

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Título del trabajo

**Diseño de un sistema de aireación difusa para la laguna de oxidación Punta Carnero 1.**

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Gonzabay Guale Oliver José

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

## DEDICATORIA

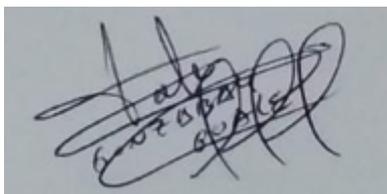
Dedicado a mis padres (José Gonzabay Mora y Aracely Guale Rosales) y a todas aquellas personas que se esfuerzan diariamente por hacer de la sociedad y el mundo un lugar mejor, desde el obrero hasta el político, desde el estudiante hasta el investigador científico.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a la Empresa Pública Municipal Mancomunada AGUAPEN-EP período 2022-2023 que sin su apoyo no habría sido posible el desarrollo de este trabajo.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Oliver José Gonzabay Guale* doy mi consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink on a light gray background. The signature is stylized and appears to read 'Oliver José Gonzabay Guale'.

Oliver José Gonzabay Guale

# EVALUADORES

**MSc. Nadia Flores Manrique**

PROFESOR DE LA MATERIA

**MSc. Christian Macias Aguiar**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La zona de Punta Carnero es considerada por la comunidad como uno de los lugares más contaminados de la provincia de Santa Elena, en este lugar se encuentran las lagunas de oxidación que actualmente funcionan bajo condiciones anaerobias, esto provoca la liberación de olores fétidos y una remoción de contaminantes desacelerada que es influenciada por las condiciones atmosféricas.

Con el objetivo de revertir este hecho y mediante un análisis investigativo se propone la incorporación de un sistema de aireación difusa para favorecer el crecimiento de organismos aerobios, acelerar la degradación biológica, incluso, dimensionar los componentes necesarios (compresor, tuberías y difusores) y conocer el costo energético para el desarrollo tentativo del proyecto.

En este caso, si se considera las condiciones de campo de la laguna de oxidación Punta Carnero 1, se obtuvieron valores de 98Kw para la potencia del compresor, 445 difusores de platos de cerámica, 21 líneas de tuberías de 11 metros de largo con diámetro interno 2.8 pulgadas que se conectan directamente a los difusores, además, 31 metros de tuberías de alimentación con diámetro 10.4 pulgadas, incluso, se contrasta los valores generados con otros tipos de difusores.

Nótese que, varios componentes presentes para el dimensionamiento de los equipos y dispositivos están fuertemente influenciados por la temperatura (constante global de difusión, constante global de saturación, constante de corrección de temperatura y otros), por tal, es necesario considerar esta propiedad al momento de iniciar una estimación de los valores (potencia del compresor, número de difusores y tuberías) y conocer después mediante simulaciones el comportamiento del sistema usando AVEVA PRO II y Python.

**Palabras clave:** lagunas de oxidación, constante global de difusión, constante global de saturación y AVEVA PRO II.

## **ABSTRACT**

*The Punta Carnero area is considered by the community as one of the most contaminated places in the province of Santa Elena, in this place are the oxidation lagoons that currently operate under anaerobic conditions, which causes the release of fetid odors and removal of pollutants decelerated that is influenced by atmospheric conditions.*

*With the objective of reversing this fact and through an investigative analysis, the incorporation of a diffuse aeration system is proposed to favor the growth of aerobic organisms, accelerate biological degradation, even dimensioning the necessary components (compressor, pipes and diffusers) and knowing the energy cost for the tentative development of the project.*

*In this case, if the field's conditions of the Punta Carnero 1 oxidation lagoon are considered, values of 98Kw were obtained for the compressor power, 445 ceramic plate diffusers, 21 pipelines 11 meters long with internal diameter 2of .8 inches that are directly connected to the diffusers, in addition, 31 meters of supply pipes with a diameter of 10.4 inches, even, the values generated with other types of diffusers are contrasted.*

*Note that several components present for the sizing of equipment and devices are strongly influenced by temperature (global diffusion constant, global saturation constant, temperature correction constant, and others), therefore, it is necessary to consider this property at the moment. to start an estimation of the values (compressor power, number of diffusers and pipes) and then find out through simulations the behavior of the system using AVEVA PRO II and Python.*

