	\$60,00
TANQUE 132 GALONES	\$93,0	1	\$93,00
TUBERÍAS 8 pul	\$32,0	1	\$32,00
Tubería 3 pulg (3 metro)	\$10,0	1	\$10,00
Codos 45°- 3 pulg	\$0,500	4	\$1,80
Uniones 3 pulg	\$0,60	2	\$1,20
Llave de paso de 1 pulg	\$1,85	1	\$1,85
Teflón rojo premium 10 metros	\$0,50	2	\$1,00
Adaptador de tanque - 1pulg	\$4,10	1	\$4,10
Adaptador de tanque - 3 pulg	\$4,100	4	\$16,40
Bomba de diafragma DC 12 V	\$30,00	1	\$30,00
Total			\$221,4

Tabla E2 Costos de construcción del sistema acuapónico

CONSTRUCCIÓN DE HUERTO HIDROPONICO de 2m de ancho, 3.5 largo, 40cm altura (camas de madera)			
DETALLE	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	GASTO TOTAL
Tabla 20cm x 4m semidura	16	\$0,5	\$8,00
Manga plástico negro 1.5 m ancho	3	\$1,19	\$3,57
Espumafón espesor 2.5cm (1x1m)	3	\$5,29	\$15,87
Accesorio (clavos)	30	\$0,5	\$15,00
Manguera flex	3	\$0,8	\$2,40
Total, del huerto hidropónico			\$44,84
TOTAL DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ACUAPONÍA			\$266,00

Cotización de precios:

<https://bim.plastigama.com/es/Paginas/default.aspx>

Tabla E3 Capital de trabajo

Capital de trabajo para el sistema acuapónico				
DETALLE	CANTIDAD		COSTO	COSTO DE LOS 6 MESES
Alevines de chame	500	peces	\$30,00	\$30,00
Alevines de chame	100	peces	\$6,00	\$6,00
Alimento saco	50	Kg	\$43,50	-
Alimento(1.04kg/día)	4	sacos	\$174,00	\$174,00
Costo agua	0	L	0	0
Kw requerido por la bomba	0,005651644	KW	\$0,09	-
Costo	0,09	\$ kwh		-
Costo de energía eléctrica por KWh	0,000508648	\$ kW h	\$2,23	\$2,23
Semillas de planta	1000	semillas	\$4,00	-
Semillas de planta (175semillas)	534	semillas	\$2,13	\$2,13
Total, del capital de trabajo				\$184,36

Tabla E4 Ingresos por venta de productos

INGRESOS POR VENTA AL FINA DEL CICLO DE CULTIVO 6meses			
PRODUCTO	COSTO	CANTIDAD	TOTAL, DE INGRESOS
Chame \$1.50 -\$1.80	\$1,8	100	\$180
Lechuga orgánica 0.20 - 0.5 ctv	\$0,5	534	\$267
Total			\$447

Costo de semillas:

<https://www.ocompra.com/ecuador/item/semillas-de-lechuga-crespa-para-hidroponia-432032067/>

Costo de la electricidad:

<https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/alza-de-tarifas-electricas-busca.html>

- Cálculo de la ganancia en 6 meses:

$$Ganancia_{6\text{ meses}} = \text{Ingresos al final del cultivo} - \text{Total costos de construcción}$$

$$Ganancia_{6\text{ meses}} = \$447 - \$450,55 = -\$3,55$$

- Cálculo de la ganancia en 12,18 y 24 meses

$$Ganancia = \text{Ingresos al final del cultivo} - \text{total de capital de trabajo}$$

$$Ganancia = \$447 - \$184,36 = \$262,64$$

Tabla E5 Ganancia acumulada en 24 meses

GANANCIA 12 meses	\$259,08
SUMA DE GANANCIA EN 18 meses	\$521,72
SUMA DE GANANCIA EN 24 meses	\$787,91

- Cálculo de la Tasa interna de retorno TIR

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

V = flujo de caja en cada periodo

I = valor del desembolso inicial de la inversión

N = número de periodos considerados

K = tipo de interés

Dado que el VAN inicial es 0:

$$VAN = -489,75 \frac{0}{1+TIR} + \frac{262,4}{(1+TIR)^2} + \frac{262,4}{(1+TIR)^3}$$

$$0 = -489,75 \frac{0}{1+TIR} + \frac{262,4}{(1+TIR)^2} + \frac{262,4}{(1+TIR)^3}$$

$$TIR = 0,028 \approx 2,8\%$$

Conocido el TIR, se aplica la misma ecuación para determinar el VAN a los 6, 12 y 18 meses.

