

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“SISTEMA DE RECIRCULACIÓN PARA MARICULTURA
BASADO EN LA TEORÍA DEL BALANCE DE MASAS”**

Presentada por:

ANIBAL SEVERO VERÁSTEGUI MAITA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima – Perú

2024

“SISTEMA DE RECIRCULACIÓN PARA MARICULTURA BASADO EN LA TEORÍA DEL BALANCE DE MASAS”

INFORME DE ORIGINALIDAD

1 %	1 %	1 %	0 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe	1 %
	Fuente de Internet	
2	library.oapen.org	1 %
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“SISTEMA DE RECIRCULACIÓN PARA MARICULTURA BASADO
EN LA TEORÍA DEL BALANCE DE MASAS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
DOCTORIS PHILOSOPHIAE**

Presentada por:

ANIBAL SEVERO VERÁSTEGUI MAITA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo

PRESIDENTE

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

ASESOR

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva

MIEMBRO

Dra. Rocío del Pilar Pastor Jáuregui

MIEMBRO

Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo

MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres,
en particular de mi madre, por sus firmes y notables enseñanzas.
A mi familia entera, de manera especial a mis hijas Reiny y Ellen,
quienes me han gratificado con grandes momentos de satisfacción.

A Betty, mi esposa.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento al Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, que hace posible la realización de una educación adecuada a las necesidades del país, expresando mi gran aprecio a cada uno de sus docentes.

A mis asesores Abel Mejía y Eusebio Ingol, y a los miembros del Jurado, Absalón Vásquez, Néstor Montalvo y Rocío del Pilar Pastor, por sus importantes enseñanzas, llenas de experiencia, y por sus correcciones a la tesis.

Al Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA), que financió el proyecto.

A Javier, Alejandrina y Evelyn – excelentes amigos – por el apoyo y aliento en estos estudios y en su culminación.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1.	ASPECTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA ACUICULTURA.....	4
2.1.1.	Características de los sistemas de recirculación para acuicultura (RAS).....	4
2.1.2.	Componentes de los Sistemas RAS.....	8
2.2.	PROCESOS FÍSICOS Y <i>BIOLÓGICOS</i> ASOCIADOS AL TRATAMIENTO DE AGUA EN LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN	9
2.2.1.	Tratamiento físico del agua	10
2.2.2.	Tratamiento biológico del agua	21
2.3.	BALANCE DE MASAS Y SU APLICACIÓN EN LOS CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN	23
2.3.1.	Definición de los sistemas y ecuaciones aplicables.....	23
2.3.2.	Determinación de caudales basado en las relaciones de balance de masas.....	28
2.3.3.	Dimensionamiento de los componentes del sistema RAS, con aplicación de la teoría del Balance de Masas.....	31
2.4.	TEORÍA HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS EN UNA RED DE TUBERÍAS	37
2.5.	SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL RAS	41
2.5.1.	Tanques de peces	41
2.5.2.	Equipo de bombeo	42
2.5.3.	Filtro de arena presurizada.....	44
2.5.4.	Filtro biológico percolador	46
2.6.	PEZ MARINO “CHITA”	47
III.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	48
3.1.	UBICACIÓN DEL ESTUDIO	48
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	49
3.2.1.	Manejo de la población del pez marino “chita”, empleada en el estudio	49
3.2.2.	Características y distribución general del sistema RAS	51
3.3.	METODOLOGÍA.....	54
3.3.1.	Información previa sobre capacidad del sistema RAS y rendimiento proyectado.....	54

3.3.2. Características y distribución general del sistema RAS	57
3.3.3. Metodología de dimensionamiento de los componentes del RAS	58
3.4. MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA.....	75
3.5. APLICACIÓN DEL SOFTWARE WaterCAD EN LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA	76
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
4.1. DISEÑO DEL SISTEMA RAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SUS COMPONENTES	79
4.1.1. Geometría de los componentes del sistema RAS	79
4.1.2. Parámetros hidráulicos y perfil hidráulico del sistema RAS	84
4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	89
4.2.1. Resultados de calidad de agua	89
4.2.2. Crecimiento de la especie <i>A. scapularis</i> y utilización del alimento	97
4.2.3. Características operacionales del Sistema RAS	101
4.3. APLICACIÓN DE WaterCAD EN LA SIMULACIÓN.....	106
V. CONCLUSIONES.....	120
VI. RECOMENDACIONES.....	122
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
VIII. ANEXOS	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de sistemas de acuicultura según el grado de recirculación	5
Tabla 2: Diámetros comerciales de filtro y tasas de filtración	45
Tabla 3: Tasa de filtración recomendadas en función de niveles de sólidos suspendidos en el agua.....	45
Tabla 4: Tamaños comerciales de filtros de arena y parámetros de funcionamiento.....	46
Tabla 5: Cálculo de población requerida para la jaula flotante en el mar	55
Tabla 6: Cálculos de sustento para el dimensionamiento de los tanques del sistema RAS	56
Tabla 7: Cálculos de sustento para la determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión	58
Tabla 8: Características de las bombas empleadas en el sistema RAS marino	60
Tabla 9: Datos para el cálculo del flujo de agua a través de los tanques de peces	62
Tabla 10: Datos y operaciones para el cálculo del número de placas y dimensiones del sedimentador de alta tasa	66
Tabla 11: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro de arena presurizada	67
Tabla 12: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico, tipo percolador – cálculo de biomasa de peces	70
Tabla 13: Datos y operaciones para el cálculo de la producción de amonio en el sistema .	70
Tabla 14: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico – cálculo del área de superficie de sustrato.....	71
Tabla 15: Relación de la superficie específica de área de la media y la tasa de carga hidráulica mínima recomendada en el biofiltro	72
Tabla 16: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico, tipo percolador – cálculo del área de superficie de sustrato	73
Tabla 17: Eficacia de transferencia de oxígeno ($\text{kgO}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$).....	75
Tabla 18: Características hidráulicas de los componentes del sistema de recirculación RAS marino	105
Tabla 19: Reporte de WaterCAD sobre ubicación de cruces, gradiente hidráulica y presiones en la red principal del RAS - Tabla de nodos	114
Tabla 20: Reporte de WaterCAD sobre gradiente hidráulica y presiones en la red principal del RAS - tabla de tuberías	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: De un sistema de flujo abierto hacia un sistema RAS con reducción en el uso de agua nueva.....	6
Figura 2: Fotografía de un sistema RAS, en ambiente cerrado	7
Figura 3: Esquema conceptual de un sistema de recirculación mostrando sus componentes principales	9
Figura 4: Esquema de componentes típicos de un sistema RAS: tanque de peces, filtro barril, filtro de lecho móvil, esterilizador UV, tanque ecualizador, oxigenador. 10	
Figura 5: Ubicación de zonas en un sedimentador rectangular	13
Figura 6: Las partículas, en función del tamaño y de su naturaleza, pueden mantenerse a flote o sedimentar	15
Figura 7: Trayectoria de la partícula “a” indica que sedimentará, y es empleado como criterio en el dimensionamiento de sedimentadores	15
Figura 8: Diagrama de vectores de desplazamiento de una partícula entre dos placas paralelas inclinadas	19
Figura 9: Sistema con (a) paredes reales y sistema con (b) paredes ficticias	24
Figura 10: Límites, sistema y entorno de un sistema, (a) Sistema cerrado y (b) Sistema abierto	25
Figura 11: (a) Sistema en estado estacionario o estable, (b) Sistema en estado transitorio o inestable	25
Figura 12: Diagrama esquemático de un sistema con aplicación del balance másico	27
Figura 13: Diagrama esquemático de entradas y salidas en el funcionamiento de un tanque de peces	29
Figura 14: Diagrama esquemático de entradas y salidas en el funcionamiento de un tanque sedimentador	35
Figura 15: Balance de masas de la transferencia oxígeno en un volumen unitario de líquido, a nivel de diagrama esquemático	36
Figura 16: Flujo a una velocidad constante “v” a través de un tubo	38
Figura 17: Vista en planta del tanque típico de peces, con entrada tangencial y salida central desde el fondo	42
Figura 18: Ubicación del laboratorio de investigación en La Punta, Callao	48
Figura 19: Distribución de frecuencia (%) de tamaños, medido como Longitud Total (LT) en cm	50

Figura 20: Relación longitud total (LT) en cm de los especímenes con el peso (W) en g..	51
Figura 21: Diagrama del flujo de agua en una vista en planta de la distribución general del sistema RAS	53
Figura 22: Ciclo de crianza de especie marina: sistema RAS en edades tempranas y jaulas instaladas en el mar, hasta tamaño adulto.....	55
Figura 23: Vista lateral del tanque de cultivo propuesto para el sistema RAS marino	56
Figura 24: Esquema de la instalación de la electrobomba centrífuga	61
Figura 25: Esquema de disposición de placas paralelas del sedimentador de alta tasa, relacionado al cálculo del área de sedimentación	65
Figura 26: Características del sedimentador de placas paralelas.....	67
Figura 27: Extrapolación grafica de la relación entre la tasa de remoción de amonio con la concentración de amonio, a diferentes cargas hidráulicas	72
Figura 28: Vista de planta de la distribución de peces en el tanque.....	80
Figura 29: Vista del sedimentador de placas paralelas y del separador de espuma para separar sólidos finos.....	80
Figura 30: Vista del filtro de arena, presurizado	81
Figura 31: Vista del biofiltro tipo percolador y el tanque sumidero ubicado en su parte inferior, para recoger el agua que percola el biofiltro.....	82
Figura 32: Vista del tanque de enfriamiento para la regulación de temperatura de agua del sistema.....	83
Figura 33: Vista en planta (a) y en elevación (b), del sistema de recirculación para acuicultura con agua de mar, que se diseñó e instaló en el presente estudio	85
Figura 34: Perfil hidráulico de la red de distribución del sistema RAS –tramo principal...	87
Figura 35: Perfil hidráulico de la red de distribución del sistema RAS –tramo secundario	88
Figura 36: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: salinidad y temperatura	90
Figura 37: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: saturación de oxígeno y oxígeno disuelto.....	90
Figura 38: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: amonio total y nitrito.....	91
Figura 39: Valores de los parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: nitrato y alcalinidad.....	92
Figura 40: Diagrama de flujo de procesos por componentes del sistema de recirculación, bajo condiciones del estudio	93

Figura 41: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: pH y temperatura en los tanques de peces	95
Figura 42: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: oxígeno disuelto en los tanques de peces.....	95
Figura 43: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: amonio total (NH ₃ + NH ₄) y nitrito (NO ₂).....	96
Figura 44: Crecimiento en longitud (LT) de <i>A. scapularis</i> , bajo condiciones del experimento.....	97
Figura 45: Curva de crecimiento – en peso (W) – de <i>A. scapularis</i> , bajo condiciones del experimento en sistema RAS	98
Figura 46: Curvas resultantes de la relación longitud total-peso corporal, de <i>A. scapularis</i> , y lo hallado por Dionicio-Acedo et al. (2018)	98
Figura 47: Tasa relativa de crecimiento de <i>A. scapularis</i> , en condiciones del presente estudio	99
Figura 48: Consumo de alimento individual, en gramos por pez, en el periodo de experimentación	100
Figura 49: Distribución del consumo diario de alimento (%), en las raciones entregadas por día	100
Figura 50: Variación de la tasa relativa de alimentación (%BW d ⁻¹), en <i>A. scapularis</i> , durante el periodo de evaluación	101
Figura 51: Ilustración de la ubicación y funcionamiento de una tubería de retorno para regulación de presiones y de caudales	102
Figura 52: Bosquejo del sistema RAS, con caudales de operación (m ³ h ⁻¹ y L s ⁻¹).	104
Figura 53: Esquema de ubicación de NODOS, en la vista de plana y elevación del RAS marino	108
Figura 54: Representación de las redes de abastecimiento en el programa WATERCAD, a partir del plano en AutoCAD	109
Figura 55: Datos hidráulicos para los diferentes nodos, resultante del procesamiento con el WaterCAD	110
Figura 56: Datos de ubicación de nodos, gradientes y presión en el sistema, resultante del procesamiento con WaterCAD	111
Figura 57: Vista en planta los trazos de redes en Auto CAD – diagrama de prisiones.....	112
Figura 58: Vista en planta los trazos de redes en WaterCAD	113

Figura 59: Vista de planta del diagrama de presiones del sistema de recirculación marina	117
Figura 60: Vista de perfil del diagrama de presiones del sistema de recirculación marina	118
Figura 61: Línea de abastecimiento de agua en el sistema RAS marino.....	140
Figura 62: Línea de drenaje de agua (desagüe) en el sistema RAS marino	141
Figura 63: Línea de abastecimiento de aire a presión, en el sistema RAS marino.....	142

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Planos de detalle – redes de agua, desagüe y sistema de aireación	140
Anexo 2: Planilla de fórmulas y cálculos – formato “xls” (Excel).....	143

RESUMEN

En recientes años, la acuicultura ha recibido subsidios del gobierno peruano para fomentar tecnologías innovadoras, es así que el presente trabajo se desarrolló con financiamiento del Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA), ejecutado en La Punta – Callao, Lima; entre enero y diciembre 2020. Como parte de ello se diseñó un sistema de recirculación (RAS) para acuicultura marina, con aplicación de la metodología de BALANCE DE MASAS, para criar el pez chita (*Anisotremus scapularis*). Luego de la instalación del RAS y su operación, se colectó información de calidad de agua y de crecimiento de la especie, encontrándose niveles de oxígeno disuelto en el agua adecuados, $6,12 \pm 0,047$ mgO₂ L⁻¹, N-Amonio total con un promedio de $0,24 \pm 0,078$ mg L⁻¹, N-nitrito $1,39 \pm 0,328$ mg L⁻¹. El sistema funcionó bajo condiciones de “cero consumos de agua”, manteniendo una temperatura de $25,32 \pm 0,202$ °C, salinidad $35,20 \pm 0,161$ ppt y pH $7,79 \pm 0,053$. En cuanto a crecimiento, tasas de $1,24\%$ Peso-peza d⁻¹, con un consumo de alimento entre $1,5$ y 6 g d⁻¹ pez⁻¹. Según la simulación de presiones y caudales con el software WaterCAD se ha determinado una máxima presión promedio $7,35$ mH₂O. Los caudales para los tanques de peces fueron $0,54 \pm 0,08$ m³ h⁻¹ ($0,15$ lps) con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de $3,81$ horas. Las presiones en la red de abastecimiento entre $0,38$ y $8,75$ mH₂O. El caudal a través del biofiltro fue $2,016$ m³ h⁻¹, tasa de carga hidráulica de $0,018$ m³.m⁻².h⁻¹. Finalmente, la aplicación del enfoque de balance de masas en el dimensionamiento de un RAS, resulta en un diseño satisfactorio, configurándose la característica de un SISTEMA ESTABLE; por lo que se recomienda la metodología empleada para asegurar la funcionalidad de estos sistemas.

Palabras clave: Sistema de recirculación, diseño de RAS, balance de masas, biofiltración, simulación WaterCAD.

ABSTRACT

In recent years, aquaculture has received subsidies from the Peruvian government to promote innovative technologies, so this work was carried out with financing from the National Program for Innovation in Fisheries and Aquaculture (PNIPA), executed in La Punta – Callao, Lima; between January and December 2020. As part of this, a recirculation system (RAS) for marine aquaculture was designed, with application of the MASS BALANCE methodology, to raise Chita fish (*Anisotremus scapularis*). After the installation of the RAS and its operation, information on water quality and fish growth was collected, finding adequate levels of dissolved oxygen in the water, $6,12 \pm 0,047 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, the total N-Ammonium with an average of $0,24 \pm 0,078 \text{ mg L}^{-1}$, N-nitrite $1,39 \pm 0,328 \text{ mg L}^{-1}$. The system operated under “zero water consumption” conditions, maintained at $25,32 \pm 0,202 \text{ }^\circ\text{C}$, salinity $35,20 \pm 0,161 \text{ ppt}$ and pH $7,79 \pm 0,053$. Regarding growth, rates of $1,24\% \text{ BW d}^{-1}$, with a feed consumption between 1,5 and $6 \text{ g d}^{-1} \text{ fish}^{-1}$. According to simulation of pressures and flow rates with WaterCAD software, a maximum average pressure of 7,35 mH₂O has been determined. Flow rates for the fish tanks were $0,54 \pm 0,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($0,15 \text{ L s}^{-1}$) with a hydraulic retention time (HRT) of 3,81 hours. The pressures in the supply network between 0,38 and 8,75 mH₂O. The flow rate through the biofilter was $2,016 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, hydraulic loading rate of $0,018 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Finally, the application of the Mass Balance approach in the sizing of a RAS results in a satisfactory design, configuring the characteristic of a STABLE SYSTEM; therefore, the methodology used to ensure the functionality of these systems is recommended.

Keywords: Recirculation system, RAS design, mass balance, biofiltration, WaterCAD simulation.

I. INTRODUCCIÓN

Los recientes reportes sobre la producción mundial de productos hidrobiológicos confirman la predominancia de los productos cosechados en granjas acuáticas sobre aquellos procedentes de la captura de stocks silvestres, siendo este último afectado de manera dramática por los avances en el desarrollo de tecnologías de detección y captura más eficientes, como también por la contaminación de los cuerpos de agua, por los efectos del cambio climático, y otros factores que afectan la pesca extractiva, y obligan a mejorar e incrementar la producción a partir de la crianza de organismos acuáticos en granjas. Es así, que la acuicultura viene mostrando importantes adelantos tecnológicos e incrementos notables en los espacios habilitados para la producción. En relación a la disponibilidad de recursos hídricos, se genera un contraste entre la necesidad de obtener una mayor producción y hacer frente a una menor disponibilidad de agua. Así mismo, el crecimiento de la producción acuícola ha generado preocupación, en relación a los impactos ecológicos y sociales de esta actividad en áreas interiores y costeras con conflictos de usuarios; donde los usos "nuevos" como la acuicultura, compiten por el espacio y los recursos con los usuarios tradicionales de la tierra (Byron y Costa-Pierce, 2013). Ello ha obligado a los científicos a desarrollar técnicas de producción que reduzcan notablemente las necesidades de agua, entre ellas se tiene la tecnología de los Sistemas de Recirculación para Acuicultura (RAS, por sus siglas en inglés).

La tecnología RAS es clave para satisfacer las necesidades mundiales de especies acuáticas producidas de manera respetuosa con el medio ambiente, siendo utilizado en varios sectores industriales a nivel mundial (Tidwell, 2012), como es la industria del cultivo de salmón (Chile) y de tilapia (EE.UU.). Esta tecnología asegura las condiciones apropiadas de calidad de agua para los diferentes cultivos, el ahorro de agua y reducción de costos de abastecimiento de este recurso. El concepto más simple de un RAS consiste en un tanque de peces y una unidad de tratamiento para recuperar la calidad de agua y posteriormente reusarla (Allsopp et al., 2013) repetidas veces y de manera prácticamente indefinida.

Esta tecnología puede usarse en granjas de agua dulce y de agua marina, y su versatilidad le permite instalarse en cualquier localidad lejos de la costa, cerca de los mercados, disminuyendo costos de transporte y las emisiones asociadas. Así mismo, tiene la ventaja de que la calidad del agua se puede gestionar para crear los ambientes más apropiados para los peces, en lugar de que el ambiente defina qué peces se pueden cultivar (Tidwell, 2012). Los sistemas RAS son más útiles en sitios donde hay escasos recursos de agua y espacio físico (Uzukwu, 2021), y climas desfavorables (Kamstra et al., 1998).

Aunque existan diferentes formas de diseñar un RAS, lo central es desarrollar una idea clara de cómo hacer su composición y tener conocimiento sobre los diversos procesos unitarios que tienen lugar, y finalmente una gestión adecuada durante su funcionamiento. No existe un modelo único que responda a todas las necesidades, los diseños a menudo se definen por restricciones económicas y disponibilidad de recursos por los propietarios (Tidwell, 2012), como también por experiencia y destreza del diseñador.

En Perú se ha logrado definir las técnicas de crianza de peces marinos de gran valor comercial, como los lenguados, corvinas y la especie que se empleó en el presente estudio: la Chita (*Anisotremus scapularis*). Estas técnicas requieren del desarrollo de las primeras etapas del crecimiento en sistemas RAS, bajo exigentes cuidados. Por ello, los sistemas de recirculación de agua requieren ser instalados con criterios apropiados en cuanto a dimensionamiento, condiciones hidráulicas, operación al menor costo, con parámetros de diseño y de funcionamiento definidos, y con características adecuadas de calidad de agua durante su operación.

Existe una gran variedad en las formas y arreglos de los elementos de los sistemas RAS, sin embargo, se percibe insuficiente dominio sobre los cálculos hidráulicos de modo que se pueda cumplir con los niveles de calidad de agua requeridos, en condiciones hidrodinámicas ideales de sus elementos, y con parámetros óptimos de funcionamiento, para obtener un sistema RAS que reporte costos operativos accesibles, y que contribuya a su funcionalidad sostenida en el tiempo. Es así que el objetivo de la presente investigación es, realizar el dimensionamiento de un sistema de recirculación para maricultura, tomando como fundamento la teoría del balance de masas, definir sus parámetros hidráulicos y geométricos. Y responder a la hipótesis de investigación, en el sentido que el diseño y simulación de un sistema de recirculación para maricultura, con aplicación de la Teoría del Balance de Masas, permite determinar de manera práctica y confiable, los requerimientos de flujo y de

capacidad de carga de los elementos del RAS, para su adecuado funcionamiento.

Los sistemas de recirculación en acuicultura forman parte de ese conjunto de desarrollos tecnológicos que permiten optimizar el uso de agua y obtener mayor producción por metro cubico de agua empleada. Es así que nos encontramos en la necesidad imperiosa de conocer más acerca de los Sistemas de recirculación en Acuicultura y siendo este sistema el modelo más avanzado de acuicultura de aplicación confiable en producciones a nivel industrial, es que se ha decidido realizar el presente trabajo de investigación.

Objetivo general

Simular un sistema de recirculación para maricultura, basado en la teoría del balance de masas y la relación con sus parámetros hidráulicos y geométricos de funcionamiento.

Objetivos específicos

- Determinar la geometría del sistema de recirculación para la acuicultura (RAS), a partir de la capacidad de carga proyectada de sus componentes.
- Definir el perfil hidráulico y flujo de caudales en un RAS, en relación a los requerimientos prácticos de funcionamiento.
- Realizar la simulación hidráulica del circuito de agua, empleando el software WaterCAD, para la estimación y verificación de caudales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA ACUICULTURA

2.1.1. Características de los sistemas de recirculación para acuicultura (RAS)

Los sistemas RAS, son instalaciones de funcionamiento autónomo, que hacen uso continuo y de manera indefinida de un volumen de agua, para el mantenimiento de organismos acuáticos vivos, bajo condiciones de calidad de agua susceptibles de ser ajustadas a rangos de variación generalmente estrechos, y cercanos a las condiciones óptimas requeridas por las especies ahí confinadas. Según Martins et al. (2010), tomando en consideración la intensidad de cambio de agua en el sistema, se distinguen las siguientes modalidades de acuicultura: (a) de flujo abierto ($> 50 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ de alimento), (b) reutilización ($1-50 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ de alimento), (c) recirculación convencional ($0,1-1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ de alimento) y (d) RAS de "próxima generación " ($<0.1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ de alimento). Así, este agrupamiento de sistemas de acuicultura toma en consideración un parámetro de funcionamiento de gran importancia: cantidad de agua que se usa para procesar cada kilogramo de alimento. Los sistemas más eficientes, desde el punto de vista ambiental, serán aquellos que usen la menor cantidad de agua.

La recirculación puede llevarse a cabo a diferentes intensidades, dependiendo de la cantidad de agua nueva que se disponga y según la destreza del operador del sistema, para realizar la recuperación y reacondicionamiento del efluente de los tanques de peces. Algunas granjas practican el cultivo súper intensivo instalados dentro de un edificio cerrado que emplea apenas 300 litros de agua nueva o menos, por kilo de pescado producido por año (Bregnballe, 2015). Son instalaciones que están siendo perfeccionadas para hacer frente a las crecientes restricciones ambientales en países con acceso limitado a la tierra y sobre todo al recurso agua.

Tipos de sistemas de acuicultura según el grado de recirculación

Los cálculos (Tabla 1) se basan en un ejemplo teórico de un sistema de 500 toneladas año⁻¹ con un volumen total de agua de 4 000 m³, donde 3 000 m³ es el volumen de tanque de peces. Tomado de Bregnballe (2010).

Tabla 1: Tipos de sistemas de acuicultura según el grado de recirculación

Tipo de sistema	Consumo de agua nueva por kg pez producido por año	Consumo de agua nueva por m ³ por hora	Consumo de agua nueva por día del volumen total de agua del sistema	Grado de recirculación en el sistema, Vol. Reciclado una vez por hora
Flujo abierto	30 m ³	1712 m ³ h ⁻¹	1028 %	0 %
RAS de bajo nivel	3 m ³	171 m ³ h ⁻¹	103 %	95,9 %
RAS intensivo	1 m ³	57 m ³ h ⁻¹	34 %	98,6 %
RAS super intensivo	0,3 m ³	17 m ³ h ⁻¹	6 %	99,6 %

Como principio, el reúso de agua surge a raíz de la necesidad de incrementar los flujos de agua a través de las unidades de cultivo (tanques o estanques) para aumentar su stock, y al mismo tiempo enfrentar las restricciones en la disponibilidad de agua fresca, lo que se ilustra en la Figura 1.

Los RAS permiten trabajar con importantes volúmenes de agua circulante (Q) a través de los tanques de cultivo, y pequeños consumos de agua para reposición de las pérdidas por evaporación y por reemplazos de descargas realizadas junto a los sólidos y en operaciones de limpieza y/o mantenimiento. Su aplicación se recomienda cada vez en un número mayor de condiciones (Remmerswaal, 1993; Lekang, 2007):

- Escasez o falta total de agua,
- Mala calidad de agua,
- Climas adversos, con temperaturas de gran variación,
- Regulaciones ambientales para la descarga de efluentes,
- Necesidad de aumentar la precisión en el manejo de la calidad de agua,
- Necesidad de tener instalaciones de crianza más compactas para un mejor control,
- Riesgos de contaminación con vectores patógenos y otros.

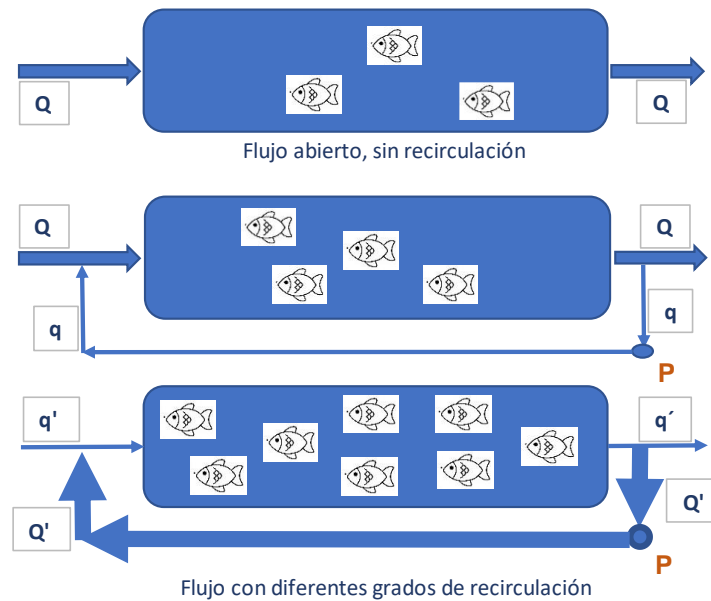


Figura 1: De un sistema de flujo abierto hacia un sistema RAS con reducción en el uso de agua nueva

Nota: Q' , Q y q : caudales, P : bomba de agua.

Fuente: Lekang (2007).

Con todo lo mencionado, los sistemas RAS son de aplicación en muchos lugares, climas variados, especies de organismos acuáticos de todo tipo, y son instalados en dimensiones también variadas, como también los hay entre los de diseño sencillo, como los que tienen un equipamiento altamente complejo. Y son particularmente útiles en países con gran variedad de especies, marinas y de agua dulce, que presentan potencialidad para ser incorporadas a un sistema de producción acuícola de alta densidad.

Los sistemas RAS ofrecen importantes ventajas, al implementarse en diferentes escalas, desde aquellos con tamaño propio para trabajos de investigación hasta aquellos empleados para realizar producciones de varios cientos de toneladas de pescado al año. Martins et al., (2010), refieren que el uso de los RAS está creciendo en Europa, para el cultivo de especies de agua dulce (anguila y bagre) y marinas (rodaballo, lubina y lenguado), pero también para la producción de alevines de especies marinas y de agua dulce (Figura 2).

En consideración a las características y propiedades que presentan los RAS, varios autores (Timmons y Ebeling, 2007; Lekang, 2007; Wheaton, 1977; Piedrahita et al., 2011) coinciden en destacar los siguientes beneficios que ofrecen:

1. La posibilidad de lograr una alta producción, gracias a buenos indicadores de crecimiento y altas tasas de supervivencia
2. Permite mantener condiciones ambientales óptimas, asegurando el bienestar animal
3. Disminuye el impacto ecológico
4. Permite criar peces de agua salada en el interior, lejos de la costa
5. Permite aumentar la capacidad de carga de una masa de agua al mantenerla circulando
6. Permiten alcanzar calidades mayores del producto, con buena uniformidad de tamaño
7. Mayor calidad y cantidad de producciones, más estables y más consistentes
8. Capacidad de producir productos acuáticos libres de contaminación, sea por metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y otras toxinas potenciales
9. Producción durante todo el año, sin estacionalidad
10. Mejor aprovechamiento de los alimentos y de las semillas (alevinos) por un mejor manejo y bajas mermas
11. Se adapta a las condiciones de una acuicultura urbana y a asociaciones con cultivos de hidroponía



Figura 2: Fotografía de un sistema RAS, en ambiente cerrado

Fuente: Regional Research Reports (2022).

En el desarrollo de la maricultura, de pequeña o gran escala, los RAS cumplen un rol clave, porque permiten desarrollar la reproducción de las especies, como el desarrollo del estadio de alevinaje y una etapa adicional de crecimiento para asegurar individuos que, transportados a las jaulas marinas, tengan la capacidad de soportar las condiciones del mar en cuanto a

cambios de temperatura, corrientes, disponibilidad de alimento, etc. En suma, los RAS son el perfecto complemento para las jaulas (flotantes o sumergidas), en las más importantes producciones acuícolas marinas, un claro ejemplo de ello es la producción de Cobias (*Rachycentron canadum*) en Centroamérica, en jaulas sumergidas.

Murray et al. (2014), señalaron como funciones adicionales de los RAS: protección del stock de la infección por agentes patógenos, proveer de las necesidades para funciones fisiológicas de los peces como oxígeno y nutrición, remoción de los desechos metabólicos (sólidos y gases producidos), eliminación de alimento no consumido y de cualquier producto de descomposición, y el mantenimiento de los parámetros de calidad de agua en los rangos más adecuados para las especies.

La eficiencia en el funcionamiento de un sistema RAS demanda no solo de un buen diseño, y apropiada instalación, sino también del buen criterio y el rigor con que el personal encargado de su funcionamiento realice sus labores.

2.1.2. Componentes de los Sistemas RAS

Los sistemas de recirculación, en general, están constituidos por elementos aparentemente de simple funcionamiento, donde el agua de los tanques de peces fluye hacia un separador mecánico de sólidos, luego hacia un filtro biológico para la transformación de amonio, y seguidamente es reacondicionado mediante aireación, para liberar el dióxido de carbono y saturar el agua con oxígeno y así ser regresado a los tanques de peces. A estos elementos principales en la recirculación de agua, se agregan otros componentes para mejorar la recuperación de la calidad del agua, acercándola a las características óptimas.

Si se toma en cuenta la naturaleza de los desechos que se van a tratar en el RAS, se consideran: los desechos sólidos (heces y alimento no consumido) y los desechos disueltos (amonio, dióxido de carbono, nitrito, nitrato, etc.) resultantes de la alimentación y del metabolismo de los peces (Ebeling y Timmons, 2012).

Los componentes del RAS responden a las características y propiedades de los desechos a tratar. Diseñados para cumplir un tratamiento físico y tratamiento biológico (Pedersen, 2018) (Figura 3).

A los elementos básicos de un sistema de recirculación, se pueden agregar otras instalaciones, como un reactor para inyección de oxígeno puro, lámpara de luz ultravioleta, un intercambiador de calor, biofiltro anaeróbico para desnitrificación, entre otros, señalados en Bregnballe (2015).

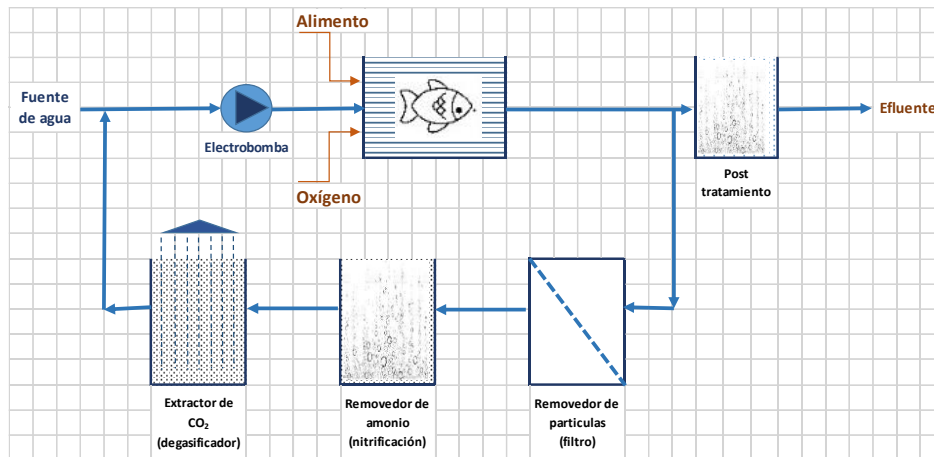


Figura 3: Esquema conceptual de un sistema de recirculación mostrando sus componentes principales

Fuente: Pedersen (2018).

2.2. PROCESOS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS ASOCIADOS AL TRATAMIENTO DE AGUA EN LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN

Los peces en un sistema de cultivo pueden considerarse como unas pequeñas “máquinas” transformadoras del alimento en filete de pescado, en esa conversión el metabolismo provoca cambios en la calidad del agua al consumir oxígeno y producir desechos (sólidos y disueltos). El destino final de los productos consumidos por los peces se visualiza y cuantifican cuando se hace el cálculo del balance de nutrientes (proteína, materia seca, energía, fosforo, etc.). El estudio de la producción de desechos sirve para cuantificar los contaminantes que habrá de controlarse en los elementos de tratamiento de agua del RAS (Wheaton, 1977).

La función de los RAS es, mantener bajo control estos compuestos contaminantes, para el mejor desempeño de las especies en cultivo, y mantenerlos lejos de los niveles tóxicos. Entonces es necesario el tratamiento constante del agua para retornar su calidad a condiciones óptimas, removiendo los desechos y reponiendo la cantidad de oxígeno que requiere el sistema.

Según Remmerswaal (1993), el funcionamiento de la unidad de tratamiento de un sistema RAS está orientado a contrarrestar los cambios en la calidad del agua de cultivo. Estos cambios en la calidad del agua se dan en mayor o menor grado, dependiendo de la intensidad de crianza (densidad de carga), de la especie que se cultiva, así como de las prácticas de manejo (tipo de alimento, frecuencia de alimentación, nivel de alimentación, etc.). El tratamiento de agua en los sistemas RAS requiere de la caracterización de los desechos, comprende el tratamiento físico para los sólidos en suspensión y el tratamiento biológico para desechos disueltos. Por tanto, los elementos de un RAS basan su funcionamiento en dos tipos de principios: mecánico (sedimentación o filtrado) y biológico (nitrificación y/o desnitrificación (Timmons y Ebeling, 2010) (Figura 4).

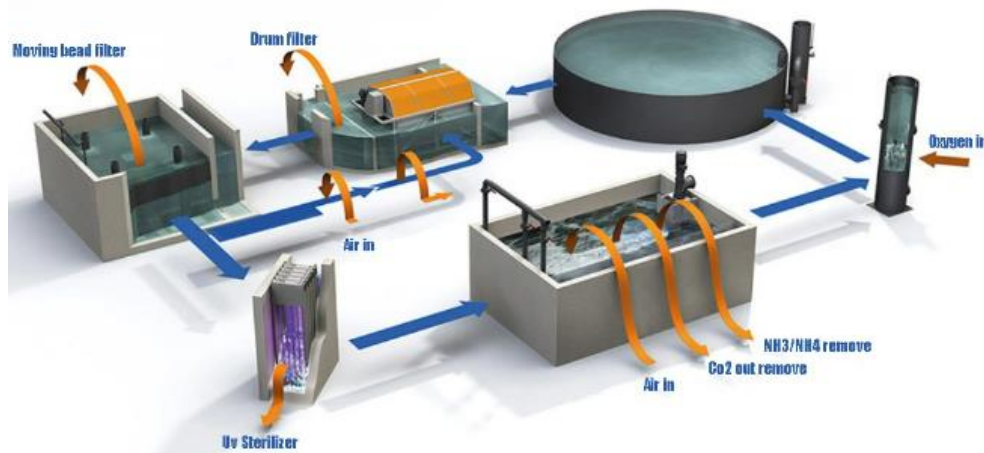


Figura 4: Esquema de componentes típicos de un sistema RAS: tanque de peces, filtro barril, filtro de lecho móvil, esterilizador UV, tanque ecualizador, oxigenador

Fuente: Made in China (s.f.).

2.2.1. Tratamiento físico del agua

2.2.1.1. Remoción de partículas sólidas

La captura y separación de los desechos sólidos que resultan de los tanques de peces se hace aprovechando sus propiedades de sedimentación. La sedimentación de las partículas ocurre por naturaleza, con un desplazamiento en sentido vertical que, por efecto de la velocidad de desplazamiento del agua, en sentido horizontal, resulta en una trayectoria oblicua, en una línea recta (Lemmer y Du Toit, 2004).

Se han desarrollado varios tipos de separadores mecánicos para la eliminación de sólidos suspendidos en el agua: los filtros de micro tamices, filtros de bolsas (o mangas) y cartuchos, filtros de medios porosos y granulares, y filtros de medios de cuentas de plástico (Pfeiffer et al., 2008). Todos estos tipos de filtros están disponibles y podrán elegirse considerando la pérdida de carga que generan, sus rendimientos en términos de tasas de filtración, el periodo de vida útil del filtro y las facilidades que ofrecen para su mantenimiento, es decir de lavado o también denominado como retro lavado; conjunto de aspectos que influyen en los costos de operación.

Bun et al. (2017), obtuvieron buenos resultados al aplicar un proceso de tratamiento múltiple, que comprende la sedimentación, la filtración de doble medio y la biofiltración, para tratar las aguas residuales del cultivo de peces. Para ello emplearon un tanque de sedimentación como pre tratamiento, seguido de la filtración rápida de doble arena y antracita para lograr una separación efectiva de los sólidos. Sin embargo, es importante considerar los costos de inversión en el equipamiento, así como los costos de operación, especialmente cuando los equipos determinan pérdidas de carga hidráulica importantes.

La sedimentación ocurre gracias al efecto de la gravedad “sedimentación por gravedad” y se presenta en varios procesos del tratamiento de agua. La sedimentación, está regida por la ley de Stokes que señala que las partículas con mayor diámetro y/o mayor peso específico que el líquido que lo sostiene, terminarán alcanzando el fondo del contenedor con mayor facilidad, pero también una menor viscosidad del líquido propicia la sedimentación. El proceso de sedimentación se presenta también por efecto de la fuerza centrífuga “sedimentación centrífuga” (Riquelme, 2021).

Entre todas las tecnologías, la sedimentación es uno de los procesos más sencillos disponibles para controlar los sólidos en el tratamiento del agua de cultivo (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Piedrahita et al., 1996), que consiste en la separación de las partículas en suspensión, que son más pesadas que el agua, por diferencias de densidad debido a la fuerza de gravedad (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Huguenin y Colt, 2002; Carlsson, 1996). La sedimentación se usa ampliamente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y el éxito de este tratamiento es crucial para la eficiencia general de la planta (Carlsson, 1996).

En los tanques de sedimentación se considera la sedimentación de tipo I que consiste en el asentamiento de partículas discretas sin interacción (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Carlsson, 1996; Piedrahita et al., 1996; Lemmer y Du Toit, 2004), para la eliminación de arena y sólidos de desecho de descarga en los sistemas de cultivo marinos (Huguenin y Colt, 2002), este tipo de sedimentación obedece a la ley de Newton y Stokes (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Carlsson, 1996; Lemmer y Du Toit, 2004), esta ley rige para partículas pequeñas (0.1 – 1 mm) (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007). Donde: V_s es la velocidad de sedimentación, o v_c velocidad terminal (Visvanathan, 2004), ρ_p es la densidad de la partícula, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, D_p es el diámetro de la partícula considerada esférica, μ es la viscosidad dinámica del agua.

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^2}{18 \mu}$$

La ecuación mostrada, corresponde a la sedimentación Tipo I, sedimentación de partículas con pequeña o ninguna tendencia a flocular, demuestra por qué las partículas con mayor densidad son las más sencillas de eliminar por decantación (Lekang, 2007; Visvanathan, 2004). Los tanques de sedimentación son muy eficaces si se configuran y operan adecuadamente; así mismo, requieren poca energía, su instalación y operación son relativamente económicas (Timmons et al., 2009; Piedrahita et al., 1996; Orellana, 2006; Zhang, 2014), presentando funciones de clarificación y separación de sólidos (Carlsson, 1996; Lemmer y Du Toit, 2004). Están divididos en 4 zonas (Figura 5), la zona de entrada, que sirve para distribuir el agua uniformemente sobre la sección transversal del tanque; la zona de sedimentación, en donde los sólidos son separados por gravedad de la columna de agua depositándose en la zona de lodos (Timmons et al., 2009; Lemmer y Du Toit, 2004), en esta etapa la separación ocurrirá siempre que la velocidad de sedimentación o hundimiento de la partícula no exceda el componente de velocidad horizontal creado por el flujo de agua a través la zona de sedimentación, en cuyo caso la partícula fluiría hacia la zona de descarga (Lekang, 2007). Y la cuarta zona, de descarga, donde el líquido clarificado generalmente se recolecta en toda la sección transversal del tanque. Idealmente en condiciones sin mezcla o sin turbulencia, el tiempo de retención, es el requerido para que una partícula que parte desde el nivel superior de la zona de entrada se sedimente al piso del tanque antes de llegar a la zona de descarga (Timmons et al., 2009).

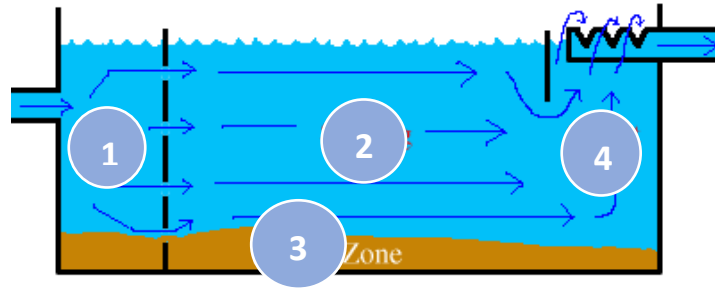


Figura 5: Ubicación de zonas en un sedimentador rectangular

Nota: 1) Zona de ingreso, 2) Zona de sedimentación, 3) Zona de lodos y 4) Zona de descarga o salida.

Fuente: The water treatments (s.f.).

El tanque de sedimentación es comúnmente rectangular, con una velocidad de fluido horizontal uniforme (V_h), su desempeño es independiente de la profundidad (Carlsson, 1996; Huguenin y Colt, 2002), pero las consideraciones prácticas respecto a la acumulación de sólidos limitan el uso de sedimentadores poco profundos. Siendo las profundidades típicas entre 1,2 a 1,8 m (Huguenin y Colt, 2002). Al diseñar sistemas de remoción física de sólidos por acción gravitacional, se debe garantizar que las condiciones hidráulicas propicien la velocidad de sedimentación típica de las partículas (Maigual et al., 2013).

El parámetro clave para el diseño de tanques de sedimentación es el flujo de agua volumétrico por unidad de superficie del tanque (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Huguenin y Colt, 2002; Carlsson, 1996; Vesga-Rodríguez et al., 2019), llamada también velocidad crítica, o tasa de carga superficial (V_c), que es la velocidad mínima para que una partícula sedimente (Carlsson, 1996), expresada generalmente en m día^{-1} o en $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$. En la ecuación, D es la profundidad del área de sedimentación (m), L es la longitud del sedimentador en la dirección horizontal del flujo (m), V_h es la velocidad horizontal (m s^{-1}), Q es la tasa de flujo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), W es el ancho del sedimentador (m) y A_{sz} es el área de la zona de sedimentación (m^2).

$$V_c = \frac{D \cdot V_h}{L} = \frac{Q}{L \cdot W} = \frac{Q}{A_{sz}}$$

Toda partícula con una velocidad de sedimentación (V_s) mayor a la tasa de carga superficial (V_c) sedimentará y por lo tanto será removida, entonces el enunciado se puede configurar en

$V_s > V_c$. Las partículas que tienen velocidades inferiores a V_c se eliminarán, en la proporción de V_s/V_c (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Huguenin y Colt, 2002).

Otros diseños de tanques de sedimentación tienen en cuenta el tiempo de retención hidráulica (τ), donde V es el volumen del área de sedimentación y Q es el caudal. Debido a que la diferencia de densidad entre el agua y las partículas excretadas por peces es pequeña, se requiere un tiempo de residencia hidráulico bastante largo (Lekang, 2007).

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

Los sedimentadores tradicionales tienden a requerir áreas de superficie relativamente grandes y, por lo tanto, no son prácticos para algunas aplicaciones donde el espacio es limitado (Piedrahita et al., 1996). Para reducir costos de área que los sedimentadores convencionales pueden tener, y mejorar las condiciones del propio sedimentador, se utilizan sedimentadores especialmente diseñados, a los cuales se le agregaron obstáculos dentro del tanque para aumentar la tasa de sedimentación (Timmons et al., 2009; Lekang, 2007; Vesga-Rodríguez et al., 2019). Estos sedimentadores son denominados de tubos o de placas paralelas, donde el flujo se introduce por la parte inferior del sedimentador y es forzado a fluir hacia arriba donde se encuentra la cámara de salida, en este proceso los sólidos se depositan paulatinamente entre las placas o tubos paralelos.

2.2.1.2. Concepto de carga superficial en un sedimentador convencional

El concepto de carga superficial es utilizado en el diseño de un sedimentador, en su versión más simple o elemental, aquel en que la sedimentación ocurre por efecto de la disminución de velocidad de desplazamiento horizontal del agua, a tal punto que las partículas – gracias a las fuerzas de sedimentación – tocan el fondo de la estructura y se estacionan al contacto, provocándose una acumulación progresiva de material, a la que se conoce como lodo, (Franqui, 2015) (Figura 6).

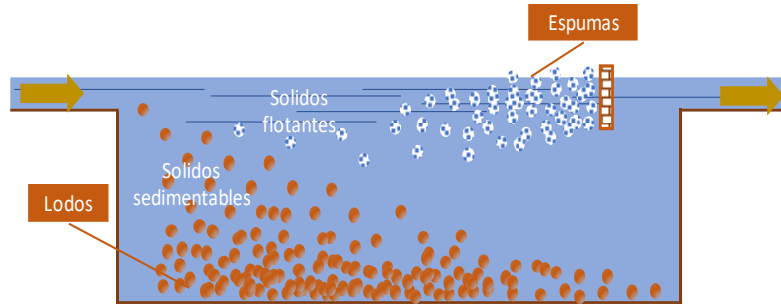


Figura 6: Las partículas, en función del tamaño y de su naturaleza, pueden mantenerse a flote o sedimentar

Fuente: Franqui (2015).

En la Figura 7, se muestran dos condiciones que pueden presentarse para el caso de partículas sedimentables al ingresar a un sedimentador rectangular: la partícula “a” sedimentará cuando entre en contacto con el fondo de la estructura, mientras la partícula “b” al impactar en la pared posterior de la estructura pueda que no lleguen a sedimentar por efecto de las fuerzas de re suspensión. Por tanto, la situación de la partícula “b” – para efectos de cálculo – se considera que no llega a sedimentar. El dimensionamiento de los sedimentadores, así como de desarenadores se hace considerando un recorrido como el de la partícula “a”, donde la velocidad de sedimentación es tal que en el tiempo que permanece un volumen de agua en el contenedor, la partícula llega a tocar el fondo, y es lo que se denomina el tiempo de retención (CEPIS, 2005).

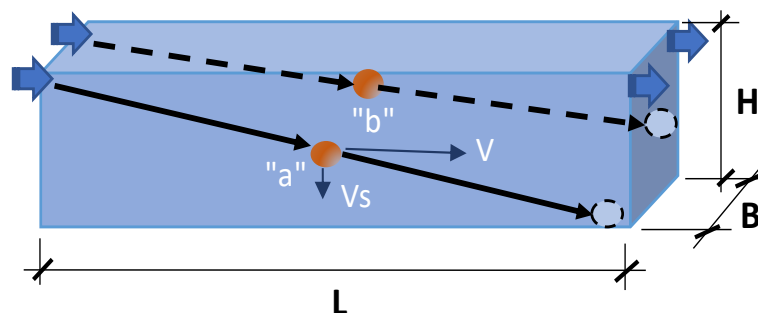


Figura 7: Trayectoria de la partícula “a” indica que sedimentará, y es empleado como criterio en el dimensionamiento de sedimentadores

Fuente: Franqui (2015) y Paulos (1991).

Considerando la Figura 7, el tiempo o periodo de retención (T_r) se puede calcular de la siguiente manera, según explicado en Ramalho (1996):

$$\begin{aligned} \text{Vol} &= L * B * H \dots\dots (m^3) \\ Q &= A * V \dots\dots\dots (m^3 h^{-1}) \\ T_r &= \text{Vol}/Q \dots\dots\dots (h) \end{aligned}$$

Donde:

- Vol. : volumen del sedimentador
- Q : caudal o flujo de agua
- V : velocidad (horizontal) del agua en el sedimentador
- L : longitud del sedimentador
- B : ancho del sedimentador
- H : altura de agua en el sedimentador

En el caso de la partícula “a”, a la velocidad de sedimentación V_s , corresponderá un periodo de retención (T_s) que deberá cumplir la siguiente relación:

$$T_r > T_s$$

Donde $T_s = H/V_s$ (dado que $V_s = H/T_s$, velocidad igual a espacio / tiempo)

Siendo entonces T_s , proporcional a la velocidad de sedimentación V_s . Para efectos de diseño, los valores de V_s se encuentran en tablas, y dependen del tipo de partícula.

La expresión anterior puede también expresarse de la siguiente manera (Guerrero et al. 2018):

$$\begin{aligned} \text{Vol}/Q &> H/V_s \\ V_s &> H*Q/\text{Vol} \\ V_s &> H*Q/(L*B*H) \text{ con } (A = L * B) \\ V_s &> Q/A = C_s \end{aligned}$$

Siendo C_s la carga superficial del sedimentador, y entonces la condición de desigualdad se describe de la siguiente manera, para área plana:

velocidad de sedimentación (V_s) > flujo (Q)/área del sedimentador

Por tanto, se llega a la siguiente expresión:

$$V_s > \text{Carga superficial (Cs)}$$

La trayectoria que sigue la partícula “a” de la Figura 7, nos lleva también a una relación, que parte de la premisa que el tiempo “t” que tarda en recorrer la distancia horizontal “L” es el mismo que tarda en recorrer la distancia vertical “H”, mostrado en Martínez y Estrada (2011). Este autor hace el análisis del movimiento de las partículas en un sedimentador convencional y con la introducción de placas horizontales para ver su efecto en la sedimentación, de lo que se generan las expresiones correspondientes a la velocidad de desplazamiento horizontal y vertical de la partícula, a partir de la ecuación básica *velocidad = espacio / tiempo*:

$$\text{Sentido horizontal: } V_L = L / t \quad \text{por tanto: } t = L / V_L$$

$$\text{Sentido vertical: } V_s = H / t \quad \text{por tanto: } t = H / V_s$$

Igualando los tiempos de desplazamiento horizontal y vertical, de modo que en el mismo tiempo la partícula recorra el sedimentador en toda su longitud, pero también en toda su profundidad, obtenemos la siguiente ecuación:

$$L / V_L = H / V_s \quad \text{de donde despejamos la longitud: } L = H * V_L / V_s$$

El patrón o recorrido de sedimentación de una partícula discreta en un contenedor rectangular, indica que al mismo tiempo que la partícula recorre una distancia vertical (hacia abajo) debido a su peso, la partícula también es desplazada horizontalmente en dirección del flujo de agua, a la misma velocidad con que ésta recorre longitudinalmente el contenedor.

Según lo expuesto, si “ V_L ” es la velocidad del agua, y “ V_s ” la velocidad de sedimentación de la partícula, “L” la longitud del contenedor y “H” su profundidad, tenemos de acuerdo a lo mostrado en Kinfu (1991) y Burgos-Flores et al. (2013), que para una partícula que se encuentre transitando entre una masa de agua que fluye por un conducto, ésta se depositará en el fondo, solo si se cumple lo siguiente:

$$\frac{L}{H} = \frac{V_L}{V_s}$$

Bajo la premisa que la partícula se desplaza uniformemente desde la entrada del contenedor hasta la salida de éste, la velocidad del agua y de la partícula está determinada por el caudal de flujo (Q), la profundidad del contenedor “H” y el ancho de éste “B”. Despejando el valor de V_F de la formula anterior, se obtiene:

$$V_F = \frac{Q}{B*H}$$

Reemplazando esta ecuación en la anterior, se obtiene la ecuación conocida como la Ley de Hazen:

$$\frac{L}{H} = \frac{Q}{V_S*B*H} \rightarrow V_S = \frac{Q}{A}$$

Donde “A” es la superficie horizontal del contenedor, $A = L*B$

Estas relaciones corresponde aplicarlas en los cálculos de placas horizontales, así como a los contenedores rectangulares.