*Keywords: oxidation ponds, global diffusion constant, global saturation constant, and AVEVA PRO II.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Aguas Residuales.....	3
1.4.1.1 Composición Física y Química de las aguas residuales.....	3
1.4.1.2 Composición Microbiológica de Aguas Residuales .....	7
1.4.2 Lagunas de estabilización. ....	8
1.4.2.1 Lagunas Aireadas. ....	9
1.4.2.2 Cinética .....	10
1.4.2.3 Teoría de la doble capa.....	11
1.4.3 Diseño de Sistema de Aireación.....	12
1.4.3.3 Requerimiento de Oxígeno para oxidación Biológica.....	15
1.4.3.4 Potencia del compresor.....	15

1.4.3.5 Difusores de burbuja Fina .....	15
1.4.3.6 Diseño de conductos de aire.....	16
1.4.3.7 Potencia del compresor según compresión adiabática .....	19
1.4.3.8 Simulación del Comportamiento del sistema bajo modelo Bemister...	20
CAPÍTULO 2.....	21
2.    Metodología .....	21
2.1 Reconocimiento de Campo.....	21
2.2 Materiales y Equipos.....	22
2.2.1 Equipos.....	22
2.2.2 Reactivos.....	24
2.3 Recolección de muestras y procesamiento de datos.....	25
2.3.1 Recolección de muestras y determinación de DBO.....	25
2.3.2 Recolección de muestras y ensayo para estimación de constante global de oxigenación .....	27
2.3.3 Registro de Caudal mensual. ....	29
2.3.4 Procesamiento de datos para DBO .....	29
2.3.5 Procesamiento de datos para $K_{la}$ .....	32
2.4 Calculo para el diseño de tuberías .....	33
2.5 Calculo para requerimiento de potencia .....	40
2.6 Análisis Económico.....	41
2.7 Simulación en AVEVA PRO II.....	42
2.8 Simulación en Python. ....	43
CAPÍTULO 3.....	45
3.    Resultados Y ANÁLISIS.....	45
3.1 Resultados de la DBO .....	45
3.2 Resultados de dimensionamiento respecto a los difusores y tuberías .....	48
3.3 Análisis respecto al coeficiente $K_{la}$ .....	49

3.4 Análisis Económico.....	54
3.5 Resultados del simulador AVEVA PRO II.....	56
3.6 Resultados de simulación en Python.....	57
CAPÍTULO 4.....	59
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	59
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	61
5. BIBLIOGRAFIA.....	62

## **ABREVIATURAS**

DBO Demanda Biológica de Oxígeno

COV Compuestos Orgánicos Volátiles

DBON Demando Biológica de Oxigeno nitrogenasa

TRH Tiempo de retención hidráulico

EPA Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos

DBO5 Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días

DBOU Demanda Biológica de Oxígeno a los 20 dias.