Tabla E6 Resultado del TIR en 18 meses

6 meses	\$0,00
12meses	\$248,52
18meses	\$241,75

Flujo de caja en 18 meses.

$$VAN_{18\text{ meses}} = \$0,00 + \$248,52 + \$241,75 = \$490,28$$

APÉNDICE F

PROPUESTA DEL DISEÑO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO Y DIAGRAMA DE FLUJO

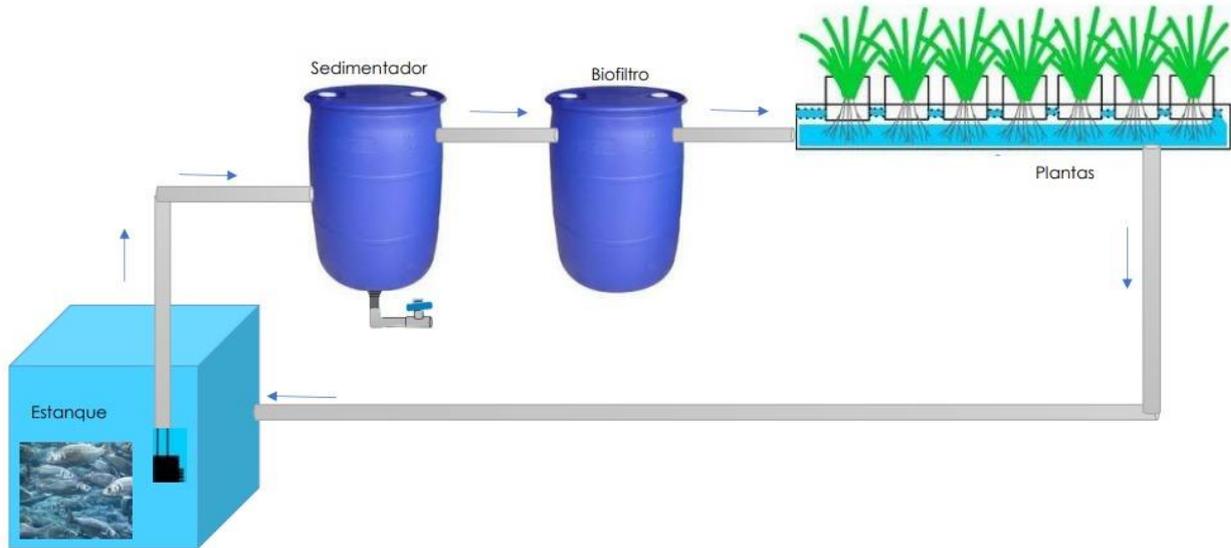


Figura F1 Diseño del sistema acuapónico

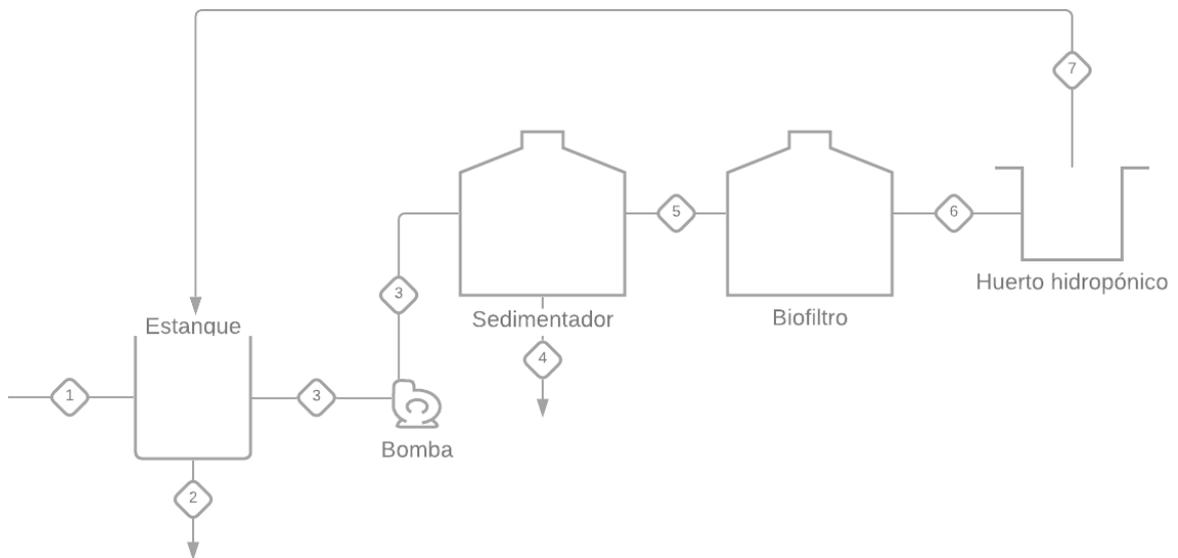


Figura F2 Diagrama de flujo del sistema acuapónico