Se ha demostrado que la incorporación de placas al interior de un sedimentador convencional, puede incrementar 10 o más veces el área de sedimentación, y por tanto la eficiencia del sedimentador se multiplica en esa misma medida. La presencia de placas inclinadas en un sedimentador donde el agua fluye de manera ascendente (Figura 8), permite el acortamiento del espacio que deben recorrer las partículas antes de tocar la superficie de sedimentación, que en este caso corresponde a la superficie de las placas inclinadas, también llamadas lamelas separadoras. De una prueba realizada por Vesga-Rodríguez et al. (2019), resultó que los sedimentadores convencionales y los sedimentadores con placas o lamelas separadoras presentaron una eficiencia de 14% y de 75% respectivamente.

Como consecuencia de ello, la colocación de placas al interior de un sedimentador convencional permite tener una reducción del área horizontal de diseño requerido. Estos sedimentadores de alta tasa son más eficientes y económicos, y son los que se adecuan mejor a la instalación de sistemas de recirculación RAS, generalmente dentro de ambientes cerrados. El efecto de la presencia de placas en el desplazamiento de una partícula solida se muestra en la Figura 8.

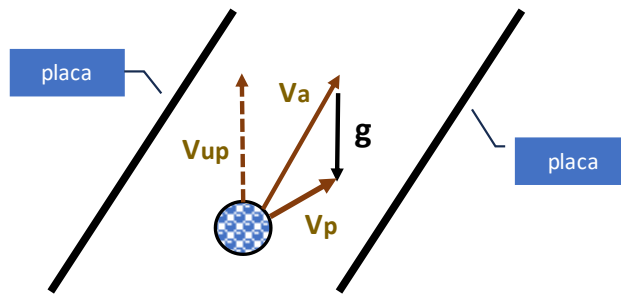


Figura 8: Diagrama de vectores de desplazamiento de una partícula entre dos placas paralelas inclinadas

Fuente: Vukovic (1999).

Siendo:

Va: Velocidad de flujo de agua

Vup: Velocidad de flujo de agua ascendente (componente vertical de Va)

g: aceleración de la gravedad

Vp: Velocidad resultante de la partícula

2.2.1.3. Sedimentadores alta tasa

A partir de la teoría de los sedimentadores de placas paralelas se ha desarrollado el concepto de los sedimentadores de alta tasa. Posteriormente surgieron en el mercado lo que se denominan sedimentadores de alta tasa tubulares. Los sedimentadores laminares o de alta tasa trabajan con flujo laminar (número de Reynolds $Nr < 500$) mientras los sedimentadores convencionales con flujo turbulento (Nr entre 10 000 y 250 000) (Ingeniería Sanitaria, 2011).

Lo que inicialmente se aplicó, en la década de los años 90s, como sedimentadores de placas o lamelas separadoras, actualmente en el mercado predominan los sedimentadores que no tienen planos de sedimentación equidistantes paralelos, sino tubos paralelos hexagonales. Los sedimentadores que presentan un set de placas paralelas o un paquete de tubos inclinados, con un periodo de detención no mayor que 15 minutos, son denominados de alta tasa (Paulos, 1991). Se recomienda que la separación entre las placas no sea menor a 5 cm, con una longitud entre 0,9 m a 1,8 m, así mismo el diseño debe permitir un flujo laminar entre las placas o tubos; en estos sedimentadores la eficiencia de remoción está directamente relacionado con la velocidad de sedimentación, idealmente de baja profundidad para optimizar su eficiencia (Visvanathan, 2004). Tanto en las placas, como en tubos

sedimentadores, se cumple la siguiente ecuación:

$$v_0 = Q/As$$

Siendo:

v_0 : Velocidad de caída de la partícula

Q: Tasa de flujo (Q = constante)

As: Área de superficie

Cuando el área de superficie As se incrementa, la velocidad de caída de la partícula v_0 decrece, generando un incremento en la eficiencia de remoción. Justamente el principio de las placas de sedimentación es el de incrementar el As (Visvanathan, 2004).

Los sedimentadores de placas o tubos paralelos, para garantizar un flujo de régimen uniforme, se deben cumplir la condición que el número de Reynolds sea menor que 500, aunque con valores menores de 150 se obtuvo una mejor uniformidad de los flujos (Burgos-Flores et al., 2013), siendo la fórmula para cálculo de Reynolds la siguiente:

$$Re = \frac{Vs \cdot d}{\nu}$$

Donde: Vs, velocidad de sedimentación ($m \ s^{-1}$); d, diámetro de partícula esférica (m); ν , viscosidad cinemática del agua ($m^2 \ s^{-1}$).

Burgos-Flores et al. (2013), Vukovic (1999), señalan que un elemento básico de diseño para un sedimentador de alta tasa es la velocidad crítica de asentamiento o carga superficial (V_{sc}), definida por la siguiente fórmula:

$$V_{sc} = \frac{Sc \cdot V_0}{\text{sen } \Theta + Lr \cos \Theta}$$

Donde V_{sc} , carga superficial ($m^3 \ m^{-2} \ d^{-1}$); V_0 , Velocidad promedio en zona de sedimentación o placas ($m \ d^{-1}$); Θ ángulo de inclinación de placas (recomendado 60°); Lr, longitud relativa del sedimentador, en flujo laminar. $L = b/d$ (longitud / ancho); Sc, eficiencia de la unidad (para sedimentador de alta tasa = 1,0).

Varios autores coinciden en que el ángulo de inclinación ideal para una autolimpieza de la zona de sedimentación es 60° (Rincón et al., 2014; Paulos, 1991; Destefano, 2008) y la relación longitud / ancho utilizada con frecuencia es 2:1, que puede variar por las dimensiones y geometría del espacio disponible.

Las placas inclinadas de los sedimentadores (Burgos-Flores et al., 2013; Lee, 2015; Vesga-Rodríguez et al., 2019), están instaladas con un ángulo de 45 a 60° para favorecer a que los sólidos sedimentados – depositados en la superficie superior de las placas – se deslicen hacia abajo y tocando fondo del contenedor, desde donde se les retira en el proceso de limpieza del sedimentador. Bajo condiciones de placas inclinadas la distancia que las partículas deben recorrer verticalmente es la distancia de separación de placas dividido por el coseno del ángulo de inclinación, y la superficie efectiva proyectada es la superficie de la placa dividido por el coseno del ángulo de inclinación. El diseño de los sedimentadores de placas paralelas se apoya en la ley Hazen (Destefano, 2008). La expresión Q/A de la fórmula (V_s), se conoce como velocidad de Hazen y es el parámetro en el que se basa el diseño. Según estas relaciones las partículas sedimentaran cuando la velocidad real o efectiva de sedimentación sea equivalente a la velocidad de Hazen o mayor a ella.

Los sedimentadores tubulares resultaron de un desarrollo a partir del principio de funcionamiento de las placas paralelas inclinadas, con el propósito de aumentar aún más la eficiencia de sedimentación. Los modelos que predominan en los canales de tubos sedimentadores de alta tasa, son triangulares, hexagonales, ondas u otras formas (Yao, 1970; Brentwood Industries, 2009).

2.2.2. Tratamiento biológico del agua

El tratamiento biológico del agua recirculante en los sistemas RAS, tiene como principal propósito disminuir las concentraciones de amonio y de nitrito, compuestos tóxicos para los organismos acuáticos (Wheaton, 1977).

Los desechos y las bacterias tienen una interrelación mutuamente complementaria. Los desechos disueltos generados por los peces pertenecen a una de las dos categorías principales: carbono orgánico o amoníaco. Estos dos productos son empleados por las bacterias utilizándolos como energía y alimento. El carbono orgánico es energía y alimento para las bacterias heterótrofas, que usan oxígeno para su respiración, convirtiendo los desechos orgánicos en material celular.

El oxígeno consumido es cuantificado mediante el parámetro denominado Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Golz, 1995).

Los componentes energéticos de los alimentos para peces, es decir los carbohidratos, grasas y proteínas, contienen en su estructura molecular una cantidad importante de carbono que, al ser entregado a los peces, una parte se convierte en biomasa, y otra parte en dióxido de carbono que es eliminado en la respiración, o como compuestos excretados post digestión. Debido a que el carbono orgánico no digerido y el excretado, están presentes en variadas moléculas, su concentración a menudo se mide y se expresa como Demanda Química de Oxígeno, DQO, o como demanda biológica de oxígeno, DBO (Pedersen, 2018).

El amoníaco, el amonio, el nitrito y el nitrato son compuestos que están presentes en los tanques de peces y tienen su origen en la proteína contenida en la dieta. El amoníaco y el nitrito presentan una elevada toxicidad, mientras el amonio y los nitratos son de menor riesgo. La suma de amonio y el amoníaco se denomina Nitrógeno Amoniacal Total (TAN, por sus siglas en inglés), y el control del equilibrio entre estos compuestos es muy importante, siendo su eliminación uno de los procesos más importantes en los sistemas RAS (Pedersen, 2018; Barnabé, 1990).

Por lo expresado, cuando se diseña y construyen los sistemas RAS, se debe asegurar que el sistema que se instala esté preparado no solo para la crianza de peces, sino también para favorecer la presencia de bacterias controladoras de estos compuestos que son producidos en el metabolismo de los peces.

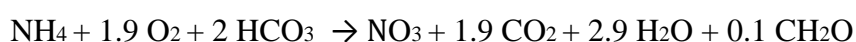
Es importante disminuir la producción de los compuestos nitrogenados mediante buenas prácticas de alimentación y adecuadas formulaciones en la fabricación del alimento. Estudios sobre los destinos del nitrógeno ingerido, se realizan aplicando el balance de nitrógeno, mediante la aplicación de una ecuación de balance de masas, en la que se toma en cuenta a todas las formas de presentación del nitrógeno. Como señalan Sandu y Hallerman (2013), las entradas totales (E_N) más la generación (P_N) en el sistema (pez), serán igual a las salidas totales (S_N) más el consumo (C_N):

$$E_N + P_N = S_N + C_N$$

Siendo la fuente más importante de entrada de N, la alimentación, que aporta prácticamente

con el 85% del N total en los sistemas acuáticos (Zhong et al., 2011). Los productos residuales del metabolismo de los animales acuáticos, conteniendo N, son transformados en su presentación a formas oxidadas, no tóxicas, por acción bacteriana en estructuras denominadas biofiltros donde ocurre la transformación de amonio y urea, principales compuestos excretados.

El principio de funcionamiento de cualquiera de los tipos de filtros biológicos tiene en común una ecuación estequiométrica que describe las reacciones de oxidación que tienen lugar en la película de bacterias, el 'biofilm', de los sustratos de filtración. La oxidación del amonio, según Gujer y Boller (1986), es descrita por el siguiente balance químico:



En donde CH₂O representa la biomasa microbiana. La ecuación indica que para la oxidación de 1,0 gramo de amonio se requiere 4,34 gramos de oxígeno y 7,14 de alcalinidad, y a partir de ello se generan 0,21 gramos de biomasa bacteriana, 1,98 gramos de ácido, y 4,43 gramos de nitrato. Lekang (2007), señala que, cuando al sistema se añade C en forma de metanol antes que ocurra la desnitrificación y siendo la masa microbiana representada empíricamente por la fórmula C₆H₇O₂N, la ecuación estequiométrica total es:



La transformación de un compuesto tóxico para los peces, como el amonio, en otro compuesto de baja toxicidad, el nitrato, como se mostró, ocurre en los biofiltros que, según su construcción y funcionamiento, pueden agruparse en: filtros de sustrato estático como los de arena y los de percolación, y en filtros de sustrato móviles como los de discos rotatorios y el filtro de lecho fluidizado (Wheaton, 1977; Barnabé, 1990).

2.3. BALANCE DE MASAS Y SU APLICACIÓN EN LOS CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN

2.3.1. Definición de los sistemas y ecuaciones aplicables

2.3.1.1. Definición de sistemas

La aplicación del balance de masas de un proceso, requiere definir claramente el sistema al cual se aplicará dicho balance. Un sistema está constituido por una porción de un proceso o del proceso total en conjunto, y es claramente definido y de manera específica para su análisis con aplicación de la teoría de balance de masas (Deiana et al., 2018; Olivares, 2012).

Basado en los conceptos desarrollados para la teoría general de balance de masas, los casos aplicados a los sistemas RAS, corresponden a los denominados “balances simples de masa” (Rojas, 2012), que son aquellos en los que se considera que no hay transformación química, o en los que no se necesita alguna ecuación o gráfica de equilibrio para su solución. El régimen de operación o de funcionamiento, es permanente; es decir, opera en estado estable con flujo continuo.

Deiana et al. (2018), señalan que los límites del sistema pueden ser “reales” o “ficticios”. Se considera un “limite real” cuando encierra solo un elemento de procesos (ejemplo: sedimentador de placas), mientras los limites ficticios comprenden dos o más elementos de proceso (ejemplo: sedimentador de placas + biofiltro) (Figura 9).

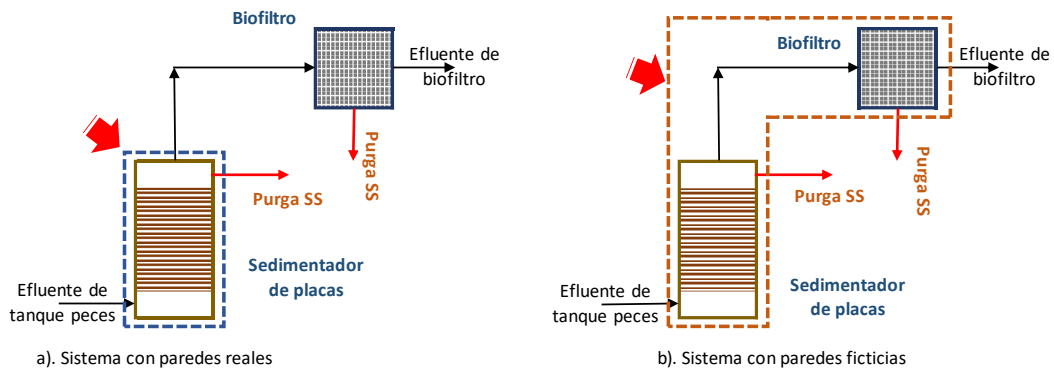


Figura 9: Sistema con (a) paredes reales y sistema con (b) paredes ficticias

Fuente: Deiana et al. (2018).

Según Deiana et al. (2018), Ashrafizadeh y Tan (2018) y Londoño (s.f.), los sistemas pueden también categorizarse en abiertos o cerrados; en el sistema abierto existe transferencia de masa a través de los límites del sistema, (entra masa, sale masa o ambas simultáneamente). Mientras en un sistema cerrado no ingresa ni egresa masa a través de sus límites. También los sistemas pueden tener muchas escalas, desde una escala microscópica hasta lo más inmenso como el universo, también puede clasificarse como sistema abierto que puede transcurrir en régimen estacionario o bien en régimen transitorio; siendo el sistema abierto estacionario si no existe acumulación de masa en el mismo. Mientras un sistema abierto es considerado transitorio si se permite acumulación de masa.

Trasladando estos conceptos a los componentes de un sistema RAS, cada uno de sus elementos, llámese tanque de peces, separador de sólidos, biofiltro, etc., representan sistemas

abiertos, de régimen estacionario, porque idealmente – durante su funcionamiento – no debe producirse acumulación de masa. Este concepto es el que permite conceptualizar adecuadamente un sistema equilibrado en una instalación RAS, y a partir de ello desarrollar las fórmulas. Ashrafizadeh y Tan (2018) terminan señalando que cuando un sistema se encuentra en estado estacionario todas sus propiedades y variables no cambian con el tiempo, y la masa total del sistema es constante (figuras 10 y 11).

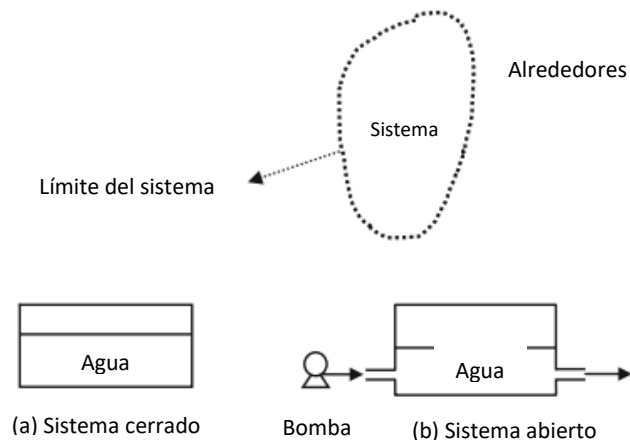


Figura 10: Límites, sistema y entorno de un sistema, (a) Sistema cerrado y (b) Sistema abierto

Fuente: Ashrafizadeh y Tan (2018).

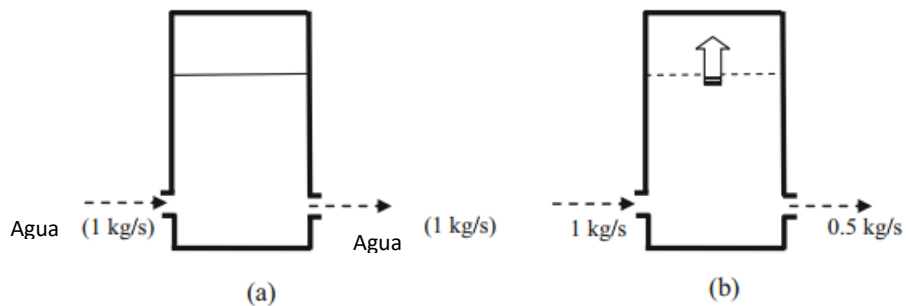


Figura 11: (a) Sistema en estado estacionario o estable, (b) Sistema en estado transitorio o inestable

Fuente: Ashrafizadeh y Tan (2018).

2.3.1.2. Ecuaciones aplicables

Según Deiana et al. (2018), Rojas (2012), Ashrafizadeh y Tan (2018) y otros autores, de manera simple y general, corresponde considerar en los cálculos, la siguiente ecuación,

aplicable a un sistema abierto:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Entrada por los} \\ \text{límites del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Salida por los} \\ \text{límites del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Generación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Consumo} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\}$$

Se aplicará también lo señalado por Deiana et al. (2018), teniendo en cuenta que la masa es conservativa, es decir no se crea ni se destruye, la expresión anterior se reduce a:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Entrada por los} \\ \text{límites del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Salida por los} \\ \text{límites del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\}$$

Continúan señalando los autores, que en un sistema abierto estacionario se cumple lo siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = 0$$

Los elementos constituyentes del sistema RAS, funcionan dejando fluir a través de sus volúmenes determinado caudal de agua conteniendo sustancias las cuales serán materia de cálculos de balance de masas.

En términos generales los cálculos en el diseño del RAS se realizarán considerando que un problema de balance de masas está constituido por una ecuación de balance volumétrico más una ecuación de balance másico, como lo explica Olivares (2012), para cada una de las especies o parámetros de calidad que se considere, según las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^N Q_{ent,i} - \sum_{j=1}^M Q_{sal,j}$$

$$\frac{d}{dt}(V \cdot C_{sis}) = \sum_{i=1}^N Q_{ent,i} \cdot C_{ent,i} - \sum_{j=1}^M Q_{sal,j} \cdot C_{sal,j} + \sum_{k=1}^L V \cdot r_k$$

Dónde:

V: volumen del sistema, m³

Q: caudal de flujo, m³ h⁻¹

C: concentración de una sustancia o compuesto, g m⁻³

r: tasa de renovación.

Considerando la aplicación del concepto de flujo másico en el funcionamiento de un tanque de peces, se genera la siguiente figura:

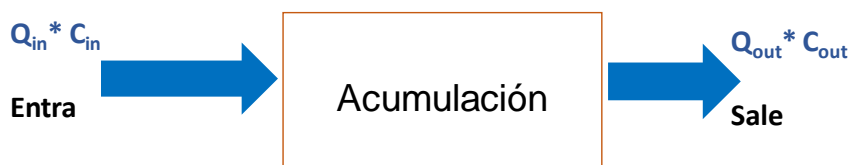


Figura 12: Diagrama esquemático de un sistema con aplicación del balance másico

A partir de la Figura 12 se formula una ecuación que corresponde al balance másico, de la siguiente forma:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Producción} - \text{Consumo}$$

Según Ashrafizadeh y Tan (2018), para un material A en el sistema, da lugar a la siguiente expresión.

$$m_{Acc} = m_{Ain} - m_{Aout} + m_{Agen} - m_{Acons}$$

Seguidamente, la ecuación de balance másico ingresando las variables de caudal (Q) y concentración de la sustancia (C), queda definida:

$$\text{Acumulación} = Q * C_{in} - Q * C_{out} + \text{Producción} - \text{Consumo}$$

Si se considera un sistema estable, la acumulación debe ser igual a cero, es decir las condiciones deben mantenerse en el tiempo.

$$\begin{aligned} \text{Acumulación} &= 0 \\ 0 &= Q (C_{in} - C_{out}) + \text{Producción} - \text{Consumo} \end{aligned}$$

Y si se considera que, para los casos de los principales parámetros de calidad de agua, como son el oxígeno y amonio o los sólidos en suspensión, en el tanque de peces el consumo es cero, la ecuación anterior queda reducida a lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= 0 \\ \text{Producción} &= Q (C_{\text{out}} - C_{\text{in}}) \end{aligned}$$

De aquí resulta la ecuación que permite calcular la cantidad de agua a suministrar a los tanques de cría de peces:

$$Q = \text{Producción} / (C_{\text{out}} - C_{\text{in}})$$

En esta fórmula las variables y las unidades más empleadas para realizar los cálculos, son las siguientes:

Q : Caudal de agua, ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)

P : Producción de una sustancia o producto, (g d^{-1})

C_{out} : Concentración de la sustancia o producto a la salida del tanque, (g m^{-3})

C_{in} : Concentración de la sustancia o producto en el ingreso del tanque, (g m^{-3})

Remmerswaal (1993), señala que el flujo de agua debe ser tal que remueva los desechos antes que la concentración de éstos alcance niveles fuera de rango recomendado para la especie. Siendo la magnitud de este, proporcional al cambio permisible de la concentración en el tanque de peces y de la máxima producción o consumo. La concentración C_{in} depende de la eficiencia del RAS y C_{out} de la tolerancia de la especie que se está cultivando.

2.3.2. Determinación de caudales basado en las relaciones de balance de masas

El dimensionamiento del volumen de cultivo de las instalaciones de acuicultura se realiza a partir de la estimación de biomasa total, asumiendo un valor de densidad de cultivo (kg m^{-3}). Una vez que se conoce el volumen de cultivo, la biomasa total y la carga de alimento, se realizan los cálculos de balance de masas y las estimaciones de tasas de remoción para dimensionar los procesos unitarios que garanticen el suministro suficiente de oxígeno y la adecuada remoción de amoníaco y dióxido de carbono para mantener los peces saludables (Piedrahita et al., 1996).

Es así que, el dimensionamiento de volúmenes y caudales para el apropiado funcionamiento de un sistema RAS consiste en asegurar la adecuada remoción de los desechos sólidos y disueltos de los peces a niveles que no representen un factor limitante para su buen desarrollo. Por otro lado, Lekang (2007) señala que la cantidad de agua requerida para diluir y remover las sustancias producidas por los peces (sólidos suspendidos (SS), CO₂ y nitrógeno de amonio total (TAN)) a concentraciones aceptables, puede ser calculada empleando ecuaciones de balance de masas (Figura 13), para sustancias individuales:

$$M_{in} + M_{ro} + M_f = M_o$$

Donde:

M_{in} = masa de una sustancia “x” en el agua nueva entrante

M_{ro} = masa de una sustancia “x” que ingresa desde el circuito de recirculación

M_f = masa de una sustancia “x” producida por el pez en el tanque

M_o = masa de una sustancia “x” en la salida del tanque

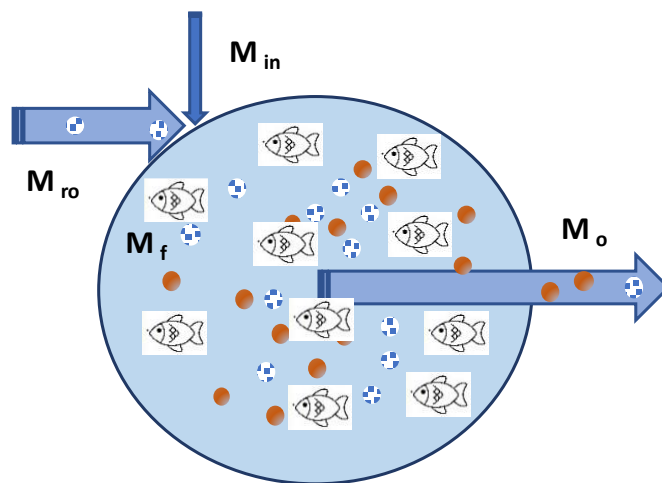


Figura 13: Diagrama esquemático de entradas y salidas en el funcionamiento de un tanque de peces

Fuente: Lekang (2007)

Tomando la fórmula presentada en Lekang (2007), si la masa de una sustancia “x” (M_o) añadido o removido del tanque y el flujo de agua en el tanque (Q_o) son datos conocidos, es posible calcular la concentración de la sustancia en la salida (C_o):

$$C_o = M_o / Q_o$$

La concentración de la sustancia “x” (C_o) no debe exceder un valor que sea aceptable para el pez. Según lo expresado, se podrá determinar el flujo de agua – el menor aceptable – para que el tanque de cultivo funcione adecuadamente, estableciéndose la siguiente relación:

$$Q_o \geq \frac{M_o}{C_{o_limit}}$$

Donde:

C_{o_limit} = concentración límite de la sustancia “x” en la salida del tanque de cultivo.

Tal que no represente una reducción en el crecimiento de los peces.

El análisis de las ecuaciones relacionadas al cálculo de caudal basado en la teoría del balance de masas, a partir de Chapra (2008), empieza con el siguiente modelo de balance de masas:

$$V * \frac{dC}{dt} = Q * C_{in} + P - Q * C_{out} - R$$

Donde:

V: Volumen (m^3)

Q: Caudal ($m^3 h^{-1}$)

C: Concentración del compuesto ($g m^{-3}$). C_{in} y C_{out} , concentraciones de entrada y salida, respectivamente. Se considera que el volumen se encuentra completamente mezclado, por tanto, se asume que $C = C_{out}$

dC/dt : tasa de acumulación o de remoción del compuesto, ($g m^{-3} h^{-1}$)

P: tasa de producción del compuesto, ($g h^{-1}$)

R: tasa de reducción del compuesto, ($g h^{-1}$)

Con el correspondiente análisis dimensional para la ecuación mostrada:

$$m^3 * \frac{g}{m^3 \cdot h} = \frac{m^3}{h} * \frac{g}{m^3} + \frac{g}{h} - \frac{m^3}{h} * \frac{g}{m^3} - \frac{g}{h}$$

La ecuación anterior expresa la tasa de cambio en la concentración de un producto presente en un volumen de agua, que puede ser acumulación o remoción, considerando un determinado límite de volumen de control, que es igual al flujo másico de entrada del compuesto al volumen de control considerado, más la tasa de producción del compuesto

dentro del volumen V, menos el flujo másico de salida del compuesto a través de los límites de control, menos la tasa de consumo del compuesto dentro del volumen. En acuicultura bajo condiciones estables, para realizar el cálculo del caudal (Q), se considera un equilibrio entre lo que ingresa y lo que sale del sistema. Es decir, el compuesto considerado, no se acumula ni se reduce, ello significa que $dC/dt = 0$. Si se considera este valor, la Ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$0 = Q * C_{in} + P - Q * C_{out} - R$$

Despejando el caudal (Q), se tiene:

$$Q = \frac{(R - P)}{C_{in} - C_{out}} - \frac{(P - R)}{C_{out} - C_{in}}$$

2.3.3. Dimensionamiento de los componentes del sistema RAS, con aplicación de la teoría del Balance de Masas

Los cálculos para el dimensionamiento de los componentes de un RAS, basados en la teoría del balance de masas, ha sido planteado por varios autores (Lekang, 2007; Gu, 2019; Toshio, 2017; Huguenin y Colt, 2002) para la definición de volúmenes y de la geometría de los tanques de cultivo, sedimentadores, biofiltros y de otros elementos que forman parte del RAS.

Una parte importante de la presente investigación, ha sido trabajado tomando en cuenta la metodología expuesta en el artículo científico de Losordo y Hobbs (2000), luego de haber revisado numerosas publicaciones, debido a la forma ordenada y secuencial como presenta el procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de los elementos del RAS.

2.3.3.1. Definición del tamaño del tanque y la biomasa

El funcionamiento de un sistema RAS, con ello la calidad del agua circulante, en gran medida está en función del tamaño y la hidrodinámica de los tanques, la biomasa en el tanque, tasa de alimentación y estrategia de alimentación, la remoción de los desechos y la eficiencia en el tratamiento del efluente en el sistema. Para empezar, se debe ingresar la información sobre dimensiones del tanque y la carga de biomasa.

Para la exposición sobre la metodología, se ha considerado un tanque de profundidad y radio conocidos. Con estos datos el volumen del tanque es determinado. Luego se establece la máxima densidad de carga, según la especie y sistema de cultivo elegido. Se ingresa el dato de la población de organismos a criar en el tanque, en una magnitud tal que, al alcanzar su tamaño comercial individual, permitirá lograr la producción total esperada, con tamaños apropiados para el mercado. Anotándose que la calidad y cantidad de los alimentos es específica a la especie y a su estadio de desarrollo (Jover et al., 2003).

Es importante anotar que los parámetros señalados pueden tener variaciones sustanciales por el factor alimento y el factor alimentación: los alimentos extruidos, altamente energéticos, son los recomendados para trabajar en sistemas RAS. La alimentación tiene aspectos específicos relacionados con la frecuencia de alimentación (número de raciones), la hora de entrega de los alimentos, incluso con la luminosidad. De ahí el término de “estrategia”, para alcanzar lograr una adecuada metodología de alimentación, (Godoy-Olmos et al., 2022; Assis et al., 2018; Li et al., 2022). La alimentación más frecuente y por periodos extendidos en las 24 horas del día, permiten evitar valores extremos (máximos) en las gráficas de excreción horaria de desechos, disminuyendo la presencia de “picos” en los valores de amonio, CO₂ o de consumo de oxígeno, entre otros parámetros. Los sistemas RAS son altamente sensibles a la desintegración temprana de los alimentos o a las malas prácticas de alimentación que producen excesivas cantidades de alimento no consumido, que complican el funcionamiento de los componentes de tratamiento de agua: sedimentador y biofiltro principalmente.

2.3.3.2. Balance de masas del nitrógeno amoniacal total y dimensionamiento del biofiltro

La aplicación de las ecuaciones de balance de masas, permite realizar la estimación del flujo de agua a través del biofiltro para mantener una concentración del nitrógeno amoniacal total (NAT) en el sistema RAS, en particular en los tanques de peces, y estimar también la cantidad de agua fresca de reposición que se debe incorporar para mantener el nitrógeno de nitrato (NO₃-N) en un nivel aceptable (Losordo y DeLong, 2015; Losordo y Hobbs, 2000; Ragab et al., 2022; Tanveer, 2017).

El procedimiento para el dimensionamiento del biofiltro, empleando la hoja de cálculo, como indican Losordo y Hobbs (2000), permite determinar la cantidad de TAN que es generada en el sistema como una función de la cantidad de alimento entregado y de su

contenido de proteína. El factor “0,065” es una constante calibrada, usada para aproximar un sistema que produce nitrógeno amoniacal en una tasa de 2,5% de la cantidad de alimento entregado bajo las condiciones del sistema. En general, aproximadamente 2,0 a 3,5% del alimento ingresado por peso, se convierte en nitrógeno amoniacal (Wheaton et al., 1994). Además de la nitrificación (conversión del nitrógeno amoniacal por oxidación a nitrato por acción bacteriana) que principalmente ocurre en el biofiltro, existe otra fracción considerada como la “nitrificación pasiva”, aquella que ocurre en superficies que se encuentran en contacto permanente con el agua que fluye en el RAS, que no sea en el biofiltro. La nitrificación pasiva podría llegar a representar hasta 30% del total de nitrificación que ocurre en un sistema de recirculación (Losordo y Hobbs, 2000).

De manera similar a la nitrificación pasiva, en la mayoría de sistemas RAS existe una cantidad de desnitrificación pasiva, proceso que convierte el nitrato en nitrógeno gas, favorecida por altas concentraciones de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) y bajas concentraciones de oxígeno, en áreas donde los sólidos orgánicos pueden favorecer a tener un ambiente anóxico, con presencia de bacterias desnitrificantes. Un 10% de tasa de desnitrificación pasiva podría considerarse, en sistemas conservados de manera limpia, con buen mantenimiento, haciendo recambios generosos de agua (Losordo y Hobbs, 2000).

Siendo el nitrato el compuesto que se ubica en el extremo final del proceso de nitrificación, los niveles de N- nitrato en un sistema RAS están gobernados por la cantidad de agua “nueva” utilizada en los recambios. Al hacer estos reemplazos de agua, no solo se reduce la concentración de N- nitrato, sino de otros compuestos, por ejemplo, los relacionados con la alcalinidad, cuya concentración se incrementa de manera acumulativa (Seginer et al., 2008; Martins et al., 2009).

El dimensionamiento del biofiltro es clave para asegurar una adecuada capacidad de nitrificación al sistema RAS. La efectividad del biofiltro está determinada principalmente por el área total que ofrece el sustrato o material filtrante. La superficie que ofrece el sustrato, se mide como superficie específica y se expresa en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$. En general la tasa de nitrificación para biofiltros usados en acuicultura varía en un amplio rango, los sustratos (o medias) con valores de superficie específica de 100 a 400 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$, que a menudo tienen las tasas de nitrificación aeróbica entre 0,5 – 1,0 $\text{gTAN m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Wheaton et al., 1994). Es decir, un metro cuadrado de superficie de filtro puede oxidar 0,5 a 1,0 gramo de N- amonio total a N- nitrato, en un periodo de un día.

Drennan II et al. (2006) exponen una evaluación y calificación de los biofiltros comercialmente disponibles, en la perspectiva del fabricante y los usuarios, con criterios estandarizados. De esta manera es posible pronosticar la performance de los biofiltros y contribuir a que se puedan hacer elecciones compatibles para un mejor equipamiento. Los autores exponen sencillos cálculos de balance de masas basado en el concepto primario de (flujo x concentración = masa). Así el balance de masas el nitrógeno amoniacal total (TAN) es:

$$(TAN \text{ producido} + TAN \text{ adicionado}) - (TAN \text{ consumido} + TAN \text{ removido}) = 0$$

Por otro lado, Pham (2018), considera un modelo en el que la biopelícula está representada por la biomasa activa con una densidad constante, tal que la concentración de la biomasa activa es expresada con el término $\rho_b \phi_b$. Así el balance de masa de la concentración de la biopelícula está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d(\phi_b \rho_b)}{dt} = \eta_{lmt} r_x \phi_b \rho_b - k_{decay} \phi_b \rho_b + r_{att} C_m - r_{det} \phi_b \rho_b$$

Donde η_{lmt} es el factor límite de crecimiento (-), r_x tasa de crecimiento de la biomasa (s^{-1}), k_{decay} tasa de decaimiento de biomasa (s^{-1}), C_m es la biomasa móvil en la fase líquida (kgm^{-3}), r_{att} y r_{det} son tasas de adhesión y desprendimiento (s^{-1}) respectivamente.

Lo último, es una demostración de la aplicación del principio de conservación de la masa, y aplicación del balance de masas, en diferentes espacios del proceso de nitrificación.

2.3.3.3. Balance de masas aplicado al dimensionamiento de separadores de sólidos suspendidos en el agua

Los sólidos en los sistemas RAS están constituidos por partículas de alimento no ingeridas y por heces. La cantidad de alimento no ingerido que se convierte en sólidos suspendidos en el agua puede variar entre 20 y 50% (Gonzales-Acosta, 2012; Criollo y Sánchez-Ortiz, 2012; Wheaton, 1977). En el cálculo se requiere el valor de la concentración de sólidos suspendidos que se desea mantener como límite máximo en el tanque de peces. Otro dato necesario es la

eficiencia de remoción de sólidos en los componentes del sistema RAS: sedimentadores y/o filtros.

También los valores de eficiencia de remoción intervienen en el cálculo; la eficiencia es estimada como un porcentaje del total de desechos sólidos producidos por día. La eficiencia de remoción es definida como el porcentaje de los sólidos removidos por el componente en un único paso por éste.

Sivanandan (2013), señala que el balance de masas como principio fundamental de la ingeniería permite seguir el destino a los materiales de un lugar a otro. El concepto es de gran aplicación en tratamiento de agua, donde se considera que hay un balance entre lo que ingresa y lo que sale de una planta de tratamiento o de un proceso: “lo que viene debe igualar a lo que se va”. Que aplica bien en la determinación de la cantidad de sólidos ingresando y saliendo de los tanques de sedimentación y es también aplicado el balance de masas utilizando la remoción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) (Figura 14). El ingreso y salida de sólidos es expresado en peso (lb), biosólidos en peso por día, los sólidos totales (TSS) en mg L^{-1} , caudal o tasa de flujo en MGD, 8,34 es factor de transformación de unidades. En la determinación del balance de masas en la remoción de sólidos, se recomienda alcanzar un 10 a 15% de recuperación (esto es: balance/afluente).

$$\text{Balance} = \text{TSS}_a \times \text{Flujo}_a \times 8,34 - (\text{TSS}_e \times \text{Flujo}_e \times 8,34 + \text{biosólidos})$$

La cantidad de sólidos se calculará multiplicando la concentración (mg L^{-1}) por el flujo (MGD) por el factor de conversión 8,34, dando el resultado en lb d^{-1} .

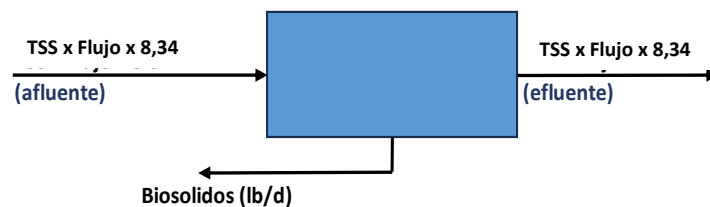


Figura 14: Diagrama esquemático de entradas y salidas en el funcionamiento de un tanque sedimentador

Fuente: Sivanandan (2013).

2.3.3.4. Balance de masas aplicado en la dinámica del oxígeno

El oxígeno es consumido tanto por los peces como también, y en gran medida, por las bacterias autótrofas (bacterias nitrificantes).

El tiempo de permanencia de los desechos en el sistema RAS, desde su producción hasta su eliminación, tiene estrecha relación con la cantidad de oxígeno disuelto en el sistema, siendo también importante el tipo de biofiltro: los biofiltros de percolación y los de discos rotatorios permiten exponer la biopelícula al contacto con el aire, captando oxígeno, mientras en los biofiltros sumergidos como los de lecho fluidizado o los de media sumergida, el oxígeno es tomado del agua, afectando – en este segundo caso - su disponibilidad en el sistema (Sedano y Anguis, 2016; Huerta-Bórquez, 2017). El balance de masas del oxígeno visto a nivel de un reactor biológico, como puede ser considerado un biofiltro (McLaughlin, 2018), es representado esquemáticamente como en la Figura 15.

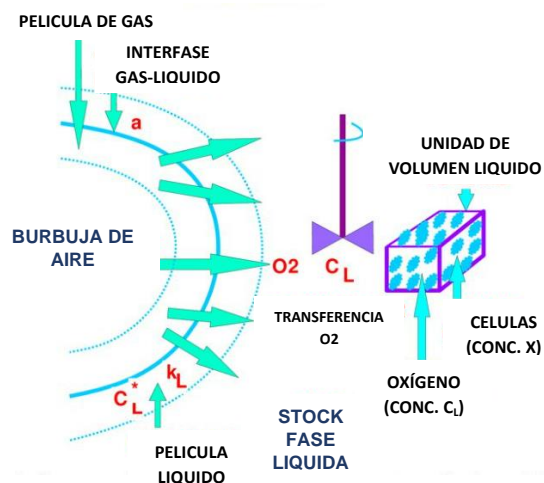


Figura 15: Balance de masas de la transferencia oxígeno en un volumen unitario de líquido, a nivel de diagrama esquemático

Fuente: McLaughlin (2018).

De la figura mostrada se puede formular una relación respecto a la tasa con que se acumula el oxígeno en un volumen referencial de líquido.

$$\text{Tasa de acumulación de } O_2 = \text{tasa neta de abastecimiento de } O_2 \text{ desde burbujas de aire} - \text{tasa de consumo de oxígeno por células}$$

$$\frac{dC_L}{dt} = k_{La} (C^*_L - C_L) - Q_{O_2}X$$

Donde: dC_L/dt en ($\text{mmol O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
 k_{La} en (h^{-1})
 C^*_L, C_L en ($\text{mmol O}_2 \text{ L}^{-1}$)
 Q_{O_2} en ($\text{mmol O}_2 \text{ g}_{\text{ peso seco células}}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
 X en ($\text{g}_{\text{ peso seco células}} \text{ L}^{-1}$)

Considerando condiciones de estado estable el primer miembro de la ecuación mostrada se hace cero.

$$dC_L/dt = 0$$

Por tanto:

$$k_{La} (C^*_L - C_L) = Q_{O_2}X$$

C_L en todos los casos es constante.

A nivel de tanques de peces, un dato importante es la cantidad de oxígeno consumido por las especies cultivadas, relacionado con el metabolismo del alimento; se considera valores entre 200 y 250 g de oxígeno por kilogramo de alimento entregado y consumido. Investigaciones en diferentes especies, diferentes estadios y diversos regímenes de alimentación han reportado valores entre 0,2 – 0,5 $\text{kgO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de alimento consumido (Wheaton, 1977; Lekang, 2007; Malone, 2013; Piedrahita, 2011).

2.4. TEORÍA HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS EN UNA RED DE TUBERÍAS

a. Conservación de la masa

Según Walker et al. (2010), el flujo de líquidos en tuberías se explica a través de la relación entre la velocidad y el área de sección transversal, denominada Ecuación de Continuidad:

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

Que lo deriva considerando un elemento de velocidad “v”, que en un intervalo de tiempo Δt , el elemento “v” recorre un espacio tal como $\Delta x = v \cdot \Delta t$. Así el volumen ΔV que atraviesa una línea de referencia transversal a la tubería en un intervalo de tiempo Δt , es:

$$\Delta V = A \cdot \Delta x = A \cdot v \cdot \Delta t$$

Aplicando ello a dos secciones transversales “1” y “2”, se tiene:

$$\Delta V = A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$$

Siendo A, el área; v, la velocidad; x, la distancia; V, el volumen y t, el tiempo (Figura 16).

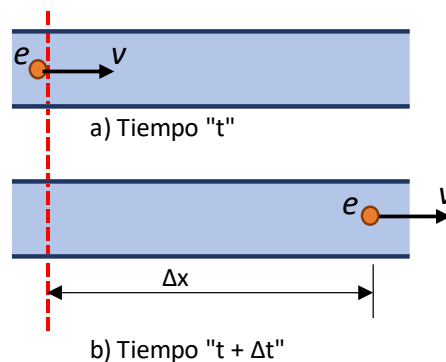


Figura 16: Flujo a una velocidad constante “v” a través de un tubo

Nota: a) en el tiempo “t”, el elemento de fluido “e” atravesando la línea punteada, b) en el tiempo “t + Δt” el elemento “e” se encuentra a una distancia $\Delta x = v \cdot \Delta t$ de la línea punteada.

Fuente: Walker et al. (2010).

La Ley de Conservación de Masa establece que la masa debe conservarse, no puede ser creada ni destruida, que significa, considerando un espacio referencial, lo que ingresa debe salir (Dawe, 2000). Expresa la continuidad del flujo de una sección a otra, mientras el fluido está en movimiento. También expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

Que expresa que, bajo condiciones de flujo estacionario, la tasa de flujo masico es constante en cualquier sección del tubo. Para fluidos de densidad constante, la ecuación de continuidad toma la siguiente forma, siendo Q la tasa de flujo del líquido.

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

b. Conservación de la energía

La conservación de energía establece que ésta no puede ser creada ni destruida, solo puede ser transformada de una a otra forma, siendo algunas de ellas: energía mecánica, energía potencial, energía cinética, energía de calor, entre otras (Dawe, 2000). La segunda Ecuación de Newton, para un fluido incompresible, puede ser dividido por la gravedad “g”, para obtener la ecuación de Bernoulli (Dawe, 2000), con la siguiente forma:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H$$

La ecuación de Bernoulli expresa el balance de energía entre dos puntos de un sistema hidráulico, típicamente entre dos puntos de una línea de flujo y proporciona la relación entre la presión “P”, la velocidad “v” y la altura sobre un plano de referencia, “z”.

Debido al principio de conservación de la energía, la ecuación de Bernoulli toma otra forma para que represente un balance de energía para un fluido en movimiento. La energía total del fluido es igual en cualquier punto de una línea de flujo, aunque las proporciones relativas en que se presenta la energía puede variar, tal como lo demuestra la siguiente ecuación, para los hipotéticos puntos 1 y 2:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Según la ecuación mostrada, cualquier pérdida de energía, representará una reducción de la presión o de altura. Así se entiende y se pueden realizar los cálculos que explican los diferentes parámetros a mencionarse en el capítulo de metodología

del presente documento, como práctica en el diseño de redes de distribución de los sistemas de recirculación de agua para acuicultura.

c. Pérdidas de carga en tuberías

La pérdida de carga en tuberías causada por fricción ha sido ampliamente estudiada por su importancia en el dimensionamiento de redes de tuberías. Walker et al. (2010), explican las dos ecuaciones más usadas para el cálculo de pérdidas de carga: la ecuación de Darcy-Weisbach y la de Hazen-Williams.

La ecuación de Darcy-Weisbach, tiene la forma de:

$$h_{f,DW} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0,0826 \frac{Q^2}{D^5} Lf$$

Donde $h_{f,DW}$ = pérdida de carga por fricción, expresado en m; f = constante de fricción sin unidades; L longitud de tubería, en m; D = diámetro de tubería en m; $V = Q/A$ = velocidad media de flujo ($m\ s^{-1}$), Q = descarga ($m^3\ s^{-1}$), A = área de la sección transversal de la tubería en m^2 ; y g = aceleración causada por la gravedad ($m\ s^{-2}$). Agrega Dawe (2000), que esta es la ecuación básica para el cálculo de pérdida de carga hidráulica debido a la fricción en tuberías.

Para flujo laminar, la ecuación de Darcy, indica que el factor de fricción depende del número de Reynolds (Re), mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{R}$$

La ecuación de Hazen-Williams, la más empleada en el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías, tiene la siguiente forma:

$$h_{f,HW} = 10,654 \left(\frac{Q}{D}\right)^{0,54} \frac{1}{D^{4,87}} L$$

Donde $h_{f,HW}$ es la pérdida de carga según Hazen-Williams.

Lo que se observa es que, a mayor rugosidad y mayor longitud de tubería, mayor será la energía perdida. Debe subrayarse la relación de la tasa de flujo con el

diámetro de tubería en una dependencia altamente no-lineal, lo cual en la práctica induce a aumentar los diámetros para reducir gastos de energía en el transporte del líquido.

En Dawe (2000), la ecuación de Hazen-Williams, también se muestra en la siguiente forma:

$$v = kCR^{0,63}S^{0,54} \quad \text{o} \quad h_L = \frac{6,79L}{D^{1,16}} \left(\frac{v}{C}\right)^{1,85}$$

Donde, “v” representa la velocidad media, “C” es el factor de rugosidad relativa, “R” es el radio hidráulico, “S” es la pendiente de la línea de gradiente de energía y “k” es un factor dependiente de las unidades que se emplean 0,849 para m s⁻¹ y m.

2.5. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL RAS

2.5.1. Tanques de peces

Partiendo del hecho que la forma geométrica circular es más eficiente en la relación área/perímetro, por tanto menor resistencia por rozamiento en las paredes al flujo de agua, como también la distribución de fuerzas de presión hidráulica sobre las paredes, pero también en el aspecto constructivo, la forma que menor material demandaría en su construcción para obtener una estructura de mayor resistencia al empuje radial debido al tirante de agua, es que en el presente trabajo se eligió tanques de forma circular.

Un estudio detallado sobre la distribución de velocidades de flujo en tres dimensiones ha sido reportado en Oca y Masalo (2012), muestra una adecuada circulación del agua, con uniformidad en planta como en vista de elevación, en los tres ejes. Por ello y siguiendo el mismo modelo de ingreso y salida de agua, tangencial en la entrada y central por el fondo respectivamente (Figura 17), se adoptó el mismo sistema de entrada y salida de agua con tanques de mediano tamaño. El movimiento del agua tiene acción sobre el efecto de autolimpieza, la distribución uniforme de la población, el adecuado uso del espacio. En los tanques de gran dimensión, los de tamaño comercial, se tienen dificultad para lograr condiciones uniformes (Gorle et al., 2018), requiriéndose herramientas computacionales para realizar un adecuado estudio de su hidrodinámica.

Como es mencionado por Oca y Masalo (2012), al ingresar el agua tangencialmente al tanque, en combinación con la salida a través de un tubo central captando agua de fondo, se produce un movimiento giratorio de la masa de agua alrededor del tubo central, siendo la tasa de flujo de agua a través del tanque un factor importante en la magnitud de las velocidades unitarias en el tanque. Ante la ausencia de estudios sobre la forma de tanques y velocidades de agua que mejor convengan a la especie *A. scapularis*, se adoptó la forma circular, por las razones señaladas, y en adición a fin de generar una adecuada mezcla del agua para asegurar uniformidad en su calidad en tres dimensiones.

Ha sido observado que el patrón de flujo de vórtice que se presenta en los tanques de peces favorece la distribución uniforme del oxígeno disuelto en el agua, e incrementa la acción de autolimpieza (Burley y Klapis, 1985). Todo ello nos llevó en el presente estudio a elegir la geometría, dimensiones de tanque y densidad de carga: tanques cilíndricos con fondo plano y 2,4 m de diámetro, el ingreso de agua tangencial a la pared del tanque y la salida desde el fondo.

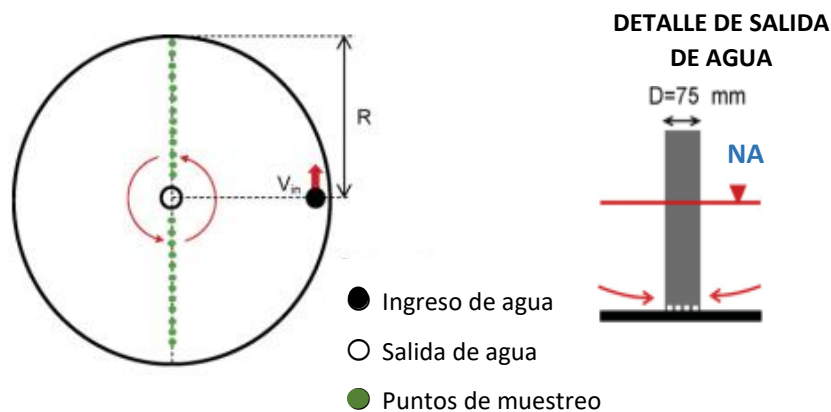


Figura 17: Vista en planta del tanque típico de peces, con entrada tangencial y salida central desde el fondo

Fuente: Oca & Masalo (2012).

2.5.2. Equipo de bombeo

Los equipos de bombeo en los sistemas RAS cumplen la vital función de hacer circular el agua a través de los diferentes componentes para que éstos cumplan la función para la que fueron incorporados en el conjunto.

Al mismo tiempo que conducen el agua a los tanques de peces llevando el oxígeno necesario y removiendo los desechos sólidos y disueltos hacia los elementos de tratamiento de agua del RAS.

Los sistemas RAS generalmente funcionan con bombas centrífugas (un tipo de bomba radial) que generan un empuje cuando el agua en el cabezal de la bomba adquiere una alta velocidad, siendo diseñadas para funcionar a presión moderada a alta, en varios rangos de flujo y construidos en función al trabajo y al tipo de fluido - agua de mar en este caso - (Huguenin y Colt, 2002; Timmons et al., 2009; Malone, 2013). En la mayoría de las aplicaciones RAS, se prefiere una bomba centrífuga de gran caudal y de baja capacidad de elevación (baja presión) para optimizar el consumo de energía, privilegiando la cantidad de agua que se mueve sobre la altura de elevación. Los diseños de RAS más antiguos se basaban en presiones de recirculación del orden de 25 pies (8 m), mientras que la mayoría de los diseños de RAS modernos apuntan a una presión de recirculación de aproximadamente 10 pies (3 m) (Malone, 2013). Estas consideraciones se aplicaron en la elección de la bomba para el presente estudio.