m.c.a Metros de columna de agua

SOTE Eficiencia estándar de transferencia de oxígeno

SCFM Pies cúbicos estándar por minuto

## SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
mg/L	Miligramo sobre litro
mm	milímetros

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1.1. Representación de la teoría de la doble capa para transferencia de Gases.....	11
Figura. 1.2. Esquema representativo de utilización y generación de biomasa en condiciones de aireación.....	13
Figura. 2.1. Laguna Anaerobia de Punta Carnero–Salinas.....	22
Figura. 2.2. Incubadora de botellas Winkler para demanda de DBO.....	23
Figura. 2.3. Medidor de oxígeno disuelto marca HACH.....	23
Figura. 2.4. Aireador marca JAD para peceras.....	24
Figura. 2.5. Ampollas de Nutrientes marca HACH.....	24
Figura. 2.6. Inhibidor de Nitrificación.....	25
Figura. 3.1. Gráfico de las DBO ejercida para los distintos días.....	46
Figura. 3.2. Tendencia logarítmica del cambio de la DBO respecto al tiempo.....	47
Figura. 3.3. Comportamiento de la concentración de Oxígeno en agua residual provocado por inyección de aire.....	50
Figura. 3.4. Análisis de sensibilidad de la potencia requerida.....	52
Figura. 3.5. Incremento de la potencia ocasionada por la concentración de oxígeno disuelto en la laguna.....	55
Figura. 3.6. Incremento en el gasto operativo mensual provocado por el incremento de oxígeno disuelto en la laguna.....	55
Figura. 3.7. Caso de estudio de la caída de presión versus el diámetro de las tuberías.....	56
Figura. 3.8. Caso de estudio de la caída de presión versus la longitud de las tuberías principales manteniendo un diámetro interno 264mm.....	57
Figura 3.9. Simulación generada a partir de la constante cinética encontrada en el laboratorio y la relación entre la DBOU y DBO5.....	57
Figura 3.10. Simulación generada a partir de la constante cinética en condiciones aireadas y la relación entre la DBOU y DBO5 encontrada en el laboratorio.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Característica de agua residual domestica típica.....	4
Tabla 1.2. Rango de valores recomendables para remoción biológica de nitrógeno.....	10
Tabla 1.3. Eficiencia de transferencia de Oxígeno de los difusores en agua limpia.....	16
Tabla 1.4. Velocidad típica del aire en las conducciones principales.....	17
Tabla 2.1. Caudal medido mensualmente por el período de un año en la empresa Aguapen-EP.....	29
Tabla 2.2. Longitud Equivalente de los dispositivos empleados en la tubería de mayor diámetro.....	40
Tabla 2.3. Costo de los equipos y materiales principales de los cuales se compone el sistema de aireación difusa.....	42
Tabla 2.4. Costo de electricidad consumido por el equipo según una base de cálculo mensual.....	42
Tabla 3.1. Tabla de los resultados generados por el procesamiento de mínimos cuadrados y el modelo logarítmico.....	48
Tabla 3.2. Resumen de los materiales y dispositivos empleados para el proceso de tratamiento de aguas residuales con aire difuso.....	48
Tabla 3.3. Resumen de los materiales y dispositivos empleados para proceso de tratamiento de aguas residuales con aire difuso en tuberías principales.....	49
Tabla 3.4. Resultado de los coeficientes de transferencia de oxígeno de los experimentos en mención.....	52

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

Santa Elena es la provincia más joven de la república del Ecuador y cuenta con muy poca infraestructura que permita el abastecimiento de agua a los sectores más alejados. En el 2021, se invirtió 2 mil millones de dólares en el programa emblemático Misión Agua para todos, en donde Santa Elena se vio beneficiada especialmente las parroquias de Colonche y Manglaralto para que sean abastecidas de agua potable (Gobierno de la República del Ecuador, s.f). No obstante, con el incremento en el abastecimiento de agua consecuentemente se incrementa la producción de aguas residuales, mismas que deben ser depuradas con el objetivo de remover contaminantes y reducir los riesgos negativos para la población y el ambiente.

Algunos cantones de Santa Elena actualmente cuentan con tratamiento de aguas residuales por lagunaje, las lagunas que se encuentran en funcionamiento están ubicadas en las zonas de Punta Carnero, Santa Elena, Ancón, Anconcito, Atahualpa, Ballenita, Colonche y San Pablo. A su vez, estas no han sido modificadas desde su construcción y aceptan caudales por encima de la capacidad de diseño, lo que imposibilita la remoción de los contaminantes y llegar a los límites permitidos por la norma de calidad ambiental vigente en el territorio Ecuatoriano. Un ejemplo de lo mencionado es la laguna de Punta Carnero 1 que se encuentra cerca de los sectores urbanizados y en ciertas épocas (feriados) del año no realiza el tratamiento óptimo.

Al ser un proceso de tratamiento de aguas residuales con un medio anaerobio, el gas H<sub>2</sub>S liberado desde la laguna provoca olores desagradables,

esto incomodando a la población que vive en los alrededores pues sienten que es un riesgo para la salud y el ambiente. No obstante, al ser Santa Elena una provincia con ecosistemas acuáticos y dependiente económicamente del turismo, el mal funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas podría desencadenar enfermedades y ausentar a los turistas nacionales y extranjeros.

## **1.2 Justificación del problema**

Pasar del proceso anaerobio al proceso aerobio mediante la incorporación de un sistema de aireación difuso en la laguna de oxidación Punta Carnero 1, aumentará la cinética de remoción para DBO y otros compuestos orgánicos como inorgánicos y consecuentemente se cumplirá con la norma de Calidad Ambiental para descargas de efluentes vigente en el territorio Ecuatoriano. El Sistema de aireación difusa fue desarrollado poco antes de 1950 y actualmente es empleado en Estados Unidos, países Europeos, Israel y Chile donde las normativas Ambientales establecen parámetros similares de regulación para tratamiento de aguas residuales.

A la fecha varias comunidades en la provincia de Santa Elena no poseen agua potable y se abastecen de aguas subterráneas o de pozo. Las aguas residuales mal depuradas tienen alto contenido de DBO, DQO, compuestos orgánicos volátiles,  $H_2S$ , Fe, Mn,  $CH_4$ ,  $Cl_2$ ,  $NH_3$  y microorganismos patógenos. Si el agua contaminada entra en contacto con las aguas subterráneas, los compuestos químicos serían transportados a los pozos de abastecimiento de agua y desencadenar una serie de enfermedades como diarrea, tifoidea, hepatitis, tracoma, shigelosis, esquistosomiasis o intoxicaciones.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar un sistema de aireación difusa para la remoción acelerada de contaminantes orgánicos e inorgánicos que ingresan a la laguna de oxidación Punta Carnero 1.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Registrar datos experimentales en campo acerca de la difusión de oxígeno en aguas residuales de la laguna Punta Carnero 1 para la estimación del coeficiente global de transferencia de gas oxígeno en agua residual.
- Determinar mediante ensayos de laboratorio la DBOU, DBO5 y constante cinética como parámetros para el cálculo del oxígeno requerido que permita la degradación biológica de la materia orgánica.
- Estimar la potencia máxima del equipo inyector de aire requerida para el sistema de aireación mediante constantes globales de difusión, saturación (alfa y beta) y requerimiento máximo de oxígeno por hora.
- Determinar el número necesario de difusores para la transferencia de aire requerido en laguna Punta Carnero 1.
- Determinar el costo operativo eléctrico asociado al proceso de tratamiento aerobio de aguas residuales en la laguna Punta Carnero 1.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Aguas Residuales**

#### **1.4.1.1 Composición Física y Química de las aguas residuales**

Las aguas residuales son los desechos líquidos que se descargan desde residencias domésticas, propiedades comerciales, actividades industriales, agrícolas entre otras. Estas contienen un amplio rango de contaminantes, por tal, se menciona a las aguas

municipales como ejemplo. El agua representa el 99.9% p/p del total de aguas residuales, mientras que el resto son sólidos orgánicos suspendidos y disueltos (carbohidratos, grasas, jabones, detergentes sintéticos, restos orgánicos de procesos industriales). También se pueden encontrar restos inorgánicos como metales y organismos patógenos como virus y bacterias (Karmoker et al., 2018).

La tabla 1.1 muestran los parámetros medidos característicos presentes en aguas residuales en magnitud promedio para aguas domésticas.

**Tabla 1.1**  
*Característica de agua residual domestica típica.*

<b>Parámetro</b>	<b>Magnitud</b>	<b>unidad</b>
DBO	200	mg/L
DQO	400	mg/L
Solidos suspendidos totales	200	mg/L
Solidos suspendidos volátiles	150	mg/L
Nitrógeno amoniacal	30	mg/L - N
Ortofosfatos.	10	mg/L - P

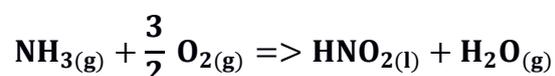
*Nota.* Cifras usuales de la cantidad de contaminantes presentes en agua residual domestica típica, Romero Rojas (2004, p 21).