– **Diámetro económico de la tubería de impulsión**

El diseño de una red de tuberías para la conducción de agua, requiere de la adecuada selección del diámetro de ellas, para un funcionamiento eficiente en costos, asegurando las presiones y tasas de flujo requeridas. Por ello se han desarrollado una serie de modelos y ecuaciones empíricas, que se adecuan a la serie de situaciones particulares, de características de fluidos, como de materiales empleados para fabricar la tubería. Las ecuaciones más simples establecen una relación proporcional directa entre el diámetro económico y la tasa de flujo volumétrico o de descarga, $m^3 s^{-1}$, afectado por una constante “k” que incorpora el costo de la tubería, su instalación, operación y los costos de mantenimiento; es el caso del Modelo de Bedjaoui-Anchour-Bouziane que establece $D = 1,27 (Q)^{1/2}$, donde D es diámetro de tubería en m, Q es la descarga en $m^3 s^{-1}$; o el Modelo del Cubo de Jack $D = 0,25 (Q)^{0,5}$ (para descargas menores a $100 gal min^{-1}$) (Arumugan et al., 2021). Otros modelos incorporan la variable “tiempo de funcionamiento del sistema”, entre ellos el Modelo de Forchheimer:

$$D = 1,46 (\varphi)^{0,25} (Q)^{0,5}$$

Siendo D diámetro en m, Q el flujo volumétrico en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, y φ es el número de horas de trabajo por año (sobre 8 760) (Arumugan et al., 2021).

– **Tiempo de retención hidráulica**

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es un concepto de hidráulica en esencia, que está mayormente asociado al funcionamiento de plantas de tratamiento de aguas industriales y/o domésticas, por cuanto el tiempo que permanece un volumen de agua en un sedimentador o un digestor, tiene efecto directo sobre el proceso físico y/o biológico que se pretende tenga lugar. El tiempo de retención fue definido por la relación entre el volumen de la estructura y el caudal de agua que ingresa. También aplicado a sistemas naturales, así Barrera-Herrera et al. (2020), señalan que el TRH es un parámetro que tiene efecto sobre la estructuración biológica y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, dado que está determinado por la entrada y salida de agua del sistema. También aplicado en la crianza de peces, (Casanova y Mejía, 2013) para evaluar el efecto de la intensidad de reemplazo de agua, empleando sistemas RAS sobre el bienestar de los peces.

2.5.3. Filtro de arena presurizada

Se trata del tipo de filtros que utilizan alta presión, para reducir el área y volumen de material filtrante y aumentar la tasa de filtrado. Consisten de un contenedor que alberga el material filtrante – un balón, una electrobomba que cumple la función de generar la presión necesaria de filtrado y un cabezal que se ubica en la parte superior del balón cuya función es comandar la dirección de flujo de agua. Estos equipos funcionan bajo los mismos principios de un filtro de arena, con la diferencia que el agua percola a una mayor tasa de flujo debido a la presión que genera la electrobomba.

El procedimiento en los cálculos de dimensionamiento, corresponde al de filtración de agua en lechos porosos, con aplicación de la Ley de Darcy que estudia las propiedades del flujo de agua a través de un lecho poroso como la arena, considerándose las variables caudal Q dado en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, el área de la sección transversal del filtro A dado en m^2 , la velocidad del flujo está dada en m s^{-1} , la diferencia de niveles o de carga o de presión que es Δh y la longitud del estrato de filtración dado por Δl (Duran-Pinzón et al., 2018). La mayoría de fabricantes expresan el diámetro de los filtros en pulgadas y la tasa de filtración en galones por minuto

por pie cuadrado (gpm pie^{-2}) o en metros cúbicos por hora y por metro cuadrado ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$); el diámetro comercial del cilindro (d) y las tasas de filtración más utilizadas en el mercado y las equivalencias entre las unidades inglesas y sistema métrico decimal se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Diámetros comerciales de filtro y tasas de filtración

Diámetro		Tasa de filtración	
(pulg.)	(m)	gpm pie^{-2}	$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$
18	0,46	15	36,67
24	0,61	20	48,89
30	0,76	25	61,11
36	0,91	30	73,34
48	1,22		

Fuente: Martínez (2001).

Es importante señalar que el empleo de diámetros de filtro menores a los técnicamente recomendados, se asocia con elevadas pérdidas de carga nominal del filtro, reduciendo la presión en tuberías terminales, también la limpieza de los filtros requiere una mayor frecuencia, y la calidad de filtrado disminuye (Martínez, 2001). De acuerdo a los niveles de concentración de sólidos, Nakayama y Bucks (1986), han recomendado tasas de filtración, según se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Tasa de filtración recomendadas en función de niveles de sólidos suspendidos en el agua

Nivel de sólidos en suspensión	Concentración (ppm)	Tasa de Filtración (gpm pie^{-2})
Leve	0 - 10	25 - 30
Moderado	10 - 100	20 - 25
Severo	100 - 400	15 - 20

Fuente: Nakayama y Bucks (1986).

Este tipo de filtros son empleados en el tratamiento de agua en sistemas de riego, pero también en el mantenimiento de la calidad de agua de piscinas, y contiene como material filtrante arena de cuarzo, para eliminar impurezas con tamaño mayor a 20μ . Los tanques son fabricados de polietileno y cuentan con una válvula selectora de 6 vías o posiciones que

permite ejecutar – a voluntad del operador – el filtrado, retro lavado y mantenimiento del equipo. Estos equipos trabajan a una presión entre 0,4 – 0,8 Kg cm⁻², con un máximo de 1,5 Kg cm⁻²; y a una tasa máxima de filtración de 50 m³ m⁻² h⁻¹ (Vulcano S.A., 2022).

Vulcano S.A. (2022), en su Catálogo de Productos, recomienda en las especificaciones técnicas de sus productos, una serie de parámetros de utilidad para el dimensionamiento de los equipos de filtrado y la potencia de la electrobomba correspondiente (Tabla 4).

Tabla 4: Tamaños comerciales de filtros de arena y parámetros de funcionamiento

Modelo	Diámetro interior	Área de filtrado	Velocidad de filtrado	Caudal de filtrado	Potencia electrobomba
	mm	m ²	m ³ m ⁻² h ⁻¹	m ³ h ⁻¹	HP
1	280	0,062	50	3,10	0,33
2	430	0,145	50	7,25	0,50
3	530	0,221	50	11,05	0,75
4	660	0,342	50	17,10	1,00 – 1,25
5	740	0,430	50	21,50	2,00

Fuente: Vulcano S. A. (2022).

Barraque (1979), refiere que el agua puede filtrarse sin un acondicionamiento previo, como ocurre en los sistemas RAS, ante la necesidad de no agregar químicos floculantes al agua de cultivo en el que solo se pretende reducir el contenido de sólidos suspendidos. Señala también, en el funcionamiento de estos filtros que la excesiva carga de materiales retenidos en su lecho produce un atascamiento, con reducción en la calidad del agua, requiriéndose realizar el lavado del material filtrante para devolverle sus cualidades iniciales y en caso extremos proceder con el reemplazo del material. Asimismo, el buen funcionamiento del filtro dependerá de una distribución uniforme del agua en toda la sección transversal del material filtrante, la regulación del caudal, y la oportunidad de lavado.

2.5.4. Filtro biológico percolador

Los filtros que funcionan por actividad microbiana, denominados biofiltros o filtros biológicos, son equipos incorporados en los sistemas RAS, exclusivamente para ejercer control de los productos nitrogenados disueltos, principalmente amonio, que se generan a partir del metabolismo de la proteína en peces (Piedrahita et al., 2011; Drennan II et al., 2006).

Además, en experiencias anteriores se ha podido confirmar las propiedades adecuadas de funcionamiento y mantenimiento de este tipo de biofiltros, que presenta parámetros medibles con buena aproximación. La secuencia de cálculos para su dimensionamiento ha sido publicada con claridad (Uzukwu et al., 2010; Losordo, 2018; Remmerswaal, 1993; Drennan II et al., 2006), y con el soporte de los conceptos teóricos y modelos matemáticos (Gujer y Boller, 1986), siendo tres los parámetros de mayor importancia para su dimensionamiento: (i) la cantidad de amonio producido en el tanque de peces, (ii) la tasa de nitrificación correspondiente a las características del biofiltro (superficie específica del sustrato) y (iii) las condiciones térmicas de funcionamiento (Vivek et al., 2015).

2.6. PEZ MARINO “CHITA”

El pez marino con nombre común Chita, y nombre científico *Anisotremus scapularis*, es una especie que se encuentra entre las cinco de mayor valor comercial que habitan las costas del Perú, distribuida desde el sur de Ecuador hasta el extremo norte de Chile. Estudios sobre su dinámica poblacional en ambiente libre y sobre su adaptación a ambientes controlados, han sido realizados por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y por el Fondo de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), lo que ha permitido tener claro que su producción comercial es viable. La conversión de datos de longitud a peso se realizó con la ecuación $W = 0,02535 L^{2,967}$, de Dionicio-Acedo et al. (2018).

Se considera al menos dos etapas en el ciclo de su producción: crianza inicial en tanques instalados en tierra y el engorde hasta su tamaño de comercialización en jaulas flotantes instaladas en el mar. Es en este esquema de producción que la presente investigación ha focalizado la parte de diseño arquitectónico y de cálculos de sustento en el diseño de los sistemas de recirculación de agua para ejecutar satisfactoriamente la primera etapa de crianza en tanques circulares con flujo abierto de agua marina.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. UBICACIÓN DEL ESTUDIO

Las instalaciones empleadas para realizar del presente trabajo estuvieron ubicadas en el distrito La Punta, Provincia Constitucional del Callao, Perú. Predominando en la zona el clima desértico, con 168 mm de precipitación y temperatura ambiental promedio de 18 °C. Las temperaturas promedio del agua más bajas en setiembre 15,70 °C y las medias más altas llegan a unos 21 °C en el mes de febrero. Son los parámetros climáticos generales a partir de las estadísticas de CLIMATE-DATA.ORG. La Punta es un distrito ubicado en las playas del Océano Pacífico, en la costa central de Perú, a menos de 10 m.s.n.m. (Figura 18).

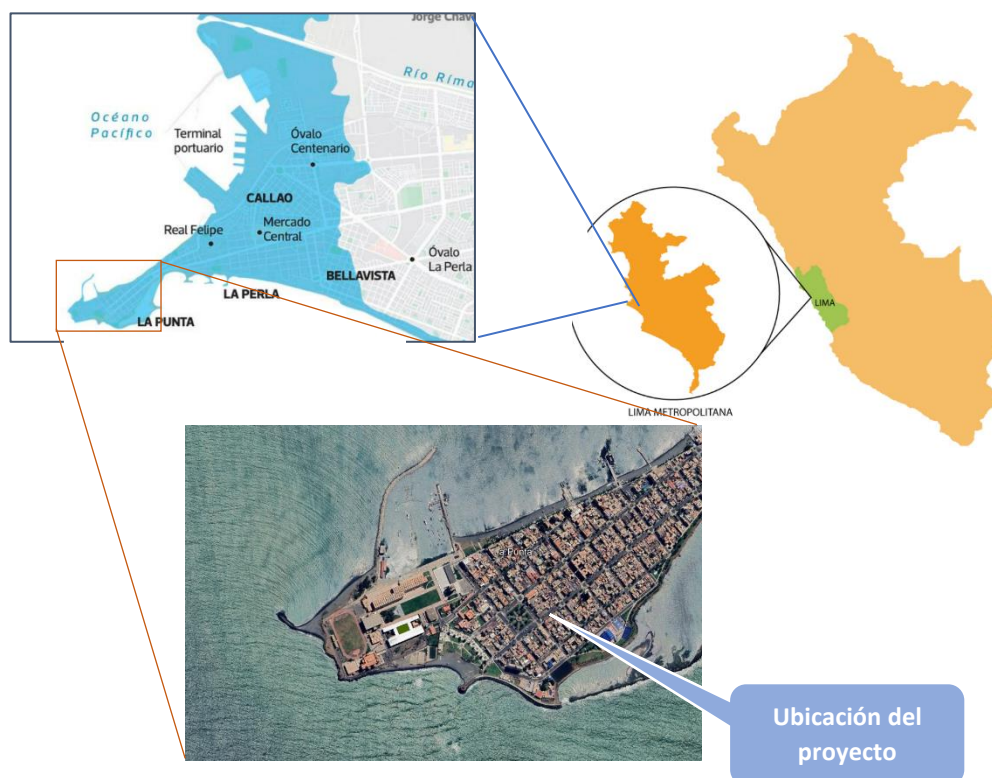


Figura 18: Ubicación del laboratorio de investigación en La Punta, Callao

La investigación se realizó como parte del proyecto “Adaptación al cultivo marino en jaulas flotantes de *Anisotremus scapularis* Chita: formulación de alimento y análisis de crecimiento – hacia un producto con trazabilidad”, siendo la entidad ejecutora la Universidad Nacional Agraria La Molina, con financiamiento del Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura (PNIPA), código de proyecto: PNIPA-ACU-SIADE-PP-000070. El proyecto comprendió dos etapas: la primera consistente en la pre cría de los peces hasta una talla y resistencia apropiados para su traslado de los tanques instalados en tierra (en un sistema RAS) a las jaulas flotantes en el mar y la segunda etapa consistió en la crianza en jaulas flotantes instaladas en el mar, con exposición a las condiciones oceanográficas propias del mar en las costas del distrito La Punta, muy próximo a la Islas San Lorenzo y El Frontón. El proyecto global duró formalmente 17 meses, realizándose el trabajo de experimentación con observaciones a detalle y colecta de datos – en las instalaciones del RAS con tanques en tierra – en el periodo comprendido entre febrero a abril 2020.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. Manejo de la población del pez marino “chita”, empleada en el estudio

Los peces empleados para la investigación, ante la falta de alevinos nacidos en laboratorio, fueron capturados en playa Arica, distrito de Lurín – Lima ($12^{\circ}18'20.85''$ S y $76^{\circ}50'57.06''$ W); para luego ser trasladados en bolsas de polietileno de 25 L, llenas con 1/3 de agua y 2/3 de oxígeno puro. Una vez llegados al laboratorio en el distrito de La Punta, fueron adaptados a las condiciones de calidad de agua de un sistema de recirculación de agua (RAS) y de manera gradual adaptados también a consumir alimento balanceado en reemplazo de su alimento en ambiente natural.

Es materia de la presente investigación la definición de la geometría y dimensionamiento de los principales elementos del sistema RAS empleado, de manera tal que la población de peces en condiciones controladas, puedan disfrutar de las mejores condiciones de hábitat - calidad de agua, y que les permita hacer un buen consumo y conversión del alimento entregado.

Aspectos importantes que se han tomado en cuenta para la caracterización de la población de peces y de su relación con los parámetros de funcionamiento del sistema RAS (Heinsbroek, 1990), son:

- Relación longitud – peso de la especie $W = a L^b$
- Tasa de consumo de alimento $FR = (F/BW.d)*100$
- Contenido de proteína en el alimento P_F
- Tasa de conversión de alimento $FC = F/(W_t - W_o)$
- Tasa de crecimiento $GR = ((W_t - W_o)/BW*d)$
- Tasa de producción de amonio $TE_{xc} = gN-NH_4/kgBW*d$

Siendo, W: peso del pez en gramos, L: longitud total del pez en cm, F: cantidad de alimento en g, BW: peso corporal en g, d: tiempo en días, TExc: tasa de excreción de N de amonio total en g por día.

El crecimiento de peces y consumo de alimento en los tanques fue monitoreado cada 15 días tomando muestras aleatorias para determinar las medidas de peso y longitud. La cantidad de alimento consumido en tres raciones diarias, fue contabilizado diariamente. El alimento empleado fue de tipo extruido balanceado con 55% de proteína total (PT).

Los datos iniciales de la población empleada en la investigación, se muestran en la Figura 19.

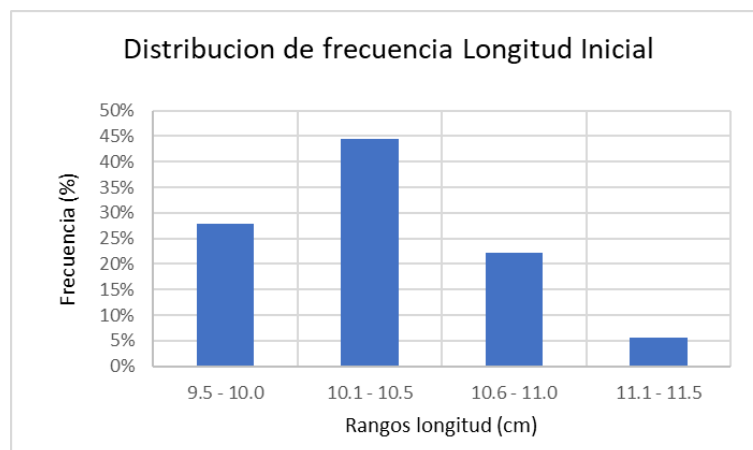


Figura 19: Distribución de frecuencia (%) de tamaños, medido como Longitud Total (LT) en cm

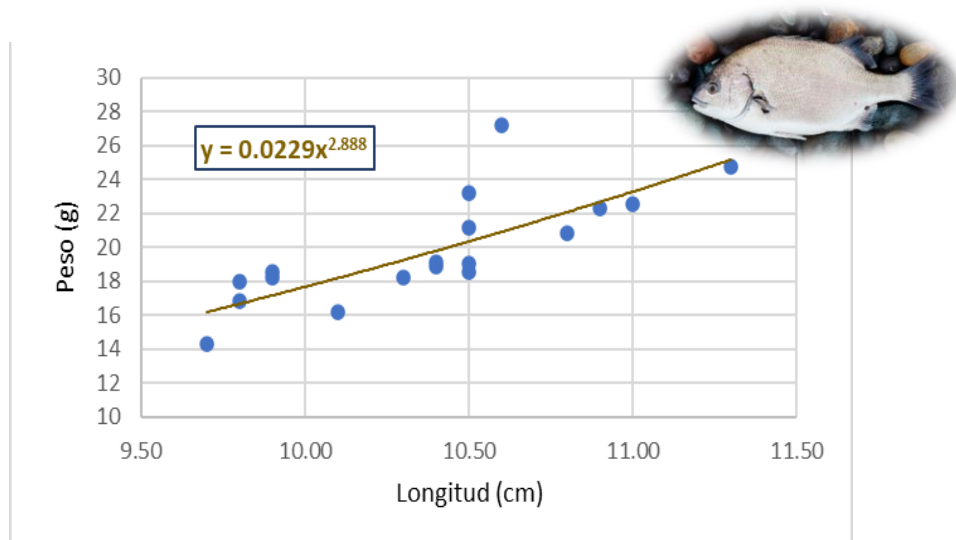


Figura 20: Relación longitud total (LT) en cm de los especímenes con el peso (W) en g

El tamaño inicial de los peces fue uniforme, con longitudes en el rango 9,7 y 11,3 cm, con pesos entre 14,32 y 27,20 g. La distribución de frecuencia de la longitud total se muestra en la Figura 19, y la relación longitud total (cm) y el peso correspondiente (g), en la Fig. 20, descrita por la ecuación:

$$W = 0,0229L^{2,89}$$

3.2.2. Características y distribución general del sistema RAS

El dimensionamiento de los componentes del sistema RAS se realizó de acuerdo con los principios del balance de masa descrito por varios autores (Timmons et al., 2009; Geankoplis, 1998; Olivares, 2012; Lekang, 2007).

El sistema RAS estaba compuesto por tres tanques de peces de 2,40 m de diámetro y 1,00 de profundidad, con un tirante de agua 0,85 m. Los tanques presentaban dos ingresos de agua: un flujo de agua principal procedente de la electrobomba (P2) con tubería PVC de diámetro de 2” y un flujo de agua secundario procedente del sistema de enfriamiento Chiller (CH) con tubería de diámetro de 1 ½”; así mismo, los tanques estaban provistos de una salida o desagüe (Figura 21) consistente en un tubo central de PVC con diámetro 3”.

La red de recolección de agua de los tanques, su paso por los filtros y bombas hacia la distribución de agua, se diseñó de manera que se tuvo tres (03) tramos de tuberías: el primer tramo, comprendió la recolección de agua efluente de los tres tanques de peces (T1, T2 y

T3) a través de un tubo PVC de 3” de diámetro, que va hacia el sedimentador de placas paralelas (SP). Junto a la zona de entrada del sedimentador de placas se instaló un separador de espuma ‘Skimmer’ (SK) que succionaba un caudal parcial para tratarlo y luego reingresarlo a la misma ubicación, constituyendo, en conjunto, un primer tramo de descarga y tratamiento mecánico.

El segundo tramo – estrictamente de succión – comprendió en los flujos de succión de las dos electrobombas centrífugas P1 y P2, en un sistema presurizado, donde la bomba P1 succiona una porción del flujo de salida del sedimentador de placas (SP) y la bomba P2 succiona la porción restante del flujo del sedimentador junto con el caudal de salida del biofiltro percolador (BP), estas bombas alimentan tanto el sistema de tratamiento de agua como los tanques de cultivo de peces.

El tercer tramo consiste en los flujos de entrada a los diferentes componentes de tratamiento de agua procedentes de las dos electrobombas. La bomba P1 reparte su flujo en dos partes, el primero redirigido al sumidero 1, generando un retorno de agua, y el segundo flujo ingresa al filtro de arena (FA). El agua efluente del filtro de arena se separó en dos, una parte se redirigió al tanque sumidero 1, generando un segundo retorno, y la otra parte de flujo ingresa al biofiltro, mezclándose con el flujo procedente de la otra bomba (P2). La bomba P2 descarga el flujo en tres partes, una primera consiste en un retorno de agua en el sumidero 2 (S2), el segundo flujo alimenta al biofiltro percolador (BP) mezclándose con el flujo procedente del filtro de arena (FA) y el tercer flujo alimenta al sistema de enfriamiento ‘chiller’ (CH) y al filtro UV (UV), para luego ingresar a los tanques de peces.

DIAGRAMA DE FLUJO EN VISTA EN PLANO DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN MARINO

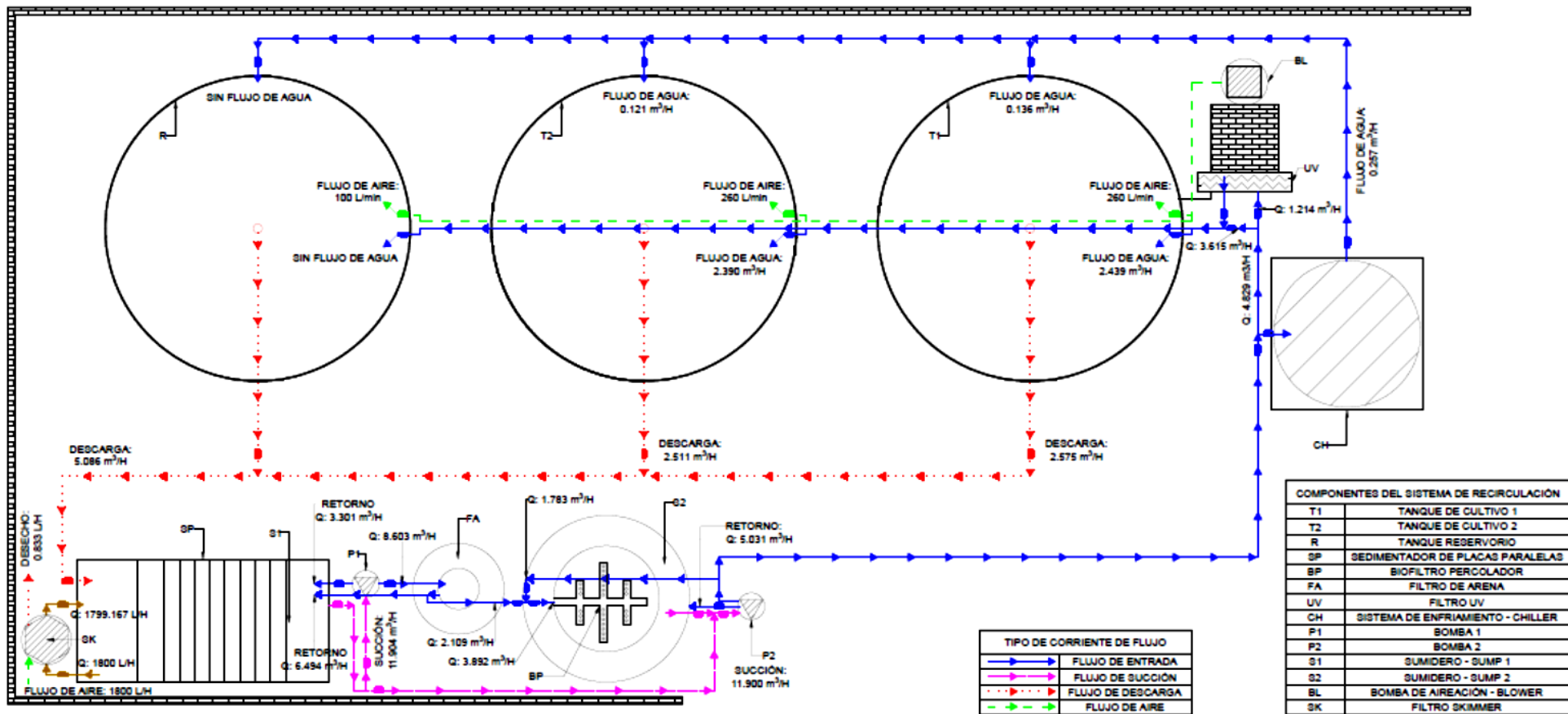


Figura 21: Diagrama del flujo de agua en una vista en planta de la distribución general del sistema RAS

Los retornos mencionados tipo ‘by pass’ cumplen la finalidad de regular los “caudales de trabajo” de algunos elementos del sistema RAS, como es el caso de las dos electrobombas centrífugas (P1 y P2), el filtro de arena (FA), el biofiltro (BP), lámpara de luz ultravioleta (UV).

Un componente importante para el funcionamiento del RAS, es el sedimentador de placas paralelas, ubicado inmediatamente a la salida de los tanques de peces para evitar la desintegración de los sólidos por acción de la turbulencia de flujo del agua en tuberías, accesorios o eventualmente al interior de las electrobombas.

Además, se consideró una red de tuberías para la conducción de aire a presión para mantener los niveles de oxígeno en los tanques de cultivo, que consistió en una tubería de 1” y 1/2” que tiene su punto de partida en un soplador de aire o Blower (BL); el aire fue distribuido en cada tanque mediante una manguera con microporos para maximizar la transferencia de gases en la interfase agua – aire, (Lekang, 2007).

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. Información previa sobre capacidad del sistema RAS y rendimiento proyectado

El sistema de recirculación fue proyectado para alcanzar parámetros de funcionamiento similar a los de una producción comercial piloto escalable, durante un periodo que podría denominarse de “Crecimiento Inicial” en tierra, en el proceso de crianza del pez marino (*Anisotremus scapularis*), que consistió en llevar los alevines logrados en laboratorio hasta que alcancen un tamaño que asegure la resistencia de los peces, jóvenes aún, a las condiciones oceanográficas del lugar de instalación de las jaulas flotantes en el mar, donde se desarrolla el proceso de engorde hasta el tamaño comercial adulto. El ciclo se ilustra en la Figura 22.

Bajo este esquema de funcionamiento del proyecto en su ciclo completo, se realizaron los cálculos de dimensionamiento de los diferentes componentes del RAS, en función a lo requerido para poner en funcionamiento una jaula demostrativa en el mar; es decir, tamaño de peces y número a estabular en la jaula de tamaño comercial.

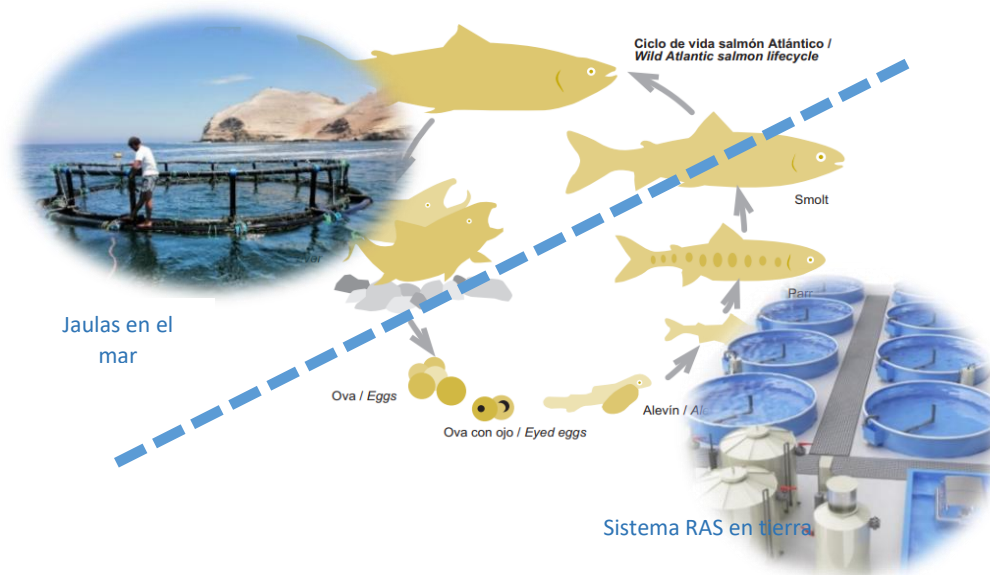


Figura 22: Ciclo de crianza de especie marina: sistema RAS en edades tempranas y jaulas instaladas en el mar, hasta tamaño adulto

Fuente: Adaptado de Nieto et al. (2010).

Tabla 5: Cálculo de población requerida para la jaula flotante en el mar

Cálculo de población		
a.	Talla mínima captura - según norma (cm)	24
b.	Talla mínima cosecha en jaula (cm)	24
c.	Peso mínimo de captura - en gramos	316
d.	$W = 0,02535 L^{2,967}$	
e.	Diámetro de jaula (m)	8,00
f.	Área de jaula (m ²)	50,27
g.	Altura total jaula (m)	5
h.	Altura útil jaula (m)	4
i.	Volumen total jaula (m ³)	251,33
j.	Volumen útil jaula (m ³)	201,06
k.	Densidad final jaula (kg m ⁻³)	5
l.	Peso individual cosecha - jaula (g)	316
m.	Biomasa a la cosecha (kg/jaula)	1 005
n.	Nro. peces en cosecha/jaula (unidades)	3 186

El cálculo de la población requerida para el sistema de recirculación se basó en una densidad de carga de 5,0 kg m⁻³ al final de la etapa II de engorde en jaula (con peso individual 316 g/pez) (Tabla 5), considerando el tamaño final de los peces al término de la etapa en el sistema RAS en 23 g/pez. Así mismo se consideró una mortalidad del 10 % durante esta

etapa inicial. La población a la siembra en el sistema RAS fue calculada entonces en 3 717 peces (Tabla 6).

Tabla 6: Cálculos de sustento para el dimensionamiento de los tanques del sistema RAS

Etapa de crecimiento en RAS. Etapa I		
o.	Nro. final peces (n + 5%)	3 345
	Talla inicial, (cm)	10,38
	Peso inicial, (g)	26,24
q.	Talla final, (cm)	14,65
r.	Peso final, (g)	72,95
s.	Numero de tanques	3
t.	Supervivencia (%)	90
u.	Nro. inicial peces en RAS (unidades)	3 717
v.	Densidad final (kg m ⁻³)	25
w.	Biomasa final (kg)	244
x.	Volumen total de tanques (m ³)	9,8
y.	Volumen x tanque (m ³)	3,3
z.	Tirante útil "y" (m)	0,75
aa.	Radio de tanque (m)	1,18
ab.	diámetro de tanque (m)	2,35
	Redondeando a valor redondo inmediato superior	2,40

Quedando así definido el tamaño de los tanques de peces en 3 unidades, de 2,40 m de diámetro cada uno, como lo necesario para que funcione una jaula de 8,0 metros de diámetro a plena capacidad (Figura 23).

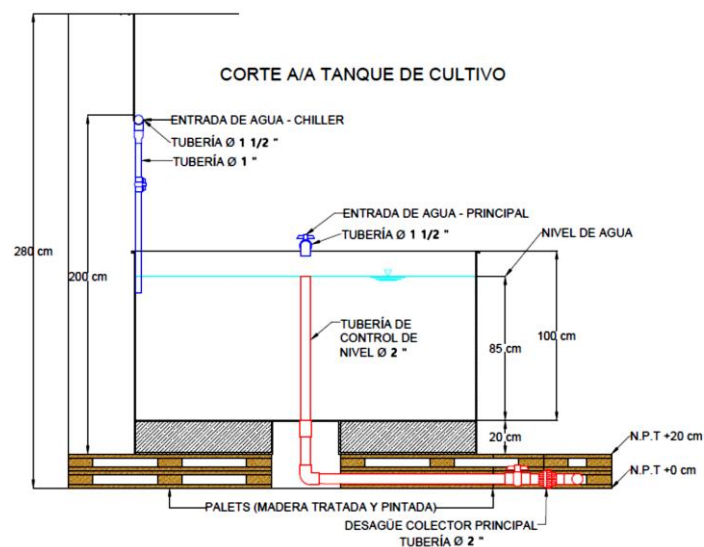


Figura 23: Vista lateral del tanque de cultivo propuesto para el sistema RAS marino

3.3.2. Características y distribución general del sistema RAS

El dimensionamiento de los componentes del sistema RAS se realizó de acuerdo con los principios del balance de masa descrito por varios autores (Timmons et al., 2009; Geankoplis, 1998; Olivares, 2012; Lekang, 2007). El sistema RAS estaba compuesto por tres tanques de peces de 2,40 m de diámetro y 1,00 de profundidad, con un tirante de agua 0.85 m. Los tanques presentaban dos ingresos de agua: un flujo de agua principal procedente de la electrobomba (P2) con tubería PVC de diámetro de 2" y un flujo de agua secundario procedente del sistema de enfriamiento Chiller (CH) con tubería de diámetro de 1 ½"; así mismo, los tanques estaban provistos de una salida o desagüe (Figura 23) consistente en un tubo central de PVC con diámetro 3".

La red de recolección de agua de los tanques, su paso por los filtros y bombas hacia la distribución de agua, se diseñó de manera que se tuvo tres (03) tramos de tuberías: el primer tramo, comprendió la recolección de agua efluente de los tres tanques de peces (T1, T2 y T3) a través de un tubo PVC de 3" de diámetro, que va hacia el sedimentador de placas paralelas (SP). Junto a la zona de entrada del sedimentador de placas se instaló un separador de espuma 'Skimmer' (SK) que succionaba un caudal parcial para tratarlo y luego reingresarle a la misma ubicación, constituyendo, en conjunto, un primer tramo de descarga y tratamiento mecánico.

El segundo tramo – estrictamente de succión – comprendió en los flujos de succión de las dos electrobombas centrifugas P1 y P2, en un sistema presurizado, donde la bomba P1 succiona una porción del flujo de salida del sedimentador de placas (SP) y la bomba P2 succiona la porción restante del flujo del sedimentador junto con el caudal de salida del biofiltro percolador (BP), estas bombas alimentan tanto el sistema de tratamiento de agua como los tanques de cultivo de peces.

El tercer tramo consiste en los flujos de entrada a los diferentes componentes de tratamiento de agua procedentes de las dos electrobombas. La bomba P1 reparte su flujo en dos partes, el primero redirigido al sumidero 1, generando un retorno de agua, y el segundo flujo ingresa al filtro de arena (FA). El agua efluente del filtro de arena se separó en dos, una parte se redirigió al tanque sumidero 1, generando un segundo retorno, y la otra parte de flujo ingresa al biofiltro, mezclándose con el flujo procedente de la otra bomba (P2). La bomba P2 descarga el flujo en tres partes, una primera consiste en un retorno de agua en el sumidero 2

(S2), el segundo flujo alimenta al biofiltro percolador (BP) mezclándose con el flujo procedente del filtro de arena (FA) y el tercer flujo alimenta al sistema de enfriamiento ‘chiller’ (CH) y al filtro UV (UV), para luego ingresar a los tanques de peces.

Los retornos mencionados tipo ‘by pass’ cumplen la finalidad de regular los “caudales de trabajo” de algunos elementos del sistema RAS, como es el caso de las dos electrobombas centrifugas (P1 y P2), el filtro de arena (FA), el biofiltro (BP), lámpara de luz ultravioleta (UV).

Un componente importante para el funcionamiento del RAS, es el sedimentador de placas paralelas, ubicado inmediatamente a la salida de los tanques de peces para evitar la desintegración de los sólidos por acción de la turbulencia de flujo del agua en tuberías, accesorios o eventualmente al interior de las electrobombas. Además, se consideró una red de tuberías para la conducción de aire a presión para mantener los niveles de oxígeno en los tanques de cultivo, que consistió en una tubería de 1” y 1/2” que tiene su punto de partida en un soplador de aire o Blower (BL); el aire fue distribuido en cada tanque mediante una manguera con microporos para maximizar la transferencia de gases en la interfase agua – aire (Lekang, 2007).

3.3.3. Metodología de dimensionamiento de los componentes del RAS

- Diámetro económico de la tubería de impulsión

Según la fórmula, el Modelo de Forchheimer, aplicada al presente estudio se tienen los siguientes cálculos:

Tabla 7: Cálculos de sustento para la determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión

Datos generales	Forchheimer’s model
caudal de bombeo	$Q_b = 1,636 \text{ L s}^{-1}$
horas de bombeo	7 320 horas 4 * 15 días OFF
velocidad recomendable	$V = <0,6 - 2,0 \text{ m s}^{-1}>$
horas de funcionamiento referencia	8 760 horas
Diámetro económico línea impulsión:	$D = 1,46 * \varphi^{1/4} * Q^{1/2}$
	φ : horas de bombeo x año
	Q : caudal, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$
diámetro económico línea impulsión	0,056 m 2,223 Pulg

«Continuación»

diámetro comercial línea impulsión	2,50 Pulg
velocidad en la tubería impulsión (2")	0,807 m s ⁻¹
diámetro en la succión	2,50 Pulg

De los cálculos realizados, se considera la tubería de impulsión de la bomba principal en 2,5 pulg., es un diámetro comercial. Como criterio usual, el diámetro de la tubería de succión será de igual o mayor diámetro, en este caso se ha considerado también 2,5 pulg.

Si bien el cálculo de la capacidad de las bombas se realiza con proyección al momento en que el sistema se encuentra en su capacidad plena de funcionamiento, en etapas previas el caudal resulta sobredimensionado, por ello la capacidad de la bomba (P2) se distribuyó de modo tal que se cumplió la siguiente ecuación de equilibrio de caudales:

$$Q_{\text{bomba}} = Q_{\text{retorno}} + Q_{\text{filtro}} + Q_{\text{enfriador}} + Q_{\text{tanque peces}}$$

- **Potencia de la bomba**

Considerando la altura de trabajo de este equipo, en el presente trabajo, se eligió las “bombas de caudal”. Asimismo, se optó por un tipo de bomba resistente a la corrosión y al trabajo continuo durante las 24 horas de funcionamiento. El diseño considerado contempló la instalación de dos electrobombas (P1 y P2), siendo la segunda bomba la principal, encargada de levantar el agua desde el tanque sumidero – ‘sump’ en inglés – hacia el biofiltro percolador (BP), hacia el retorno del sumidero 2 (S2), hacia el tanque de enfriamiento (CH), y hacia la lámpara UV (UV), en proporciones que el operador del sistema pudo regular mediante la graduación de apertura de las válvulas de paso respectivas. La bomba P1, tuvo como única función el de alimentar al filtro de arena (FA), por requerir este equipo un mínimo de presión de trabajo, el flujo a este fue regulado con válvulas y retorno al sumidero 1 (S1) (Figura 24).

Las dos bombas fueron ancladas sobre un dado de concreto a nivel de piso con accesorios para absorber las posibles vibraciones. Fueron del tipo bombas centrífugas de eje horizontal, con succión positiva, para descartar posibles fallas por falta de carga hidráulica a nivel de los impulsores de la misma. Las características de la bomba se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Características de las bombas empleadas en el sistema RAS marino

Tipo:	Centrífuga de eje horizontal	
Potencia (HP): 1	Potencia (Kw): 0,75	Voltaje: 220V/60Hz
H. Máx.: 16 m		Q máx.: 200 L min ⁻¹
S. carga.: 9 m		RPM: 3 450

Para determinar la potencia de la bomba se empleó la ecuación (Lekang, 2007), donde el consumo de energía generalmente se expresa como potencia (P), que es la energía transmitida al agua por unidad de tiempo expresada en Watts (W), donde: ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), g es la aceleración de la gravedad (m s^{-2}), Q es el caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y h es la altura total de trabajo de la bomba (m).

$$HPT = P = \rho * g * h * Q$$

Para evaluar la eficiencia de la bomba se empleó la ecuación propuesta en Timmons et al. (2009); que define la eficiencia como la relación entre la energía que la bomba transmite al agua (HPT) y la energía usada por la bomba (HPF)

$$E_{bomba}(\%) = 100 * \frac{HPT}{HPF}$$

Si dos bombas tienen la misma capacidad, una bomba de baja eficiencia requiere más potencia que una bomba de alta eficiencia para mover la misma cantidad de líquido a la misma presión (Huguenin y Colt, 2002).

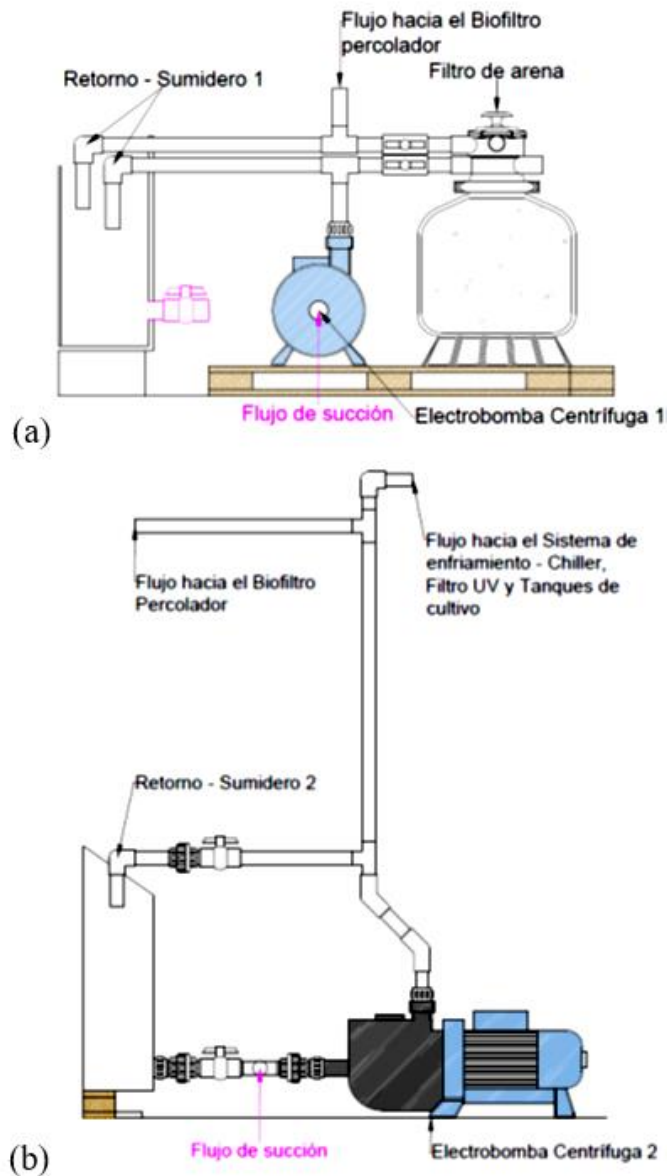


Figura 24: Esquema de la instalación de la electrobomba centrífuga

(a) instalación de electrobomba centrífuga 1; (b) instalación de electrobomba centrífuga 2.

Las capacidades de bombeo parten de datos de tasas de renovación de agua de los tanques de crianza, así, en este trabajo por corresponder a sistemas intensivos de acuicultura, se adoptó el valor de 0,25 recambios por hora, del total de volumen de agua en los tanques de peces (tomándose como referencia: Obirikorang et al., 2022; Uzuoku, 2021; Mozes et al., 2003). A partir de estos datos de biomasa y de volúmenes de agua, se adoptó una regla práctica para el cálculo de caudal a través de los tanques de cultivo, con un periodo de detención de 4,0 horas, y al considerar el volumen total de cultivo $10,18 \text{ m}^3$, resulta en un caudal de $5,09 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (1,41 Lps o 22,41 gpm) (Tabla 9).

Tabla 9: Datos para el cálculo del flujo de agua a través de los tanques de peces

Variables	Valor	Unid.
Volumen x tanque	3,39	m ³
Volumen total agua en tanques del RAS	10,18	m ³
Tiempo de detención en tanques de peces	2,00	h
Tasa de recambio, en tanque de peces	0,25	h ⁻¹
Caudal	5,09	m ³ h ⁻¹
Caudal	0,001	m ³ s ⁻¹
	1,414	L s ⁻¹
	22,408	gpm

La fórmula empleada fue tomada del Manual del Ingeniero Químico (Perry, 1992), según la siguiente expresión:

$$P_b (hp) = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_B}{746 e}$$

Donde:

P_b: potencia de la bomba (hp)

ρ: densidad del agua (kg m⁻³)

g: gravedad (9,8 m s⁻²)

h_B: carga de la bomba (m)

e: eficiencia de la bomba

$$746 \text{ w} = 1,0 \text{ hp}$$

- Sedimentador de sólidos

Los sólidos presentes en un sistema de recirculación se generan en el tanque de peces, a partir del alimento entregado, Timmons et al. (2002), formula el balance de sólidos en estado estable de un tanque de cultivo de dos salidas, una central para la extracción de sólidos principalmente y otra salida lateral para la extracción de agua con desechos disueltos, mediante la siguiente relación:

$$\{Q \cdot TS_{in}\} + \{TS_P\} = \{Q_{out1} \cdot TS_{out1}\} + \{Q_{out2} \cdot TS_{out2}\}$$

Siendo, “TS” sólidos totales en el agua, “in” significa entrada y “P” corresponde a producción de TS en el tanque.

Simplificada la ecuación anterior para el caso del presente estudio, al tener los tanques de peces una sola salida – dren central, a lo siguiente:

$$\{Q.TS_{in}\} + \{TS_P\} = \{Q_{out1}.TS_{out1}\}$$

Donde:

Q: flujo de agua, ($m^3 d^{-1}$)

Q_{out1} : flujo de agua saliendo por el dren central, ($m^3 d^{-1}$)

TS_{in} : concentración de TS entrando a la unidad, ($kg m^{-3}$)

TS_{out1} : concentración de TS saliendo por el dren central, ($kg m^{-3}$)

TS_P : tasa de producción de sólidos suspendidos totales, ($kgTS d^{-1}$)

Entonces, para asegurar un equilibrio entre los sólidos producidos y los retirados del sistema RAS se han diseñado equipos y accesorios que aprovechan ciertas propiedades del agua y del material a retirar, lo que permite llegar a un sistema equilibrado en relación a los sólidos suspendidos.

Separar las excretas y los alimentos no consumidos, por sedimentación, resulta eficiente cuando la captura de estos sólidos se realiza inmediatamente después de ocurrir su producción en los tanques de peces, evitando que la acción de la turbulencia, y en los casos más críticos, el efecto de las bombas, actúe sobre la estructura de los sólidos, desintegrándolos, y dificultando su captura para eliminarlos del sistema RAS. En consideración a ello, el sedimentador de placas paralelas fue instalado muy próximo a la salida de los tanques de peces.

El modelo de sedimentador fue el de alta tasa, tuvo las dimensiones 1,20 m x 0,80 m x 0,80 m (largo x ancho x altura), construido enteramente con fibra de vidrio. Para garantizar su funcionamiento en condiciones de flujo en estado estable, las válvulas de paso en los efluentes de los tanques de peces fueron mantenidas en una posición constante, luego de la serie de ajustes de caudal en los diferentes circuitos de flujo hidráulico del sistema RAS.

El caudal de entrada a la unidad fue el mismo en el tiempo - constante, medido

mediante un flujómetro colocado en la línea de alimentación a los tanques de peces. El sistema se estabilizó hidráulicamente manteniendo el nivel constante, tanto en la unidad de sedimentación como en los tanques de peces, evitándose variaciones de flujo, configurándose un funcionamiento estable.

Visto que los sólidos suspendidos producidos en el sistema RAS, tienen su origen en la alimentación de peces, se tomó la relación presentada en la publicación de Timmons et al. (2002), el cual señala que los sólidos suspendidos totales (TS) resultantes de la alimentación pueden ser calculados con la siguiente ecuación:

$$TS_P = A_{TS} * R_{feed} * \rho_{fish} * V_{tank}$$

A_{TS} : es la cantidad de sólidos suspendidos totales TS, producida como una proporción del alimento ingerido. Siendo considerada como una “regla practica general”: los TS representan 25% del alimento ingerido en base seca.

R_{feed} : tasa de alimentación, ($kg_{alimento} kg^{-1}_{pez} d^{-1}$)

ρ_{pez} : es la densidad de cultivo en el tanque de peces, ($kg_{peces} m^{-3}$)

V_{tank} : es el volumen de agua en el tanque de cultivo, (m^3)

En la misma publicación también se indica que la tasa de remoción de sólidos por sedimentación (TS_{out2} , $kg.m^{-3}$) puede calcularse como:

$$TS_{out2} = TS_{in} * (\text{fracción removida}) * (\text{tasa de recambio, } l d^{-1})$$

$$TS_{out2} = TS_{in} * (v_s / HLR) * (Q/V)$$

Que puede ser expresado de la siguiente manera:

$$TS_{out2} = TS_{in} * (v_s / d)$$

Donde:

v_s : es la velocidad media de sedimentación de la partícula ($m h^{-1}$)

d : es la profundidad de agua (m)

HLR: es la tasa de carga hidráulica ($m^3 m^{-2} h^{-1}$)

Referencias sobre velocidad de sedimentación de biosólidos (pellets fecales) han dado a conocer diferentes valores, así Magill et al. (2006), reportaron $0,48 \text{ cm s}^{-1}$ (partículas

de 710 micras) para la dorada (*Sparus aurata*) ‘sea bream’ en inglés, y de 0,70 cm s⁻¹ (partículas de 1 120 micras) para la lubina (*Dicentrarchus labrax*), ‘sea bass’ en inglés; señalando que en general los peces más pequeños generan partículas fecales de menor tamaño.

Visto que el modelo de sedimentador de alta tasa era el más adecuado para el presente estudio, por la limitada disponibilidad de espacio y necesidad de mantener controlada las condiciones ambientales de las instalaciones, para los cálculos de dimensionamiento se consideró el siguiente esquema básico (Figura 25).

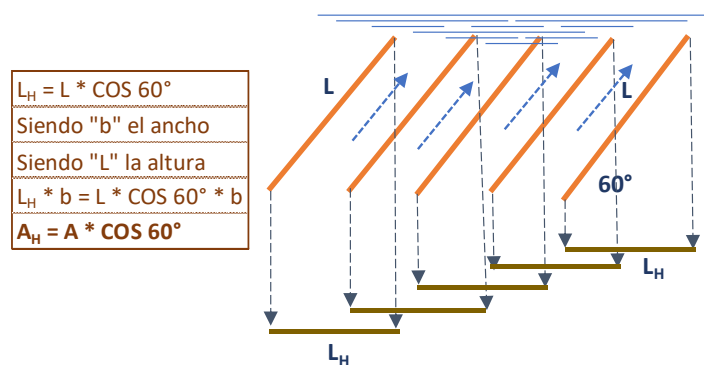


Figura 25: Esquema de disposición de placas paralelas del sedimentador de alta tasa, relacionado al cálculo del área de sedimentación

Se ha considerado una biomasa total, al término del periodo de ‘nursery’ de 244 kg, con una tasa de alimentación 4,05% el peso corporal diario, que da un total de 9,88 kilos de alimento diario.

En relación a la velocidad media de sedimentación de bio-partículas, Kishi et al. (1994) reportaron 0,50 cm s⁻¹; Yao (1970) 15 cm min⁻¹ y Uzuwu (2021) para partículas orgánicas en su publicación sobre “Cómo diseñar sistemas RAS” reporta 0,42 mm s⁻¹, tomándose este último valor para los cálculos del presente estudio.

Seguidamente se ha tomado la secuencia de cálculo presentada por Remmerswaal (1993), obteniéndose lo siguiente:

Tasa de flujo	5,09 m ³ h ⁻¹
Velocidad de sedimentación	36,29 m d ⁻¹

Aplicando las fórmulas para el cálculo del área de superficie de sedimentación y la superficie de sedimentación, siguientes:

$$\text{'Settling surface area} = \text{Flow rate} / \text{Settling velocity}'$$

Superficie de área de sedimentación = Tasa de flujo / Veloc. de sedimentación

$$\text{'Settling surface} = \text{Plate surface} * \text{Cosine (plate angle)'}$$

Superficie de sedimentación = Superficie de placa * coseno del ángulo placa

Bajo el criterio de tener un ángulo de inclinación para las placas paralelas de sedimentación igual a 60°, se tienen los siguientes resultados (Tabla 10):

Tabla 10: Datos y operaciones para el cálculo del número de placas y dimensiones del sedimentador de alta tasa

Variables	Valores	Unid.
Tasa de flujo	5,09	m ³ h ⁻¹
Velocidad de sedimentación	36,29	m d ⁻¹
Área de superficie de sedimentación – en plano horizontal	3,37	m ²
Ángulo de la placa (Θ)	60,00	
Coseno del ángulo (Θ)	0,50	
Superficie de sedimentación – en plano inclinado	6,73	m ²
Altura de la placa	0,75	m
Ancho de la placa	0,80	m
Superficie de la placa	0,60	m ²
Número de placas	11,22	unid.

Con lo que queda definida la geometría del sedimentador y las características hidráulicas de su funcionamiento (Figura 26).

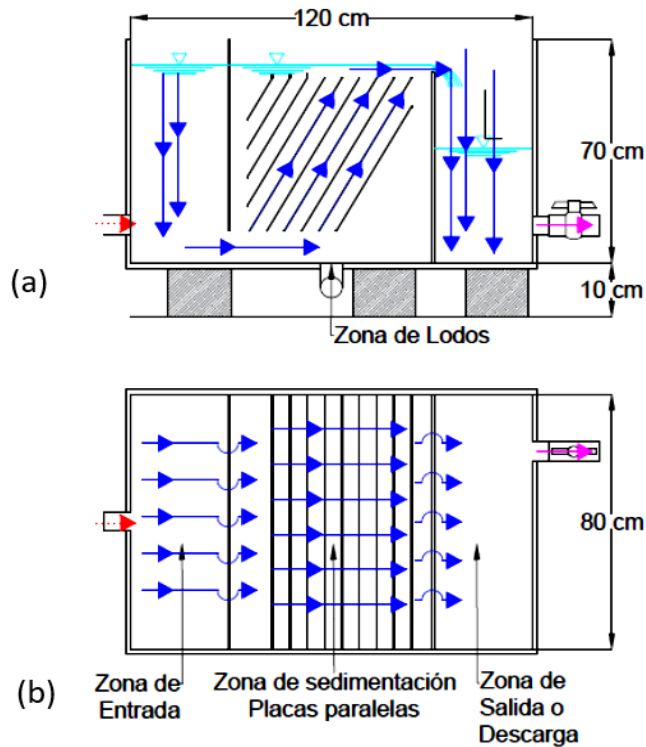


Figura 26: Características del sedimentador de placas paralelas

Nota: (a) vista en elevación, (b) vista de planta.

– **Filtro de arena presurizada**

Considerando las fórmulas y parámetros de dimensionamiento, se procedió a definir las características del filtro de arena del RAS.

Tabla 11: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro de arena presurizada

Variables	Valores	Unidades	Equivalente	Unid. Eq.
Caudal	1,414	L s ⁻¹	22,408	gpm
Tamaño de partículas (biosólidos)	3	mm		
Concentración SS recomendada	25	ppm		
Nivel de sólidos	moderado		Tabla 8	
Caudal de filtrado	5,089	m ³ h ⁻¹		
Velocidad de filtrado	50	m ³ m ⁻² h ⁻¹	Tabla 9	
Área de filtrado	0,102	m ²	1,096	pie ²
Tasa de filtración	13,889	L s ⁻¹ m ⁻²	20,452	gpm pie ⁻²

Según estos cálculos, el modelo que corresponde al presente estudio, tiene las siguientes características:

Modelo: 2 (Vulcano S.A., 2022)

Diámetro interior del filtro: 430 mm

Área de filtrado: 0,145 m²

Caudal de filtrado: 7,25 m³ h⁻¹

Potencia de electrobomba: 0,5 HP

- **Filtro biológico percolador**

En el presente estudio se eligió el filtro biológico de percolación (en inglés ‘trickling filter’) por ser de simple construcción, funcionamiento con baja demanda de mano de obra, además que la nitrificación, favorece – en simultaneo – la liberación de gases disueltos en exceso en el agua circulante, presenta una buena aireación de la biopelícula (en inglés ‘biofilm’), entre otras características favorables, sus características y parámetros de funcionamiento, han merecido numerosos estudios (Smith, 2013; Uzukwu et al., 2010; Timmons y Ebeling, 2010).

En cuanto a la producción de amonio, la mayoría de especies acuáticas domesticadas y utilizadas en acuicultura, han sido estudiadas a nivel de excreción de desechos, entre ellos los que contienen nitrógeno, como la excreción de amonio a través de branquias y orina, representa casi la totalidad de excreción disuelta de desechos nitrogenados. La especie *Anisotremus scapularis*, empleada en el presente estudio, no ha sido materia de este tipo de estudios, por lo tanto, se desconoce las tasas de excreción de estos residuos que se generan del metabolismo del pez. Por ello, se ha tomado como referencia los trabajos realizados en otras especies cultivadas, así, un estudio realizado por Godoy-Olmos et al. (2022), reporta que al evaluar un alimento comercial la tasa de producción de amonio es significativamente elevada 0,778 gN-TAN kg_{pez}⁻¹ d⁻¹ para el pez marino “dorada” (*Sparus aurata*), en inglés ‘sea bream’.

El dimensionamiento del biofiltro ha seguido un procedimiento expuesto por varios autores (Smith, 2013; Uzukwu, 2021; Losordo y Hobbs, 2000; Losordo y DeLong, 2015), tomando la siguiente secuencia:

- Estimación de la cantidad de alimento para entregar a la población de peces en el tiempo de máxima biomasa.

- Definir el nivel de amonio tolerable, según la especie y estadio de desarrollo. Fijar la tasa de remoción de amonio, que está relacionado con la tasa de carga hidráulica.
- Determinar la cantidad de agua que fluirá a través del biofiltro, teniendo en consideración preferente la tasa de recambio por hora el volumen de los tanques de peces.
- En base a la cantidad de alimento y la tasa de remoción de amonio, determinar el área de superficie para el crecimiento bacteriano requerida en el biofiltro.
- Hacer la elección del material a emplear con una superficie específica que se ajuste a la tasa de remoción definida.
- Calcular el volumen de la media (material sustrato para las bacterias), por una división del área requerida en el biofiltro entre la superficie específica del material.
- Elegir la forma del biofiltro: un cilindro o un paralelepípedo, u otra forma, en función principalmente del espacio disponible.
- Determinar la tasa de carga hidráulica de trabajo para el biofiltro para relacionarlo con lo indicado sobre tasas mínimas de carga en función de la superficie específica de área.

Los cálculos de dimensionamiento del biofiltro siguen la secuencia expuesta en la publicación de Losordo y Hobbs (2000), quienes han empleado hojas de cálculo de Microsoft Excel. El dimensionamiento – según esta metodología – se realizó considerando la magnitud final de peso vivo de la población, es decir, con la máxima biomasa que soportará el sistema y por un periodo de 84 días, tiempo suficiente para que los peces alcancen el tamaño de transferencia a las jaulas flotantes en el mar. Las variables y valores obtenidos, se presentan en la Tabla 12.

En los cálculos, para el tamaño de traslado de los peces a la jaula flotante se tomó como referencia lo indicado por Joseph (2009), para la especie marina “lubina” (en inglés Sea Bass), a fin de asegurar una adecuada resistencia de los peces a las condiciones oceanográficas extremas y de calidad de agua en mar abierto; conociéndose poco aun sobre la tolerancia de la especie *A. scapularis*.

Tabla 12: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico, tipo percolador – cálculo de biomasa de peces

Variable	Valores	Unid.
Número de peces - inicio	3 717	Unid.
Longitud total de peces - inicio	10,38	cm
Peso de peces inicio	26,24	g
Biomasa inicial	97,55	kg
Longitud total de peces - final	14,65	cm
Peso de peces final	72,95	g
Periodo de crianza en RAS	84,00	días
Número de peces - final	3 345	Unid.
Biomasa final	244,03	kg

Realizado el cálculo de la biomasa, se procedió con la determinación de la producción de amonio. El biofiltro tendrá que tener la capacidad de procesar la cantidad de amonio que se produzca como resultado del metabolismo del alimento consumido y el cálculo se realiza con la siguiente fórmula:

$$P_{amonio} = B_{peces} * T_{EXC} amonio$$

A este nivel, aplicando la fórmula mostrada, derivada de Heinsbroek (1990), se obtienen los siguientes valores que permiten seguir con el dimensionamiento del biofiltro (Tabla 13).

Tabla 13: Datos y operaciones para el cálculo de la producción de amonio en el sistema

Variabes	Valores	Unid.
Proteína contenida en el alimento	55%	%
Cantidad de alimento, ración diaria	9,88	Kg d ⁻¹
Tasa de producción de amonio	0,778	gN-TAN kg _{pez} ⁻¹ d ⁻¹
TAN permisible	1,50	mg L ⁻¹
Cantidad de amonio producida	189,86	gTAN d ⁻¹

Se ha considerado la cantidad de alimento, con 55% de proteína (PT), (Yanac et al. 2023), un alimento desarrollado específicamente para la especie *A. scapularis*, fijando 55% de PT como la mejor dosis. Seguidamente se determinó la tasa de excreción de

amonio ($TE_{\text{Exc amonio}}$) (Godoy-Olmos et al., 2022). Con ello, se determinó la producción de amonio en gramos por día.

Los diferentes tipos de biofiltro, los diferentes materiales empleados en su construcción, las diversas condiciones de flujo de agua, las concentraciones de amonio en la llegada al biofiltro, la temperatura, entre otros factores, influyen en el ritmo de transformación de amonio a nitrito. Ello se expresa en forma cuantitativa bajo un parámetro denominado “tasa de remoción de amonio”, que interviene en la ecuación para el cálculo del área de sustrato que se requiere para que se aseguren los niveles esperados de nitrificación en el biofiltro. Godoy-Olmos et al. (2022), también reportaron una tasa de remoción de amonio para un biofiltro, cuando se empleó alimento balanceado comercial, para la dorada (*S. aurata*) ($0,11 \pm 0,01 \text{ gN-TAN}_{\text{removido}} \text{ m}^{-2} \text{ \text{área de biofiltro}} \text{ d}^{-1}$). Aquí es necesario explicar que en el funcionamiento de los sistemas RAS, la nitrificación no solo ocurre en el biofiltro, sino también en todas las superficies que se encuentran en contacto con el agua circulante, esta nitrificación que ocurre fuera del biofiltro se denomina biofiltración pasiva y ha sido estimada en 30% del total de nitrificación que ocurre en el sistema de recirculación. Losordo y Hobbs (2000), siguiendo el formato de la hoja de cálculo “xls” se tienen los siguientes resultados, considerando con prudencia un 25% de nitrificación pasiva y, por tanto, la actividad del biofiltro encargada del 75% de la cantidad total de amonio que se produce en el metabolismo de peces (Tabla 14) en el momento de la máxima biomasa proyectada.

Tabla 14: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico – cálculo del área de superficie de sustrato

Variables	Valores	Unid.
Contribución de la nitrificación pasiva	25	%
Cantidad de amonio - nitrificación activa	142,39	gTAN d ⁻¹
Tasa de remoción de amonio	1,20	g m ⁻² d ⁻¹
Área de superficie de la media	118,66	m ²

El área total de exposición para la fijación de las bacterias nitrificantes, se ha determinado tomando un valor de tasa de remoción de amonio igual a $1,20 \text{ gTAN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, el cual fue obtenido del gráfico sobre tasas de remoción de amonio en función de la concentración de amonio en el agua y tasas de flujo (Figura 27), publicado por Smith (2013), entrando con un valor de TAN permisible de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$, considerado

apropiado para una especie similar, en estudio previo (Godoy-Olmos et al., 2022).

Determinar la tasa de carga hidráulica, permite ajustar la forma del biofiltro de tal forma que se obtenga una adecuada tasa de carga hidráulica. Tomándose en cuenta una tasa mínima de carga hidráulica en función de la superficie específica de área (Tabla 15).

Tabla 15: Relación de la superficie específica de área de la media y la tasa de carga hidráulica mínima recomendada en el biofiltro

Superficie específica de área	Tasa de carga hidráulica mínima
Pie ² pie ⁻³	gpm pie ⁻²
30	3
50	4
70	5
120	7

Fuente: Smith (2013).

La superficie específica de área refiere el área que ofrece la media por unidad de volumen, mientras la tasa de carga hidráulica relaciona el caudal de agua que fluye por unidad de área de biofiltro en una vista en planta.

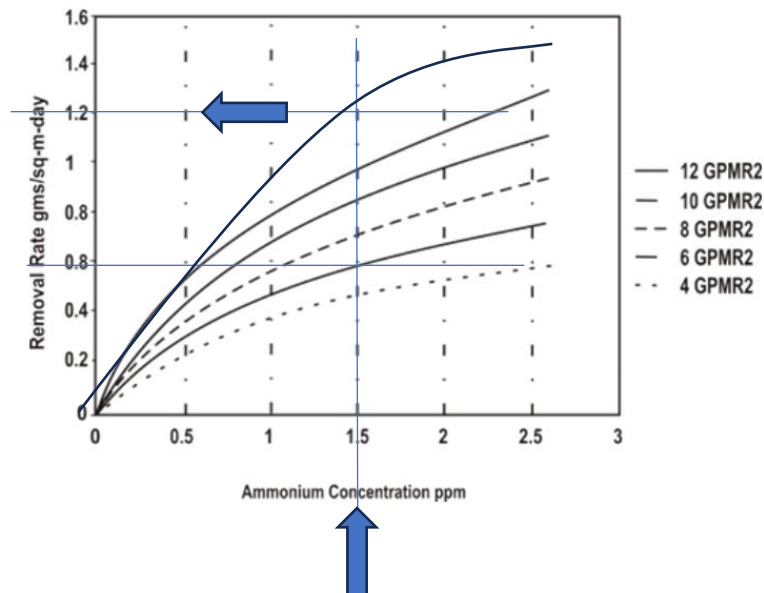


Figura 27: Extrapolación grafica de la relación entre la tasa de remoción de amonio con la concentración de amonio, a diferentes cargas hidráulicas

FUENTE: Smith (2013).

Smith (2013), publicó el gráfico que proporciona la tasa de remoción para filtros percoladores con agua dulce y temperaturas templadas, con adecuada distribución de agua y con suficiente oxígeno. El autor señala que es de estimar que tasas menores de remoción se presentarían en agua de mar y con bajas temperaturas - frías; una afirmación respaldada en el hecho que el proceso de nitrificación lo realiza la colonia de bacterias como parte de su metabolismo natural, y siendo que el metabolismo bacteriano en aguas frías y con niveles de sal disuelta en el agua, se hace menor.

En el presente estudio, tomando como referencia la secuencia de pasos en los cálculos descritos, el área total requerida para el mantenimiento de las colonias de bacterias nitrificantes en el biofiltro fue calculado aplicando la fórmula:

$$A_{\text{sustrato}} = AP * TR_{\text{amonio}}$$

Siendo A_{sustrato} , el área total de la superficie expuesta del sustrato en m^2 , AP es la cantidad de amonio producido en el sistema a procesar en el biofiltro en gTAN d^{-1} , y TR_{amonio} es la tasa de remoción de amonio expresado en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Finalmente se procedió a la definición de la geometría del biofiltro, para ello se introdujo el valor de la “superficie específica de la media”, expresada en m^2 por m^3 de material que constituye la media o sustrato de cultivo de bacterias nitrificantes, aplicándose la siguiente fórmula:

$$V_{\text{filtro}} = A_{\text{media}} * SE_{\text{media}}$$

Se llegó al resultado que se requiere un biofiltro que contenga $0,53 \text{ m}^3$ de sustrato o media, con la superficie específica que se indica en la Tabla 16.

Tabla 16: Datos y operaciones para el cálculo de las dimensiones del filtro biológico, tipo percolador – cálculo del área de superficie de sustrato

Variables	Valores	Unid.
Volumen de la media	0,53	m^3
Diámetro de biofiltro percolador	0,96	m
Área de sección transversal biofiltro percolador	0,72	m^2
Altura del sustrato en el biofiltro	0,73	m
Borde libre en la torre	0,18	m
Altura total del biofiltro	0,91	m

En los cálculos mostrados se han aplicado las fórmulas para determinar el diámetro y altura, considerando también las dimensiones comerciales de tanques construidos en HDPE con dimensiones estándar, en este caso $D = 0,96 \text{ m}$ y $226 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ de superficie específica del sustrato. Queda de esta manera definido el tamaño y la geometría cilíndrica del biofiltro percolador empleado en el presente estudio.

- **Soplador de aire ‘blower’**

Al menos dos enfoques existen en la determinación de la potencia de los sopladores de aire, ‘blowers’ en inglés, el primero basado en la necesidad de cumplir con la transferencia de una cantidad determinada de oxígeno al agua, y el segundo se basa en la cantidad de aire que se requiere insuflar a una masa de agua para lograr una completa y constante mezcla en toda su columna y área.

Se adoptó el primer enfoque, y en ese propósito, se consideró que Godoy-Olmos et al. (2022), reportaron una tasa de consumo de oxígeno en $12,48 \text{ gO}_2 \text{ kg}_{\text{pez}}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para una especie similar, la “dorada” (*Sparus aurata*), empleando un alimento comercial; valor con el cual se dimensionó la capacidad del soplador, para mantener niveles apropiados de oxígeno disuelto en el tanque de peces. De los cálculos de biomasa para el estudio, se llegó a la conclusión que en los tres tanques que conforman el RAS habrá, al término del proceso de crianza, 3 717 peces de 72,95 g c/u, haciendo una biomasa total de 244 kg. Considerando la tasa de consumo de oxígeno señalada, se llega a una demanda total de $0,0454 \text{ kgO}_2 \text{ h}^{-1}$. Para aplicar la fórmula, tomada de Huerta-Bórquez (2017):

$$Potencia \text{ aireador } (Kw) = \frac{1,9 * Demanda \text{ de } O_2 \left(\frac{kgO_2}{hr} \right)}{Eficacia \text{ transferencia de } O_2 \left(\frac{kgO_2}{hr} \right) / hr}$$

Es necesario conocer la eficacia de transferencia de oxígeno, para ello se toma en consideración los valores referenciales de la Tabla 17 (Huerta-Bórquez, 2017).

Tabla 17: Eficacia de transferencia de oxígeno (kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹)

Tipo de burbuja	Agua con 0 ppm de O ₂	Agua con 6 ppm de O ₂
Burbuja fina	1,2 a 2,0	0,25 a 0,42
Burbuja media	1,0 a 1,6	0,21 a 0,34
Burbuja gruesa	0,6 a 1,2	0,13 a 0,25

Por cuanto se empleó una manguera difusora que permite obtener burbujas finas, con niveles de oxígeno en 6 ppm a más, se consideró un valor promedio de 0,335 el cual es corregido por un factor de corrección por salinidad generado para el presente trabajo, tomando los valores hallados por Sehsah y Elsbaay (2012) en el estudio sobre valores de SAE en agua de granja y agua de mar 0,0043 y 0,0036 kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹, respectivamente.

Es importante señalar aquí que se ha determinado un factor de corrección a semejanza a lo determinado por Henkel (2010), el 'factor- α ' (relación entre el coeficiente de transferencia de oxígeno del agua residual y del agua limpia), el cual juega un papel importante en la estimación de la tasa de transferencia de oxígeno estándar requerida (SOTR), que es un parámetro clave en los sistemas de aireación. Con factor- α igual a $k_{La \text{ agua residual}} / k_{La \text{ agua limpia}}$ siendo k_{La} el coeficiente de transferencia de oxígeno, expresado en L h⁻¹.

Con estas determinaciones, se aplicó la fórmula presentada, para obtener la potencia del aireador necesario, resultando en 0,31kW, convertido a caballos fuerza 0,41HP. A este resultado matemático, se le ha agregado un 50% de seguridad a modo de criterio de diseño - considerando necesidades adicionales de aireación y pérdida de eficiencia del equipo - llegándose a un valor de 0,62HP. Por lo que el tamaño de aireador a instalar, resultó en el tamaño inmediato superior que exista en el mercado, esto es: 0,75HP.

3.4. MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA

El volumen de agua de mar requerido para completar los volúmenes de agua empleado por el sistema RAS a lo largo del tiempo que tomó la investigación, fue adquirida en el Instituto del Mar del Perú (IMARPE). Los puntos de muestreo se definieron en función del propósito

considerado:

- a. Para ver las variaciones de los parámetros fisicoquímicos del agua en el tiempo que tomó el periodo de observación
- b. Para evaluar la variación horaria de los parámetros a fin de evaluar la estabilidad de la calidad del agua en el sistema, en las 24 horas

La tendencia y variaciones de los parámetros de calidad de agua en el periodo del estudio se determinó mediante mediciones diarias de cantidad y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, temperatura del agua, pH y salinidad y mediciones con intervalos de una semana de nitrógeno amoniacal total, N-nitrito, N-nitrato y alcalinidad. La constante pérdida de agua por evaporación se compensó con la adición de agua dulce en un promedio de 50 litros diariamente. Asimismo, el sistema requirió de la adición de bicarbonato de sodio, a razón de 100 gramos inter diario, a fin de mantener los niveles de alcalinidad disminuida por el proceso de nitrificación. El manejo del sistema RAS y de los peces, permitió mantener los parámetros de calidad de agua dentro de los rangos recomendados para la especie *A. scapularis* “chita”.

Para la determinación de los valores de cada uno de los parámetros evaluados se empleó un pH-metro portátil, marca OAKTON, modelo pHTestr 30; para determinar la concentración de oxígeno disuelto (OD) y la saturación, un oxímetro digital, modelo YSI DO200A-4. La salinidad con un refractómetro portátil ATC – Salinómetro, el Nitrógeno amoniacal total, N de nitrito, N de nitrato y alcalinidad se midió con un Fotómetro modelo YSI 9500.

Como parte de las actividades de mantenimiento del RAS, se realizó la limpieza de los tanques y contenedores de agua en general, empleando un sifón, con una frecuencia de dos semanas y cuando la calidad de agua presentaba algún valor cercano al límite de rango. Los valores extremos permisibles fueron tomados de publicaciones de trabajos anteriores (Dionicio-Acedo et al., 2018; León-Palomino et al., 2017; Castro-Fuentes et al., 2022).

3.5. APLICACIÓN DEL SOFTWARE WaterCAD EN LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA

El uso del software WaterCAD en el presente estudio tuvo lugar debido a que uno de los principales aspectos en la instalación y funcionamiento de los sistemas de recirculación para acuicultura (RAS), es la distribución de agua. Siendo importante para una operación segura

del sistema, el correcto cálculo de capacidades de tuberías, las presiones de trabajo y pérdidas de carga asociadas al movimiento del agua en tuberías.

WaterCAD es un software producido por Haestad Methods (Dawe, 2000), señala que es un modelo computacional que usa ecuaciones matemáticas para ayudar a explicar y pronosticar eventos físicos reales, y en específico, el modelamiento de un sistema de distribución de agua, permite determinar presiones del sistema y tasas de flujo bajo una variedad de condiciones. Así, con WaterCAD es posible hacer simulaciones de estado estacionario, de calidad de agua y hacer también el dimensionamiento de tuberías y bombas.

El empleo de modelos analíticos puros convencionales presenta limitaciones, que han sido superadas por la simulación, para ello se han desarrollado softwares como WaterCAD que es de gran ayuda en el diseño y funcionamiento de un Sistema de Distribución de Agua (SDA) (Kusnayát et al., 2019). Este autor resalta la necesidad de disponer de un software de evaluación en el diseño y funcionamiento de un SDA. Señala que WaterCAD V8i (2014) es aplicable para el modelamiento hidráulico que comprenda una serie de funcionalidades, que puntualiza Dawe (2000):

- Realiza simulaciones de estado estacionario y en período prolongado
- Dimensionamiento de tuberías y bombas
- Análisis de las demandas, con variaciones en el tiempo
- Modelamiento sobre la hidráulica de tanques, bombas y accesorios
- Seguimiento de compuestos químicos en el agua
- Estimaciones de fugas de líquido en la red

En el diseño de un sistema de distribución de agua es también importante considerar el estado estacionario. El trabajo consiste en definir la distribución de caudal y pérdidas de carga en los elementos individuales, con un caudal total y una pérdida de carga total del sistema. La solución consiste en definir el patrón de flujo en cada tubería bajo determinadas condiciones de abastecimiento y consumo. Alternativamente, podría definirse la carga hidráulica en cada nodo de la malla de tuberías y usar ésta para determinar la tasa de flujo en cada tramo del sistema (Izinyon y Anyata, 2011).

El WterCAD es un software de modelamiento hidráulico que requiere de información sobre las propiedades del sistema de redes de distribución de agua, de sus demandas y las reglas

de operación; y se encarga a partir de ello, de calcular los caudales, presiones, gradiente hidráulico, calidad de agua y otras características del sistema. Su aplicación usual es en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable a través de redes domiciliarias, pero por similitud se ha considerado su aplicación en esta investigación para la verificación y aseguramiento de la adecuada entrega de agua y control de caudales y de presiones en la red de abastecimiento de agua a los tanques de peces y a los diferentes componentes del sistema de recirculación de agua para acuicultura.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISEÑO DEL SISTEMA RAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SUS COMPONENTES

4.1.1. Geometría de los componentes del sistema RAS

El Sistema de Recirculación para Acuicultura, según experiencias previas y los resultados obtenidos en el presente estudio, es un equipo compuesto por varios elementos que, aprovechando conceptos de la ingeniería básica o fundamental, resulta en un equipamiento de alta tecnología compuesto por dos partes primarias: batería de tanques de peces y la unidad de tratamiento de agua, con bombas para mantener el flujo de agua Uzukwu et al. (2010), permitiendo el reúso del agua, y brindando a los peces óptimas condiciones de hábitat.

El diseño adoptado para el presente estudio fue inspirado en el modelo holandés, cuya característica es el empleo de sedimentadores de placas de alta tasa hidráulica y el biofiltro tipo percolador de flujo vertical (Remmerswaal, 1993). Estos filtros son de fácil construcción, simple funcionamiento y suficientemente eficaces que además de la nitrificación provoca la liberación de CO₂ y la incorporación de oxígeno (Losordo y DeLong, 2015). Este conjunto de ventajas se ha puesto de manifiesto – luego de los cálculos, diseños y proceso de instalación – durante la puesta en marcha y el periodo de funcionamiento del RAS, reflejado en los parámetros de calidad de agua y la performance de la población de peces que fueron evaluados durante la investigación.

Entrando a detalles, es categórico que la forma circular de los tanques fue la más adecuada, considerando que la población de peces fue procedente del medio natural, nacieron y crecieron durante los primeros meses de vida en condiciones de hábitat natural – llevaron una vida libre en el mar. Siendo así, al trasladar los peces a ambientes controlados, era de esperar una reacción desfavorable o un estrés agudo con un elevado número de pérdidas. Lo que no ocurrió, por el contrario, se observó una gradual adaptación a las condiciones de

espacio y la hidrodinámica del tanque, con ingreso tangencial en la superficie del agua y salida central por el fondo. La ubicación de los puntos de entrada y salida de agua aseguró, complementado con la inyección de aire, una distribución uniforme de los peces en los tanques (Figura 28), un recambio uniforme de agua, y la eliminación permanente de los sólidos que se producían como restos de alimento y excretas de los peces.



Figura 28: Vista de planta de la distribución de peces en el tanque

El siguiente componente del RAS fue el sedimentador de placas, una pequeña estructura que recibía los efluentes de los tanques de peces, encargada de retener los sólidos para eliminarlos a través de una tubería de purga y eventualmente mediante una limpieza rigurosa con eliminación total del agua (Figura 29). Por tratarse de una población de peces silvestres, se aseguró tener una excelente calidad de agua, con elevados niveles de oxigenación y sin turbidez.



Sedimentador de placas paralelas, empleado en la investigación



Un separador de sólidos de espuma ('skimer' en inglés)

Figura 29: Vista del sedimentador de placas paralelas y del separador de espuma para separar sólidos finos

Se complementó el tratamiento mecánico mediante la colocación de esponja tipo perlón a la salida del sedimentador de placas y en una de las esquinas de éste, se instaló un separador de espuma, para la separación de partículas sólidas más finas que la sedimentación ni el filtrado en la esponja de perlón podían retener.

El diseño tal como proyectado e instalado del RAS comprendió también un filtro presurizado de arena, el cual trabajó con una electrobomba para incorporar la presión a la tubería de llegada que requiere este tipo de filtro. Sin embargo, este equipo fue retirado del circuito después de casi un mes de funcionamiento, por los elevados volúmenes de agua para realizar el proceso de retro lavado de la arena y por el consumo de electricidad, al tener una electrobomba adicional, solo para el funcionamiento de este filtro. Entonces, la práctica muestra que si bien como diseño luce bien el tener un filtro de arena que asegura la separación de sólidos, en la práctica se convierte en una fuente de mayores costos. Por ello, el funcionamiento del RAS – en su mayor tiempo de funcionamiento – no requirió del filtro presurizado de arena. Además, estos filtros de arena requieren ser limpiados 2 a 3 veces por semana (Isla, 2023), representando un consumo importante de agua. Ebeling y Vinci (s.f.), señalan que el empleo de filtros de piscina (Fig. 30) no es recomendable para sistemas RAS con moderada carga.



Figura 30: Vista del filtro de arena, presurizado

Nota. Se observa la válvula multifunción para el retro lavado.

Culminado el proceso de separación de sólidos, el flujo de agua pasa al biofiltro (Figura 31) requiriéndose para ello una segunda electrobomba que cumplió la función de impulsión del agua desde un tanque denominado “sumidero” hacia el biofiltro y hacia la red de alimentación de los tanques de peces, pasando por el esterilizado UV. A ello se agregó una tubería a pocos centímetros de la salida de la bomba, con válvula de control para regular las presiones en el circuito, denominándose esta tubería “retorno”. Mediante la regulación de caudales, los niveles de amonio y de otros compuestos nitrogenados, disueltos en el agua, se han mantenido dentro de los parámetros requeridos para este trabajo y copan las exigencias de la especie, como se apreciará en la sección de calidad de agua.



Biofiltro tipo percolador (parte inferior), con ingreso de agua por la parte superior, en forma de “lluvia”



Tanque “sumidero” desde donde la bomba toma el agua. Se observa tuberías ‘by pass’

Figura 31: Vista del biofiltro tipo percolador y el tanque sumidero ubicado en su parte inferior, para recoger el agua que percola el biofiltro

Finalmente, el agua impulsada por la bomba, envía el agua hacia la lámpara de desinfección UV y de ésta sigue hacia el tanque de regulación de temperatura (‘chiller’), en este caso se bajó la temperatura, considerando las elevadas temperaturas ambientales y la necesidad de mantener la temperatura dentro del rango recomendado para la especie. Ambos elementos trabajaron de manera aceptable, aunque a la luz de los resultados corresponde realizar dos ajustes:

- El esterilizador UV, debe llevar un manómetro para determinar y ajustar la presión hidráulica en la entrada, a fin de no exponer este equipo a presiones fuera de sus rangos de especificaciones técnicas.

- Dimensionar adecuadamente el equipo de enfriamiento, con suficiente holgura, a fin de asegurar los niveles de temperatura que requiere la especie, para una mejor performance.

En relación a estos dos equipos últimos, se presentaron eventos que serían considerados fallas de instalación, por un lado, la explosión de la lámpara UV al ocurrir un exceso de presión debido al cierre parcial de las válvulas de salida de agua hacia los tanques de peces, excediendo la presión máxima admisible para la lámpara; y por otro lado el sistema de enfriamiento (Fig. 32) presentó fallas de fuga del gas refrigerante, por lo tanto se considera conveniente recomendar otro sistema de enfriamiento, al no haberse logrado regular adecuadamente la temperatura en el sistema.



El tanque de enfriamiento, con un sistema cuyo funcionamiento puede ser mejorado

Figura 32: Vista del tanque de enfriamiento para la regulación de temperatura de agua del sistema

Finalmente señalar que los factores geométricos de los diferentes elementos que componen del Sistema RAS, en particular el patrón de flujo de agua en los tanques de peces, que gobiernan la distribución del cardumen, distribución de velocidades y de calidad de agua, como lo señala Oca y Masalo (2012), han resultado determinados por características del dispositivo de ingreso de agua, el radio del tanque, la columna de agua y toda superficie que representó una pérdida de energía por fricción; en una clara relación entre la geometría de los componentes del RAS y de los procesos biológicos que tiene lugar en cada uno de ellos.

4.1.2. Parámetros hidráulicos y perfil hidráulico del sistema RAS

El diseño, a nivel de instalación del sistema de recirculación de agua se muestra en la Figura 33, consiste de una red de abastecimiento de agua a los tanques de peces bajo una modalidad de funcionamiento, denominado un “sistema hidráulico presurizado”: la presión de salida de agua a los tanques de peces proviene directamente de la electrobomba de recirculación, Fig. 34. Estas condiciones de trabajo generan variaciones de presión interna en la red de tuberías entre la bomba de recirculación principal y el punto de llegada a los tanques de peces, según la apertura que se tenga en las válvulas de control de caudales para los tanques de peces. Es así que en el presente trabajo estos cambios de presión en tuberías por maniobras en las válvulas de control, se derivó en una falla al encontrarse en este tramo la lámpara UV, generándose una explosión de la carcasa de la lámpara UV por exceso de presión.

La distribución de cada uno de los elementos del RAS, en planta como en elevación, fue adecuada, dando como resultado una instalación compacta con aprovechamiento óptimo de los espacios. Si bien no se tuvo separado el ambiente de tanques de peces (área de crianza) del ambiente de tratamiento de agua (área de máquinas), el funcionamiento de los equipos, la intensidad de manejo y consumo de energía fue adecuado, dando como resultado un funcionamiento continuo, sin mortalidad de peces y resultados de crecimiento aceptables, como se reportará en las secciones correspondientes.

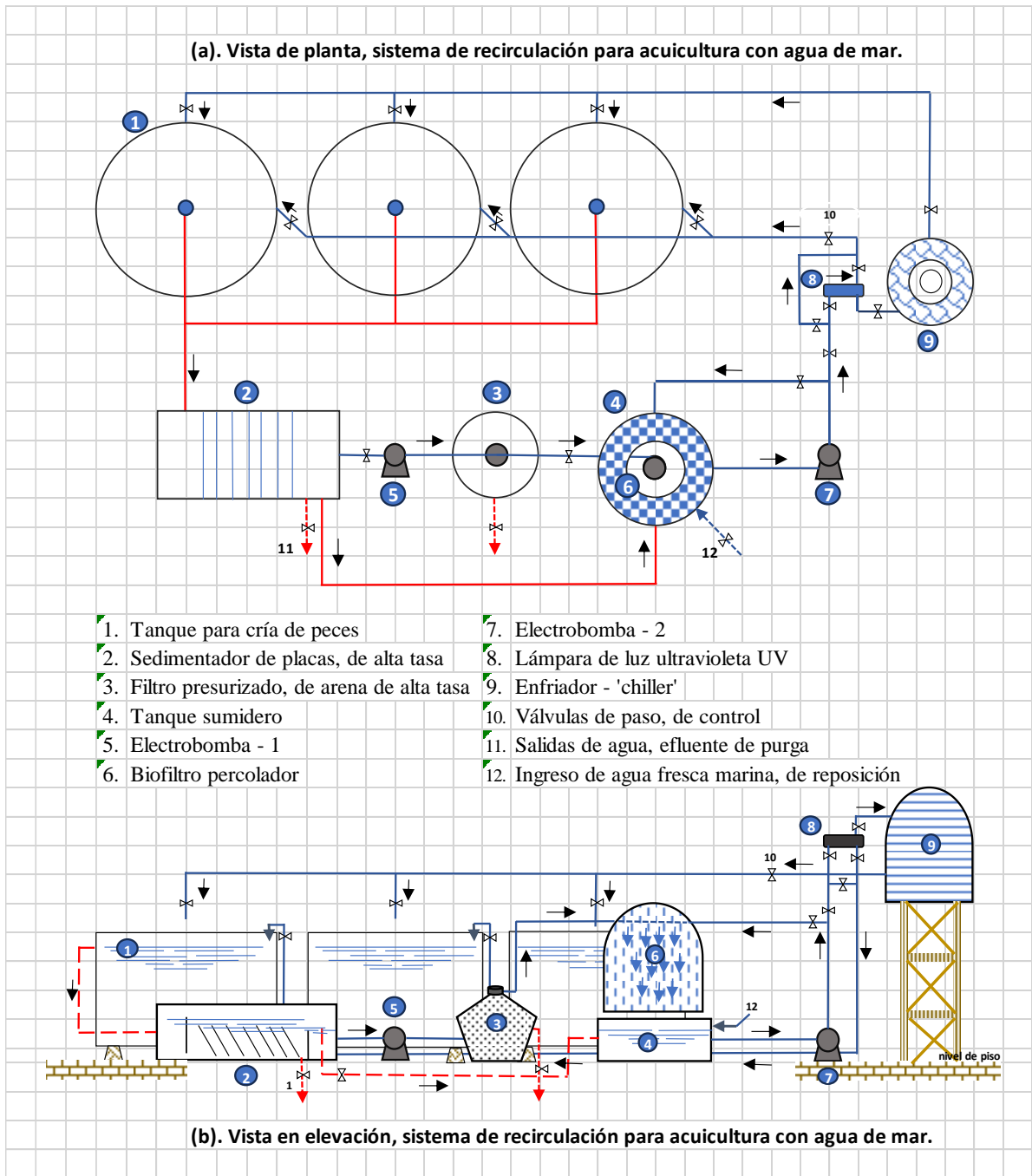


Figura 33: Vista en planta (a) y en elevación (b), del sistema de recirculación para acuicultura con agua de mar, que se diseñó e instaló en el presente estudio

Los niveles de carga y el manejo de la alimentación han demostrado que el diseño empleado y su operación puede simplificarse mediante el retiro del filtro de arena presurizado, el cual – como se dijo anteriormente – requiere una segunda electrobomba, con el consiguiente consumo de mayor energía como también mayor requerimiento de agua para las operaciones de retro lavado que periódicamente requiere el equipo. Con esta modificación se ha llegado a reducir la cantidad de agua de recambio, a un porcentaje que no superó el 5% del volumen por día.

Un buen inicio en el tratamiento del agua efluente de los tanques de peces, consiste en someterlo a un proceso de sedimentación tan pronto deje los tanques, evitándose turbulencias hasta donde sea posible, a fin de evitar la desintegración de sólidos. La sedimentación en placas paralelas fue complementada con un tamizado del agua mediante una capa de perlón (lana de fibra sintética - 100% poliéster, ecológico y resistente al agua de mar) de 7,5 cm de espesor promedio, que permitió retener sólidos finos que atravesaron el tramo de sedimentación por gravedad. Este tratamiento complementario no tiene cálculo para su dimensionamiento, más bien es un recurso resultante de la experiencia que ayuda a aumentar la efectividad de la sedimentación en placas. Tanto las placas como el perlón fueron sujetos de mantenimiento inter diario que consistió en retirar el material orgánico acumulado empleando un chorro de agua o con ayuda de un sifón.

Perfil hidráulico del sistema

A efectos de mostrar detalladamente la altimetría a lo largo del circuito de abastecimiento de agua en el RAS marino, se ha adaptado los formatos de presentación de los perfiles hidráulicos en diseño de abastecimiento de agua potable a los planos que se muestran en la Fig. 34 y 35. También conocido como Perfil de Flujo de la Red, EPM (2009), elaborados como parte de la evaluación del comportamiento de una red. Es importante señalar que esta información es clave dentro del Expediente Técnico de una obra de instalación de un sistema RAS marino. Puede ser creado de manera manual o empleando un software, como por ejemplo el Hidra, en el presente estudio se ha empleado el método manual. Tixe (2004), señala que la clase de tubería a elegirse responderá a los rangos de servicio determinadas por las condiciones de presión hidrostática exija; información que se consigna el perfil longitudinal de la red. De manera similar se podrá consignar la ubicación de los elementos accesorios de la red, la progresiva, diámetros de tubería, etc.

PERFIL LONGITUDINAL DE LA RED DE ABASTECIMIENTO PRINCIPAL DE RAS MARINO

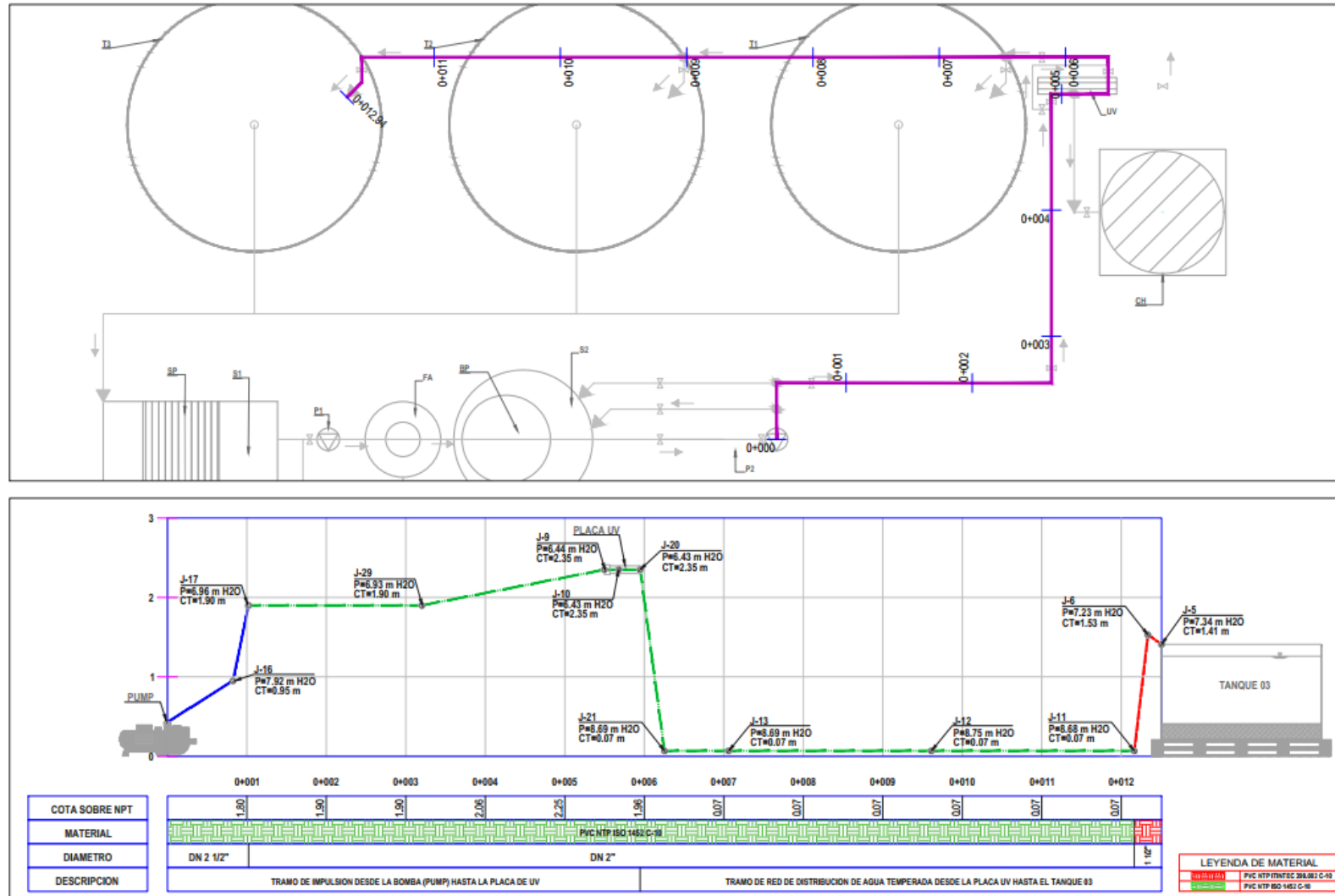


Figura 34: Perfil hidrutico de la red de distribución del sistema RAS –tramo principal

PERFIL LONGITUDINAL DE LA RED DE ABASTECIMIENTO SECUNDARIO DE RAS MARINO

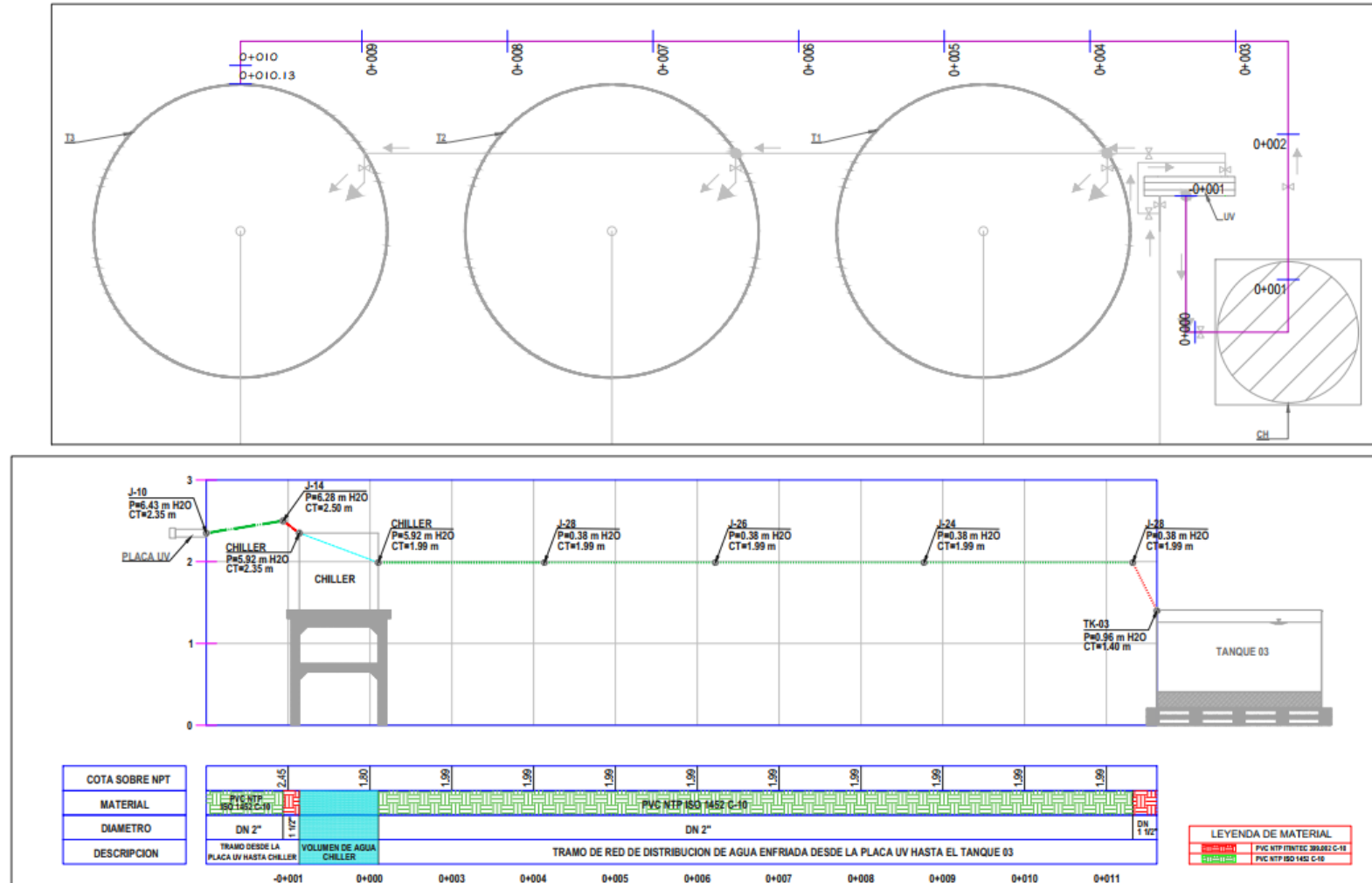


Figura 35: Perfil hidráulico de la red de distribución del sistema RAS –tramo secundario

4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.2.1. Resultados de calidad de agua

4.2.1.1. Calidad de agua en el periodo de investigación

Como parte de la evaluación del funcionamiento del sistema RAS, se realizó la determinación de los principales parámetros de calidad del agua, a fin de asegurar un hábitat apropiado para los peces, y considerando también que las funciones de cada uno de los elementos que componen el sistema RAS se reflejan finalmente en calidad de agua que llega a los tanques de peces, como principal objetivo del sistema en su conjunto. Es así que se observó que, en todo el periodo de trabajo, los parámetros se encontraron dentro de los valores recomendados para la especie. La variación de los parámetros fisicoquímicos está presentada en las Figuras 36 a la Figura 39. Se observa según los niveles promedios y la variación en el tiempo, que las características hidráulicas y procesos que tuvieron lugar en el sistema han permitido tener un hábitat en condiciones prácticamente estables en el tiempo.

Los indicadores de calidad del agua en el sistema, en el transcurrir de los días, han mostrado una tendencia lineal sin pendiente - horizontal, habiendo variado la temperatura entre 24,70 °C y 26,90 °C con un promedio de 26,04±2,46 °C. Es preciso mencionar que estos valores superan a las temperaturas reportadas por Dionicio-Acedo et al. (2018) y Castro-Fuentes et al. (2022), quienes obtuvieron un promedio de 18,83°C; no obstante, en el presente trabajo, los valores extremos no han estado fuera del rango permisible para la especie, León-Palomino et al. (2017) reportaron un límite térmico superior de 32,6°C para juveniles de la especie.

En cuanto a la salinidad y pH del agua, estos parámetros fueron mantenidos en niveles estables, 35,20 ±0,161 ppt, habiendo adicionado para ello agua dulce como reposición de los volúmenes de agua que se perdieron a través de la evaporación que ocurre en los diferentes puntos del RAS (Figura 36). El pH varió entre 7,68 y 8,13, con promedio de 7,79±0,053. Por tratarse de agua de mar el pH se encuentra por encima de 7,0 tal como también lo reporta Dionicio-Acedo et al. (2018) y Castro-Fuentes et al. (2022). El nivel de oxígeno en los tanques se mantuvo en cantidades suficientes para la especie, un mínimo registrado de 5,71 mgO₂ L⁻¹, máximo 6,48 mgO₂ L⁻¹ y un promedio de 6,12±0,047 mgO₂ L⁻¹, equivalente a 90,77±1,024% de saturación (Figura 37). Estos valores son considerados recomendables para la especie y el estadio.

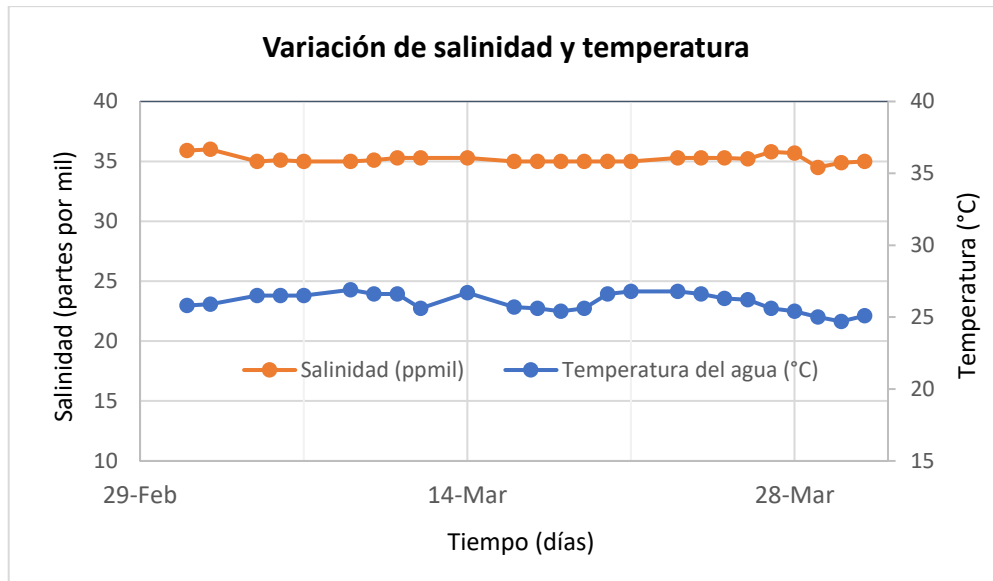


Figura 36: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: salinidad y temperatura

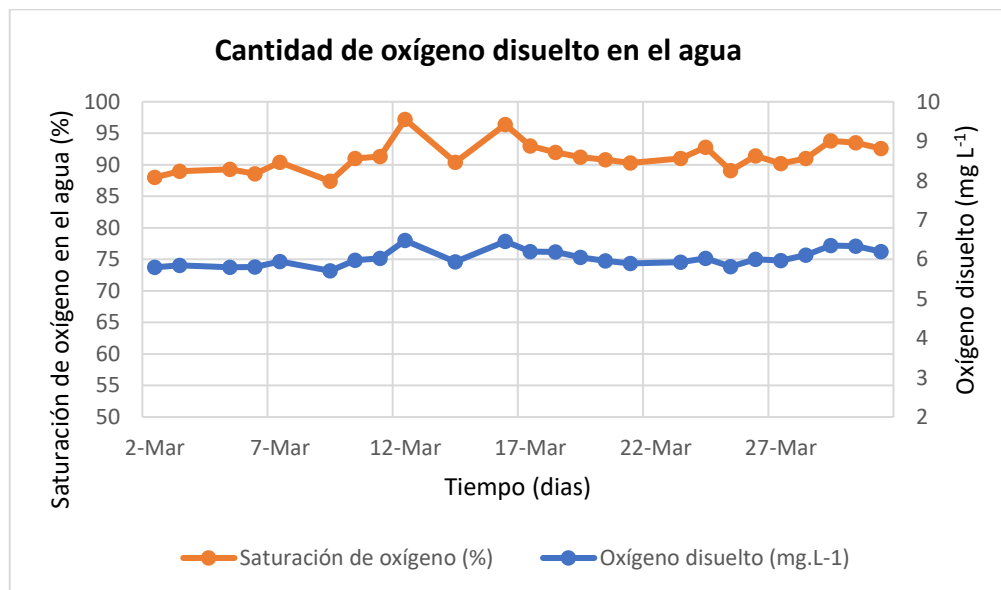


Figura 37: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: saturación de oxígeno y oxígeno disuelto

La concentración de N-Amonio total varió en el periodo de observación entre 0,10 mgN L⁻¹ y 0,50 mg L⁻¹ con un promedio de 0,24±0.078 mg L⁻¹, valores similares obtenidos por otros autores (Dionicio-Acedo et al., 2018; Castro-Fuentes et al., 2022). Kamstra et al. (1998) reportó un máximo de 1,8 mg L⁻¹ en el efluente de un filtro de percolación. Mientras los valores de N-nitrito en el presente estudio se encontraron por encima de los reportados por

los autores antes mencionados: un mínimo de $0,90 \text{ mgN L}^{-1}$ y máximo $3,60 \text{ mg L}^{-1}$, con un promedio de $1,39 \pm 0,328 \text{ mgN L}^{-1}$ (Figura 38). Ambos parámetros variaron dentro de los rangos recomendados para la especie, demostrando que el proceso de nitrificación que ocurrió en el sistema de filtración biológica del RAS había llegado a estabilizarse y mantener niveles adecuados para la especie y según proyecciones realizadas en el diseño.