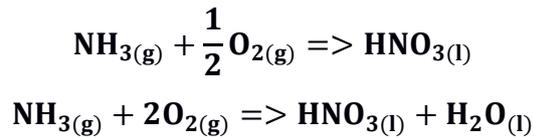
Al referirse a las aguas residuales se debe mencionar la materia orgánica, esta se conforma de proteínas que se encuentran en desechos de alimentos con alto contenido de agua o en restos de tejidos que provienen de animales. La presencia dentro de las aguas residuales es compleja y se debe a que siguen métodos diferentes de degradación biológica, la composición principal se basa Nitrógeno junto con moléculas de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, en algunos casos son también responsables de la incorporación de compuestos fosfóricos, azufrados y de hierro en las aguas residuales (Metcalf and Eddy, 1995).

Oración larga

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), son otro tipo de contaminante en las aguas residuales, su característica principal es el punto ebullición menor a 100 grados centígrados. Estos son necesarios para estimar el riesgo de afección a la salud de la comunidad debido a que varios de sus compuestos son carcinógenos. La reactividad presente por su liberación a la atmosfera presenta un riesgo ambiental, ejemplo de esto es el cloruro de vinilo (Metcalf and Eddy, 1995).

Otra consideración importante para caracterizar aguas residuales es la demanda biológica de oxígeno (DBO), esta medida incorpora la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos (bacterias saprofitas y autótrofas) para degradar o estabilizar la materia orgánica biodegradable. Normalmente se usa para el dimensionamiento de instalaciones de aguas residuales y controlar el cumplimiento de las descargas en cuerpos de agua (Romero, 2004). A pesar de ser el parámetro más usado, se encuentra limitado a errores pues la materia orgánica se compone de proteínas y su hidrolisis da como resultado materia no carbonácea, ejemplo de esto es la reducción de amoniaco a nitritos y después a nitratos, esto se conoce como DBON. En general, se necesita un tiempo de 6 a 10 días para que los microorganismos puedan ejercer una demanda medible para DBO (Metcalf & Eddy 1995). La integración de inhibidoras químicos es necesaria para el desarrollo de ensayos de laboratorio, los comúnmente usados son 2-cloro-6 (triclorometil) piridina, Azul de metileno, Tiourea y Aliltiourea (Standard Methods, 2017).





Las aguas residuales tienen un importante contenido de fósforo que ayuda al desarrollo de organismos biológicos en especial las algas, generalmente la cantidad de fósforo varía entre 4 a 15 mg/L, habitualmente el fósforo se encuentra en soluciones líquidas de  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Las aportaciones excesivas de fósforo como de nitrógeno a los medios acuáticos provoca el crecimiento acelerado de algunas especies de algas, estas se acumulan en la superficie y forman una capa superior impidiendo el paso de la luz, consecuencia de esto, las algas del fondo no puedan realizar actividades fotosintéticas, provocando el agotamiento del oxígeno (SINC, 2017).

El  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  son gases procedentes de la descomposición de materia orgánica y pueden provocar corrosión en las tuberías de transporte de aguas servidas, especialmente de  $\text{H}_2\text{S}$  que puede pasar a formar ácido sulfúrico, sin embargo, la cantidad necesaria para que esto ocurra debe ser igual o mayor 200mg/L y no es habitualmente alcanzada. Existen otros gases disueltos como  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2$  que son incorporados por la actividad humana o la integración de desinfectantes al agua residual. Por último, el  $\text{O}_2$  disuelto es necesario para el crecimiento de los organismos aerobios y otras formas de vidas en medios acuáticos, además la cantidad de este en cuerpos de aguas es influenciada por temperatura salinidad, solubilidad del gas y la presión parcial (Metcalf and Eddy, 1995).

#### **1.4.1.2 Composición Microbiológica de Aguas Residuales**

Protozoos, bacterias, algas y hongos tienen protagonismo activo en el proceso de degradación biológica, es necesario entender la naturaleza de estos (crecimiento, alimentación y medio) con el fin de utilizar un proceso biológico correcto en el tratamiento de efluentes contaminados (Rumana, 2012). Por ejemplo, el oxígeno libre resulta tóxico para organismos estrictamente anaerobios, en tanto que los microorganismos aerobios usan al oxígeno como un aceptor terminal de electrones para su respiración (Mara y Horan, 2003).