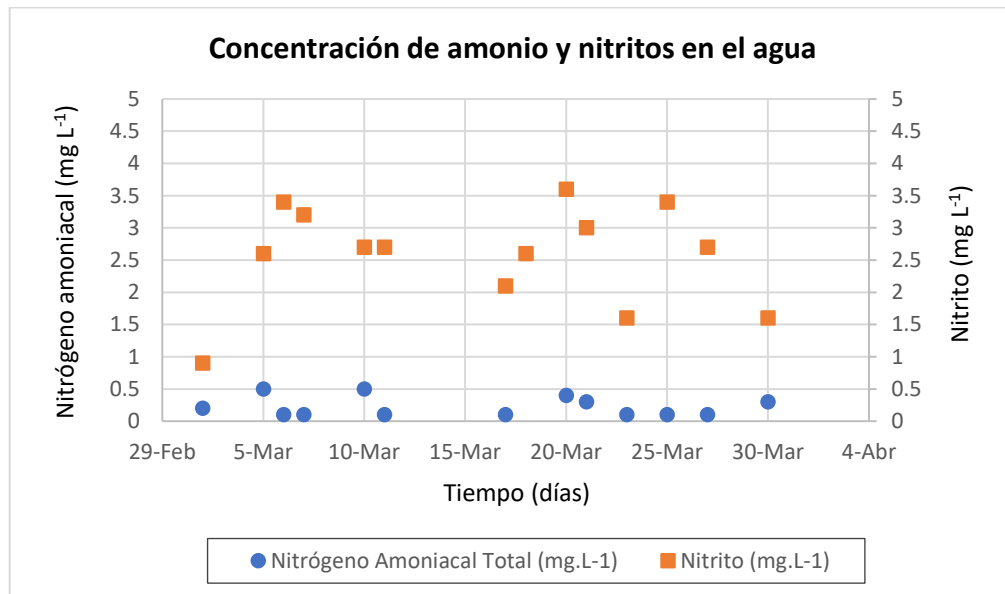


Figura 38: Parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: amonio total y nitrito

Finalmente señalar que los parámetros de N-nitratos y de Alcalinidad se encontraron dentro de rangos adecuados, el N-nitrato mostró variaciones mayores en relación de los otros parámetros, encontrándose en el rango de $312,80 \text{ mgN L}^{-1}$ y $600,00 \text{ mgN L}^{-1}$ con un promedio de $462,00 \text{ mgN L}^{-1}$; estos valores son notablemente superiores al reportado por Castro-Fuentes et al. (2022), señalándose que este investigador trabajó con la especie en edades más tempranas y en condiciones de laboratorio en estricto, por lo que habría acumulado una menor cantidad de nitrato en el sistema.

También aquí es importante señalar que el sistema RAS del presente estudio funcionó con un nivel de reemplazo de agua inferior al 5%, porcentaje bastante bajo comparado con el reporte de otros sistemas RAS, siendo lo promedio en general y por definición 10% a menos, equivalente a lo señalado por Ebeling y Timmons (2012), al indicar estos autores, que los RAS permiten el ahorro de 90 a 99% del agua empleada por sistemas convencionales.

La alcalinidad varió entre 300 mg CaCO₃ L⁻¹ y 550 mg CaCO₃ L⁻¹ con un promedio de 387,50 ± 20,68 mg CaCO₃ L⁻¹, un nivel propio de las aguas marinas (Figura 39).

El conjunto de datos comentados y lo que se puede apreciar en los gráficos correspondientes, demuestran que la calidad del agua en los tanques de peces del RAS, se mantuvo en los rangos más adecuados, con un margen de seguridad que podría permitir trabajar con mayor carga, esto es, una mayor biomasa (kilos de peces) por unidad de volumen del sistema.

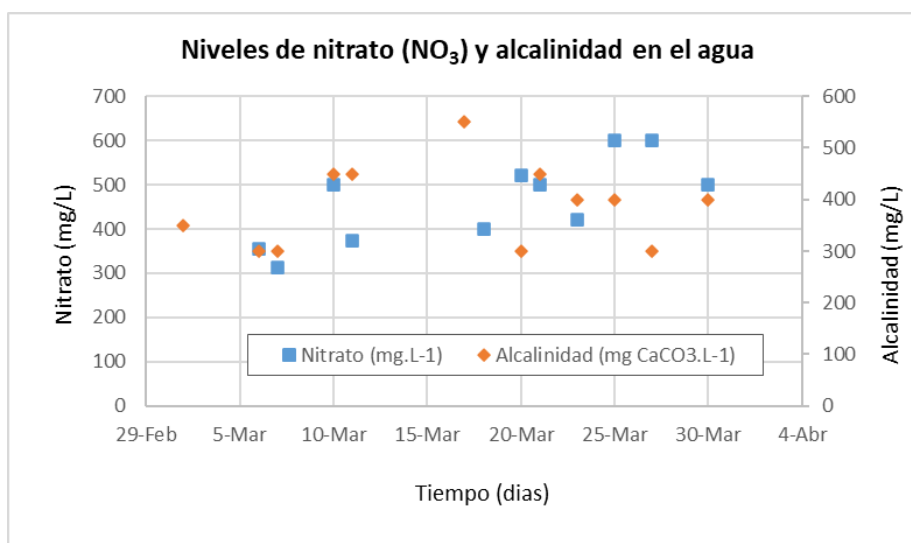


Figura 39: Valores de los parámetros de calidad de agua, y su variación en el tiempo de experimentación: nitrato y alcalinidad

El resumen de los valores promedio obtenidos para los diferentes parámetros de calidad de agua, se muestra en la Figura 40, en un diagrama de flujo donde se muestra las funciones que tiene cada uno de los componentes del RAS sobre los diferentes parámetros de calidad de agua, incrementando o disminuyendo su nivel. En general, los resultados demuestran la adecuada composición o elección de componentes que se adoptó en el diseño del RAS en conjunto, lo que se refleja en valores dentro de los rangos recomendados, con baja variabilidad, con una tendencia horizontal en el tiempo.

En cuanto a los valores de parámetros mostrados, tal como el oxígeno disuelto, éste se encontró permanentemente por encima de 60% de saturación, el mínimo recomendado (Wheaton, 1977; Wheaton et al., 1994). El N-amonio con promedio 0,16 mg L⁻¹, similar al

obtenido en Dionicio-Acedo et al. (2018). De similar manera de N-nitrito. Sin embargo destaca el alto valor del N-nitrato debido a los bajos volúmenes de agua de recambio $< 5\% \text{ d}^{-1}$, siendo el esperado 10% (Ebeling y Timmons, 2012; Isla, 2023; Jover et al., 2003; Lawson, 1995). Finalmente, la alcalinidad en valores relativamente altos pero similares a los encontrados en Yanac et al. (2023).

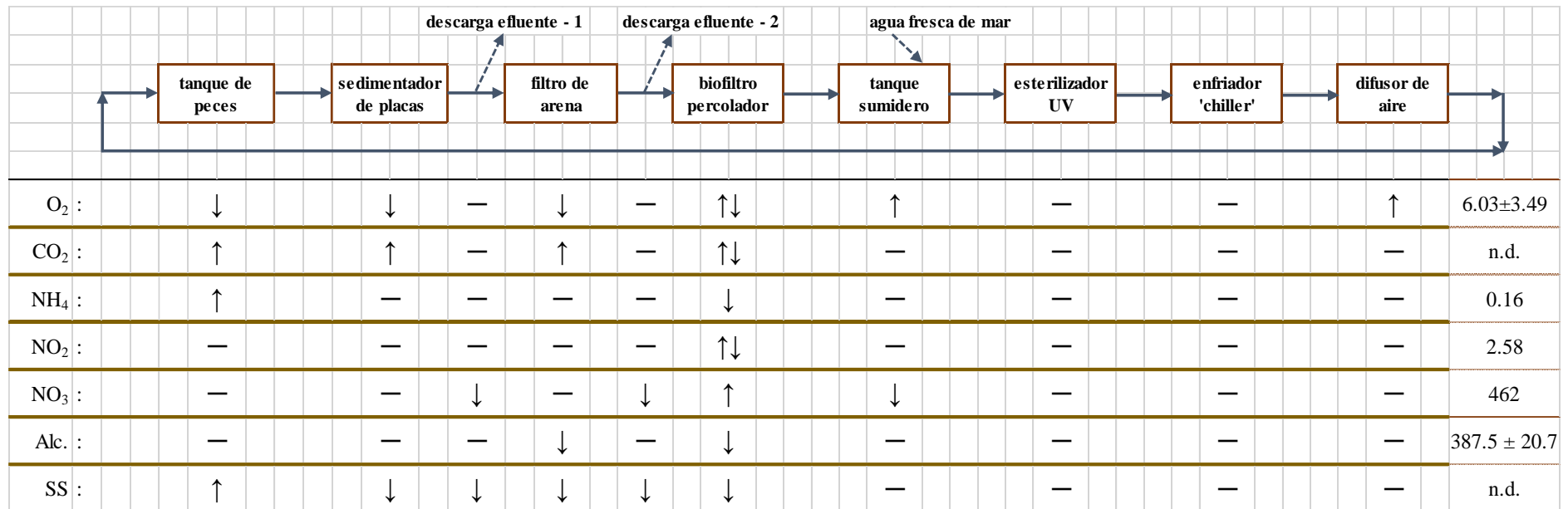


Figura 40: Diagrama de flujo de procesos por componentes del sistema de recirculación, bajo condiciones del estudio

4.2.1.2. Variación horaria de los parámetros de calidad de agua

La variación horaria de los parámetros de calidad de agua, en los sistemas RAS, es un aspecto importante a tomar en cuenta, en mayor grado que en sistemas de crianza convencional, porque tiene relación con la magnitud de los eventos metabólicos de la población en los tanques de peces, principalmente ligados al consumo de alimento. Dada la existencia de la variación horaria se presentan periodos críticos en el transcurso de las 24 horas del día, debido a que uno o más de los parámetros haya superado los límites permisibles para la especie. Pero también estas variaciones tienen relación con el volumen de agua total del sistema. Así, un sistema RAS con reducido volumen de agua, por ejemplo, por ausencia de tanques reservorio, será más sensible a la excreción de desechos en horas de máximo metabolismo de los peces. Al diseñar un sistema RAS se busca obtener parámetros de calidad de agua lo más estable, tanto en el tiempo calendario, pero también en el régimen horario.

La moderada variación horaria de la calidad del agua que se observa en las figuras correspondientes, refleja un proporcional impacto de la excreción de desechos y del metabolismo del alimento consumido sobre la calidad del agua. Podría considerarse en este orden, que el sistema es bastante estable frente a los efectos contaminantes, debido al consumo y metabolismo del alimento (Figura 41 a Figura 43). También se observa que la temperatura del agua no presenta un patrón de variación, por el contrario, una estabilidad alrededor de 25 °C, aunque bien por encima de las temperaturas recomendadas para la especie. La temperatura que optimizaría los procesos fisiológicos de la chita *A. scapularis* en estadio juvenil, es de $18,7 \pm 2$ °C (León 2016; León-Palomino et al., 2017).

Respecto a los desechos excretados por los peces, en un enfoque de “balance de masas”, el suministro de alimento está vinculado a la utilización del alimento, a la excreción de desechos y a la remoción de los mismos, asociados finalmente a la calidad del agua. Requiriéndose para un mejor y más preciso entendimiento de todo ello, de estudios con simulación dinámica, para la predicción de las fluctuaciones horarias de la calidad del agua asociadas al metabolismo del alimento (Kamstra et al., 1998).

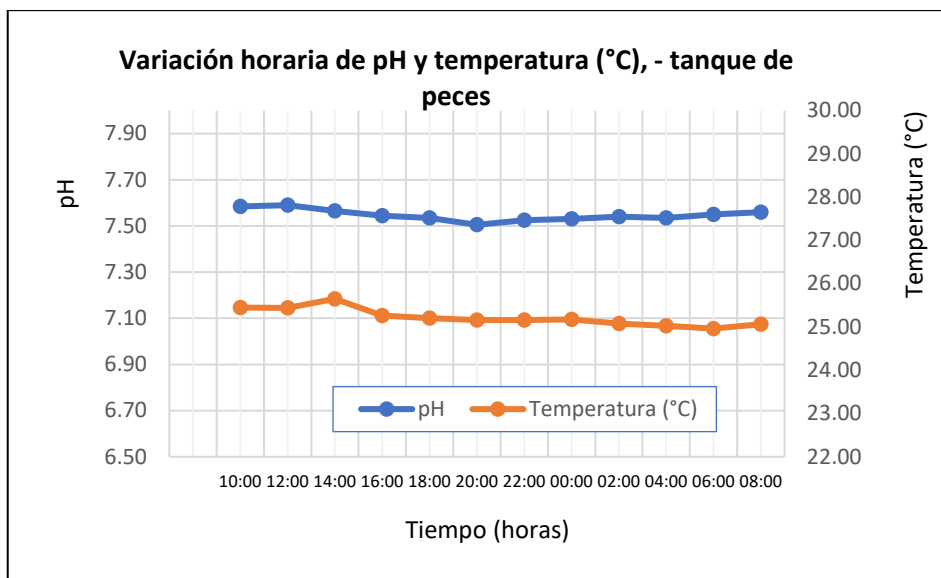


Figura 41: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: pH y temperatura en los tanques de peces

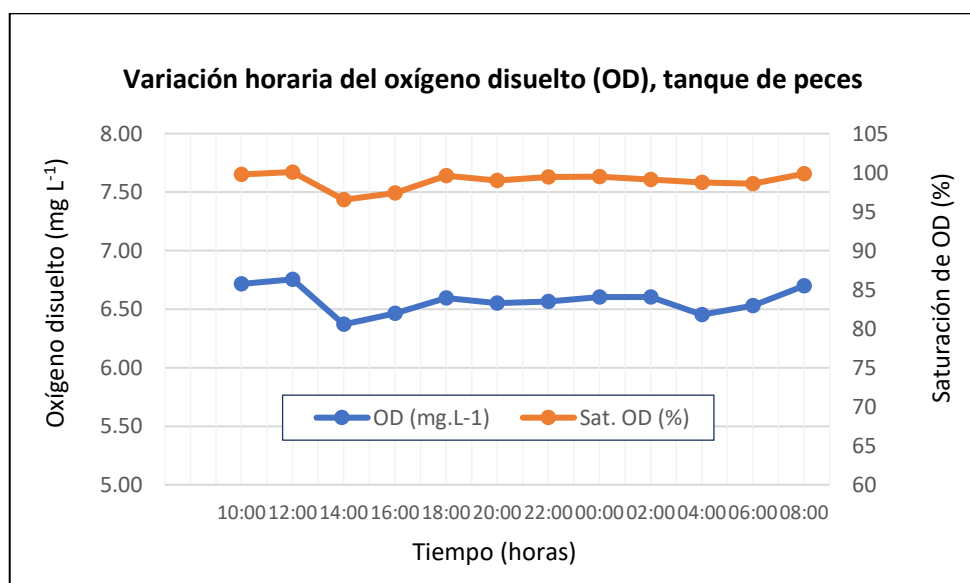


Figura 42: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: oxígeno disuelto en los tanques de peces

Como se puede apreciar en las Figuras 41 y 42, los valores de pH ligeramente por encima de 7,5 propio de agua de mar de buena calidad, y la cantidad de oxígeno disuelto en niveles idóneos para cualquier especie en cultivo, en promedio $6,5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ equivalente a una saturación plena de este gas que es indispensable para la buena performance en crecimiento como en utilización del alimento. La variación horaria de la concentración de amonio en el

agua, como factor más limitante en los sistemas de crianza de peces, se asocia con el régimen de alimentación, así Kvamme et al. (2018) encontró que alimentando salmones en un sistema RAS a diferentes tasas específicas de flujo de agua, a las 9 – 10 a.m. y 3 – 4 p.m., los picos de excreción se presentan a las 7 p.m. independientemente de las tasas específicas de flujo de agua. De lo mostrado en la Figura 43, se aprecia que no existen picos en la concentración de amonio, sino más bien ligeras variaciones dentro de los rangos aceptables para *A. scapularis*.

En cuanto al nitrito, este es un compuesto que penetra a través de las membranas de las branquias para interferir con el transporte de la hemoglobina en la sangre, y provoca la denominada “enfermedad de la sangre marrón”, Pattillo (2014). Este autor señala que la trucha muere con concentraciones de 0,15 ppm, mientras el bagre de canal – más resistente – llega hasta 29 ppm. Los niveles hallados en las determinaciones de 24 horas, en el presente estudio, no superaron 2,20 ppm, no habiéndose observado algún comportamiento de los peces, típico a la presencia de nitrito en niveles tóxicos para la especie.

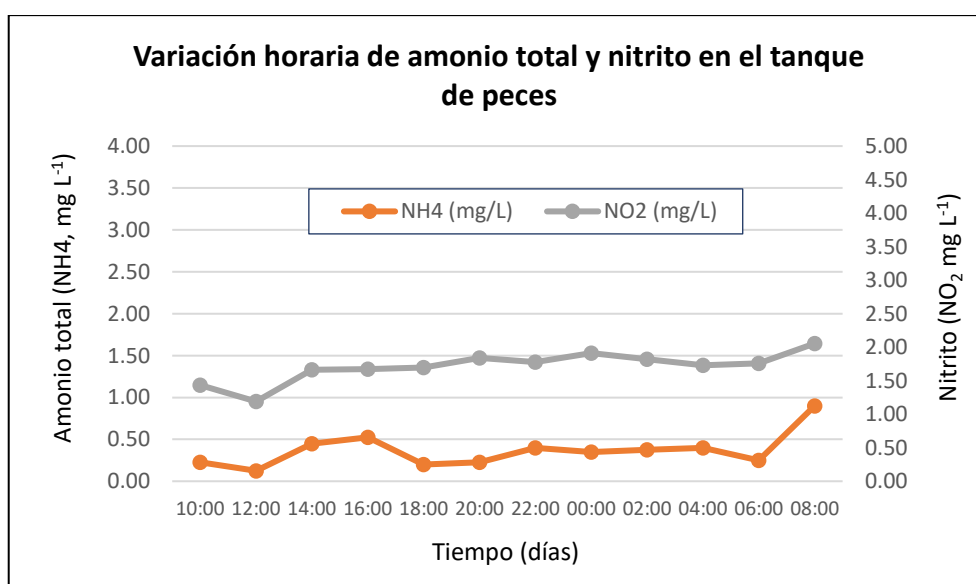


Figura 43: Variación horaria de los parámetros de calidad de agua en el sistema RAS: amonio total (NH₃ + NH₄) y nitrito (NO₂)

En cuanto a los niveles de nitrato en el presente trabajo se mantuvieron aceptables, aunque cercano a los límites superiores, debido a la baja tasa de reemplazo de agua (con ingreso de agua nueva) en el sistema. Pattillo (2014) indicó que los niveles aceptables de nitrato para

trucha se encuentran debajo de 250 ppm, mientras los bagres pueden tolerar hasta 400 ppm. Además, señala que una práctica usual es realizar un reemplazo del 10% diario del volumen total de agua del RAS recomendando mantener buena oxigenación en todas las partes del RAS para evitar su retorno a nitrito o amonio. Waller et al. (2001), señalan que la reposición con agua nueva en una cantidad $< 5 \% d^{-1}$, permite tener la calidad de agua siempre dentro de los rangos seguros en densidades de hasta 46 kg m^{-3} , de la especie marina ‘sea bass’ (*Dicentrarchus labrax*). Esto último estaría concordando con lo que se ha observado durante el experimento con la especie marina Chita, donde con bajos niveles de reemplazo de agua del sistema con agua nueva, se ha llegado a niveles relativamente altos de nitrato, sin llegar a valores extremos peligrosos.

4.2.2. Crecimiento de la especie *A. scapularis* y utilización del alimento

4.2.2.1. Curva de crecimiento de *A. scapularis*

Tal como la teoría lo señala, se observa que el crecimiento de los peces en longitud total (LT), sigue una tendencia lineal en el tiempo, con pendiente positiva (Figura 44).

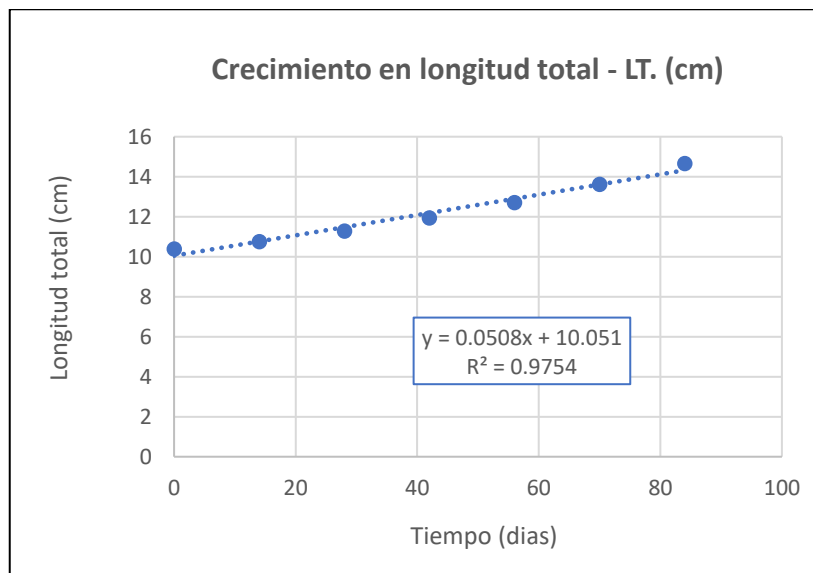


Figura 44: Crecimiento en longitud (LT) de *A. scapularis*, bajo condiciones del experimento.

Asimismo, el crecimiento medido en peso corporal, presenta un comportamiento exponencial, $W_t = W_o e^{st}$, ecuación presentada por Heinsbroek (1990) (Figura 45).

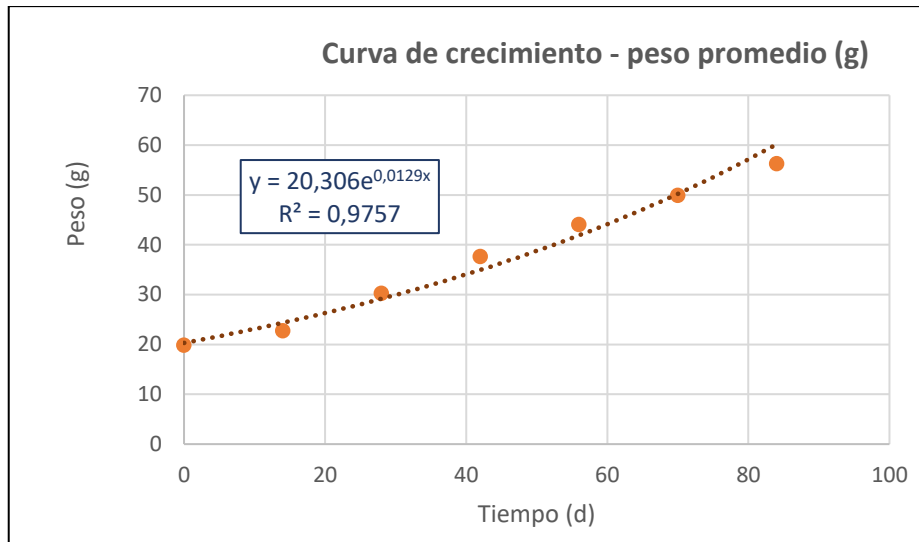


Figura 45: Curva de crecimiento – en peso (W) – de *A. scapularis*, bajo condiciones del experimento en sistema RAS

Por otro lado, la relación longitud total – peso corporal, $\text{Peso} = 0,0174L^{3,051}$, encontrado en el presente estudio, en comparación con lo reportado por Dionicio-Acedo et al. (2018), ($\text{Peso} = 0,0254L^{2,967}$) refleja un menor índice de condición (Figura 46), que podría explicarse con el hecho que los volúmenes de agua de cultivo fueron diferentes o también sería un factor influyente la procedencia de los peces experimentales. En el presente trabajo se emplearon ejemplares capturados del medio natural, mientras los autores referidos trabajaron con peces nacidos en laboratorio.

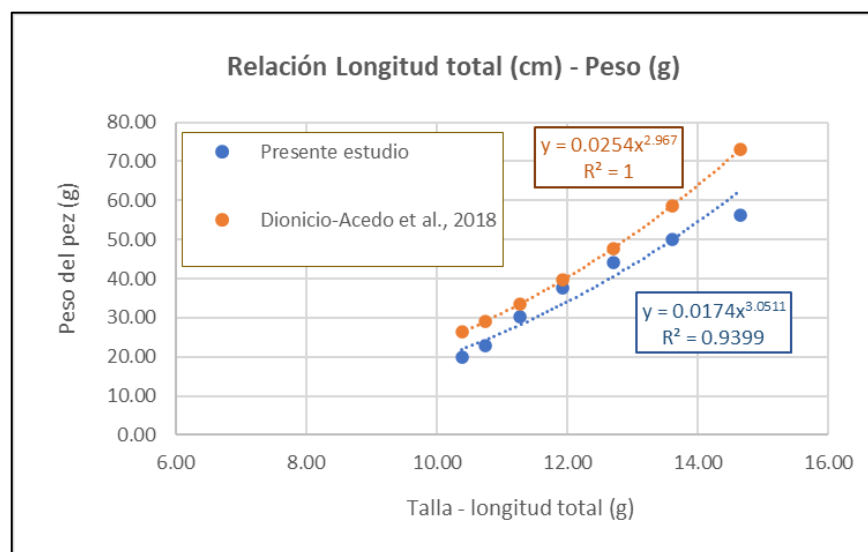


Figura 46: Curvas resultantes de la relación longitud total-peso corporal, de *A. scapularis*, y lo hallado por Dionicio-Acedo et al. (2018)

En cuanto a la evolución del crecimiento en valores relativos, $\text{g kg}^{-1} \text{d}^{-1}$, la curva que describe el comportamiento sigue la tendencia característica, con pendiente decreciente en grado moderado (Figura 47), con un promedio de $12,34 \pm 1,904$. En general los peces incrementan en peso cada día en una menor proporción expresado por unidad de peso corporal, debido a la disminución del ritmo metabólico en general. La tasa específica de crecimiento (SGR) para el periodo de evaluación resultó en $1,24 \pm 0,192 \% \text{BW d}^{-1}$, siendo BW el peso corporal. Cota et al. (2017), reportaron tasas específicas de crecimiento de $1,52 \pm 0,02 \% \text{g d}^{-1}$ al alimentar juveniles de *Anisotremus scapularis* con alimento comercial de 50% proteína y 15% de lípidos.

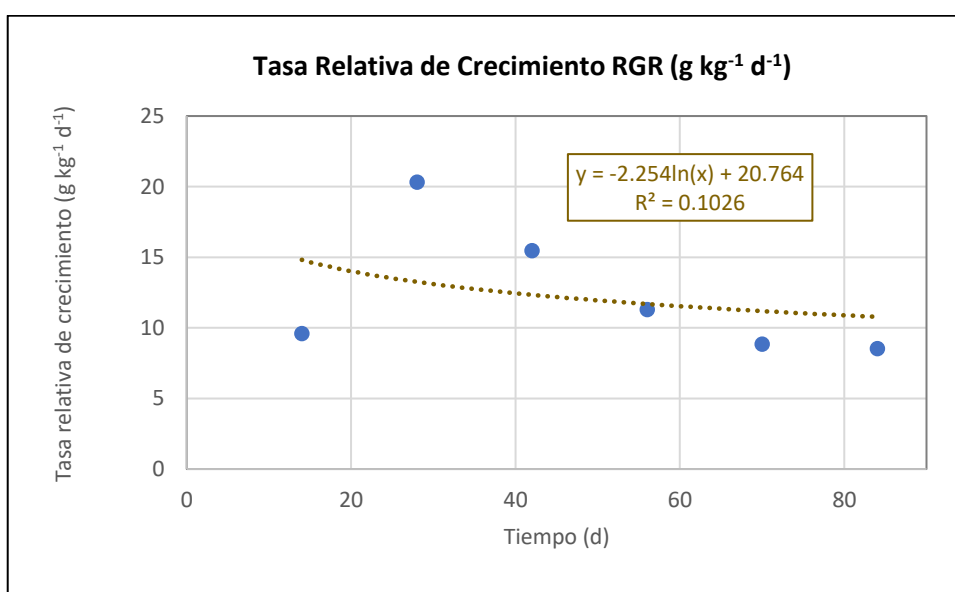


Figura 47: Tasa relativa de crecimiento de *A. scapularis*, en condiciones del presente estudio

4.2.2.2. Consumo y conversión del alimento

El consumo de alimento en niveles adecuados refleja condiciones apropiadas de hábitat y también es responsable del nivel de ganancia de peso. Si la medida se expresa en gramos de alimento que consume cada pez por día, se tendría una tendencia a incrementarse en el tiempo. La Figura 48 muestra una clara tendencia lineal.

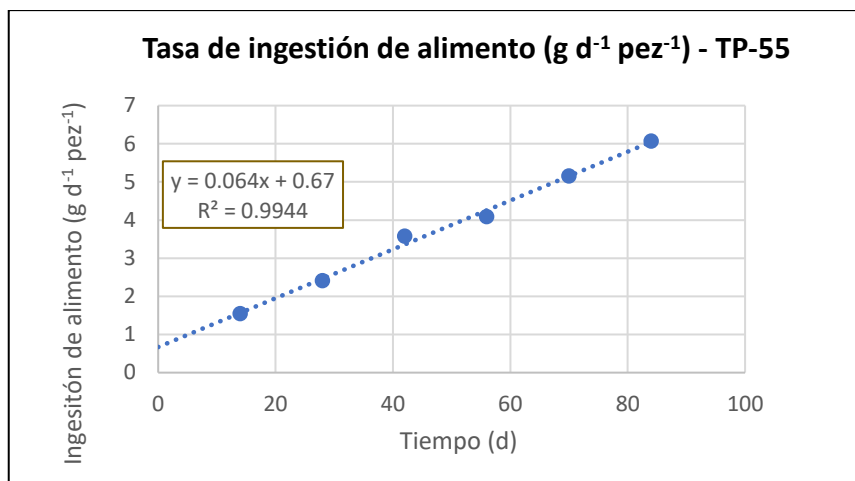


Figura 48: Consumo de alimento individual, en gramos por pez, en el periodo de experimentación

Otro aspecto importante en la alimentación es determinar cómo se distribuye el consumo de alimento durante el día. En el presente trabajo se entregó tres raciones, y lo que muestra la Figura 49 es que el consumo diario se distribuye prácticamente de manera uniforme entre las tres comidas diarias: en promedio 33% del consumo diario en cada turno de comida. Por un lado, ello refleja que las condiciones de calidad de agua – horaria – son constantes y por otro lado indica que la producción de desechos ocurrirá de manera uniforme sin picos pronunciados – al darse el consumo de alimento distribuido en tres fracciones iguales – y por lo tanto el sistema de tratamiento de agua no enfrentará valores extremos de excreción.

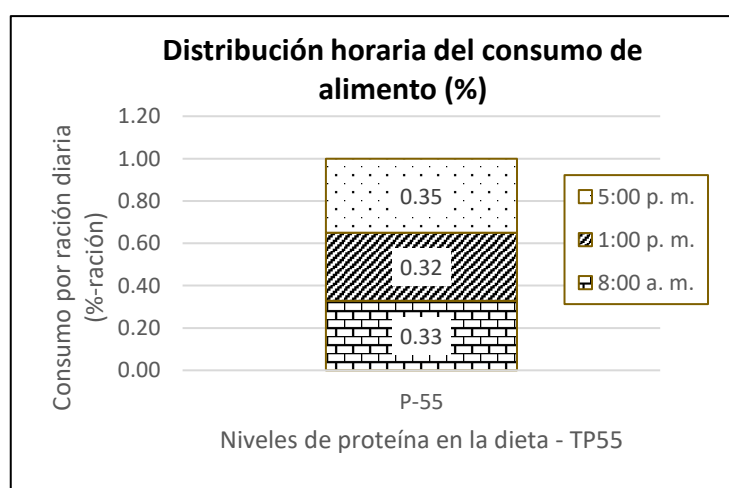


Figura 49: Distribución del consumo diario de alimento (%), en las raciones entregadas por día

Relacionando la cantidad de alimento consumido con el peso corporal, se obtiene valores de tasas de alimentación con un promedio de 9,88% BW d⁻¹, con un mínimo de 7,25 y máximo de 11,43% BW d⁻¹. Estos valores son superiores a los hallados por Dionicio-Acedo et al. (2018) (3,79 a 2,76% biomasa d⁻¹ a 22 °C), debido a que en el presente trabajo la temperatura se encontró alrededor de 25°C. La tendencia de los valores encontrados (Figura 50) se ajusta a una ecuación polinómica indicando que el consumo de alimento porcentual respecto del peso del pez, va disminuyendo en el tiempo y con el incremento del tamaño corporal.

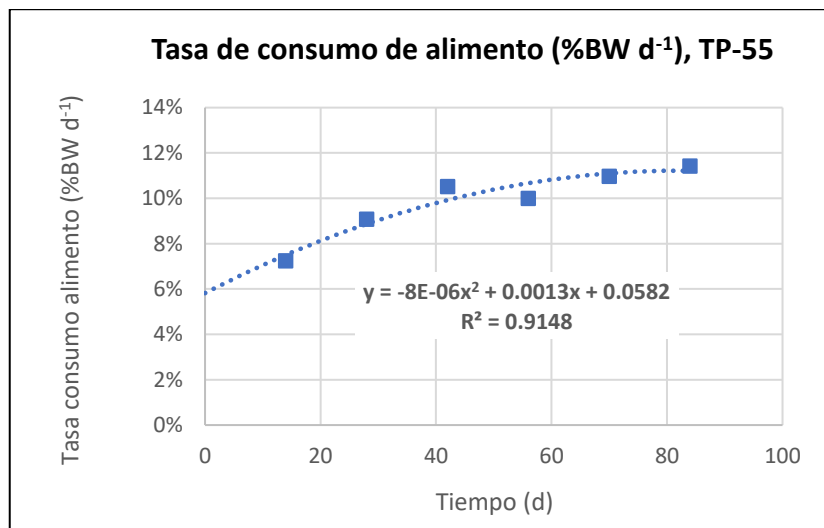


Figura 50: Variación de la tasa relativa de alimentación (%BW d⁻¹), en *A. scapularis*, durante el periodo de evaluación

Finalmente, la conversión del alimento durante el periodo de experimentación, alcanzó un valor promedio de $2,93 \pm 0,25$, considerándose este valor relativamente elevado, y refleja una eficiencia moderada de utilización de alimento. Posiblemente ello esté asociado a una desproporción entre la cantidad de proteína (55%) y la cantidad de energía contenidos en el alimento. Cota et al. (2017), reportaron conversiones alimenticias de $1,42 \pm 0,03$ al alimentar juveniles de *Anisotremus scapularis* con alimento comercial de 50% proteína.

4.2.3. Características operacionales del Sistema RAS

4.2.3.1. Equilibrio de caudales – niveles de agua en el sistema RAS

Como resultado de la instalación del sistema RAS, y su funcionamiento, se ha visualizado y enfrentado la necesidad de realizar un manejo constante de caudales, niveles de agua y de

presiones, empleando para ello las válvulas de paso y tuberías de reboce del sistema. Por ello es muy importante disponer de una cantidad adecuada de estos elementos y la ubicación correcta de ellos. Mas aun cuando el tipo de funcionamiento es el que se utilizó en el presente estudio, con directa alimentación a los tanques de peces desde la bomba principal del sistema.

En la Figura 51 se observa el ramal de tubería con denominación “Retorno – Sumidero 2”, que sirve de alivio a la línea de impulsión de la bomba principal del sistema RAS. Ramal que fue instalado después que se registró una falla por explosión de la lampara UV al excederse de presión en la tubería. En la figura se observa el diagrama típico de tuberías donde se aprecia un ramal que por lo general no se proyecta, pero que resulta necesario a fin de tener un fácil y adecuado manejo de caudales y presiones en la parte donde se ubica la bomba principal del sistema.

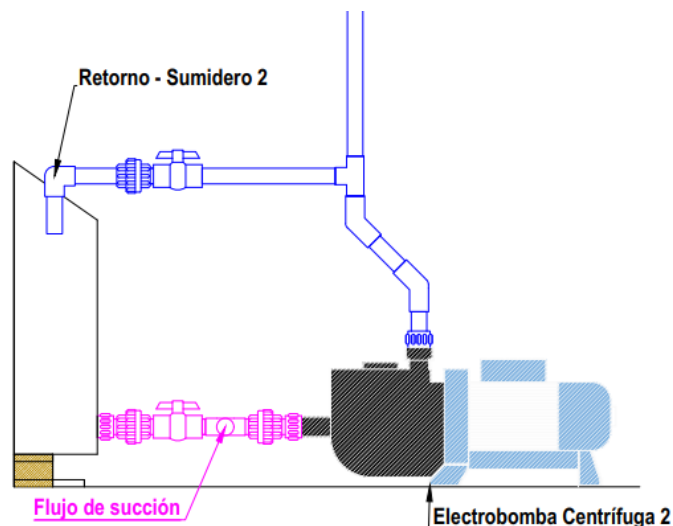


Figura 51: Ilustración de la ubicación y funcionamiento de una tubería de retorno para regulación de presiones y de caudales

La distribución general de la red de tuberías instalada ha permitido distribuir adecuadamente los caudales y regular las presiones a partir de la succión desde el tanque sumidero y hacia la lampara UV o directamente a los tanques de peces, hacia el biofiltro y hacia la tubería de retorno, siendo este último un medio de alivio para regular la presión en la línea de impulsión.

4.2.3.2. Relación tasas de flujo y volúmenes de agua: tiempo de retención hidráulica (TRH)

En el presente trabajo, se desarrolló este ítem con el propósito de caracterización de los diferentes contenedores instalados en el sistema RAS marino, en vista que este parámetro tiene relación con el grado o intensidad con la que ocurren los diferentes procesos propios de cada contenedor de agua. Recogiendo los conceptos vertidos por varios autores, la definición podría plasmarse en la siguiente fórmula:

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

Siendo,

TRH: tiempo de retención hidráulica (horas)

V: volumen (m³)

Q: caudal (m³ h⁻¹).

Entendiéndose que el caudal de ingreso es igual al caudal de salida.

Los volúmenes están definidos desde que se han realizado los cálculos para la definición de los diferentes componentes, y en esta parte corresponde exponer los caudales que han permitido obtener las condiciones de calidad de agua y los rendimientos biológicos que también se han expuesto como resultados del desarrollo de la especie. En la Figura 52, se muestran los caudales que han circulado en cada uno de los componentes del sistema y de la red de distribución de agua.

potencia de este equipo. Los caudales de funcionamiento final son cambiantes según las actividades que se realizan principalmente en los tanques de ces, es algo que lo define cada operador, evidentemente dentro de ciertos rangos. Precisamente el manejo de este tipo de instalaciones requiere de conocimientos y criterios propios que se desarrollan con la práctica, tras ver los resultados en el crecimiento y supervivencia de los peces. El manejo de los sistemas RAS requiere de destreza del operador para obtener los mejores rendimientos de cada uno de los componentes del sistema; obviamente en base al ingreso de los insumos necesarios, bajo un esquema de balance de masas.

Volviendo a referir la información sobre el TRH, los resultados de los cálculos correspondientes para los contenedores más representativos, en cuanto a volumen del RAS, se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18: Características hidráulicas de los componentes del sistema de recirculación RAS marino

Componente RAS	Volumen (V, m³)	Tasa flujo (Q, m³ h⁻¹)	Tiempo de retención hidráulica (TRH, h)
Tanque de peces (FISH TK)	3,254	0,853	3,813
Sedimentador placas paralelas (PST)	0,768	2,540	0,302
Filtro de arena (SF)	0,365	3,940	0,093
Filtro de percolación TK-F	0,487	1,020	0,477
Tanque sumidero (SUMP)	0,450	3,940	0,114
Tanque enfriamiento 'chiller' (CH)	0,580	0,640	0,906

Los reportes sobre tasas de recambio, los hay para tanques de peces, en valores elevados como es el caso De Leon-Ramirez et al. (2022), que evaluó 1,2, 2,8 y 5,3 volúmenes de tanque por hora. O referidos a la cantidad de alimento entregado, 70 a 2 000 litros de agua por kilo de alimento (Jesu-Prabhu et al., 2017). Mientras otras publicaciones refieren la tasa de recambio a la relación entre la cantidad de agua nueva que ingresa al sistema respecto al volumen total de agua en él (Good et al., 2009), mencionando valores de 2,6%, 0,26% de agua nueva por día, asociado a cargas promedio de alimento de 0,39 y 4,1 kg m³ d⁻¹ de agua nueva para el bajo y alto recambio respectivamente. Como también los recambios de la masa de agua fueron estudiados en términos de su impacto en la aparición de los valores máximos de excreción de desechos, encontrándose que no existe relación (Kvamme et al., 2018).

Los valores de TRH en los tanques de peces, resultan comparativamente bajos, y la justificación radica en que el sistema RAS empleado, contaba con una línea de aireación, lo cual aseguró las cantidades de oxígeno suficientes y constante durante el tiempo que duró el trabajo, evitando además la sedimentación de partículas en el tanque por la constante turbulencia generada al ascenso de las burbujas en la columna de agua.

Los valores de TRH mostrados en la Tabla 18 para los otros componentes del RAS, frente a la falta de información similar a los parámetros calculados, queda a manera de referencia para futuros trabajos, en los que se brinde una justa importancia a este parámetro, en vista de su gran significancia en el funcionamiento de cada uno de los componentes, reflejados en sus respectivos indicadores de eficiencia.

4.3. APLICACIÓN DE WaterCAD EN LA SIMULACIÓN

La instalación de los sistemas RAS se han venido realizando a la actualidad, en casos mejor desarrollados, realizando los cálculos hidráulicos de manera aislada, sin tener un diagnóstico del funcionamiento de las redes de conducción de agua, en conjunto.

Durante el desarrollo del presente estudio, la aplicación de la simulación con el software WaterCAD ha permitido tener un reporte sobre el funcionamiento hidráulico de las redes en toda su extensión, en vista que son frecuentes las fallas por la incidencia de elevadas presiones. Tal como se ha visto en artículos científicos previos el WaterCAD ha sido usado satisfactoriamente en una investigación Kusnayat et al. (2019), mostrando una performance similar o superior frente a otros similares, permitiendo una mayor precisión respecto a estudios previos, y además un menor tiempo que demandaría realizar el trabajo por métodos manuales. Estos softwares han resultado suficientemente adecuados, recomendándose su uso en el análisis de Sistemas de Distribución de Agua (con siglas en inglés, WDS) en proyectos de abastecimiento de agua para consumo humano, y en esta oportunidad, en proyectos sobre sistemas RAS.

En la actualidad existen varios programas orientados al cálculo de redes hidráulicas a presión que facilitan a la ingeniería y brindan resultados concretos. Uno de los softwares que existen en el mercado es el WaterCAD. Este software ayuda a realizar una simulación hidráulica de una red de abastecimiento de una localidad para poder estudiar aspectos como los consumos, posibles pérdidas de caudal, etc. Sin embargo, como se ha mencionado, existen también otros programas con funciones y herramientas parecidas, razón por la cual en este trabajo de

investigación se proporcionarán las ventajas de este software y similitudes que pueden existir que lo ha llevado a ser tan empleado en la actualidad en la rama de la ingeniería.

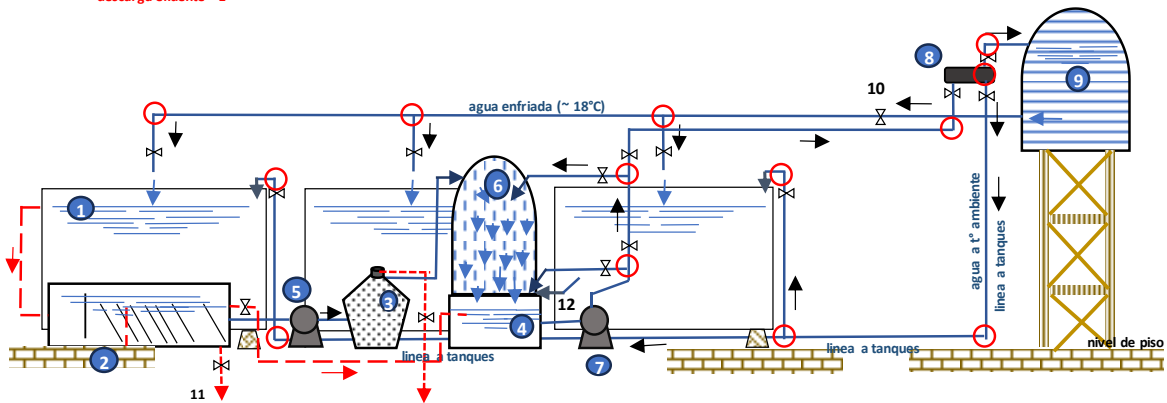
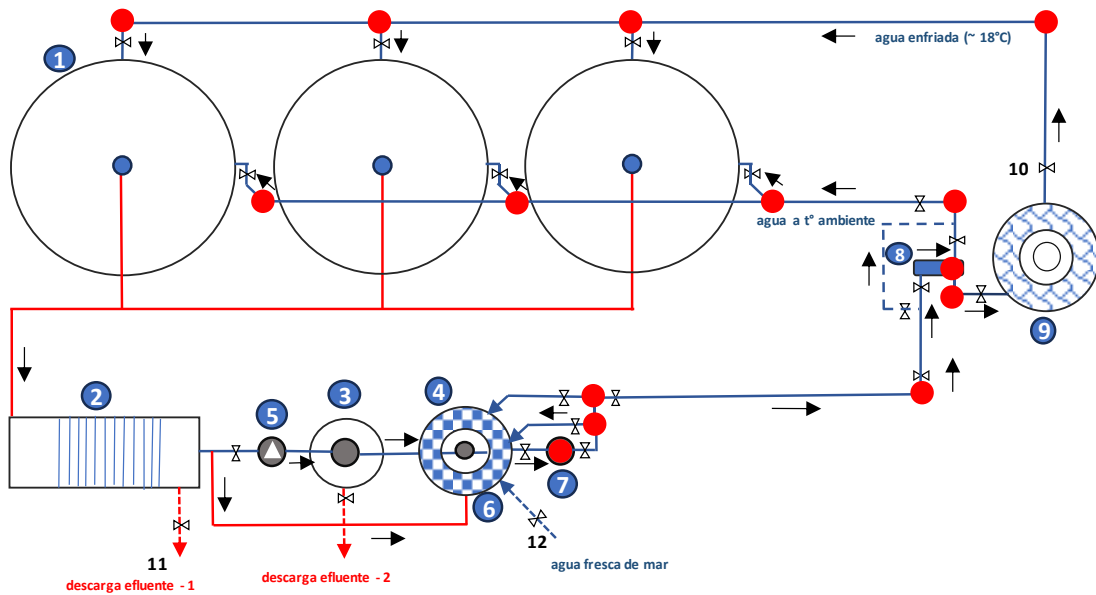
El sistema de recirculación marina está conformado principalmente por una fuente de abastecimiento, línea de impulsión, redes de distribución, tuberías de retorno y demás estructuras hidráulicas como el biofiltro (TK-F), tanque de enfriamiento (CH) y componentes menores como válvulas, bombas, entre otros. Estos componentes en conjunto y bajo condiciones de operación dan lugar a un comportamiento complejo del flujo de agua, que es necesario comprender para realizar el diseño acorde a los requerimientos de consumo y operatividad.

En cuanto a la aplicación del software WaterCAD, dado que el presente trabajo es el primero reportado en el campo de la acuicultura, se tuvo como propósito general, poner en práctica la aplicación del WaterCAD para el diseño de redes de sistema de recirculación marina. Y a nivel específico se consideró: (i) Conocer los comandos y herramientas del software, (ii) Realizar los dibujos en versión de AutoCAD y el manejo básico del interfaz de la misma. y (iii) Desarrollar el proceso para el diseño de un sistema de recirculación marina, en WaterCAD.

a. Metodología para el diseño

A efectos de generar un material que al mismo tiempo cumpla una función didáctica, se presenta primeramente el esquema elaborado acerca de la distribución general del RAS, de la ubicación de los nodos, definiéndose estos, como los puntos donde la tubería presenta un cambio significativo de dirección y generalmente acompañado de la presencia de un accesorio, que representa una pérdida local y/o un cambio en las condiciones de flujo de agua. En la Figura 53, se observa el esquema de ubicación de los nodos, definidos según criterios de hidráulica.

(a). Vista de planta, sistema de recirculación para acuicultura con agua de mar.



(b). Vista en elevación, sistema de recirculación para acuicultura con agua de mar.

●	Nodos en vista de planta
○	Nodos en vista de elevación
Caudal (Q): $m^3 \cdot h^{-1}$	

- | | |
|--|--|
| 1. Tanque para cría de peces | 7. Electrobomba - 2 |
| 2. Sedimentador de placas, de alta tasa | 8. Lámpara de luz ultravioleta UV |
| 3. Filtro presurizado, de arena de alta tasa | 9. Enfriador - 'chiller' |
| 4. Tanque sumidero | 10. Válvulas de paso, de control |
| 5. Electrobomba - 1 | 11. Salidas de agua, efluente de purga |
| 6. Biofiltro percolador | 12. Ingreso de agua fresca marina, de reposición |

Figura 53: Esquema de ubicación de NODOS, en la vista de plana y elevación del RAS marino

Para el análisis hidráulico del sistema de recirculación marina se puede utilizar el método de Hardy Cross, seccionamiento o cualquier otro método convencional. En el presente trabajo se utilizó el programa WaterCAD. Se planteó según el diseño y las presiones necesarias para el funcionamiento hidráulico adecuado de los tanques

de peces, un sistema de redes de acuerdo con el cálculo hidráulico realizado en el dimensionamiento de los componentes del RAS, por lo que se ingresaron los caudales demandados a distribuir – por tramos – a través de tuberías de diámetros diferentes, que se aprecia en la imagen mostrada en la Figura 54.

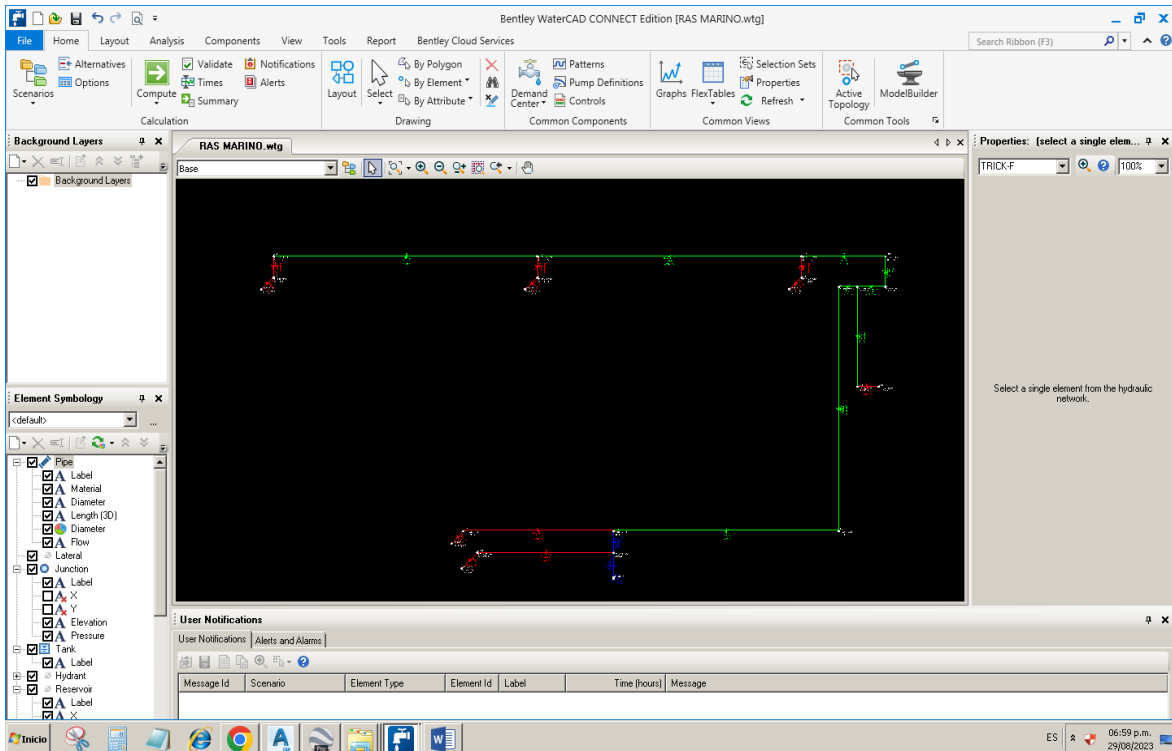


Figura 54: Representación de las redes de abastecimiento en el programa WATERCAD, a partir del plano en AutoCAD

La distribución de caudales en el sistema de recirculación marina se ha dimensionado, según criterios técnicos de manejo para este tipo de instalación, predominando las necesidades de calidad de agua y bienestar de los organismos vivos, tomando como referencia la publicación “Better Management Practices for Recirculating Aquaculture” de Summerfelt y Vinci (2009), antes que algún reglamento – que aún no existe en acuicultura. De esta manera se asegura una dotación de agua a los tanques, en cantidades suficientes, privilegiando el bienestar animal.

b. Tuberías

Se usaron tuberías lisas de PVC clase 10, cuyos datos de longitud se muestran en la Figura 55. Para el cálculo hidráulico de las tuberías se aplicaron fórmulas normalizadas de hidráulica. En el presente caso se aplicó la fórmula de Hazen Williams utilizando los coeficientes de fricción correspondientes al material PVC. Las tuberías de policloruro de vinilo (PVC), 'polyvinyl chloride' en inglés, es un plástico que ha demostrado ser resistente al agua salada, de amplio uso en acuicultura y con buenos resultados en cuanto a durabilidad e inerte al contacto permanente con el agua.

FlexTable: Pipe Table												
Etiqueta	Nodo Inicio	Nodo Final	Longitud (3D) (m)	Diametro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Hazen-Williams C	Gradiente de Pérdida de Carga (m/km)	Pérdida de Presión (m H2O)	Pérdida de Carga (m)	Velocidad (m/s)	
T-1	J-2	J-1	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-2	J-4	J-3	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-3	J-6	J-5	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-4	J-8	TRICK-F	0.21	43.40	PVC	0.56	150.0	4.10	0.00	0.00	0.38	
T-6	J-9	J-10	0.18	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.00	0.00	0.98	
T-7	J-10	J-20	0.27	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.00	0.00	0.56	
T-8	J-10	J-14	0.95	43.40	PVC	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30	
T-9	J-11	J-6	1.47	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-10	J-12	J-2	1.53	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-11	J-12	J-11	2.55	57.00	PVC	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12	
T-12	J-13	J-4	1.47	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20	
T-13	J-13	J-12	2.55	57.00	PVC	0.60	150.0	1.23	0.00	0.00	0.24	
T-14	J-14	CHILLER	0.25	43.40	PVC	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30	
T-15	J-16	J-17	0.97	67.80	PVC	3.05	150.0	10.76	0.01	0.01	0.84	
T-16	J-16	J-19	1.31	43.40	PVC	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26	
T-5	J-17	J-8	1.45	43.40	PVC	0.56	150.0	4.10	0.01	0.01	0.38	
T-18	J-17	J-29	2.18	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98	
T-19	J-19	RETORNO	0.24	43.40	PVC	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26	
T-20	J-20	J-21	2.30	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56	
T-21	J-21	J-13	0.81	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56	
T-22	J-22	TK-03	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10	
T-23	J-24	TK-02	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10	
T-24	J-24	J-22	2.55	57.00	PVC	0.15	150.0	0.09	0.00	0.00	0.06	
T-25	J-26	TK-01	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10	
T-26	J-26	J-24	2.55	57.00	PVC	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12	
T-27	J-28	J-26	2.09	57.00	PVC	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18	
T-28	J-29	J-9	2.34	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98	
T-29	T-6	PUMP	0.22	67.80	PVC	3.43	150.0	13.38	0.00	0.00	0.95	
T-17	PUMP	J-16	0.96	67.80	PVC	3.43	150.0	13.38	0.01	0.01	0.95	
CHILLER	CHILLER	J-28	2.03	57.00	PVC	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18	

Figura 55: Datos hidráulicos para los diferentes nodos, resultante del procesamiento con el WaterCAD

c. Presión del agua

En cuanto a la presión del agua, debe ser aquella suficiente para que el agua pueda llegar a todas las instalaciones, con los caudales requeridos. La presión máxima será aquella que no origine consumos excesivos por parte del sistema y no produzca daños a los componentes del mismo, por lo que la presión dinámica en cualquier punto de la red no será menor de 0,30 m y la presión estática no será mayor de 10

m. Así, la Figura 56 muestra una imagen de captura con el reporte de ubicación de los nodos, las gradientes y presiones en la red de distribución del sistema RAS.

FlexTable: Junction Table						
Etiqueta	Este (X)	Norte (Y)	Elevacion	Gradiente Hidraulico	Presion (in H2O)	Presion de Carga
CHILLER	261,293.96	8,657,345.87	2.35	8.79	6.43	6.44
J-1	261,290.55	8,657,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-2	261,290.67	8,657,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-3	261,293.10	8,657,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-4	261,293.22	8,657,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-5	261,288.00	8,657,346.78	1.41	8.77	7.24	7.26
J-6	261,288.11	8,657,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-8	261,289.95	8,657,344.51	1.90	8.87	6.96	6.97
J-9	261,293.58	8,657,346.81	2.35	8.80	6.44	6.45
J-10	261,293.76	8,657,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-11	261,288.11	8,657,347.10	0.07	8.77	8.68	8.70
J-12	261,290.67	8,657,347.10	0.01	8.77	8.75	8.76
J-13	261,293.22	8,657,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-14	261,293.76	8,657,345.87	2.50	8.79	6.28	6.29
J-16	261,291.40	8,657,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-17	261,291.40	8,657,344.51	1.90	8.88	6.96	6.98
J-19	261,290.09	8,657,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-20	261,294.03	8,657,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-21	261,294.03	8,657,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-22	261,287.26	8,657,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-24	261,289.82	8,657,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-26	261,292.37	8,657,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-28	261,294.46	8,657,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-29	261,293.58	8,657,344.51	1.90	8.84	6.93	6.94
RESTORNO	261,289.94	8,657,344.16	0.83	8.89	8.04	8.06
TK-01	261,292.37	8,657,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-02	261,289.82	8,657,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-03	261,287.26	8,657,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TRUCK-F	261,289.84	8,657,344.40	1.78	8.87	7.68	7.69

Figura 56: Datos de ubicación de nodos, gradientes y presión en el sistema, resultante del procesamiento con WaterCAD

d. Procedimiento seguido en el modelado en WaterCAD

Para realizar el diseño hidráulico de tuberías, para la impulsión de agua de un punto de captación al sistema de recirculación marina, se ha diferenciado dos (02) ramales: una red PRINCIPAL que saliendo desde la bomba (P2), llega al esterilizador UV el cual es un accesorio hermético (funciona a la misma presión de las tuberías) y se dirige hacia los tres tanques de peces; la red SECUNDARIA de abastecimiento es el que parte del tanque de enfriamiento ‘chiller’ y alimenta a los tres tanques de peces con agua enfriada, conduciéndose el agua por presión dada la carga hidrostática definida por la ubicación del ‘chiller’.

La secuencia de actividades seguidas en la simulación, se resume en los pasos que a continuación se dan:

- a. Adecuación del trazo de redes a nivel de bosquejo o ‘draft’, con el propósito de una mejor visualización

- b. Trazo de la red de distribución en el programa AutoCAD, una vez definido en el sistema de recirculación marina a abastecer
- c. Definición de circuitos y nodos, a nivel de bosquejo
- d. Estandarización de trazos llevados al software WaterCAD (imágenes del modelado realizado) que resulta en en el diagrama de presiones del sistema de recirculación, (Figura 57).

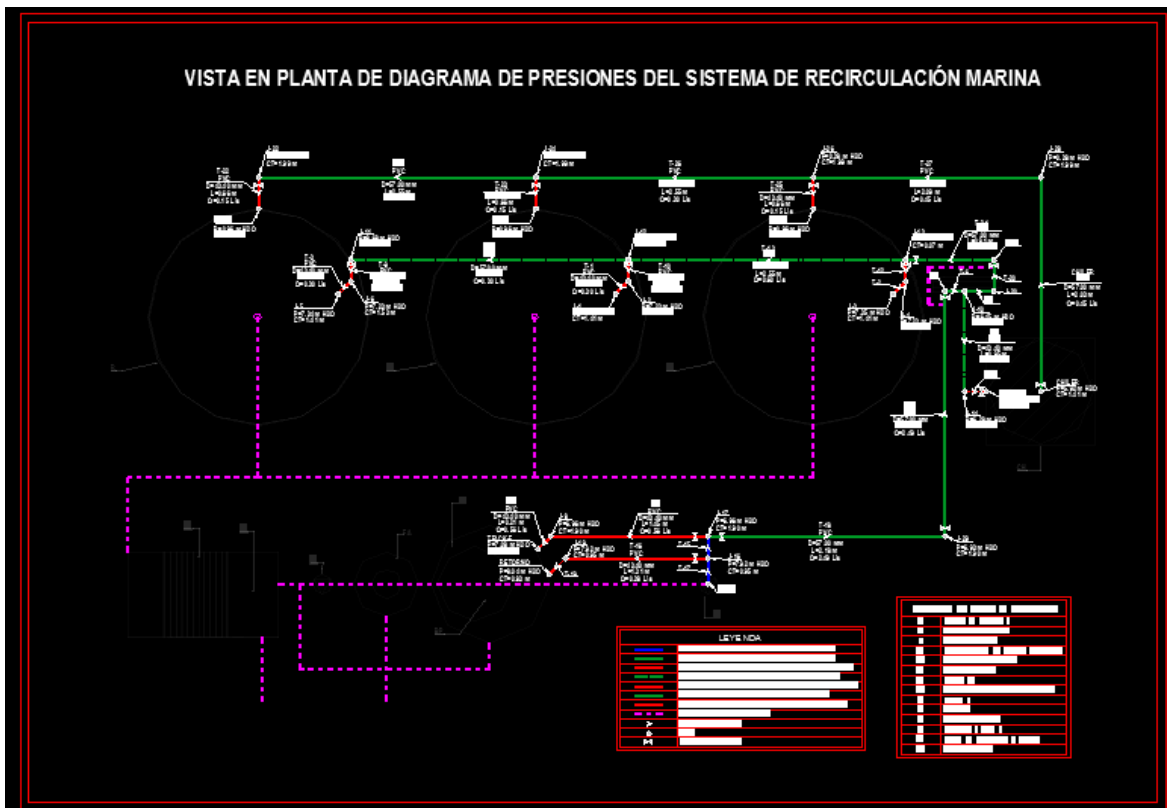


Figura 57: Vista en planta los trazos de redes en Auto CAD – diagrama de presiones

- e. Simulación propiamente, con la identificación de los puntos de reunión ('juntions') en el software WaterCAD, donde se diferencia claramente las características hidráulicas de los dos tramos (principal y secundario) que constituyen la red de distribución de agua en el RAS (Figura 58). Configurada la red, verificándose los caudales demandados en cada uno de los componentes del RAS, se procede a realizar la simulación en diferentes posibles condiciones de trabajo, obteniéndose los parámetros hidráulicos de operación.

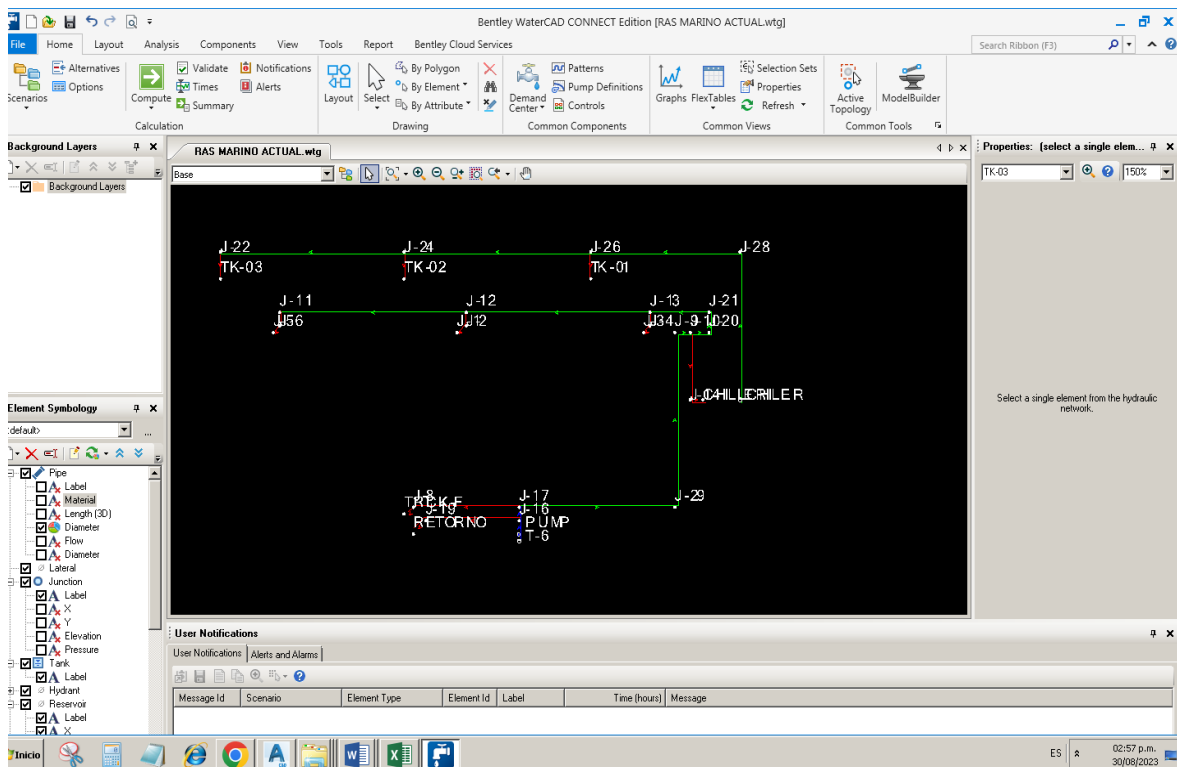


Figura 58: Vista en planta los trazos de redes en WaterCAD

Al completarse los pasos descritos, se procedió con la simulación de la red de distribución de agua obteniéndose para cada escenario los valores de cargas hidrostáticas y presiones en los diferentes tramos de tubería.

e. Resultados de la simulación

El WaterCAD genera una información útil para evaluar las condiciones de diseño y de funcionamiento de las redes de abastecimiento de agua, en este particular caso, de las líneas de tuberías desde la bomba hasta el punto de descarga de agua en cada uno de los tanques de peces. Son dos las tablas principales que se generan, una primera **'Flex Table: Junction Table'** con información sobre la ubicación de cada uno de los puntos de determinación, denominados “puntos de cruces” en inglés **'JUNCTIONS'**, (Tabla 19) con los siguientes parámetros:

- Denominación del cruce, etiqueta
- Ubicación – componente Este (X)
- Ubicación – componente Norte (Y)
- Elevación, sobre un nivel referencial (m)

Tabla 19: Reporte de WaterCAD sobre ubicación de cruces, gradiente hidráulica y presiones en la red principal del RAS - Tabla de nodos

Flex Table: Junction Table						
Etiqueta	Este (X) (m)	Norte (Y) (m)	Elevación (m)	Gradiente Hidráulica (m)	Presión (m H ₂ O)	Presión de Carga (m)
CHILLER	261,293.96	8,667,345.87	2.35	8.79	6.43	6.44
J-1	261,290.55	8,667,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-2	261,290.67	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-3	261,293.10	8,667,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-4	261,293.22	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-5	261,288.00	8,667,346.78	1.41	8.77	7.34	7.36
J-6	261,288.11	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-8	261,289.95	8,667,344.51	1.90	8.87	6.96	6.97
J-9	261,293.58	8,667,346.81	2.35	8.80	6.44	6.45
J-10	261,293.76	8,667,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-11	261,288.11	8,667,347.10	0.07	8.77	8.68	8.70
J-12	261,290.67	8,667,347.10	0.01	8.77	8.75	8.76
J-13	261,293.22	8,667,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-14	261,293.76	8,667,345.87	2.50	8.79	6.28	6.29
J-16	261,291.40	8,667,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-17	261,291.40	8,667,344.51	1.90	8.88	6.96	6.98
J-19	261,290.09	8,667,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-20	261,294.03	8,667,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-21	261,294.03	8,667,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-22	261,287.26	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-24	261,289.82	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-26	261,292.37	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-28	261,294.46	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-29	261,293.58	8,667,344.51	1.90	8.84	6.93	6.94
RETORNO	261,289.94	8,667,344.16	0.83	8.89	8.04	8.06
TK-01	261,292.37	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-02	261,289.82	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-03	261,287.26	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TRICK-F	261,289.84	8,667,344.40	1.78	8.87	7.08	7.09

- Gradiente hidráulica (m)
- Presión del agua (mH₂O)
- Presión de carga (m)

Una segunda tabla '**Flex Table: Pipe Table**' que brinda información sobre los tramos de tuberías, comprendidos entre los "cruces" o junctions, (Tabla 20) que brinda la siguiente información:

- Denominación del tramo, etiqueta
- Identificación del nodo de inicio
- Identificación del nodo final
- Longitud 3D del tramo (m)
- Diámetro de la tubería (mm)
- Material de la tubería
- Caudal asignado al tramo ($L s^{-1}$)
- Constante de Hazen-Williams C correspondiente
- Gradiente de pérdida de carga ($m km^{-1}$)
- Pérdida de presión interna (mH_2O)
- Pérdida de carga hidráulica (m)
- Velocidad de flujo del agua ($m s^{-1}$)

Los valores contenidos en las tablas, son los que mejor corresponden a un diseño de esta naturaleza y acorde con los espacios asignados, en proporción a la magnitud de la instalación RAS.

El software también brinda un plano compatible al formato CAD, sobre "Diagrama de presiones del Sistema" en este caso del RAS marino, en una vista de PLANTA y otra en ELEVACION (figuras 59 y 60).

Tabla 20: Reporte de WaterCAD sobre gradiente hidráulica y presiones en la red principal del RAS - tabla de tuberías

Flex Table: Pipe Table											
Etiqueta	Nodo Inicio	Nodo Final	Longitud (3D) (m)	Diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Hazen-Williams C	Gradiente de pérdida de carga (m km ⁻¹)	Pérdida de presión (m H ₂ O)	Pérdida de carga (m)	Velocidad (m s ⁻¹)
T-1	J-2	J-1	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-2	J-4	J-3	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-3	J-6	J-5	0.21	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-4	J-8	TRICK-F	0.21	43.40	PVC	0.56	150.0	4.10	0.00	0.00	0.38
T-6	J-9	J-10	0.18	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.00	0.00	0.98
T-7	J-10	J-20	0.27	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.00	0.00	0.56
T-8	J-10	J-14	0.95	43.40	PVC	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30
T-9	J-11	J-6	1.47	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-10	J-12	J-2	1.53	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-11	J-12	J-11	2.55	57.00	PVC	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12
T-12	J-13	J-4	1.47	43.40	PVC	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-13	J-13	J-12	2.55	57.00	PVC	0.60	150.0	1.23	0.00	0.00	0.24
T-14	J-14	CHILLER	0.25	43.40	PVC	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30
T-15	J-16	J-17	0.97	67.80	PVC	3.05	150.0	10.76	0.01	0.01	0.84
T-16	J-16	J-19	1.31	43.40	PVC	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26
T-5	J-17	J-8	1.45	43.40	PVC	0.56	150.0	4.10	0.01	0.01	0.38
T-18	J-17	J-29	2.18	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98
T-19	J-19	RETORNO	0.24	43.40	PVC	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26
T-20	J-20	J-21	2.30	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56
T-21	J-21	J-13	0.81	57.00	PVC	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56
T-22	J-22	TK-03	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-23	J-24	TK-02	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-24	J-24	J-22	2.55	57.00	PVC	0.15	150.0	0.09	0.00	0.00	0.06
T-25	J-26	TK-01	0.66	43.40	PVC	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-26	J-26	J-24	2.55	57.00	PVC	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12
T-27	J-28	J-26	2.09	57.00	PVC	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18
T-28	J-29	J-9	2.34	57.00	PVC	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98
T-29	T-6	PUMP	0.22	67.80	PVC	3.43	150.0	13.38	0.00	0.00	0.95
T-17	PUMP	J-16	0.96	67.80	PVC	3.43	150.0	13.38	0.01	0.01	0.95
CHILER	CHILER	J-28	2.03	57.00	PVC	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18

VISTA EN PLANTA DE DIAGRAMA DE PRESIONES DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN MARINA

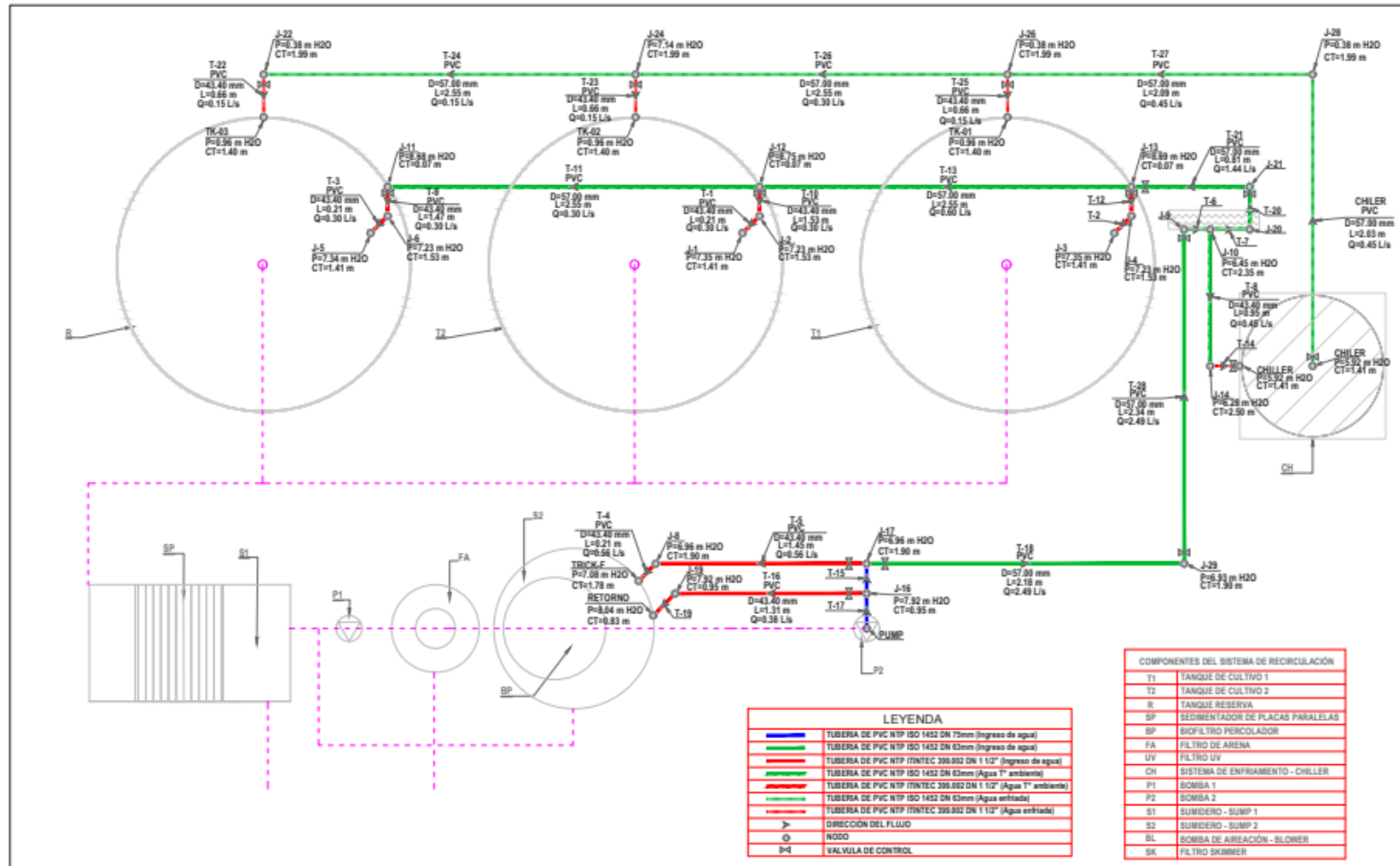
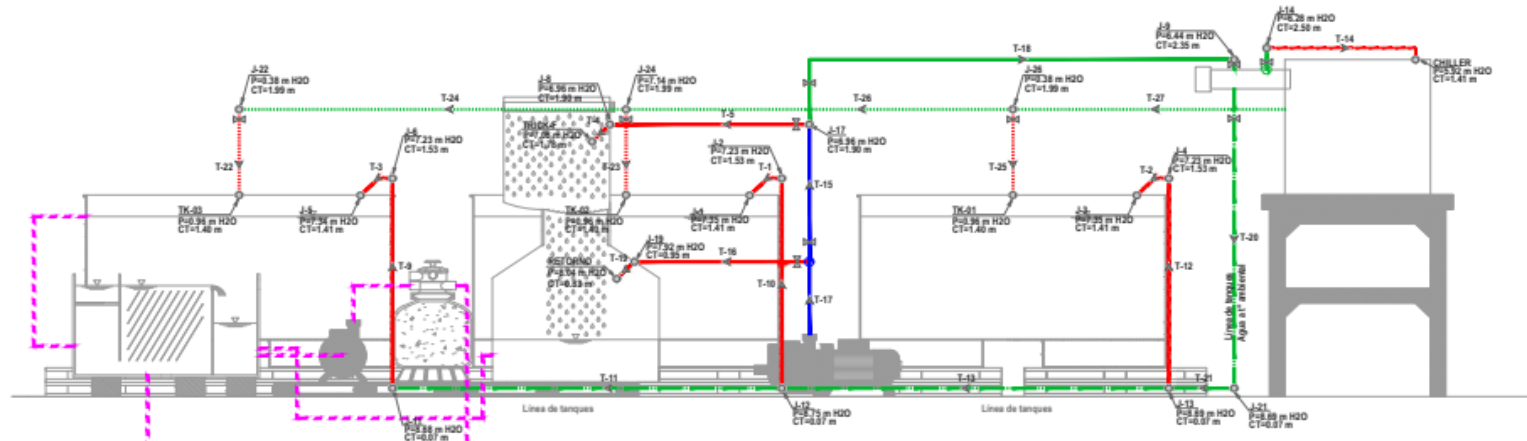


Figura 59: Vista de planta del diagrama de presiones del sistema de recirculación marina

VISTA DE PERFIL DE DIAGRAMA DE PRESIONES DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN MARINA



COMPONENTES DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN	
T1	TANQUE DE CULTIVO 1
T2	TANQUE DE CULTIVO 2
R	TANQUE RESERVA
SP	SEDIMENTADOR DE PLACAS PARALELAS
BP	BIOFILTRO PERCOLADOR
FA	FILTRO DE ARENA
UV	FILTRO UV
CH	SISTEMA DE ENFRIMIENTO - CHILLER
P1	BOMBA 1
P2	BOMBA 2
S1	SUMIDERO - SUMP 1
S2	SUMIDERO - SUMP 2
BL	BOMBA DE AIREACIÓN - BLOWER
SK	FILTRO SKIMMER

LEYENDA	
—	TUBERIA DE PVC NTP ISO 1452 DN 75mm (Ingreso de agua)
—	TUBERIA DE PVC NTP ISO 1452 DN 63mm (Ingreso de agua)
—	TUBERIA DE PVC NTP INTREC 309.062 DN 1 1/2" (Ingreso de agua)
—	TUBERIA DE PVC NTP INTREC 309.062 DN 1 1/2" (Agua T° ambiente)
—	TUBERIA DE PVC NTP ISO 1452 DN 63mm (Agua enfriada)
—	TUBERIA DE PVC NTP INTREC 309.062 DN 1 1/2" (Agua enfriada)
—	TUBERIA DE PVC NTP INTREC 309.062 DN 1 1/2" (Agua enfriada)
—	TUBERIA DE DESCARGA, BY PASS
—	DIRECCIÓN DEL FLUJO
—	MODULO

Etiqueta	"X" (m)	"Y" (m)	"Elevación (m)"	"Gradiente Hidráulico (m)"	"Presión (m H2O)"	"Pérdida de Carga (m)"
CHILLER	261.293.96	8.667.245.87	2.25	8.76	6.43	6.44
J-1	261.296.25	8.667.246.78	1.41	8.77	7.25	7.26
J-2	261.296.57	8.667.246.69	1.53	8.77	7.23	7.24
J-3	261.292.10	8.667.246.78	1.41	8.77	7.25	7.26
J-4	261.293.52	8.667.246.60	1.53	8.77	7.23	7.24
J-5	261.298.00	8.667.246.78	1.41	8.77	7.24	7.25
J-6	261.288.11	8.667.246.60	1.53	8.77	7.23	7.24
J-8	261.289.95	8.667.244.51	1.90	8.87	6.96	6.97
J-9	261.293.58	8.667.245.81	2.25	8.80	6.44	6.45
J-10	261.293.76	8.667.246.81	2.25	8.80	6.43	6.45
J-11	261.288.11	8.667.247.10	0.87	8.77	6.68	6.70
J-12	261.290.67	8.667.247.10	0.87	8.76	6.75	6.76
J-13	261.293.23	8.667.247.10	0.87	8.76	6.68	6.71
J-14	261.293.76	8.667.245.87	2.25	8.76	6.28	6.29
J-16	261.291.40	8.667.244.21	0.95	8.80	7.92	7.94
J-17	261.291.40	8.667.244.51	1.90	8.80	6.96	6.98
J-18	261.296.58	8.667.244.21	0.95	8.80	7.92	7.94
J-20	261.294.53	8.667.246.81	2.25	8.80	6.43	6.45
J-21	261.294.53	8.667.247.10	0.87	8.76	6.68	6.71
J-22	261.287.26	8.667.247.87	1.59	2.37	6.38	6.39
J-24	261.289.42	8.667.247.87	1.59	2.37	6.38	6.39
J-26	261.294.46	8.667.247.87	1.59	2.37	6.38	6.39
J-29	261.293.58	8.667.244.51	1.90	8.84	6.03	6.04
RETORNO	261.289.94	8.667.244.16	0.83	8.80	8.04	8.06
Tk-01	261.292.37	8.667.247.58	1.40	2.37	6.96	6.97
Tk-02	261.289.82	8.667.247.58	1.40	2.37	6.96	6.97
Tk-03	261.287.26	8.667.247.58	1.40	2.37	6.96	6.97
TRUCK-F	261.289.84	8.667.244.40	1.78	8.87	7.08	7.09

Etiqueta	Nudo Inicio	Nudo Final	"Longitud (m)"	"Diámetro (mm)"	Materia	"Caudal (m³/h)"	"Pérdida de Carga (m H2O)"	"Pérdida de Presión (m H2O)"	"Pérdida de Carga (m H2O)"	"Velocidad (m/s)"
T-1	J-2	J-1	0.21	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-2	J-4	J-3	0.21	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-3	J-6	J-5	0.21	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-4	J-8	TRUCK-F	0.21	43.40	PVC	0.50	10.0	4.10	0.00	0.28
T-6	J-6	J-5	0.18	57.00	PVC	3.69	10.0	17.21	0.00	0.96
T-7	J-10	J-9	0.27	57.00	PVC	1.46	10.0	6.24	0.00	0.56
T-8	J-10	J-16	0.66	43.40	PVC	0.45	10.0	2.73	0.00	0.36
T-9	J-11	J-6	1.47	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-10	J-12	J-2	1.53	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-11	J-12	J-11	0.55	57.00	PVC	0.30	10.0	0.34	0.00	0.12
T-12	J-13	J-4	1.47	43.40	PVC	0.30	10.0	1.20	0.00	0.20
T-13	J-13	J-12	0.55	57.00	PVC	0.40	10.0	1.23	0.00	0.24
T-14	J-14	CHILLER	0.25	43.40	PVC	0.45	10.0	2.73	0.00	0.28
T-15	J-16	J-17	0.87	67.80	PVC	3.05	10.0	16.16	0.01	0.81
T-16	J-16	J-18	1.31	43.40	PVC	0.38	10.0	2.00	0.00	0.36
T-17	J-17	J-8	1.45	43.40	PVC	0.30	10.0	4.10	0.01	0.38
T-18	J-17	J-28	2.18	57.00	PVC	2.69	10.0	17.21	0.04	0.94
T-19	J-19	RETORNO	0.24	43.40	PVC	0.38	10.0	2.00	0.00	0.28
T-20	J-20	J-21	0.30	57.00	PVC	1.44	10.0	6.24	0.01	0.61
T-21	J-21	J-13	0.81	57.00	PVC	1.44	10.0	6.24	0.01	0.61
T-22	J-22	Tk-03	0.66	43.40	PVC	0.15	10.0	0.36	0.00	0.18
T-23	J-24	Tk-02	0.66	43.40	PVC	0.15	10.0	0.36	0.00	0.18
T-24	J-24	J-22	0.55	57.00	PVC	0.15	10.0	0.69	0.00	0.18
T-25	J-26	Tk-01	0.80	43.40	PVC	0.15	10.0	0.36	0.00	0.18
T-26	J-26	J-24	0.55	57.00	PVC	0.30	10.0	0.34	0.00	0.12
T-27	J-28	J-26	0.59	57.00	PVC	0.45	10.0	0.73	0.00	0.18
T-28	J-29	J-9	0.24	57.00	PVC	2.69	10.0	17.21	0.04	0.94
T-29	T-4	PUMP	0.22	67.80	PVC	2.43	10.0	13.38	0.00	0.86
T-17	PUMP	J-16	0.86	67.80	PVC	2.43	10.0	13.38	0.01	0.81
CHILLER	CHILLER	J-28	0.03	57.00	PVC	0.45	10.0	0.73	0.00	0.18

Figura 60: Vista de perfil del diagrama de presiones del sistema de recirculación marina

De los resultados obtenidos, se puede apreciar que existe una variedad en los valores de presiones, relacionada a una adecuada graduación de diámetros a lo largo de las redes. Con el impacto proporcional en las presiones internas, que se ajustan a las características y clase de tubería empleada e ingresada al software, y la graduación de los diámetros. Es importante considerar el diámetro de la tubería terminal porque influye en las características de salida de la tubería en la entrega de agua, según lo hallado por Shimizu et al (2019). También, estos autores hallaron que, a menor diámetro en la tubería de salida, el caudal de descarga es más uniforme; condición que es deseable en la distribución de agua a los tanques de peces. Asimismo, se observó que la velocidad de flujo es uniforme en tramos rectos sin derivaciones, y al presentarse éstas, la velocidad de flujo disminuye rápidamente, pudiendo retornar a la situación uniforme en tramos siguientes sin derivaciones. Estas consideraciones van a permitir a futuro efectuar instalaciones más seguras, especialmente cuando se trata de instalaciones para producciones de grandes magnitudes.

V. CONCLUSIONES

- El diseño y simulación de un sistema de recirculación para maricultura, aplicando la teoría del balance de masas, ha permitido definir sus parámetros hidráulicos y geométricos de funcionamiento, en estado estable, a la luz de los resultados de la ejecución y monitoreo de un ensayo experimental.
- Las características geométricas de los diferentes elementos que componen el sistema de recirculación para acuicultura (RAS), diseñado con aplicación de la teoría de balance de masas, típicamente constituido por un sedimentador de placas paralelas de 0,624 m³ y un biofiltro percolador de 0,659 m³, han permitido el funcionamiento del conjunto de tanques de crianza con 10,18 m³, con eficiencia para alcanzar la capacidad de carga proyectada y para el mantenimiento de las exigentes condiciones ambientales que requiere la especie Chita (*Anisotremus scapularis*); a la luz de los resultados de supervivencia, consumo y utilización del alimento, y del crecimiento exhibido por la especie.
- El dimensionamiento realizado y la arquitectura de diseño del sistema RAS, aplicando el enfoque de balance de masas, para una correcta proporcionalidad en las dimensiones de los componentes, ha permitido definir el perfil hidráulico del conjunto con dos ramales: uno principal de 12,84 m con una presión máxima de 8,75 mH₂O accionado por presión proveniente directamente de la bomba ‘pressurized system’ y otro ramal de 10,13 m con una presión máxima de 0,96 mH₂O accionada por gravedad ‘gravity fed system’, han resultado en el patrón de flujo de agua y tiempos de retención hidráulica, que han favorecido a la distribución adecuada de velocidades y periodos de retención, con un caudal total a través de los tanques de peces de 1,414 L s⁻¹; en una clara relación entre la geometría de los componentes del RAS, los flujos de agua y los procesos físicos y biológicos que tienen lugar en cada uno de los componentes, llegándose a la conclusión que el sistema RAS ha tenido un funcionamiento bajo condiciones de un sistema en estado estable (calidad de agua estable en el tiempo). La simulación hidráulica del

circuito de agua en el RAS empleando el software WaterCAD, ha generado un conjunto de datos de presión hidráulica, caudales, velocidades de flujo y diámetro de tuberías, en la red de abastecimiento, que se han reflejado en el modelo real durante su funcionamiento en el periodo experimental, encontrándose dentro del esquema recomendable de operación mientras se mantenga la eficiencia de la bomba y no se alteren las descargas asignadas en los puntos de consumo de agua. Se observó una distribución de caudales que ha permitido el funcionamiento adecuado de cada uno de los componentes del RAS.

VI. RECOMENDACIONES

- De la aplicación de la metodología de diseño basado en la teoría de balance de masas, se recomienda su aplicación a cada uno de los elementos del sistema RAS individualmente, como también al conjunto, como un todo. Manteniendo como propósito central el conseguir un sistema abierto estable, donde la concentración de cualquier compuesto en estudio, durante el funcionamiento del sistema, debe mantenerse constante en el tiempo o aproximarse a esta condición.

Ante la evidencia del buen funcionamiento de los sedimentadores de placas paralelas y el biofiltro percolador, se recomienda emplear esta combinación, como elementos de control de sedimentos y amonio disuelto respectivamente, en un esquema de distribución de agua a través de una red activada por energía de gravedad. Es decir, con bombeo del agua a un tanque elevado de regulación o de cabecera, verificando que las presiones hidráulicas no excedan los 10 mH₂O.

- Los flujos de agua, propios a cada especie y tipo de componente de los RAS, deben afinarse con información específica de tasas de excreción de desechos, así como las demandas de oxígeno y la producción de amonio expresadas en tasas de excreción para diferentes condiciones de desarrollo corporal y de alimentación. Como también sobre velocidades de sedimentación de biosólidos, tasas de nitrificación en biofiltros bajo diferentes condiciones de trabajo y otros de tasas de carga para componentes del sistema RAS.
- En vista de los resultados de la simulación asistida por computadora empleando el software WaterCAD, se recomienda en los trabajos de instalación de los sistemas de recirculación, se incorpore la determinación de caudales y presiones en las redes, a fin de evitar posibles fallas por exceso de presión, para un mejor funcionamiento y cuidado de los accesorios y equipos que se instalan en la red y asegurar desde el diseño las presiones y caudales en cada uno de los ramales de la red de distribución del RAS.

Asimismo, se recomienda tomar en cuenta que, a partir de la presente tesis se abren las siguientes líneas de investigación:

- Parámetros de crecimiento y conversión de alimento, en especies acuáticas similares a la empleada en el presente trabajo de investigación.
- Determinación de tasas de excreción de desechos en cultivo de peces, para diseñar los sistemas de recuperación del agua utilizada.
- Diseño de componentes de sistemas de recirculación, con dimensiones y geometrías específicas para las diferentes especies biológicas de importancia para la acuicultura.
- Estudio y simulación de la hidráulica de los diferentes elementos del sistema de recirculación para definir los modelos más eficientes, según casos específicos.
- Determinación de las implicancias en costos económicos, de la optimización en los diseños de redes de distribución de agua, como de los otros elementos que constituyen el sistema RAS.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allsopp, M., Santillo, D. & Dorey, C. (2013). Sustainability in Aquaculture: Present Problems and Sustainable Solutions. In: A. Chircop, S. Coffen-Smout & A. McConnell (Eds). Ocean Yearbook 27, International Oceans Institute and the Marine Environmental Law Institute of Dalhousie University, 1: 291-322. https://www.academia.edu/20757941/Sustainability_in_Aquaculture_Present_Problems_and_Sustainable_Solutions
- Arumugam, A., Subramani, S., Kibrom, H., Gebreamlak, M., Mengstu, M., & Teame, M. (2021). Comparison and Validation of Models for the Design of Optimal Economic Pipe Diameters: A Case Study in the Anseba Region, Eritrea. *Tecnológicas*, vol. 24, núm. 52, 1992. Instituto Tecnológico Metropolitano. <https://www.redalyc.org/journal/3442/344268257007/html/>
- Ashrafizadeh, S. A. & Tan, Z. (2018). Mass and Energy Balances. Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems. Mechanical Engineering Series. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72290-0>
- Assis, Y., de Assis, L., Melo, N.F.A.C., Almeida, G. D., Luz, R. K., Favero, G. C. (2020). Feed restriction as a feeding management strategy in *Collossoma macropomum* juveniles under recirculating aquaculture system (RAS), *Aquaculture* Volume 529, 15. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735689>
- Barraque, Ch. (1979). Capítulo 9: Filtración del agua. *Manual técnico del agua*. 4 ed. Española. Degremont. <https://www.scribd.com/document/422844503/Manual-Tecnico-Del-Agua-Tratamiento-Especifico>
- Barrera-Herrera J. A., Aranguren-Riaño N., Páez-Ruíz Y. M., Molina-Pacheco, L. B., Pedroza-Ramos A. y Díaz-Ballesteros, C. A. (2020). Incidencia del tiempo de retención hidráulica en el plancton del reservorio La Chapa (Santana, Boyacá), Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 44(171):407-422, abril-junio de 2020. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1022>

- Bregnballe, J. (2015). A Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Published by FAO and EUROFISH International Organization. 100 pp. <http://www.fao.org/publications/card/es/c/7516ab04-7632-482a-99f7-7c853a0e0d6d/>
- Bregnballe, J. (2010). A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. <http://www.fao.org/3/ai4626e.pdf>
- Brentwood Industries. (2009). Diseño y aplicaciones. *Sedimentaciones Tubulares*. Documento 1.2. Mayo 2009. <https://dokumen.tips/download/link/sedimentadores-tubulares.html>
- Bun, S., Chawaloeshphonsiya, N., Ermukdakul, T., Pungrasmi, W., Suwannasilp, B. B. y Painmanakul, P. (2017). Suspended solid and nitrate removal from aquaculture system wastewater by different approaches. *Desalination and Water Treatment* 81: 87–94.
- Burgos-Flores, D., Pérez-Tello, M., Borbón, A.C., Martín, A., Martín-Dominguez, I. y Alarcón-Herrera, M. T. (2013). Comportamiento hidráulico de sedimentador de alta tasa bajo distintos arreglos de entrada-salida. *Iberoamerican Journal of Project Management*. Vol.4, No.1, A.I., pp.01-14.
- Byron, C. J. y Costa-Pierce, B. A. (2013). Carrying capacity tools for use in the implementation of an ecosystems approach to aquaculture. In: Ross, L. G., Telfer, T. C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J. (Eds.). Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture, pp. 87-101. FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6-8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21. Rome, FAO. 282 pp.
- Carlsson, B. (1996). An introduction to sedimentation theory in wastewater treatment. Course Wastewater treatment, Aquatic and Environmental Engineering program. Systems and Control Group Uppsala University. Sweden. 7 p. <http://www.it.uu.se/research/project/jass/material/sett98.pdf>
- Casanova, D. y Mejía, E. (2013). Evaluación de dos tiempos de retención hidráulica, en un sistema de recirculación vs aireación convencional y su efecto en las variables productivas y bienestar de ejemplares de trucha arcoíris (*Oncorhynchus*

- mykiss*). Informe final de Trabajo de Grado. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto. <http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/1880>
- Castro-Fuentes, A., Cota, N., Montes, M. y Carrera, L. (2022). Evaluación de la densidad de cultivo sobre el crecimiento y supervivencia de larvas de chita *Anisotremus scapularis* (Tschudi, 1846) en laboratorio. *Marine and Fishery Sciences* 35 (1): 7-18. <https://doi.org/10.47193/mafis.3512022010102>
- CEPIS. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. OPS/CEPIS/05.158 UNATSABAR. 34 pp. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005b.%20Gu%C3%ADa%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf
- Chapra, S. C. (2008). 2008. *Surface Water-Quality Modeling*. Tufts University. Long Grove Illinois. United States of America. Waveland Press, Inc.
- Cota, N., Castro, A., Carrera, L., Montes, M., Medina, M., Flores, L. y Ruiz, A. (2017). Evaluación de diferentes dietas (Otohime, Truchina y Nicovita Classic Cobia) en el crecimiento, supervivencia, composición proximal del músculo y aspectos histológicos de juveniles de Chita *Anisotremus Scapularis* bajo condiciones de laboratorio. Resumen de Trabajo presentado en la South American Regional Aquaculture 17. Latin American & Caribbean Aquaculture 17. LAQUA 17. November 7 - 10, 2017, Mazatlan, México. https://www.was.org/LACC/downloads/LacQual7_AbstractBook.pdf
- Criollo, R. G. y Sánchez, I. A. (2012). Montaje y evaluación preliminar de remoción de sólidos en cuatro sistemas de drenaje de tanques circulares, con recirculación de agua para cultivo de trucha arcoíris. *Revista Investigación Pecuaria* Vol. 1 No. 1: 10 p.
- Dawe, P. (2000). Workshop on Hydraulic Network Modelling with WaterCAD. 16-20 October 2000. https://kupdf.net/download/watercad-theory-document_5b0c2de3e2b6f5ff6d9c7a96_pdf
- Deiana, A. C., Granados, D. y Sardella, M. (2018). Balance de Masa. Introducción a la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química – FI – UNSJ. Argentina. 21 p. <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>
- De Leon-Ramirez J. J., Garcia-Trejo, J. F., Felix-Cuencas L., Lopez-Tejeida S., Sosa-Ferreya CF. y Gonzalez-Orozco A. I. (2022). Effect of the water exchange rate in a recirculation aquaculture system on growth, glucose and cortisol levels

in *Oreochromis niloticus*. Lat. Am. J. Aquat. Res. vol.50 no.2 Valparaíso.
<http://dx.doi.org/10.3856/vol50-issue2-fulltext-2790>

- Destéfano, J. A. (2008). Diseño preliminar de una planta de tratamiento de agua para el consumo humano en los distritos de Andahuaylas, San Jerónimo y Talavera de la Reyna, provincia de Andahuaylas, Región Apurímac. Tesis Ing. Pontificia Universidad Católica del Perú.
https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/977/DESTEFANO_MOLERO_JAVIER_PLANTA_TRATAMIENTO_AGUA_APURIMAC.pdf?sequence=1
- Dionicio-Acedo, J., Rosado-Salazar, M., Galecio-Regalado, F. y Aguirre-Velarde, A. (2018). Crecimiento y tasas fisiológicas de chita *Anisotremus scapularis* (Tschudi 1846): Bases técnicas para cultivo. Bol Inst. Mar Perú. 33(1): 79-89.
- Drennan II, D.G., Hosler, K.C., Francis, M., Weaver, D., Aneshansley, E., Beckman, G., Johnson, C. H. y Cristina, C. M. (2006). Standardized evaluation and rating of biofilters II. Manufacturer's and user's perspective. Aquacultural Engineering 34: 403–416.
- Duran-Pinzón, M., Páez-Arango, J. & García-Guarín, P. (2018). Numerical modeling and experimental analysis for flows in a homogeneous porous medium through soils. ITECKNE, 15(1), 24-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1961>
- Ebeling J. M. & Michael B. Timmons. (2012). Recirculating Aquaculture Systems. J.H. Tidwell (Ed.) Chapter 11. Aquaculture Production Systems. First edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Ebeling J. M. & Vinci B. (s.f).Solids Capture. Recirculating Aquaculture Systems Short Course.
<https://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ISTA7/RecircWorkshop/Workshop%20PP%20%20&%20Misc%20Papers%20Adobe%202006/5%20Solids%20Capture/Solids%20Control.pdf>
- Empresas Públicas de Medellín (2009). EPM. Guía para el diseño Hidráulico de Redes de Alcantarillado. Medellín, Colombia. Empresas Públicas de Medellín.
https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/GuiaDisenoHidraulicoRedesAlcantarillado.pdf
- FAO. (2010). Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture. In Lindsay G. Ross, Trevor C. Telfer, Lynne Falconer; Doris Soto, José Aguilar-Manjarrez (Eds.). FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert

- Workshop. 6–8 December. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland Fisheries and Aquaculture Proceedings 21. Roma Italy. 282 pp. <http://www.fao.org/3/a-i3322e.pdf>
- Franqui, C. (2015). Teoría de Sedimentación. Tratamiento del Agua. Disponible en <https://www.tratamientodelagua.com.mx/teoria-de-sedimentacion/>
- Fumio, S., Masatoshi, A., Yuya, M. & Kazuhiro, T. (2019). Flow characteristics of water delivery piping system and its effective flow area at discharge branches. IOP Earth and Environmental Science 240 062034. [doi:10.1088/1755-1315/240/6/062034](https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/6/062034)
- Geankopolis, C. J. (1998). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3 ed. México. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México. <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/05/geankopolis.pdf>
- Godoy-Olmos, S., Jauralde, I., Monge-Ortiz, R., Milián-Sorribes, M. C., Jover-Cerdá, M., Tomás-Vidal, A., Martínez-Llorens, S. (2022). Influence of diet and feeding strategy on the performance of nitrifying trickling filter, oxygen consumption and ammonia excretion of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) raised in recirculating aquaculture systems. Aquaculture International (2022) 30:581–606. doi.org/10.1007/s10499-021-00821-3
- Golz, W. J. (1995). Biological Treatment in Recirculating Aquaculture Systems. In Recirculating aquaculture in the classroom: a training workshop for agricultural science teachers, a proceedings of a workshop sponsored by the Louisiana Sea Grant College Program, Louisiana State University, and the Louisiana Department of Education, 6-7. December. 1995. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana. USA. https://www.academia.edu/2199407/Biological_treatment_in_recirculating_aquaculture_systems
- Gonzales Acosta, J.A. (2012). Uso y manejo de sedimentos provenientes de la piscicultura como base para el manejo sostenible: revisión del tema. Revista Ciencia Animal. Volumen 1, N°5. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1053&context=ca>
- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Brazil, B., Snekvik, K. & Summerfelt, S. (2009). The impact of water exchange on the health and performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems. Aquaculture 294: 80-85. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2009.05.014

- Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., Mota, V. C. y Summerfelt, S. (2018). Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production. *Aquacultural Engineering* 81 (2018) 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.001>
- Gu, D. (2019). Mass balance approach for calculating discharge from aquaculture production system. Master Thesis. Department of Mathematical Sciences and Technology. Ås. 36 p.
- Guerrero V., T. E., Salazar Álvarez, J. C., Paredes Salazar, J. L. (2018). Eficiencia de un sedimentador laminar y convencional para eliminar sólidos. *Rev. Soc. Quím. Perú.* 84(3). <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v84n3/a07v84n3.pdf>
- Gujer, W. & Boller, M. (1986). Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. *Wat. Res.* Vol. 20, No. 11, pp. 1353-1362.
- Heinsbroek, L.T.N. (1990). Growth and Feeding of Fish. Department of Fish Culture and Fisheries. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands.
- Henkel, J. (2010). Oxygen Transfer Phenomena in Activated Sludge. Tesis Doctoral. Departamento 13 Ingeniería Civil y Geodesia. Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania. <https://core.ac.uk/download/pdf/11681292.pdf>
- Huerta-Bórquez, M. A. (2017). Selección y dimensionamiento de las unidades de tratamiento de agua para un sistema de recirculación. liceo técnico profesional Dr. Rigoberto Iglesias Bastías de Lebu. Proyecto para optar al título de Ingeniero Acuicultor. Valparaíso. Disponible en: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-2500/UCC2844_01.pdf
- Huguenin, J. E. y Colt, J. (2002). Design and operating guide for Aquaculture Seawater Systems 2 ed. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science – 33.* The Netherlands. Elsevier Science. 328 p.
- Ingeniería Sanitaria. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual de Plantas de Filtración Rápida. Capítulo 4: Decantadores. MANUAL II: Diseño de Plantas de Tecnología Apropiada. (actualizado el 02 de mayo 2011). www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual2/ma2_cap4.pdf
- Isla, M. (2023). Water quality in recirculating aquaculture systems (ras) for arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) culture. División de Cultivos Marinos, Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP). La Habana. Cuba. <http://hdl.handle.net/1834/3102>
- Izinyon, O. C. & Anyata, B. U. (2011). Water distribution network modelling of a small community using watercad simulator. *Global Journal of Engineering Research.* VOL 10, N°. 1-2, 35-47. <https://www.ajol.info/index.php/gjer/article/view/82184>

- Jesu-Prabhu, P.A.; Kaushik, S.J., Geurden, I., Stouten, T., Fontagné-dicharry, S., Veron, V., Mariojouis, C., Verreth, J.A.J., Eding, E.H., and Schrama, J.W. (2017). Water exchange rate in RAS and dietary inclusion of micro-minerals influence growth, body composition and mineral metabolism in common carp. *Aquaculture* Volume 471, 20, pp. 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.12.031>
- Joseph, S. (2009). Open Sea Cage culture: carrying capacity and stocking in the grow out system. In: Course manual: National training on cage culture of seabass. CMFRI & NFDB, Kochi, pp. 102-105. http://eprints.cmfri.org.in/6092/1/18_Sho.pdf
- Jover M., Martínez S., Tomás A., Pérez L. (2003). Propuesta metodológica para el diseño de instalaciones piscícolas. *Revista AquaTIC*, n°19, pp. 17-26.
- Kamstra, A., van der Heul, J. W. & Nijhof, M. (1998). Performance and optimization of trickling filters on eel farms. *Aquacultural Engineering*. Volume 17, Issue 3, pp. 175-192. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00014-4)
- Kishi, M. J; Uchiyama, M. Iwata, Y. (1994). Numerical simulation model for quantitative management of aquaculture. *Ecological Modelling*, 72 (1994) 21-40. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Kusnayat, A., Sari, S., Perdana, D., Martini, S. (2019). Hydraulic Analysis Software Comparison of Water Distribution System at Telkom University Area III. *International journal of simulation: systems, science & technology*. Apr2019, Vol. 20 Issue 2, p1-6. 6p. DOI 10.5013/IJSSST.a.20.02.15
- Kvamme K., Fivelstad, S., Handeland, S. O., Bergheim, A. (2018). Water flow and diurnal variation in metabolite production rates of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolt. *Wiley Aquaculture Research*. Disponible en DOI: 10.1111/are.13902
- Lawson, T. B. (1995). *Fundamental of Aquacultural Engineering*. Kluwer Academic publishers.
https://books.google.com.pe/books?id=cXF8gzWFWEYC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Lee, B. (2015). Experimental study to evaluate design procedure and proposed improvement measures for clarifier with inclined plates. *Environ. Eng. Res.* 20(3): 298-305. <http://dx.doi.org/10.4491/eer.2015.0046>
- Lekang, O. (2007). *Aquaculture Engineering*. Department of Mathematical Sciences and Technology, Norwegian University of Life Sciences. Blackwell Publishing. Garsington Road, Oxford, UK.
https://cesarom.files.wordpress.com/2013/08/aquaculture-engineering_copia.pdf

- Lemmer, T. N. & Du Toit, C. G.d K. (2004). Modelling of rectangular sedimentation tanks. Report to the Water Research Commission (WRC). Report No. 998/1/04. ISBN No 1-77005-148-1. <https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/998-1-04.pdf>
- León, C. (2016). Efecto de la temperatura de aclimatación en las respuestas térmicas de juveniles de *Anisotremus scapularis* “chita” (Tschudi, 1846). Tesis Biol. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/5655/Leon_pc.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- León-Palomino, C., Flores-Mego, J., Dionicio-Acedo, J., Rosado-Salazar, M., Flye-Sainte-Marie, J. y Aguirre-Velarde, A. (2017). Preferencia y tolerancia térmica de juveniles de chita *Anisotremus scapularis* (Pisces: Haemulidae). Revista de Biología Marina y Oceanografía Vol. 52, N°3: 581-589. doi.10.4067/S0718-19572017000300014
- Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z. & Qu, K. (2022). A review of influencing factors on a recirculating aquaculture system: Environmental conditions, feeding strategies, and disinfection methods. J. World Aquac Soc.; 54:566-602. DOI: 10.1111/jwas.12976
- Londoño G. R. (s.f.). Balances de masa y energía. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://blog.utp.edu.co/balances/files/2015/02/LIBRO-BME2015-1.pdf>
- Losordo, T. M. & DeLong, D. P. (2015). Estimating biofilter size for RAS systems. Global Aquaculture Advocate. <https://www.globalseafood.org/advocate/estimating-biofilter-size-for-ras-systems/>
- Losordo, T.M. & Hobbs, A.O. (2000). Using computer spreadsheets for water ow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. Aquacultural Engineering 23 (2000) 95-102. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00048-0)
- Made in China. (s.f). *Pisciculture Equipment Indoor Water Recirculation System*. <https://zkaqua.en.made-in-china.com/product/POctDpJdaYVA/China-Pisciculture-Equipment-Indoor-Water-Recirculation-System.html>
- Magill, S., Thetmeyer, H., Cromey, C. J. (2006). Settling velocity of faecal pellets of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and sensitivity analysis using measured data in a deposition model. Aquaculture 251(2006)295–305.
- Maigual, Y., Sánchez, O. I., Matsumoto, T. (2013). Desempeño de tanques decantadores de sólidos en un sistema de recirculación para producción de tilapia. Rev. MVZ Córdoba 18(2): 3492-3500.