Los protozoarios son organismos unicelulares cuya reproducción se realiza por fisión binaria (división en dos células), muchos son aeróbicos químicos. Su presencia es deseable en las aguas residuales debido a que actúan como purificadores naturales y consumidores de bacterias (Mackenzie, 2010).

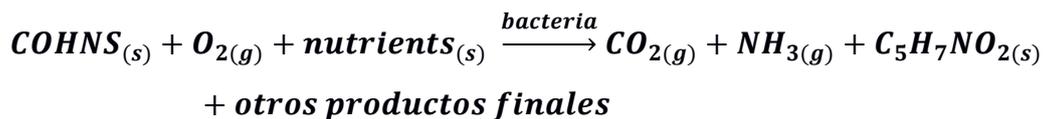
Las bacterias son también microorganismos unicelulares con una amplia población en aguas residuales, las condiciones en la planta de tratamiento se adaptan para un acelerado crecimiento y permitir la remoción de sustancias tóxicas por medio de su metabolismo. Ninguna especie en particular es mejor removiendo contaminantes, pero casi la mayoría es susceptible al cloro (Mackenzie, 2010).

Los hongos son multicelulares, no fotosintéticos, heterótrofos que son obligados a reproducirse en un medio aerobio por fisión y otros medios. Sus células requieren la mitad del nitrógeno en comparación a las bacterias lo que posibilita su estancia en aguas residuales con

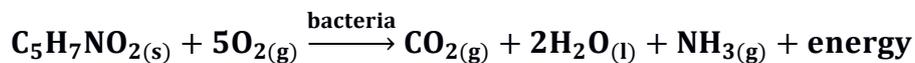
deficiencia de nitrógeno, estos predominan sobre las bacterias (Mackenzie,2010).

Las algas son organismos fotoautótrofos gracias a la clorofila y pueden ser unicelulares o multicelulares, durante el día realizan la actividad fotosintética produciendo oxígeno y durante la noche usan una cantidad de oxígeno para su respiración. Son usadas para la estabilización de lagunas cuando se suministra un exceso para la respiración (Mackenzie,2010).

Principales reacciones y síntesis.



Respiración endógena.



#### 1.4.2 Lagunas de estabilización.

Las lagunas de estabilización descritas en la literatura se clasifican en: facultativas, anaerobias y de maduración, básicamente son zanjas de gran extensión donde se retiene las aguas residuales para que se desarrollen los procesos naturales para estabilizar la materia orgánica, no obstante, son fuertemente influenciadas por los fenómenos naturales. Existe discrepancia en la bibliografía consultada con respecto a las dimensiones de las lagunas facultativas, ciertos autores recomiendan 1,5 a 2,5 metros de profundidad con un TRH próximo a los 10 días mientras que otros sugieren de 1 a 2 metros de profundidad con TRH de 15 a 35 días, cabe mencionar que el TRH disminuye

en regiones donde la temperatura es más elevada (Matsumoto y Sánchez, 2010).

#### **1.4.2.1 Lagunas Aireadas.**

Las lagunas aireadas son tecnologías usadas ampliamente en los Estados Unidos, la aireación es suministrada mediante dispositivos mecánicos o sistemas de difusión. La tecnología es clasificada según el tipo de mezcla que puedan generar siendo completa o parcial, este último no provee la energía suficiente para mantener los sólidos totales en suspensión. Un sistema de mezcla completa se asemeja al tratamiento de lodos activados, pero no incorpora una recirculación del material celular, esto tiene como consecuencia un tiempo de retención hidráulico más largo (EPA, 2002). A su vez tienen ventaja considerable sobre el proceso tradicional de lodos activados, la principal es su bajo costo, simplicidad y operación flexible, inclusive el terreno ocupado no supera el 10% del área de la laguna de estabilización (Cárdenas et al., 2015).

En Santiago Poniente (Chile) se evaluó durante 18 meses el comportamiento de un sistema de lagunas aireadas para una población aproximadamente de 130000 habitantes, con resultados favorables de remoción entre el 50 y 60 % para la DBO total y 87-91% para la DBO soluble (Cárdenas et al., 2015).