- Malone, R. (2013). Recirculating Aquaculture Tank Production System. A Review of Current Design Practice. Southern Regional Aquaculture Center SRAC. Publication No. 453. October 2013.
- Martínez, E. & Estrada, J. (2011). Sedimentación en el tratamiento de agua para consumo humano. Artículo de tesis de grado. Repositorio de ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17090/1/Sedimentador%20Laminar%20en%20el%20Tratamiento%20de%20Agua%20para%20Consumo%20Humano.pdf>
- Martínez, L. (2001). Manual de operación y mantención de equipos de riego presurizado. Gobierno Regional de Atacama, Comisión Nacional de Riego e Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile). Centro Regional de Investigación Intihuasi (La Serena), Centro Experimental Huasco (Vallenar). Boletín INIA N° 65, 76 p. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7729>).
- Martins, C. I. M., Eding, E.H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J. P., Roque d'Orbcastel, E., y Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*. November 2010, Volume 43, Issue 3, pp. 83-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Martins, C. I. M., Ochola, D., Ende, S. S. W., Eding, E. H. y Verreth, J. A. J. (2009). Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture system? *Aquaculture* Volume 298, Issues 1-2, Pages 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.09.030>
- Mays, LW. (ed.). (1999). *Hydraulic Design Handbook*. 1 ed. New York. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070411524>
- McLaughlin, A. (2018). The volumetric mass transfer coefficient KLa and methods of measurements [Slides 2-5]. Slideplayer. <https://slideplayer.com/slide/14041085/>
- Mozes, N; Eshchar, M; Conijeski, D; Fediuk, M; Ashkenazy, A. Mozes N., Eshchar, M., Conijeski, D., Fediuk, M., Ashkenazy, A. (2003). Marine recirculating systems in Israel - Performance, production cost analysis and rationale for desert conditions. Field Report. *The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh* 55(4), 274-282
- Murray, F., Bostock, J. & Fletcher, D. (2014). Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and their Commercial Application. Final Report March 2014.

- Highlands and Islands Enterprise; RAS Aquaculture Research, Stirling Aquaculture Institute of Aquaculture University of Stirling. Scotland UK. 82 pp. <https://www.hie.co.uk/media/6168/ras-study.pdf>
- Nakayama, F. S. & Bucks, D. A. (1986). (Eds.). Trickle Irrigation for Crop Production. Design, Operation and Management. Developments in agricultural Engineering 9. Volume 9, Pages 1-383 (1986). ELSEVIER. USA. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42615-4.50012-6>
- Nieto, D., Norambuena, R., González, E., González, L. y Brett, D. (2010). Sistemas de Producción de Smolts en Chile. Análisis de alternativas desde la perspectiva ambiental, sanitaria y económica. En P. Moreno y D. Carrillo. (Eds). Valdivia, Chile: WWF.
- Obirikorang, K. A., Opoku, E. N., Gyampoh, B. A. (2022). Feed Digestion, Growth and Disease Prevalence in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Cultured at Different Water Exchange Rates in a Recirculating Aquaculture System. Aquaculture Studies, 22(3), AQUAST565. <http://doi.org/10.4194/AQUAST565>
- Oca, J. & Masalo, I. (2012). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. Aquacult. Eng. 52, (2013), 65-72 <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.09.002>
- Olivares, M. (2012). Balances de Masa. CI4102. [u-cursos.cl. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI4102/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D423373](http://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI4102/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D423373)
- Orellana, J. (2006). Identification and quantification of suspended solids and their effects in modern marine recirculation systems. Tesis Doctorado. Universidad Christian-Albrechts de Kiel. Alemania. IFM-GEOMAR, Leibtiz, Alemania. https://macau.uni-kiel.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00001942/d1942.pdf
- Pattillo, D. A. (2014). Water Quality Management for Recirculating Aquaculture. Extension and Outreach Publications. 10 pp. http://lib.dr.iastate.edu/extension_pubs/230
- Paulos, Y. K. (1991). Sedimentation Between Parallel Plates. Thesis M.A. Sc. University of British Columbia Department of Civil Engineering. Editor University of British Columbia. Vancouver, Canada. 176 pp. <https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/831/1.0098589/2>
- Pedersen, S. (2018). Simulation and Optimization of Recirculating Aquaculture Systems. Thesis for the degree of licentiate of engineering. Department of Electrical Engineering Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 71 pp.

- Perry, R. H. (1992). Manual del Ingeniero Químico. Tomo 2. En R. Perry, D. Green, J. Maloney (Eds.). 6 ed. Mc Graw-Hill.
<https://dokumen.pub/perry-manual-del-ingeniero-quimico-2-6-ed-9789684220966-9684220960-9789684229723-9684229720-9789684229730-9684229739-9789684229747-9684229747-9789684229754-9684229755-9789684229761-9684229763.html>
- Pfeiffer, T., Osborn, A. y Davis, M. (2008). Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 39: 24–29.
- Pham, H. L. (2018). Operation of biofilters: a numerical approach to some couplings between hydrodynamic and biofilm growth Modeling. Tesis Ph. D. Université Grenoble Alpes. <https://theses.hal.science/tel-01983040/document>
- Piedrahita R. H. (2011). Sistemas de recirculación en acuicultura. En: Tecnología de recirculación de agua aplicada a cultivos marinos. Universidad Católica del Norte. Coquimbo, Chile. 213 pp.
- Piedrahita, R. H., Zachritz, W. H., Fitzsimmons, K., y Brockway, C. (1996). Evaluation and Improvements of Solids Removal Systems for Aquaculture. In *Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture*, *Aquacultural Engineering Proc II*. Libey, GS; Timmons, MB (Eds.). NE Regional Agric. Engineering Service Pub #NRAES-98. p. 342-353.
- Piedrahita R. H., Merino G. E., Uribe E.G., Araneda M. E., Morey R.I., Barraza J.F. y Brokordt K. B. (2011). Tecnología de recirculación de agua aplicada a cultivos marinos. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ciencias del Mar, Departamento de Acuicultura, Coquimbo. Chile. 204 p.
- Ragab, A. M., El-Gindy, A.-G. M., Kaddour, O., Ali, S. A. (2022). Dissolved Oxygen and Ammonia Mass Balance in a Recirculating Aquaculture System for Raising the Nile Tilapia. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*. Vol. 26 (2): 217 – 237
- Ramalho, R. S. (1996). Pretratamientos y Tratamientos Primarios. *Tratamientos de Aguas Residuales*. 705 pp. Ed. Reverté.
https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/pretratamientos_tratamientos_primarios.pdf
- Regional Research Reports. (2022). *Recirculating Aquaculture System Market Global Industry Research Analysis & Forecast 2022 to 2030*.

<https://www.regionalresearchreports.com/request-sample/recirculating-aquaculture-system-market/AS-1201>

- Remmerswaal, R. A. M. (1993). Recirculating Aquaculture System. INFOFISH Technical Handbook 8. P O BOX 10899, 50728 Kuala Lumpur, Malasya. ISBN 983-9816-10-1. Printed by: SP-Muda Printing Sdn. Bhd. 27 pp
- Riquelme, S. J. (2021). Influencia del tamaño de sistemas de partículas en su velocidad de sedimentación, representada por la función de corrección propuesta por Richardson & Zaki, aplicada a suspensiones estables de partículas de orden micrométrico. Memoria de Ing. Civil Mecánico. Universidad de Talca, Chile. 112 p.
<http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12970/3/2021A000813.pdf>
- Rincón, A; Herrera, O. F. y Ortiz, M. F. (2014). Esquema para el dimensionamiento de Unidades de Sedimentación de alta tasa de flujo ascendente. Entre Ciencia e Ingeniería. Año 8 No. 16 - Segundo Semestre de 2014, pp. 29–40.
<https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/588/598>
- Rojas González, A. (2012). Fundamentos de procesos químicos. Guía de estudio para alumnos de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55975/9789587610321.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Sandu, S. & Hallerman, E. (2013). Biodegradation of Nitrogen in a Commercial Recirculating Aquaculture Facility. InTech. <https://www.intechopen.com/> doi: 10.5772/55841
- Sedano, F. y Anguis, V. (2016). Calidad del agua en sistemas de recirculación para la acuicultura (SRA) marina. /. – El Puerto de Santa María. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. 1-17 p. Formato digital (e-book) – (Cultivos Marinos y Recursos Pesqueros)
- Seginer I., Mozes, N., Lahav, O. (2008). A design study on the optimal water refreshment rate in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 38: 171-180.
- Sehsah, E.M. & Elsbaay, A. M. (2012). Reduce the power requirement for aeration in aquaculture system. The 19 th. Annual conference of Misr Society of Agricultural Engineering. *Misr J. Agric Eng.* 14-15 (Nov.2012)-781-796.
- Shimizu, F., Akinaga, M., Matsuyoshi, Y. & Tanaka, K. (2019). Flow characteristics of water delivery piping system and its effective flow area at discharge branches. 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conf. Series: Earth

- and Environmental Science 240 (2019) 062034. doi:10.1088/1755-1315/240/6/062034
- Sivanandan, T. P. (11 Julio del 2013). Find Mass Balance of Your Settling Tanks. *Water-chemistry.in*. <http://www.water-chemistry.in/2011/05/find-mass-balance-of-your-settling-tanks/>
- Smith, M. (15 de Agosto del 2013). Sizing a Biofilter. L. S. Enterprises. <http://biofilters.com/websize.htm>
- Soderberg, R. W. (1995). *Flowing Water Fish Culture*. Boca Raton, Florida. Lewis Publishers. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=ooYnQqnOtToC&oi=fnd&pg=PA1&ots=hLWcK61cEM&sig=XTb6gz2U-IRcWY1KA_auSvCb97I&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Summerfelt, S. T. & Vinci, B. J. (2009). Better Management Practices for Recirculating Aquaculture. Chapter 10. En: *Environmental Best Management Practices for Aquaculture*. Editors Tucker CS. & Hargreaves JA. DOI: 10.1002/9780813818672.ch10
- Tanveer, M. (2017). Estimation of flow rate and sizing of trickling filter in a recirculating aquaculture. *International Journal of Agricultural Engineering* Volume 10(2) 577-580. DOI: 10.15740/HAS/IJAE/10.2/577-580
- The water treatments. (s.f.). *Zones of Sedimentation Basin*. <http://www.thewatertreatments.com/wastewater-sewage-treatment/zones-sedimentation-basin/>
- Tidwell, J. (2012). *Aquaculture Production Systems*. WILEY. Ames, Iowa, Estados Unidos de América. https://www.academia.edu/36260785/Aquaculture_Production_Systems
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. & Vinci, B. J. (2002). *Sistemas de Recirculación para la Acuicultura*. 2 ed. en español. Chile. Fundación Chile.
- Timmons, M. B. & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating Aquaculture Systems*. 2 ed. Cayuga Aqua Ventures Llc.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., & Piedrahita, R.H. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. En M Hevia, G.Parada, R. Labatut, (Eds.), Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, USA.

- Tixe, S. (2004). Guía de Diseño para Líneas de Conducción e Impulsión de Sistemas de Abastecimiento de Agua Rural. Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - Organización Panamericana de la Salud. Lima 2004. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TIXE%202004a.%20Dis%20e%20C3%B1o%20de%20conducci%C3%B3n%20e%20impulsi%C3%B3n.pdf
- Toshio T. (2017). Application of Recirculating Aquaculture Systems in Japan. Fisheries Science Series. Tokio, Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56585-7>
- Uzukwu, P., Leton, T., Ogbonna, D. & Obinna, F. (2010). The design of trickling biological periwinkle shells filter for closed recirculation catfish system. International Journal of Natural and Applied Sciences, 6(3): 272-280. <http://www.researchgate.net/publication/275211429>.
- Uzukwu, P.U. (30 de Marzo de 2021). How to design Recirculating Aquaculture System components. Aquaculture in The Tropics. <https://piusuzukwu.medium.com/how-to-design-recirculating-aquaculture-system-components-5c40583acec>
- Vélez-Zuazo, X., Alfaro-Shigueto, J., Castagnino, F y Cordova, F. (2020). Evaluación anual de la comercialización de peces bajo la talla mínima legal en terminales pesqueros y puntos de desembarque (2018-2019). Lima. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA).
- Vesga-Rodríguez, C., Donado-Garzón, L. D., Weber-Shirk, M. (2019). Evaluation of high rate sedimentation lab-scale tank performance in drinking water treatment Evaluación del desempeño de un modelo a escala del tanque de alta tasa de sedimentación en el tratamiento de agua potable. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, No. 90, pp. 9-15. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/330343/20791864>
- Visvanathan, C., (2004). Sedimentation Physico-Chemical Processes. Bauhaus - Universitat Weimar, University of Leeds, Bangkok-Thailand.
- Vivek, S., Verma, A. K., Chandra, P. & Roy, S. D. (2015). Optimization of trickling bio filter at different water flow rate and filter media thickness. Pollution Research 34 (3) : 135-143. <https://www.researchgate.net/publication/318274852>
- Vukovic, Z. (1999). Overflow rate of high-rate settlers. Transactions on Ecology and the Environment Volume 33. 7 p. Witpress.com. WP99008FU.pdf

- Vulcano S.A. (22 de setiembre del 2022). Filtros piscina residenciales. Catálogo de productos 2022. www.vulcano-sa.com/ar/. https://www.vulcano-sa.com/media/catalogo/220922_CATALOGO2022_W.pdf
- Walker, J., Halliday, D., & Resnick, R. (2010). Fundamentals of physics. 10th edition. John Wiley & Sons. New Jersey. USA.
- Waller U., Orellana, J., Schiller, A. & Sander, M. (2001). The growth of young sea bass (*Dicentrarchus labrax*) in a new type of re-circulation system. ICES CM 2001/S:06. <https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/2002/S/S0602.PDF>
- Wheaton F. W. (1977). Aquacultural Engineering. New York. WILEY Inc. 680 pp.
- Wheaton, F.W. Hocheimer, J. N., Kaiser, G. E., Krones, M. J., Libey, G. S. and Easter, C. C. (1994). Nitrification filters principles. Editors M. B. Timmons and T. M. Losordo, Developments in Aquaculture and Fisheries Science, volume Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management. Elsevier Science B.V.: Amsterdam, The Netherlands. 27: 101-171.
- Yanac C., Verástegui, A., Sotelo, A., y Hall, S. (2023). Requerimiento de proteína en juveniles del pez marino chita *Anisotremus scapularis* (Tschudi, 1846) (*Perciformes:Haemulidae*). Rev Inv Vet Perú 2023; 34(3): e25476. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i3.25476>
- Yao, KM. (1970). Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. Journal (Water Pollution Control Federation), 42(2), 218–228. <http://www.jstor.org/stable/25036470>
- Zhang, D. (2014). Optimize sedimentation tank and lab flocculation unit by CFD (Computational Fluid Dynamics). Master Thesis. Norwegian University of Life Sciences. Ås, Norway. https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/198948/Duo_master_thesis_IMT_NMBU.pdf?sequence=1
- Zhong, F., Liang, W., Yu, T., Cheng, S.P., He, F. & Wu, Z.B. (2011). Removal efficiency and balance of nitrogen in a recirculating aquaculture system integrated with constructed wetlands. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 46:7, 789-794, Taylor & Francis Group, LLC. DOI: 10.1080/10934529.2011.571974

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Planos de detalle – redes de agua, desagüe y sistema de aireación

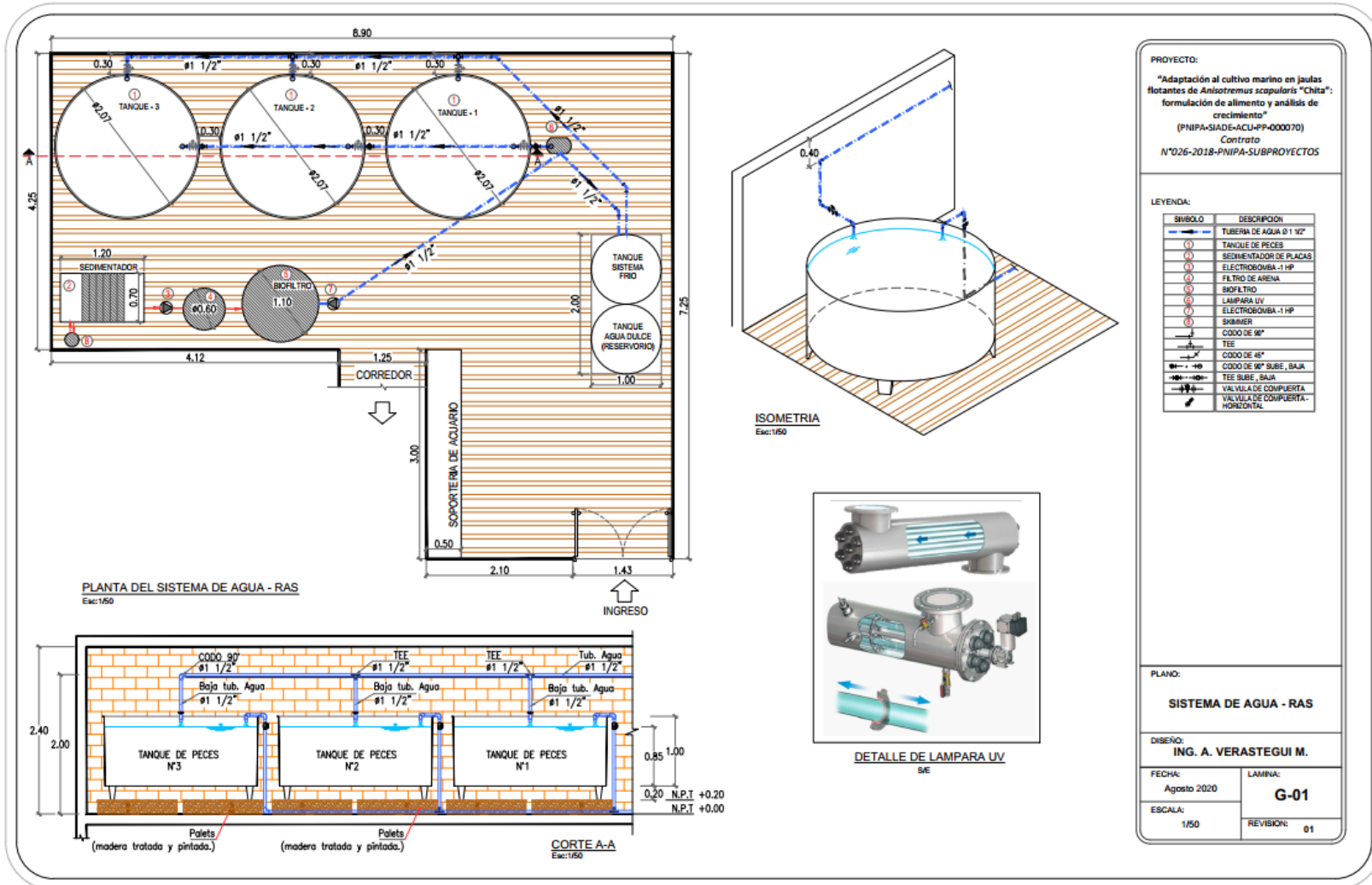


Figura 61: Línea de abastecimiento de agua en el sistema RAS marino

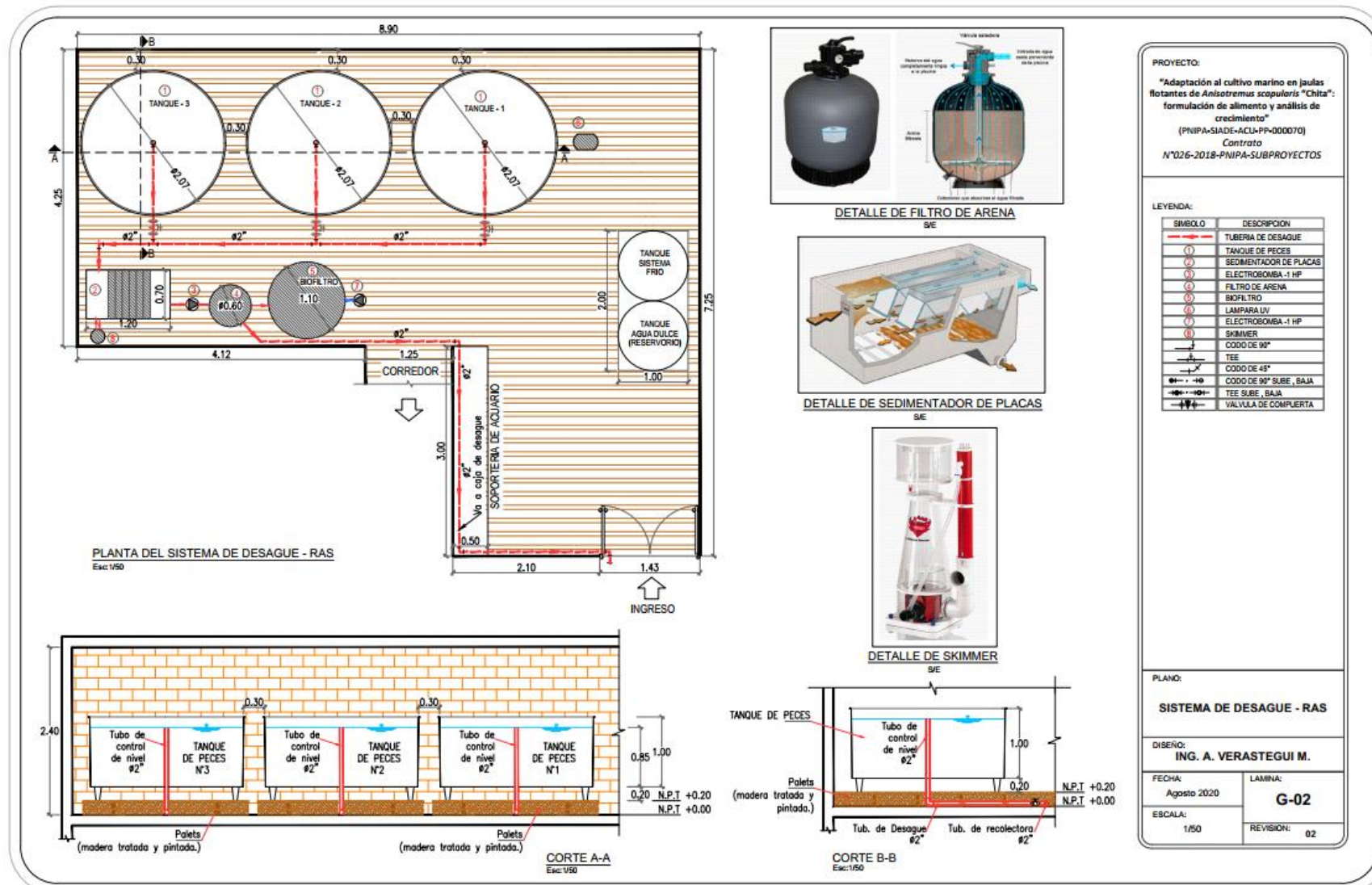


Figura 62: Línea de drenaje de agua (desagüe) en el sistema RAS marino

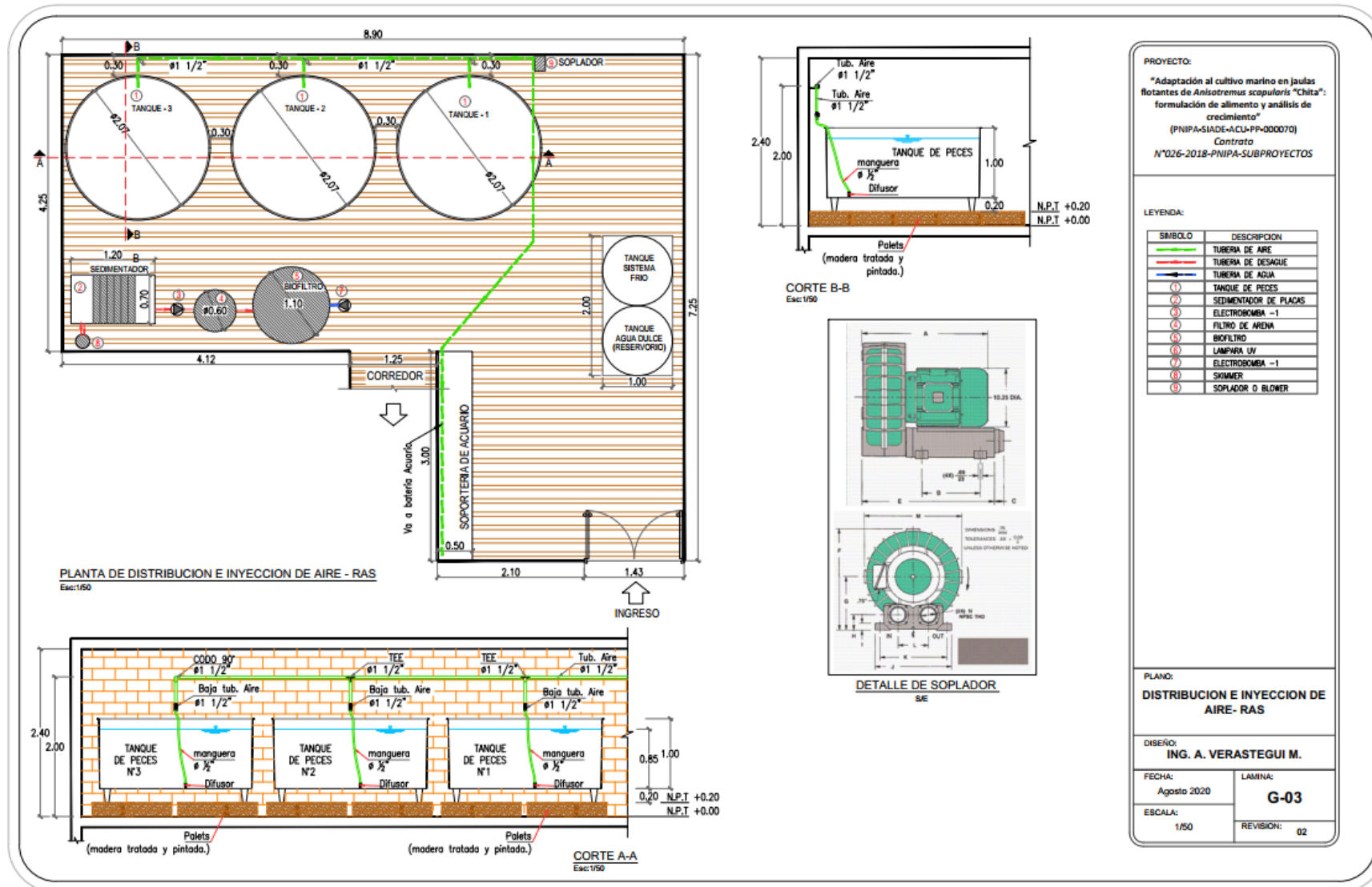


Figura 63: Línea de abastecimiento de aire a presión, en el sistema RAS marino

Anexo 2: Planilla de fórmulas y cálculos – formato “xls” (Excel)

Las siguientes líneas son reproducibles en una hoja de cálculos del software Excel.

ANISOTREMUS SCAPULARIS, "CHITA"			
1. CALCULO DE POBLACION Y VOLUMENES DE CULTIVO			
1.1. Etapa de engorde en JAULAS			
a.	Talla Mínima Captura - según norma (cm):	24	Resolución N° 156-2016-PRODUCE
b.	Talla Mínima Cosecha en JAULA (cm):	24	igualando a la Res. N° 156-2016
c.	Peso mínimo de captura - en gramos:	316	=0.02535*D4^2.967
d.	W = 0.02535 L^{2.967}		Dionicio-Acedo et al., 2018
	Calculos:		
e.	Diametro de jaula (m):	8.00	diametro menor posible de construir
f.	Area de jaula (m ²):	50.27	=3.1416*(D9/2)^2
g.	Altura total jaula (m):	5	criterio constructivo
h.	Altura útil jaula (m):	4	criterio de manejo
i.	Volumen total jaula (m ³):	251.33	=+D10*D11
j.	Volumen útil jaula (m ³):	201.06	=+D10*D12
k.	Densidad final jaula (kg.m ⁻³):	5	apoyado en: Joseph, 2018
l.	Peso individual cosecha - JAULA (g)	316	igualando a la Res. N° 156-2016
m.	Biomasa a la cosecha (kg/jaula):	1005	=+D15*D14
n.	Nro. peces en cosecha/jaula (unidades):	3186	=+D17/(D6/1000)
o.	Densidad final jaula (peces.m ⁻³):	15.85	=+D18/D14
1.2. Etapa de crecimiento (nursery) en tanques RAS marino			
a.	Nro. final peces en nursery (n + 5%):	3345	=+D18*1.05
b.	Talla inicial en nursery, cms	10.38	criterio manejo - experiencia previa
c.	Peso inicial en nursery, g	26.24	=0.02535*D23^2.967
d.	Talla final en nursery, cms	14.65	apoyado en: Joseph, 2018
e.	Peso final en nursery, g	72.95	=0.02535*D25^2.967
f.	Numero de tanques - nursery	3	criterio manejo: 3 tallas en el proceso
g.	Supervivencia en nursery (%)	90	criterio manejo - cultivo intensivo
h.	Nro. inicial peces en RAS (unidades):	3717	=+D22/(D28/100)
i.	Densidad final nursery (kg.m ⁻³):	25	criterio manejo: cultivo intensivo
j.	Biomasa final nursery (kg):	244	=+D22*D26/1000
k.	Volumen total de tanques (m ³)	9.8	=+D31/D30
l.	Volumen x tanque (m ³):	3.3	=+D32/D27
m.	Tirante útil "y" (m):	0.75	criterio manejo - tanques intensivos
n.	Radio de tanque (m) V = PI * r2 * y	1.18	=+(D33/(3.1416*D34))^0.5
o.	Diametro de tanque (m):	2.35	=+D35*2
	Redondeando al inmediato superior:	2.40	=+REDONDEAR(D36;1)

«Continuación»

2. CALCULO DE TASAS DE FLUJO - TANQUE DE PECES			
a.	Volumen x tanque (m ³):	3.39	=3.1416*((D37/2)^2)*D34
b.	Volumen total agua en tanques del RAS	10.18	=+D27*D40
d.	Tiempo retencion hidraulica - tanques (h)	4.00	Sumoharjo & Maidie, 2013
c.	Tasa recambio, tanque de peces (Vol.h ⁻¹)	0.25	=1/D42
e.	Caudal - 1 (m ³ .h ⁻¹)	2.54	=+D41/D42
f.	Caudal - 1 (m ³ .s ⁻¹)	0.0007	=+D44/3600
g.	Caudal - 1 (L.s ⁻¹)	0.707	=+D45*1000
3. DIAMETRO ECONOMICO DE LA TUBERIA DE IMPULSION			
Forchheimer's model			
a.	Caudal de bombeo (Qb)	0.707 l/s	
b.	Tiempo de bombeo (h) - 4 * 15 dias OFF	7320 horas	Horas/año - periodos x mantenimiento
d.	Velocidad recomendable (V, m/s)	<0.6 - 2.0 m/s>	Rango recomendado
c.	Horas de funcionamiento de referencia	8760 horas	Numero de horas total x año
e.	Diametro economico - Linea de impulsion		De = 1.46 * φ^{1/4} * Q^{1/2}
	Forchheimer's model	φ :	horas de bombeo x año
		Q :	caudal, m ³ .s ⁻¹
f.	Diametro economico - Linea impulsion (m)	0.037	m
		1.461	Pulg.
g.	Redondeo de diametro economico	1.000	Pulg.
h.	Velocidad en tuberia de impulsion	1.395	m/s
i.	Diametro den la succion	1.0	Pulg.
4. SEDIMENTADOR DE ALTA TASA - DE PLACAS PARALELAS			
4.1. Datos previos			
a.	Biomasa final (kg)	244	=+D31
b.	Tasa de alimentacion (%)	4.05%	Yanac, 2022
d.	Cantidad de alimento (kg)	9.88	kg
c.	Velocidad media de sedimentacion (cm/s)	0.5	Kishi et al., 1994
e.	Velocidad media de sedimentacion (cm/min)	15	Yao, 1970
f.	Veloc. de sedim. - particulas organicas (mm/s)	0.42	Uzukwu, P.U., 2021. https://piusuzukwu.medium.com/how-to-design-recirculating-aquaculture-system-components-5c40583acec

«Continuación»

4.2. Procedimiento INFOFISH Tecnical Handbook 8 (Remmerswaal, 1993)			
a.	Tasa de flujo - caudal (m ³ .h ⁻¹)	2.54	=+D46*3.6
b.	Velocidad de sedimentacion (m.d ⁻¹)	36.29	=(D70/1000)*(60*60*24)
c.	Area de superficie de sedimentacion (m ²) - plano horizontal	1.68	+=D\$73*24/D74
d.	Angulo de placas (Θ)	60	
e.	Coseno del angulo (Θ)	0.5	
f.	Superficie de sedimentacion (m ²) - plano inclinado	3.37	=+D75/D77
g.	Altura de la placa (m)	0.75	Criterio de diseño
h.	Ancho de la placa (m)	0.80	Criterio de diseño
i.	Superficie de placas (m ²)	0.60	=+D79*D80
j.	Numero de placas (unidades)	5.61	=+D78/D81
Settling surface area = Flow rate / Settling velocity			
Settling surface = Plate surface * Cosine (plate angle)			
5. BIOFILTRO PERCOLADOR			
5.1. Tamaño y biomasa del tanque			
a.	Profundidad de agua en el tanque (m)	0.75	=+D34
b.	Volumen total (m ³)	9.76	=+D32
d.	Volumen de tanque, c/u (m ³)	3.25	=+D33
c.	Numero de tanques (unidades)	3.00	=+D27
e.	Tasa de alimentacion como (% peso corporal)	4.05%	Yanac, 2022.
f.	Densidad maxima de cultivo (kg/m ³)	25.00	=+D30
g.	Biomasa de peces (kg)	244.03	=+D93*D89
5.2. TAN, aplicación del Balance de Masas			
a.	Proteina contenida en el alimento (%)	0.55	Yanac, 2022.
b.	Cantidad de alimento, racion diaria (kg/d)	9.88	=+D94*D92
d.	Tasa produccion amonio (gN-TAN.kg _{pez} ⁻¹ . d ⁻¹)	0.778	Godoy te al., 2022
c.	TAN permisible (mg/L)	1.50	Uzukwu et al., 2010
e.	Cantidad de amonio producida (gTAN/d)	189.86	=+D100*D94
f.	Contribucion de la Nitrificacion Pasiva (%)	0.25	Losordo & Hobbs, 2000
g.	Cantidad de amonio - Nitrificacion Activa (gTAN/d)	142.39	=+D102*(1-D103)
h.	Tasa de remocion de amonio, Ref.: Fig. 1. (g/m ² .d)	1.20	LSE, 2003 (autor: Smith, 2013)
i.	Area de superficie de la media (m ²)	118.66	=+D104/D105
j.	Area de Superficie Especifica (m ² /m ³)	226.00	LSE, 2003 (autor: Smith, 2013)
k.	Volumen de la media o sustrato (m ³)	0.53	=+D106/D107
l.	Diametro de biofiltro percolador (m)	0.96	diametro de tanque marca comercial
m.	Area de seccion transversal biofiltro percolador (m ²)	0.72	=3.1416*(D109/2)*(D109/2)
n.	Altura del biofiltro (m)	0.73	=+D108/D110
o.	Caudal (L/s)	0.707	=+D46
p.	VTR calculado en el presente estudio (g/m ³ /d):	74.61	g/m ³ /d
q.	VTR según CAVENDISH (SSA=200 m ³ /m ²)	90	g/m ³ /d,

Hydraulic Analysis and Water CAD simulation of the Water Distribution Network applied to marine Recirculating Aquaculture Systems

Anibal Verástegui-Maita^{1*}, Jesús Mejía², Néstor Montalvo³, Absalón Vasquez⁴

¹*Master's Program in Aquaculture, Faculty of Fisheries, National Agrarian University La Molina, La Molina, Lima, Peru; avm@lamolina.edu.pe

²Doctoral Program in Water Resources, Department of Water Resources, National Agrarian University La Molina (UNALM), Lima, Peru; jabel@lamolina.edu.pe

³Doctoral Program in Water Resources, Department of Water Resources, National Agrarian University La Molina (UNALM), Lima, Peru; pdrh@lamolina.edu.pe

⁴Doctoral Program in Water Resources, Department of Water Resources, National Agrarian University La Molina (UNALM), Lima, Peru; pdrh@lamolina.edu.pe

***Corresponding Author:** Anibal Verástegui-Maita

*Master's Program in Aquaculture, Faculty of Fisheries, National Agrarian University La Molina, La Molina, Lima, Peru; avm@lamolina.edu.pe

Abstract

Water supply is crucial for all human activities, especially when large volumes and high quality are required. Therefore, greater efficiency is sought in water storage, distribution, use and reuse systems. The present design and simulation work was carried out simultaneously with the physical installation of a Recirculating Aquaculture System (RAS) for the breeding of the marine fish Chita in Callao - Peru. The sizing of the RAS components and hydraulic characterization was carried out by applying mass balance theory, using an Excel spreadsheet and hydraulic simulation of the distribution network with WaterCAD software. The objective was to apply these software tools and compare the simulation results with parameters conventionally used in the design of RAS installations, and to investigate head losses, hydraulic pressure and diameter assignment in the pipe network. Demonstrating the adaptability of WaterCAD in the verification of pressures, flow rates and flow velocities in the distribution of water in a RAS, and finding that the diameters conventionally used, based solely on empirical criteria, were 7.76% larger than those of the simulation. Consequently, it is deduced that the hydraulic parameters present significant differences that must be considered to conceptualize an adequate water distribution network. The introduction of WaterCAD simulation in the design and operation of the RAS system is recommended to obtain safer pipe networks, that guarantee the stable state condition of the RAS system. Opening the possibility of more stable water flows, with lower energy costs associated to the operation of pumps.

Keywords: Aquaculture, Marine RAS, Water CAD simulation, Water distribution network, Fish culture.

1. Introduction

Recirculating aquaculture systems (RAS) are considered a high-tech alternative aimed at the production of aquatic animals through water reuse (Bregnballe, 2022). RAS engineering has developed methodologies to size its main components as a whole (Wheaton, 2008; Timmons and Ebeling, 2007; Pillay and Kutty, 2005; Lekang, 2007; Takeuchi, 2017). Other researchers have also worked on the design of: solid separators (Blanco Salazar, 2004; Rincón and Herrera, 2014; Vesga-Rodríguez et al., 2019; Yao, 1970), and biological filters (Godoy-Olmos et al., 2016; Babadjanova, 2017; Uzuoku et al., 2010; Shrivastava et al., 2015; Kamstra et al., 1998; Tanveer, 2017). These components work in conjunction with complementary equipment to achieve more refined levels of water quality, such as skimmers, degassers, UV lamps, etc., operating together and interconnected. These RAS elements require a network of pipes for water transport, the design and operation of which has received little attention to date.

Water distribution mainly refers to the supply of drinking water, widely studied (Izinyon and Anyata, 2011; Kusnayati et al., 2019; Kadhim et al., 2021), however, water transportation through pipelines is also topic of recirculation systems for the breeding of aquatic animals. Distribution systems consist of main, secondary, branch and lateral pipes; which are generally placed taking advantage of the available geometric hydraulic head (Garg, 2017). The definition of the optimal configuration and parameters of the distribution network that can satisfy the required water flow and pressure results from hydraulic analyzes and cost-benefit indicators (Dasic and Djordjevic, 2004; Kadhim et al., 2021). Regarding the reliability of the sizing, in water resources systems, the probability of failure results from examining the possibility of satisfying the demand under predefined scenarios of minimum demand. In practice, this results in an oversizing of some elements of the system (Dasic and Djordjevic, 2004).

WaterCAD helps design and optimize water distribution systems (Bentley Systems, 2023; Eryürük, 2021; Kadhim et al., 2021; Septiawati et al., 2019). An insufficient water flow associated with hydraulic pressures lower than those necessary in a RAS system causes a decrease in process performance in each of the system components. WaterCAD is capable of performing simulations under steady-state conditions and long-period scenarios, with the option to test assumed scenarios (Bentley Systems, 2023). To guarantee an adequate environment for fish production, recirculation systems (RAS) must maintain permanent water flows, avoiding alterations in the hydraulic regimes in their components, being aware of possible flow reductions due to the adhesion of organic matter inside of the pipes (Kals, 2004). The objectives of the present study were (i) Apply the commands, tools and processes of the WaterCAD software for the hydraulic simulation of the water supply pipe network of a recirculating system for marine aquaculture, and (ii) Evaluate the resulting data on head losses, hydraulic pressure, water velocity and pipe diameter, compared to the operating parameters of the physical model of the RAS system.

Steady state systems concept

Before defining ‘Steady State System’ which a very transcendent concept in recirculating aquaculture systems design, it should be explain how Mass Balance Theory fits in this part of Aquaculture Engineering. Based on the concepts developed for the general theory of Mass Balance, the cases applied to RAS systems correspond mainly to the so-called “Simple Mass Balances” (Rojas González, 2012), those in which there is no chemical transformation, or in which that no equilibrium equation is needed for its solution. Being the operating regime, permanent; that is, it operates in a stable state with continuous flow. According to Deiana et al. (2018), Ashrafizadeh and Tan (2018), and Londoño García (2015), systems can be categorized as open or closed. In the open system there is mass transfer across its boundaries, while in a closed system no mass enters or leaves its limits. At the same time, the open system can operate in a stable or transient state. The open system is stationary when there is no accumulation of mass in it, while the transient open system presents mass accumulation. Transferring these concepts to the components of a RAS system, each of its elements, whether called a fish tank, solids separator, biofilter, etc., represent open systems in a steady state, because ideally– during their operation– accumulation should not occur. And this concept is what allows us to properly conceive a balanced system in a RAS installation, and from there develop the formulas and calculations. Ashrafizadeh and Tan (2018) conclude by pointing out that when a system is in a steady state, all its properties and variables do not change with time, and the total mass of the system is constant. Furthermore, the calculations in the design of the RAS are carried out considering that a mass balance problem is constituted by a volumetric balance equation plus a mass balance equation (Eq. 1 and 2), as explained by Olivares (2012), for each of the species or compounds considered:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^N Q_{ent,i} - \sum_{j=1}^M Q_{sal,j} \dots\dots\dots \text{Eq. 1,}$$

$$\frac{d}{dt} (V \cdot C_{sis}) = \sum_{i=1}^N Q_{ent,i} \cdot C_{ent,i} - \sum_{j=1}^M Q_{sal,j} \cdot C_{sal,j} + \sum_{k=1}^L V \cdot r \dots\dots \text{Eq. 2.}$$

where, V is system volume, Q is the flow rate, C is the concentration of a substance or compound, and r is the renewal rate. According to Ashrafizadeh and Tan (2018), for any material in the system, under chemical reactions, it is appropriate to consider for equilibrium, quantities of production or consumption within the system, in addition to the inputs and outputs of the material across its boundaries.

Head losses in pipes formulas

Walker et al. (2014), Larock et al. (2000) and USDA (2023), explain the two most used equations for calculating head losses in pipe sizing: the Darcy-Weisbach equation and the Hazen-Williams equation. The Darcy-Weisbach equation (Abdulameer et al., 2022; Larock et al., 2000; Dawe, 2000) has the form of:

$$h_f = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g} = f \frac{L}{D} \frac{L \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \dots \text{Eq. 3,}$$

where h_f = friction head loss (m); f = unitless friction constant; L = pipe length (m); D = hydraulic diameter of the pipe (m), $D = 4A/P$ being A and P cross-sectional area and wetted perimeter, respectively (for a completely filled cylindrical pipe, the hydraulic diameter is equal to the inner diameter); $V = Q/A$, fluid flow velocity (m/s), $Q =$ discharge (m³/s), $A =$ cross-sectional area of the pipe (m²); and $g =$ acceleration due to gravity (9.81 m/s²), according Larock et al. (2000), is the most sound and versatile equation for frictional head loss, although implies difficulties of determining the friction factor “f”. Because Darcy-Weisbach equation has non-empirical origin is

considered as the most accurate method for modeling (Abdulameer et al., 2022). Also named in Mawengkang et al. (2023), as pressure drop equation due to friction (ΔP pressure drop across the pipe = h_f), and has the form:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad \dots \text{Eq. 4,}$$

being, ΔP is the pressure drop, f the Darcy friction factor, which depends on the roughness of the pipe surface and the Reynolds number, L the length of the pipe, D the diameter of the pipe, ρ the density of the fluid and V the velocity of the water.

The Hazen-Williams equation is a formula derived empirically from pipe water flow data (USDA 2023), mainly used in pressure analysis (Abdulameer et al. 2022) and the calculation of head losses in pipes (h_f), has the following form, depending on the flow:

$$h_f = \frac{K \cdot L}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.85} \quad \dots \text{Eq. 5,}$$

where h_f is head loss (m); k is a unitless constant (0.85 for SI units); L is pipe length (m); Q is the flow rate (m^3/s); C is Hazen-William's coefficient, ranges from 80 to about 150; D is pipe diameter (m), possibly the Hazen-Williams equation is the most widely used (Larock et al., 2000). The relationship between the flow rate and the pipe diameter is highly non-linear, which in practice leads to increasing the diameters to reduce energy costs in transporting the liquid. In Dawe (2000), the Hazen-William's equation is also shown in the following form:

$$h_f = \frac{6.79}{D^{1.16}} \left(\frac{v}{C} \right)^{1.85} \quad \dots \text{Eq. 6,}$$

where, "v" represents the average velocity (m/s), "C" the relative roughness factor. Or in the form presented by USDA (2023), solving for h_f as function of "Q" the flow rate:

$$h_f = 10.704 \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.85} \frac{L}{D^{4.87}} \quad \dots \text{Eq. 7,}$$

For International System (SI), corresponding units are: h_f (m), L (m), Q (m^3), and C_{HW} the Hazen-Williams relative roughness factor (unitless).

2. Methodology

The research work was carried out in La Punta district, Callao province, Perú. The desert climate predominates in the area, with 168 mm of precipitation and an average ambient temperature of 18°C . The lowest water temperatures in September are 15.70°C and the highest averages reach about 21°C in the month of February. These are the general climatic parameters according to statistics from CLIMATE-DATA.ORG. La Punta is a district located on the beaches of the Pacific Ocean, on the central coast of Peru at less than 10 meters above sea level (Figure 1).



Figure 1: Location of the research laboratory in La Punta, Callao.

The physical model of the recirculating aquaculture system for this research was oriented to the breeding of marine fish “Chita” (*Anisotremus scapularis*) in circular tanks, within the framework of a project executed by the National Agrarian University La Molina, with financing from the National Program of Innovation in Fisheries and Aquaculture (PNIPA).

2.1. Fish characteristics and water quality monitoring

The recirculation system was designed to achieve operating parameters similar to those of a scalable commercial pilot production, during a period called “Initial Growth” on land, in the process of breeding *A. scapularis*, which consists of bringing the fingerlings until they reach a size that ensures the resistance of the fish, still young, to the oceanographic conditions of the floating cages in the sea, where the fattening process is completed until reaching commercial adult size. The fish used for the experimental trial were captured in Arica beach, district of Lurín - Lima (12°18'20.85”S and 76°50'57.06”W), 2500 juveniles with lengths in the range of 9.7 and 11.3 cm, and weights between 14.32 and 27.20 g. To evaluate the water quality, an OAKTON brand pH meter, model pHTestr 30, a YSI DO 200A-4 model oximeter was used to measure the dissolved oxygen (DO, g/m³) and saturation level (%), a ATS refractometer – salinometer, and a model YSI 9500 photometer to measure total ammoniacal-N, nitrite-N, nitrate-N and alkalinity.

The collection of water samples was carried out with the purpose of seeing the variations of the physicochemical parameters during the time that the observation period lasted, with sampling every 15 days and; also evaluate the hourly stability of water quality, with sampling every 2 hours for 24 hours a day. These two approaches to assessing water quality provided a reliable reflection of the degree of stability of the system, which is what is sought as the operating principle of the RAS system, a stable system.

2.2. Hydraulic analysis and simulation procedure using Water CAD

Configuration of the RAS System: water distribution network

The design of the aquaculture recirculation system for this research has gone through three stages: the first consisted of defining the maximum biomass, fish in culture tanks, that the system must handle. The second stage consisted of defining the components of the RAS and calculating its capabilities. The third stage consisted of defining the Water Distribution Network (WDN), according to the location of the RAS components and considering pipe accessories such as valves, reductions, bends, unions, etc. including return branches to regulate water pressures and flows. In the second and third stages, it was considered to place all the RAS elements in the available space, having resulted in a very compact RAS plant, with a fair circulation path and also anticipating traffic during equipment replacement, repair or maintenance activities. In the present study, the fish tanks, settler, sand filter, trickling filter, cooling tank and UV lamp were appropriately located in the work area according to the layout plan previously drawn using AutoCAD software (Figure 2).

The adopted design was inspired by the Dutch model, whose characteristic is the use of a parallel plate settler and trickling biofilter (Remmerswaal, 1993). These filters are easy to build, simple to operate and robust enough that, in addition to nitrification, they cause the release of CO₂ and the incorporation of oxygen (Losordo and DeLong, 2015). This set of advantages has been evident after calculations, the design process and installation, during start-up and RAS operation, which is reflected in water quality parameters and fish behavior.

The sizing of the RAS system components was carried out applying the mass balance principles described by Timmons et al. (2009); Geankoplis et al. (1998); Olivares (2012); Lekang (2007). The RAS system was composed of three fish tanks 2.40 m in diameter and 1.00 m high, with a water depth of 0.80 m. The tanks had two water inlets: a main one from the electric pump (P2) with a 2” diameter PVC pipe and a secondary one from the Chiller cooling tank (CH) with a 1 ½” PVC pipe. Likewise, the tanks had a drain made up of a central 3” diameter PVC pipe.

The water collection network for the tanks was designed with three (03) sections of pipes: the first included the collection of effluent water from the three fish tanks (T1, T2 and T3) with a 3” PVC pipe, that goes to the parallel plate settler (ST). The second section, strictly suction, included the suction flows of the two electric pumps P1 and P2, in a pressurized network, where the pump P1 sucks a portion of the output flow of the plate settler (SP) and the pump P2 sucks the remaining portion together with the output flow of the trickling biofilter (TRICK-F), the third section consists of pressurized flows towards the different water treatment components starting from the two electric pumps, the pump P1 distributes its flow into two fractions, towards sink 1, as water return, and the second flow enters the sand filter (SF). The effluent water from the sand filter was separated into two, one part was redirected to sump tank 1 generating a second return and the other part of the flow entered the biofilter mixing with the pump flow (P2). Pump P2 discharges the flow in three parts, the first consists of a return to sump 2 (S2), the second flow feeds the trickling biofilter (TRICK-F) mixing with the sand filter flow (SF) and the third flow - that passes the UV lamp (UV) – feeds the cooling tank ‘chiller’ (CH) and towards the fish tanks, this flow

being the main one. The flow leaving the cooling tank is delivered to the fish tanks as a secondary flow (see Figure 2). The calculations at this point end with flow data for each RAS component, specifically.

The network of water distribution pipes in the marine recirculation system has been designed considering the expected performances for each of the components of the system, which were previously calculated using the formulas and parameters specific to the function that each of them fulfills. For these calculations, an Excel spreadsheet was used, similar to that shown by Losordo and Hobbs (2000), applying the theory of mass balance.

Simulation methodology

The hydraulic analysis and simulation of the water distribution network in the RAS system was preceded by the calculations of fish biomass and water volumes in breeding tanks, the definition of characteristics of the components (settler, mechanical and biological filters, cooling tank, and others), and the positioning of RAS elements within available area for definitive installation of the RAS.

Having defined position of each RAS components, next steps corresponded to WDN design and simulation in WaterCAD software, similar to what was presented in (Patel and Mehta, 2022): (i) the RAS design is drawn in a WaterCAD file, (ii) data was entered into the software: diameters, demands, elevations, coordinates, material, etc. (iii) the water demand pattern is imported, here a continuous water supply was assumed, and (iv) Once the data is entered: the model is executed. WaterCAD is a Windows-based, stand-alone system software developed by Haestad Methods Inc. of Cincinnati, Ohio, USA. It is an easy-to-use hydraulic and water quality modeling application for water distribution systems, (Bentley Systems, 2023; Izinyon and Anyata, 2011; Sarker, 2021).

Simulation using WaterCAD software begins to identify water distribution pipes to and from each RAS component. Moving further into the simulation, pipe segments and nodes were placed at their coordinates and elevations above the floor. In addition, the properties of the pipes, entirely made of Polyvinyl Chloride (PVC), were entered: diameters and corresponding roughness coefficient. The number and length of the pipes were 30 and 36.04 m, respectively. The water flow rate assigned to each RAS component as a result of its sizing calculations was entered into the nodes and the hydraulic simulation was run. The hydraulic calculations were carried out considering the Hazen- William equation (Eq. 7), taking the friction coefficients. The relative location of the components of the RAS system, presented in plan and elevation views, with flow rates and pipe diameters for practical use, was seen in Figure 2 (a). Nodes are points where the hydraulic conditions of the flow change and can represent water. fountains, storage tanks, discharge points, bypass pipeline sites, etc. (Mawengkang et al., 2023). This information was input to a WaterCAD file going through the following two activities:

- a. Transfer the schematic of the RAS system (components + pipe network) to a scaled
- b. The images in the AutoCAD software, recorded in DXF format, were imported into the WaterCAD program using the Model Builder command, as seen in the modeling images.

Hydraulic analysis of water distribution systems includes the calculation of pressure loss in the WDN. Today, WaterCAD is used to calculate energy losses in water distribution systems for the most varied uses, because this software is easy to use, versatile enough (Kusnayat et al., 2019), and is the most advanced and powerful software (Kadhim et al., 2021). In this work, the WaterCAD program was used according to the design and the necessary pressures to adequately provide the water flows to the fish tanks and the biofilter, as the main demand points. The flow rates were defined through the hydraulic calculation carried out, to transport the necessary oxygen and eliminate the contaminating compounds resulting from the metabolism of the fish. This was done through PVC pipes of different diameters, class 10 smooth PVC pipes were used, taking into consideration criteria of corrosion resistance, pressure resistance, installation characteristics and availability on the market.

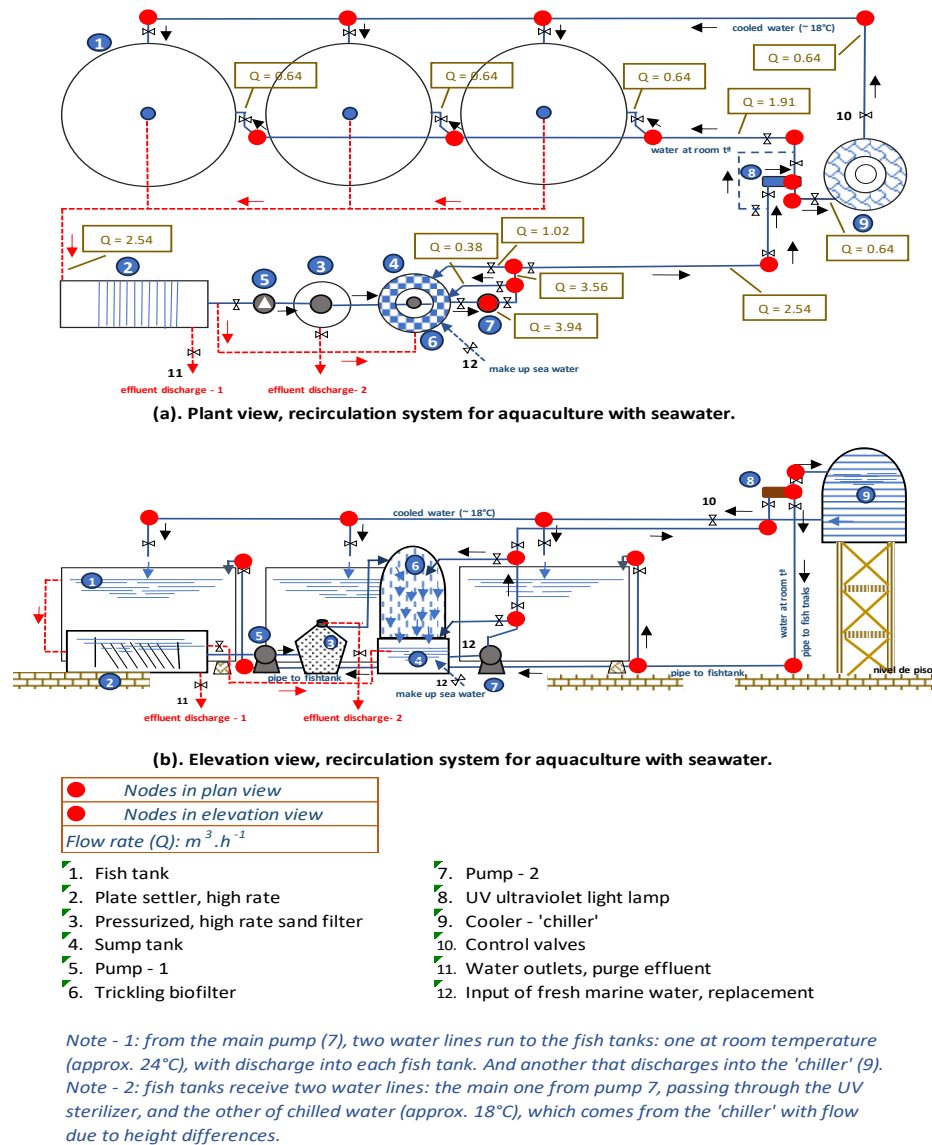


Figure 2: Water flow diagram and views of the general layout of the RAS system, with nodes location.

3. Results

3.1. Hydraulic analysis of the RAS water distribution network

Since this work is the first on water distribution networks (WDN), applied to marine RAS systems, the variable “pipe diameter” has been taken to evaluate the degree of proximity between the diameters of the installed network and the diameters of resulting simulation. In the present study, installed pipes have been found with a diameter 7.76% larger than that determined in the simulation, see Table 1.

Table 1. Comparison of the results of pipe diameters, from the simulation hydraulic analysis with the data collected from the RAS facilities in operation

Label	Initial node	Final node	Pipe diameter installed (mm)	Pipe diameter simulated (mm)	Difference (%)
T-1	J-2	J-1	57.00	43.40	31.34%
T-2	J-4	J-3	57.00	43.40	31.34%
T-3	J-6	J-5	57.00	43.40	31.34%
T-4	J-8	TRICK-F	57.00	43.40	31.34%
T-6	J-9	J-10	57.00	57.00	0.00%
T-7	J-10	J-20	57.00	57.00	0.00%
T-8	J-10	J-14	57.00	43.40	31.34%
T-9	J-11	J-6	57.00	43.40	31.34%
T-10	J-12	J-2	57.00	43.40	31.34%
T-11	J-12	J-11	57.00	57.00	0.00%

T-12	J-13	J-4	57.00	43.40	31.34%
T-13	J-13	J-12	57.00	57.00	0.00%
T-14	J-14	CHILLER	57.00	43.40	31.34%
T-15	J-16	J-17	57.00	67.80	-15.93%
T-16	J-16	J-19	57.00	43.40	31.34%
T-5	J-17	J-8	57.00	43.40	31.34%
T-18	J-17	J-29	57.00	57.00	0.00%
T-19	J-19	RETURN	57.00	43.40	31.34%
T-20	J-20	J-21	57.00	57.00	0.00%
T-21	J-21	J-13	57.00	57.00	0.00%
T-22	J-22	TK-03	43.40	43.40	0.00%
T-23	J-24	TK-02	43.40	43.40	0.00%
T-24	J-24	J-22	43.40	57.00	-23.86%
T-25	J-26	TK-01	43.40	43.40	0.00%
T-26	J-26	J-24	43.40	57.00	-23.86%
T-27	J-28	J-26	43.40	57.00	-23.86%
T-28	J-29	J-9	43.40	57.00	-23.86%
T-29	T-6	PUMP	57.00	67.80	-15.93%
T-17	PUMP	J-16	57.00	67.80	-15.93%
CHILER	CHILER	J-28	57.00	57.00	0.00%

Table precedent shows ‘pipe diameter installed’ which correspond to PVC pipe diameter as function of flow rates required for projected capabilities in each RAS components, those indicated in labels in Figure 3.

Of a total of 25 pipe sections resulting from the RAS pipe networks, in 12 of them the pipe diameter is oversized, in 7 sections smaller diameters than the simulation results were installed. And in 11 sections the diameters obtained from the simulation are equal to those installed. Having found differences in the diameters of the pipes, it is therefore possible to expect proportional differences in the series of hydraulic parameters of the RAS water distribution network.

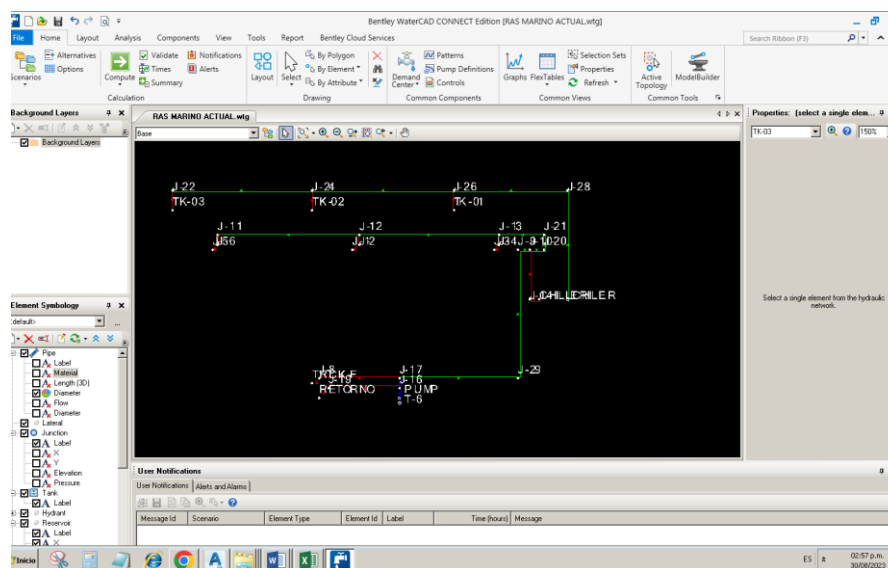


Figure 3: Screenshot from WaterCAD software: Plan view of the water distribution network showing the gravity-fed branch and the pressurized branch

3.2. Modeling the distribution network in WaterCAD

Modeling using WaterCAD software served to verify that the design of the hydraulic network ensured the delivery of water from a suction point (S2) to the highest and most distant points of the marine RAS. Condition that is verified in the data generated by the simulation and during the operation of the facilities in the experimental research.

As a result of the geometry of the RAS, and also the flow and volume requirements of water, two water branches were clearly configured in the WDN: the main one coming from the electric pump (P2) with 2” diameter PVC pipe (series J-16, J-17, J-29, J-20, J-21, J-13, J-12 and J-11) and a secondary one from the Chiller cooling tank (CH) with PVC of 1 ½” (J-27, J-28, J-26, J-24 and J-22 series), in Figure 3. The latter constitutes what is called “gravity-fed system”, according to Action Contre la Faim, (2008), because it works by gravity. The water

stored in the cooling tank descends under its own weight, flowing through the pipes to the fish tanks. In this system the pipes and faucets are at a lower level than the water level in the chiller tank.

Hydraulic gradient and pressures in the distribution network of the RAS system

The location of the nodes, as shown in Figure 2 and Table 2, was defined by UTM coordinates in the plan view, and the vertical position had a reference level with zero elevation, corresponding to the floor level. From these references, the simulation allowed the calculation of the hydraulic gradient and pressure, which ranged between 2.37 and 8.89 m for the gradient values and 0.37 to 8.76 m for the hydraulic pressure.

Table 2. Data resulting from the simulation: hydraulic gradient and pressures in the distribution network of the RAS system

Flex Table: Junction Table						
Label	East (X) (m)	North (Y) (m)	Elevation (m)	Hydraulic Gradient (m)	Pressure (m H ₂ O)	Head Pressure (m)
CHILLER	261,293.96	8,667,345.87	2.35	8.79	6.43	6.44
J-1	261,290.55	8,667,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-2	261,290.67	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-3	261,293.10	8,667,346.78	1.41	8.77	7.35	7.36
J-4	261,293.22	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-5	261,288.00	8,667,346.78	1.41	8.77	7.34	7.36
J-6	261,288.11	8,667,346.90	1.53	8.77	7.23	7.24
J-8	261,289.95	8,667,344.51	1.90	8.87	6.96	6.97
J-9	261,293.58	8,667,346.81	2.35	8.80	6.44	6.45
J-10	261,293.76	8,667,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-11	261,288.11	8,667,347.10	0.07	8.77	8.68	8.70
J-12	261,290.67	8,667,347.10	0.01	8.77	8.75	8.76
J-13	261,293.22	8,667,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-14	261,293.76	8,667,345.87	2.50	8.79	6.28	6.29
J-16	261,291.40	8,667,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-17	261,291.40	8,667,344.51	1.90	8.88	6.96	6.98
J-19	261,290.09	8,667,344.31	0.95	8.89	7.92	7.94
J-20	261,294.03	8,667,346.81	2.35	8.80	6.43	6.45
J-21	261,294.03	8,667,347.10	0.07	8.78	8.69	8.71
J-22	261,287.26	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-24	261,289.82	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-26	261,292.37	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-28	261,294.46	8,667,347.87	1.99	2.37	0.38	0.38
J-29	261,293.58	8,667,344.51	1.90	8.84	6.93	6.94
RETURN	261,289.94	8,667,344.16	0.83	8.89	8.04	8.06
TK-01	261,292.37	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-02	261,289.82	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TK-03	261,287.26	8,667,347.58	1.40	2.37	0.96	0.97
TRICK-F	261,289.84	8,667,344.40	1.78	8.87	7.08	7.09
RAS MARINO ACTUAL.wtg 30/08/2023		Bentley Systems, Inc. Haestad Methods Solution Center		27 Siemon Company Drive Suite 200 W Watertown, CT 06795 USA +1- 203-755-1666		

The highest values of hydraulic pressure in the RAS system correspond to the line of pipes coming from the centrifugal pump (P2). While the lowest values correspond to the “gravity-fed system” branch, that is, the one coming from the cooling tank, as well as the branches controlled by valves, such as those returning to tank S2. These pressures, according to the specifications of the class 10 PVC pipe used in the installation of the RAS, do not exceed its resistance, so there would be no cases of explosion due to excessive hydraulic pressures.

Associated with the hydraulic gradient and hydraulic pressures, the head losses and the speed of the water flow were determined by simulation, resulting, with class 10 PVC pipes, in the values contained in Table 3. The water flows are those expected for ensure the correct functioning of RAS components. However, it is worth paying attention to the speed of the water flow, which varies from 0.06 m/s to 0.98 m/s. All these values seem insufficient to avoid the accumulation of solids in the pipes.

Table 3. Data resulting from the simulation: head losses and flow velocity in the distribution network of the RAS system**Flex Table: Pipe Table**

Label	Initial Node	Final Node	Length (3D) (m)	Diameter (mm)	Flow rate (L/s)	Hazen-Williams C	Head Loss Gradient (m/km)	Loss Pressure (m H ₂ O)	Head Loss (m)	Velocity (m/s)
T-1	J-2	J-1	0.21	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-2	J-4	J-3	0.21	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-3	J-6	J-5	0.21	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-4	J-8	TRICK-F	0.21	43.40	0.56	150.0	4.10	0.00	0.00	0.38
T-6	J-9	J-10	0.18	57.00	2.49	150.0	17.21	0.00	0.00	0.98
T-7	J-10	J-20	0.27	57.00	1.44	150.0	6.24	0.00	0.00	0.56
T-8	J-10	J-14	0.95	43.40	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30
T-9	J-11	J-6	1.47	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-10	J-12	J-2	1.53	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-11	J-12	J-11	2.55	57.00	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12
T-12	J-13	J-4	1.47	43.40	0.30	150.0	1.29	0.00	0.00	0.20
T-13	J-13	J-12	2.55	57.00	0.60	150.0	1.23	0.00	0.00	0.24
T-14	J-14	CHILLER	0.25	43.40	0.45	150.0	2.73	0.00	0.00	0.30
T-15	J-16	J-17	0.97	67.80	3.05	150.0	10.76	0.01	0.01	0.84
T-16	J-16	J-19	1.31	43.40	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26
T-5	J-17	J-8	1.45	43.40	0.56	150.0	4.10	0.01	0.01	0.38
T-18	J-17	J-29	2.18	57.00	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98
T-19	J-19	RETURN	0.24	43.40	0.38	150.0	2.00	0.00	0.00	0.26
T-20	J-20	J-21	2.30	57.00	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56
T-21	J-21	J-13	0.81	57.00	1.44	150.0	6.24	0.01	0.01	0.56
T-22	J-22	TK-03	0.66	43.40	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-23	J-24	TK-02	0.66	43.40	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-24	J-24	J-22	2.55	57.00	0.15	150.0	0.09	0.00	0.00	0.06
T-25	J-26	TK-01	0.66	43.40	0.15	150.0	0.36	0.00	0.00	0.10
T-26	J-26	J-24	2.55	57.00	0.30	150.0	0.34	0.00	0.00	0.12
T-27	J-28	J-26	2.09	57.00	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18
T-28	J-29	J-9	2.34	57.00	2.49	150.0	17.21	0.04	0.04	0.98
T-29	T-6	PUMP	0.22	67.80	3.43	150.0	13.38	0.00	0.00	0.95
T-17	PUMP	J-16	0.96	67.80	3.43	150.0	13.38	0.01	0.01	0.95
CHILLER	CHILLER	J-28	2.03	57.00	0.45	150.0	0.72	0.00	0.00	0.18

RAS MARINO ACTUAL.wtg
30/08/2023

Bentley WaterCAD CONNECT Edition
[10.00.00.50]
Page 1 of 1

Pressure diagram of WDN – marine RAS

Figures 4 and 5 present the location in plan and elevation view of each node with the hydraulic parameters considered in the simulation, resulting in an interesting tool to make adjustments to the pipeline layout. The plan view, combined with the elevation view, better shows the location of pipes and control valves, not only to regulate flow rates, but also pressures. The maximum pressure in the J-16 node at 0.95 m from the pump (P2) can be observed at 7.92 mH₂O, and the minimum 0.38 mH₂O in the line coming from the cooling tank, which belongs to the gravity-fed system.

The transport of water volumes in RAS systems must be carried out with a high degree of reliability, constantly and guaranteeing regular water quality and, therefore, a stable environment. Therefore, it was necessary to use computer tools to predict flows, pressures, pipe diameters, among other hydraulic parameters. WaterCAD data

was imported for drawing in AutoCAD to work on the flowchart and overall design views of the RAS system, to present them with values for the different hydraulic parameters.

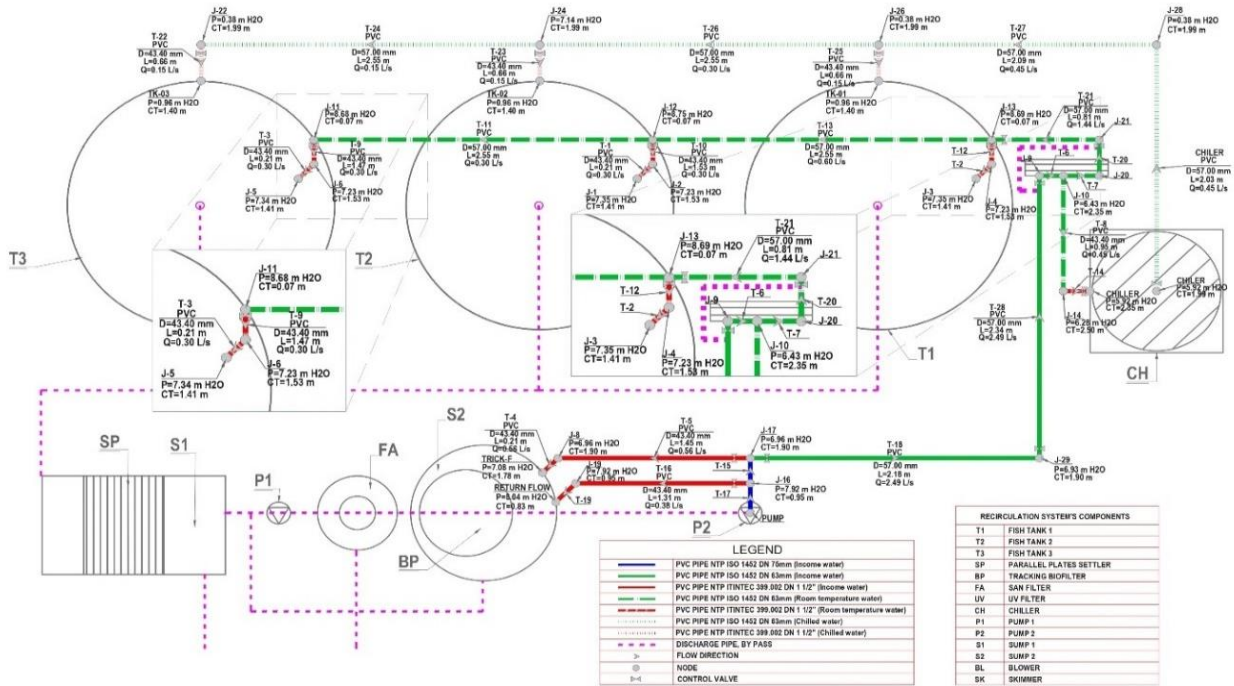


Figure 4: Plan view of the water distribution network and hydraulic simulation parameters, in WaterCAD file, for presentation purposes.

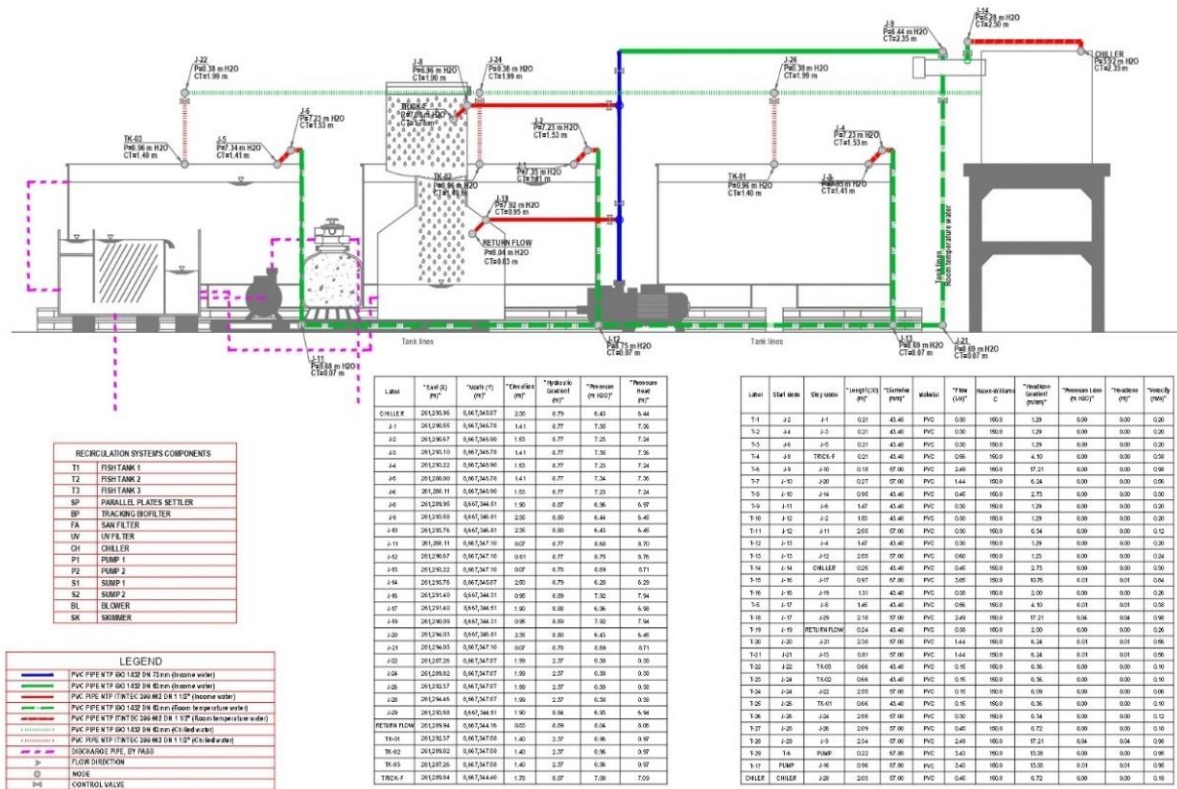


Figure 5: Elevation view of the water distribution network and hydraulic simulation parameters, in WaterCAD file, for presentation purposes.

The return flows in the RAS system have played a great role by having served to regulate the discharges and pressures in the pipes towards the key elements of the RAS system, such as the two centrifugal electric pumps (P1 and P2), the sand filter (SF), biofilter (TRICK-F), ultraviolet light lamp (UV); that operate in continuous flow and

in a closed circuit. As can be seen, the returns branches worked under relative high pressure: 8.04 mH₂O for return to sump 2 tank, see Fig. 5.

3.3. Water quality, an indicator of steady-state condition

It is observed, Figure 6 and 7, that the water quality occurred in the system have reflected having a habitat in stable conditions during the experimental period. The water quality indicators, in general, have shown a linear trend without a slope but rather a horizontal one, with the temperature having varied between 24.70 °C and 26.90 °C with an average of 26.04±2.46 °C (summer season). These values exceeded the temperatures reported by Dionicio-Acedo et al. (2018) and Castro-Fuentes et al. (2022). However, the extreme values in the present work have not been outside the permissible range for the species; León-Palomino et al. (2017), reported a maximum upper thermal limit of 32.6°C for juveniles of the species.

The salinity of the water was maintained at stable levels, 35.20 ±0.16 ppt, with fresh water having been added to compensate for losses due to evaporation. The pH presented an average of 7.79±0.05, being above 7.0 as also reported by Dionicio-Acedo et al. (2018) and Castro-Fuentes et al. (2022). The oxygen level in the fish tanks was maintained in sufficient quantities for the species, registering a minimum of 5.71 mgO₂/L, a maximum of 6.48 mgO₂/L, with an average of 6.12±0.05 mgO₂/L, equivalent to 90.77±1.02% saturation.

The average concentration of total ammonium-N was 0.24±0.08 mgN/L, similar values obtained by other authors (Dionicio-Acedo et al., 2018; Castro-Fuentes et al., 2022). While the N-nitrite values in the present study were above those reported by the aforementioned authors: an average of 1.39±0.328 mgN/L. Both parameters varied within the recommended ranges for the species, demonstrating that the nitrification process that occurred in the system was stabilized and maintained adequate levels for the species. N-nitrate levels were found within acceptable ranges, although higher than those reported by Castro-Fuentes et al. (2022). The RAS system in this study operated with a water replacement level of less than 5%, a fairly low percentage compared to that reported for other RAS systems, the average being in general and by definition 10% or less, as indicated by Ebeling and Timmons (2012). Alkalinity varied between 300 and 550 mg CaCO₃/L with an average of 387.50 ± 20.68 mg CaCO₃/L, a typical level of saline waters.

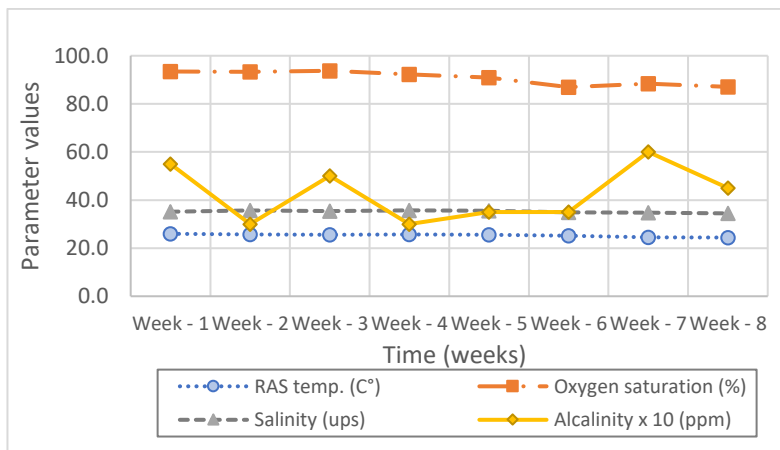


Figure 6: Values of water quality parameters, during the experiment time: temperature, salinity, dissolved oxygen saturation and alkalinity.

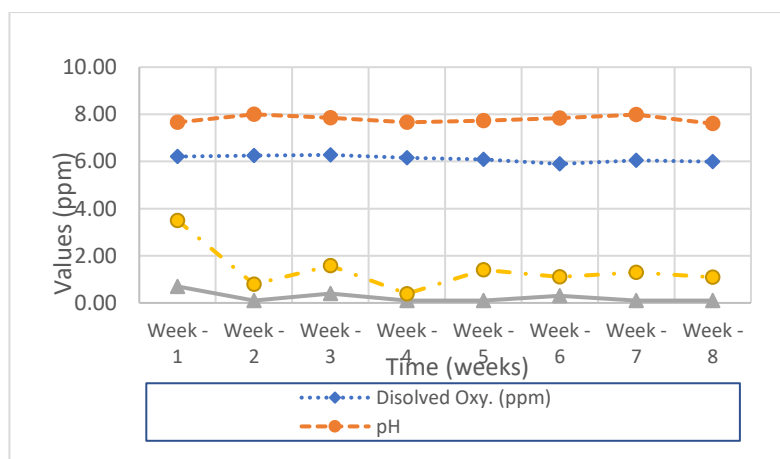


Figure 7: Values of the water quality parameters, during the experimentation time: pH, oxygen, ammoniacal nitrogen and nitrite.

In general, the water analysis results demonstrate the proper functioning of the RAS system, implicitly with adequate sizing of its components, and the appropriate configuration of the pipe network for water distribution. Water quality values remained within the recommended ranges, with low variability and a horizontal orientation, maintaining this trend over time. However, there are no elements to qualify this RAS system as the most efficient from the point of view of energy consumption, since empirical criteria were applied in its installation.

4. Discussion

Hydraulic analysis: parameters observed in operation versus simulated

Once the simulation was carried out, significant differences were observed between the results of the analysis using the WaterCAD software and the hydraulic operating parameters of the RAS, highlighting the following: RAS systems are installed following common sense criteria, oversizing the diameter of the pipes, to ensure sufficient driving capacity throughout the WDN. However, since they are estimates, they do not always result in an adequate diameter of the pipes. In the present hydraulic analysis, first in water recirculation for aquaculture, the pressure losses and hydraulic load were taken into account because these parameters are directly related to the energy consumption for the operation of the RAS systems.

For installations of medium or small RAS systems, it has not been observed that hydraulic calculations are carried out for the water distribution pipe network. The application of WaterCAD in the simulation of pressure losses in pipe networks, although it is a frequent practice for drinking water installations, in installations of water recirculation systems for aquaculture, would be a new practice, which will undoubtedly contribute to an improvement in the installation and operation of these systems.

It has also been observed that the hydraulic pressure in the pipes, during the operation of the RAS system, exceeded the values estimated by simulation with the WaterCAD software. A 1.0 HP electric pump was installed, which far exceeded the required power according to hydraulic calculations. At this point, practical criteria that are not supported by hydraulic calculations lack reliability and lead to excessive energy expenditure and, consequently, unjustifiably high operating costs.

Excessive pressures generate risks for pipes, accessories and some equipment that works with the same internal pressure of the network, such as the case of the UV ultraviolet light lamp (see Fig. 4 and 5). On the other hand, the technical specifications of the equipment do not necessarily contain the maximum recommended working pressure, which generates a potential danger that the water supply in the network may be interrupted due to lack of water flow or loss of efficiency in some specific processes. So much so that in the present study the explosion of a UV lamp was experimented.

The returns fulfill the purpose of facilitating the regulation of flows and pressures in pipes of the majority of elements of the RAS system, which function as a continuous output in a closed circuit, with regulation valves. In this way, closed flow circuits are configured within the general recirculation of the RAS system, such as the returns of pump 1 (P1) and pump 2 (P2), which return part of the pumped flow to the sump tanks, S1 and S2, respectively. WaterCAD software offers the advantage of exercising full control to configure a WDN in aquaculture water recycling systems, developing, evaluating and comparing an unlimited number of hypothetical scenarios for the same case. Facilitating decision making, analyzing design alternatives for multiple variants in production planning. And providing support for the selection, sizing and operation of pumps and elements such as connectors for disassembly or control of water flows.

With the flow rates calculated for the operation of the different components, pump power (P2) and pipe diameters assigned during the installation of the marine RAS, it was found by application of the Water CAD tools, that the water pressure in the network distribution was sufficient for the water to reach all its components. It has been taken into account that the maximum pressure is that which does not cause excessive discharges and does not cause damage to the components of the RAS and in addition to maintaining a pressure as stable as possible, as stated by Tian et al. (2023). An important aspect for pressurized pipe networks is their hydraulic capacity, which allows them to meet the design flow and another important aspect is flow control Mawengkang et al. (2023), which allows flow adjustments to be made. Therefore, in recirculation systems, as in any WDN, a broader analysis is necessary to ensure the correct functioning of the facilities. According Izinyon and Anyata (2011), solving the distribution of water flow and head loss for particular elements of the system, given the total flow or total head loss, is the central hydraulic problem of WDN.

Hydraulic gradient and pressures

The pressure in the distribution of water for domestic consumption, depends on the height of the buildings (Izinyon and Anyata, 2011). In RAS systems, the pressures will depend on the location heights of their components. Al-Mousawey and Abed (2023) reported 12.23 mH₂O as the lowest pressure value, and considered acceptable values of 15.29 to 21.41 mH₂O in a domestic water supply system, much higher than the values found in this work.

This shows that the pipes of water networks in aquaculture correspond to low pressure systems, which privilege the flow of water volumes. In this way, in pump selection, the water flow pump is chosen instead of the pressure pump.

Regarding head losses, Table 2 shows that in general these have insignificant values, due to the length of the pipes and the material used to manufacture them, so they could not be considered in the sizing of the pump, the loss loading as additional work. It is also observed in the same table that the water velocities resulting from the WaterCAD simulation range from 0.06 to 0.98 m/s, resulting lower than those reported by Al-Mousawey and Abed (2023), 0.15 to 3.85 m/s for 160 mm PVC- HDPE pipes. Conventionally, 0.4 m/s is considered as the lower limit for a self-cleaning drinking water distribution system; Izinyon and Anyata (2011) adopted 1.5 m/s as a maximum value and 0.2 m/s as a minimum. Low velocities would represent a problem for RAS systems, as long as the flow rates are met, however the low velocity values are associated with a possible accumulation of solids. This is an important factor to consider, since the recirculating water contains living cells (microalgae) and small organisms (copepods, worms, etc.) that are a natural fauna accompanying the recirculating aquaculture waters. It is worth paying attention not to neglect the pressure losses, even if they are very small, since this is a system operated by a pump 24 hours a day, the energy cost must be the minimum necessary, due to its contribution to operating costs of water recirculation systems in aquaculture.

Pressure diagram of the marine RAS

Recirculation aquaculture systems ultimately end up being complex hydraulic systems in which the experience and ingenuity of the operator will allow obtaining the much-appreciated dynamic balance between each of the components of the RAS system, operating at their maximum capacity, according to design calculations. Simultaneously, the operation of the RAS system water network must be configured in optimal flow and pressure scenarios that avoid physical water losses, and report the reduction of energy consumption in pumping, allowing the network to operate with lower pressures, avoiding over pressurization (Marques et al., 2023). Ranjan et al. (2022) points out that in most intensive recirculation systems, the total lifting height is about 2 to 3 meters, which favors the use of low-pressure pumps to be more efficient.

In addition to optimizing pipe layout, WaterCAD simulation allows you to better visualize the placement of accessories for easier and more timely attention to any occurrence of hydraulic failures that may occur during the operation of the RAS system, the inadequate attention of which would endanger an important population of fish, of high economic value. Likewise, simulation with WaterCAD allows generating n-conditions or scenarios to finally choose the one with the lowest energy cost during its operation, since energy cost is an important aspect in the design of WDN as pointed out by Kurian et al. (2018), considering that finally the general economic balance of aquaculture based on RAS facilities lies in the energy costs.

The pressure diagram resulting from this research gives a clear idea of how both piping systems work: the “gravity-fed network” and the “pressurized network”, fed with gravity energy and pumping energy respectively. It seems that the gravity fed system is more reliable and favors the care of the pump because it works at a constant hydraulic head.

Since water became the main and critical factor in aquaculture production, knowledge in hydraulics and the latest advances in simulation developed for drinking water network systems were very useful to adapt it to the design and operation of recirculation systems in aquaculture. Therefore, the design of a water distribution system has at least two main challenges: (i) the correct discharge rate and (ii) the required water pressure. The distribution of hydraulic pressure in the networks and discharge points, as well as the water flow proportional to the demands, are part of the task of the dynamic hydraulic model that is finally developed to achieve adequate water distribution. And minimize the volumes of water loss but also guarantee the efficiency in the work of the RAS components and the infrastructure as a whole (Abu-Mahfouz et al., 2019). Based on previous work on RAS installation and observations made in the present study, distribution systems often have many technical problems that can be predicted with simulation tools, which represents an important contribution to good design practices. of RAS systems.

5. Conclusions

Based on the results of the hydraulic analysis of RAS system network and the observations made in the present study, the following can be concluded:

- The water supply of the RAS system was found within the optimal operating scheme since the water quality remained stable and within recommended ranges for the life and growth of the fish confined in the marine RAS system.
- The water flow pressures found by simulation of the pipe network do not exceed the maximum value established for the class 10 PVC pipe used. However, when equipment is incorporated that operates under the same network pressure, it does not necessarily support the pressures recorded during the operation of the RAS.

- Two branches' pipes have been installed in the WDN corresponding to the water supply lines to the fish tanks, the one that worked with energy transmitted directly by the pump (P2), and the "gravity-fed" line that worked with gravity energy. This second case would be more stable, however susceptible to obstruction problems due to the low speeds reported by the simulation.
- In light of the results of the application of simulation using WaterCAD in the design of the RAS system, this practice would allow deciding on a better distribution of the pipes, the best circuit design, the more appropriate location of the control valves, and better schemes of return pipes. Favoring a major control of the operation of water distribution networks in RAS systems and lower energy costs in pumping.

The recommendations that have emerged as a result of this work, it is noted:

- To obtain comparable numerical field data, it is recommended to place pressure gauges in the pipe sections between the nodes to know the working pressures. The installation of flowmeters is also recommended to detect variations in flow rates in the operation of the RAS system.
- It is recommended also to correlate the field data with the results of the hydraulic analysis using WaterCAD simulation, during the development of the designs in order to avoid overpressures and achieve lower energy costs, considering that the pumping equipment in the RAS systems works tirelessly.

Acknowledgments

The authors thank to National Innovation Program in Fisheries and Aquaculture (PNIPA-ACU-SIADE-PP-000070). Ministry of Production. Government of Peru.

Conflict of Interests

The authors of this research declare not have any conflicts of interest with all the organizations that could influence the content to this manuscript.

References

1. Abdulameer, Layth Saed, Nazira Dzhumagulova, Hayder Algretawee Larisa Zhuravleva and Musa Habib Alshammari. 2022. "Comparison between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala City, Iraq". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 1, no. 1: 1159.
2. Abu-Mahfouz Adnan M., Yskandar Hamam Philip R. Page, Kazeem B. Adedeji, Amos O. Anele and Ezio Todini. 2019. "Real-Time Dynamic Hydraulic Model of Water Distribution Networks." *Water (Switzerland)* 11, no. 3: 470. <https://doi.org/10.3390/w11030470>
3. Action Contre la Faim. 2008. "Principles and Sizing of a Gravity Fed Systems." Module 2: In *Design, Sizing, Construction and Maintenance of Gravity-Fed System in Rural Areas*. Montreuil. ACF Editores. 53 pages. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/acf_gravity_fed_system_2_sizing_en.pdf.
4. Al-Mousawey, Hassan Jaffar and Abed Basim Sh. 2023. "Simulation and Assessment of Water Supply Network for specified districts at Najaf Governorate", *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 32, no. 1 :20220233.
5. Ashrafizadeh, Seyed Ali, Zhongchao Tan. 2018. *Mass and Energy Balances* (Springer).
6. Babadjanova, Mashkhura. 2017. "Nitrification process in recirculating aquaculture system", PhD thesis (University of Zagreb. Faculty of Agriculture. Department of Fisheries).
7. Bentley Systems. 2023. "OpenFlows™ WaterGEMS® Water Distribution Modeling and Management. Product Data Sheet." <https://www.bentley.com/wp-content/uploads/PDS-WaterGEMS-LTR-EN-HR.pdf>.
8. Blanco Salazar, César Augusto. 2004. "Diseño de un Sedimentador de Placa Paralela con Flujo Horizontal bajo el Concepto de la tasa de desbordamiento superficial". Bogotá. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/56df40f3-0037-4066-9ae0-66a4378501c0/content>.
9. Bregnballe, Jacob. 2022. *A Guide to Recirculation Aquaculture. an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2390en>
10. Castro-Fuentes, Angélica, Noemi Cota, Melissa Montes and Lili Carrera. 2022. "Evaluación de la densidad de cultivo sobre el crecimiento y supervivencia de larvas de chita *Anisotremus scapularis* (Tschudi, 1846) en laboratorio". *Marine and Fishery Sciences (MAFIS)* 35 (1):7-18. <https://doi.org/10.47193/mafis.3512022010102>.
11. Dasic, Tina and Djordjevic Branislav. 2004. "Method for Water Distribution Systems Reliability Evaluation." In, edited by BYU Scholars Archive. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 138. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2004/all/138>.

12. Dawe, Paula and South Pacific Applied Geoscience Commission. 2000. *Workshop on Hydraulic Network Modelling with WaterCAD, 16-20 October 2000*. [Suva, Fiji]: [SOPAC].
13. Deiana, Cristina, María Dolly Granados, and Fabiana Sardella. 2018. "Balance de Masa." Introducción a la Ingeniería, Departamento de Ing. Química, Universidad de San Juan. San Juan. <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>
14. Dionicio-Acedo, Jhon, Maryandrea Rosado-Salazar, Fernando Galecio-Regalado, and Arturo Aguirre-Velarde. 2018. "Crecimiento y Tasas Fisiológicas de Chita *Anisotremus scapularis* (Tschudi, 1846): Bases Técnicas Para Cultivo. 33 (1): 79–89. http://www4.imarpe.gob.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I0170050101000000000000.
15. Ebeling, James M. and Michael Ben Timmons. 2012. "Recirculating aquaculture systems". *Aquaculture production systems*, 245–277.
16. Eryürük, Kağan. 2021. "Hydraulic Models for Calculating Head Loss in Water Distribution System: A Case Study in Konya." *European Journal of Science and Technology*, November. (28):275–279. <https://doi.org/10.31590/ejosat.996991>.
17. Garg, Santosh Kumar, 2017. *Water supply engineering: Environmental engineering*, 28th Edition Vol I. (Khanna publishers).
18. Geankoplis, Christie. J. 1998. *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. 3ra Edición. CECSA Editorial.
19. Godoy-Olmos, Sergio., Silvia Martínez-Llorens, Ana Tomás-Vidal and Miguel Jover-Cerdá, 2016. "Influence of filter medium type, temperature and ammonia production on nitrifying trickling filters performance". *Journal of environmental chemical engineering* 4, no. 1: 328–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.023>
20. Izinyon, Osadolor C. and B.U. Anyata. 2011. "Water Distribution Network Modelling of Small Community Using WaterCad Simulator". *Global Journal of Engineering Research* Vol. 10 N^o 1 & 2:35-47
21. Kadhim, Noor Riyadh, Khalid Adel Abdulrazzaq and Athraa Hashim Mohammed. 2021. "Hydraulic analysis and modelling of Water Distribution Network using WaterCAD And GIS: Al-Karada Area". *In E3S Web of Conferences* 318: 04004. *EDP Sciences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131804004>
22. Kals, Jeroen. 2004. "Recirculating Aquaculture Production Systems: An Overview Of Different Components, Management, Economics and Technology". Literature study executed within the MRG recirculation technology Program. Netherlands Institute for Fisheries Research. Internal Report. 04.019. Set.
23. Kamstra, Andries, Jan Van der Heul and Mark Nijhof. 1998. "Performance and optimization of trickling filters on eel farms". *Aquacultural Engineering*, 17, no. 3:175–192.
24. Kurian, Varghese, Saravanan Chinnusamy, Ashok Natarajan, Sridharakumar Narasimhan and Shankar Narasimhan. 2018. "Optimal operation of Water Distribution Networks with intermediate storage facilities". *Computers & Chemical Engineering*, 119:215–227 doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.017
25. Kusnayat, Agus, Syadzwinia Sendra Sari, Doan Perdana, and Sri Martini. 2019. "Hydraulic analysis software comparison of water distribution system at Telkom University area III", *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology* 20, no. 2.
26. Larock, Bruce, Roland Jeppson, and Gary Watters. 2000. *Hydraulics of pipeline systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
27. Lekang, Odd Ivar. 2007. *Aquaculture Engineering*. Department of Mathematical Sciences and Technology, Norwegian University of Life Sciences. Blackwell Publishing, Garsington Road, Oxford.
28. León-Palomino, Candy, Jorge Flores-Mego, Jhon Dionicio-Acedo, Maryandrea Rosado-Salazar, Marie Jonathan Flye-Sainte and Arturo Aguirre-Velarde. 2017. "Preferencia y tolerancia térmica de juveniles de Chita (*Anisotremus scapularis*) (pisces: Haemulidae)". *Revista de biología marina y oceanografía*, (52) 3:581–589.
29. Londoño García, Rodrigo. 2015. *Balances de masa y energía*. Universidad Tecnológica de Pereira. Disponible en: <https://blog.utp.edu.co/balances/files/2015/02/LIBRO-BME2015-1.pdf>
30. Losordo, Thomas and Dennis DeLong. 2015. Estimating biofilter size for ras systems. *Global Aquaculture Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/estimating-biofilter-size-for-ras-systems/>
31. Losordo, T. and A. Hobbs. 2000. Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacultural engineering*, 23(1-3):95–102.
32. Marques, Sara María, Fernando das Graças Braga da Silva, Alex Takeo Yasumura Lima Silva, Matheus David Guimarães Barbedo, Mateus Cortez Marcondes, Solange Cristina Raimundo Alves and José Antonio Tosta dos Reis. 2023. "Evaluation of hydraulic behavior of water distribution network varying reservoirs levels, roughness, and diameters with the use of r and epanet". *Revista Ambiente & Água* 18: e2893.
33. Mawengkang, Herman, Muhammad Romi Syahputra, Sutorman Sutorman, and Gerhard Wilhelm Weber. 2023. "Water distribution network optimization model with reliability considerations in water flow (debit)". *Water* 15, no. 17: 3119.
34. Olivares, Marcelo. 2012. Balances de Masa, CI4102. [Diapositivas de power point]. <https://www.u->

- cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI4102/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D423373
35. Patel, Kinjal and Darshan J. Mehta. 2022. "Design of the continuous Water Supply System using Watergems Software: A Case Study of Surat City." *Larhyss Journal* 50: 125–36. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/index>.
 36. Pillay, T.V.N. and M.N. Kutty. 2005. *Aquaculture Principles and Practices*. 2nd Edition. Blackwell Publishing Ltd.
 37. Ranjan, Ritesh and Sampath Kumar G., Seeram Nooka Raju, Chinnibabu Bathina, Ravi K Avadhanula. 2022. "Recirculating Aquaculture System engineering: Design, components and construction". In: Training Manual on nursery rearing of Indian pompano in Recirculating Aquaculture System. *CMFRI Training Manual Series* (28). ICAR- Central Marine Fisheries Research Institute, Visakhapatnam: 19-36.
 38. Remmerswaal, R. 1993. *Recirculating aquaculture systems*. INFOFISH Technical Handbook 8. Kuala Lumpur.
 39. Rincón, Alejandro and Oscar Fernando Herrera. 2012. "Esquema para el Dimensionamiento de Unidades de Sedimentación de alta tasa de flujo ascendente". *Entre Ciencia e Ingeniería* 8 no. 16 (2014):29–40.
 40. Rojas Gonzalez, Andres Felipe. 2012. Fundamentos de Procesos Químicos. Guía de estudio para alumnos de Ingeniería. (Departamento de Ingeniería Química), Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55975/9789587610321.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
 41. Sarker, Shibli. 2021. "Water distribution (pipe) network analysis with watercad". *International Journal of Engineering Development and Research* 9:149–153.
 42. Septiawati, Eka and Edy Sutriyono, Ika Juliantina and Ari Siswanto. 2019. "Evaluation of Design Planning Water Distribution System with WaterCAD V. 7.0 Simulation Program for Townsite Basecamp Settlement Relocation in Tanjung Enim, South Sumatra". In *Journal of Physics: Conference Series* 1198: 082022. IOP Publishing.
 43. Shrivastava, Vivek, A K Verma, Prakash Chandra, and Dam Roy Sibnarayan. 2015. "Optimization of Trickling BioFilter at Different Water Flow Rates and Filter Media Thicknesses." *Pollution Research* 34 (3): 135–43. <https://www.researchgate.net/publication/318274852>.
 44. Takeuchi, Toshio. 2017. "Application of recirculating aquaculture systems in Japan". Fisheries Science Series. Springer. Tokio, <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56585-7>
 45. Tanveer Mohammad. 2017. "Estimation of Flow Rate and Sizing of Trickling Filter in a Recirculating Aquaculture System". *International Journal of Agricultural Engineering* 10(2) 577-580. doi: 10.15740/HAS/IJAE/10.2/577-580
 46. Tian, Yuan, Jingliang Gao, Jianxun Chen, Junshen Xie, Qidong Que, Rodger Millar Munthali and Tiantian Zhang. 2023. "Optimization of Pressure Management In Water Distribution Systems Based On Pressure-Reducing Valve Control: Evaluation and case study", *Sustainability* 15, no. 14:11086.
 47. Ebeling, James M. and Michael Ben Timmons. 2007. *Recirculating aquaculture*. Northeastern Regional Aquaculture Center (NRAC) Cayuga Aqua Ventures Nueva York – USA.
 48. Timmons, Michael. Ebeling James M. Ben, and Raul Humberto Piedrahita. 2009. "Acuicultura en Sistemas de Recirculación", (Edición en español) Cayuga Aqua Ventures.
 49. USDA *Pipe Flow*. Chapter 4. In *Hydraulics National Engineering Handbook*, edited by DRAFT, 1st ed. Vol. Part 634 (2021). <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=46364.wba>.
 50. Uzukwu, P.U., Tambari Leton, David Ogbonna, and F. Obinna. 2010. "The design of trickling biological periwinkle shells filter for closed recirculation catfish systems", *International Journal of Natural and Applied Sciences* 6, no. 3. <https://www.researchgate.net/publication/275211429>.
 51. Vesga-Rodríguez, Claudia Patricia, Leonardo David Donado-Garzón and Monroe Weber-Shirk. 2019. "Evaluation of High Rate Sedimentation Lab-Scale Tank Performance in Drinking Water Treatment". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 90:9–15.
 52. Walker, Jearl, David Halliday and Robert Resnick. 2014. *Fundamentals of physics*. 10th Edition. John Wiley & Sons. New Jersey.
 53. Wheaton Fred. 2008. "Recirculating System Aquaculture—What You Need To Know". In A presentation given at the 7th International Conference of Recirculating Aquaculture. Roanoke, Virginia USA.
 54. Yao, K. M. 1970. "Theoretical Study of High-Rate Sedimentation." *Journal (Water Pollution Control Federation)*:218–228. <http://www.jstor.org/stable/25036470>.