Un factor importante para considerar al momento de incorporar tratamiento aireado es la posibilidad de nitrificación con ello se debe considerar un cierto rango en los parámetros para implementar aireación. Por tal, la tabla 2 puede resumir estas consideraciones:

**Tabla 1.2***Rango de valores recomendables para remoción biológica de nitrógeno*

Parámetro	Rango recomendable	Autor
pH	7-9 para nitrificación. 6.5-7.5 para desnitrificación	Timmons & Ebellling; Crites Tchobanoglous, 85, 86
Alcalinidad	> 200mg/L de CaCO <sub>3</sub>	Cárdenas y Cols 87
Temperatura	Entre 25-30 grados Celsius	Lema 88
Concentración de OD	Para nitrificación > 2 mg/L para desnitrificación, valores bajos.	Timmons Ebeling 89
Relación C/N	Para Nitrificación < 3, para desnitrificación valores entre 2 – 3 y entre 3-6	Chen, Ling & Blancheton; Ye y cols.; Van Rijin, Tals & Schreier 90-92

*Nota.* Cuadro resumen de los valores a considerar para desarrollo de algas en el proceso de nitrificación, Cárdenas Gloria y Sánchez Iván (2013, p.81).

#### 1.4.2.2 Cinética

El efecto de remoción de la DBO puede realizarse en condiciones aerobias como anaerobias, pero es mucho más rápida cuando se efectúa en condiciones con suficiente de oxígeno. Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico (TRH) en la parte de zona aeróbica influirá en el rendimiento y será la parte donde se encontrará la mayor remoción respecto al tratamiento. Nótese también que, dependiendo de la profundidad el O<sub>2</sub> estará más o menos disuelto, por ende, el sistema de aire difuso tiene ventaja en los procesos de aireación (Ratsey, 2019).

Una ecuación bien usada para la descripción del comportamiento del reactor biológico es la siguiente:

$$S = \frac{S_0}{1+K\theta} \quad (1)$$

S: concentración de la DBO<sub>5</sub> del afluente, mg/L.

$S_o$ : concentración de la DBO<sub>5</sub> del efluente, mg/L.

$K$ : constante cinética de eliminación global de la DBO<sub>5</sub>, días<sup>-1</sup>.

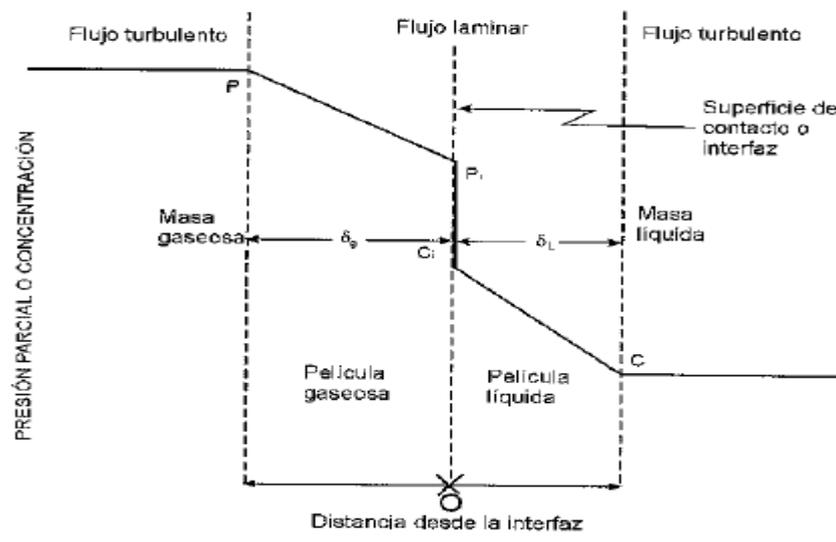
$\Theta$ : Tiempo de retención hidráulico en días, velocidad sobre el caudal.

### 1.4.2.3 Teoría de la doble capa

La Fig. 1 representa el esquema de la teoría enunciada por Lewis y Whitman para la descripción de transferencia de gases (1924).

**Fig. 1.1**

*Representación de la teoría de la doble capa para transferencia de Gases*



*Nota.* Adaptado del libro Romero Rojas, Tratamiento de Aguas residuales, 2004, p.376

El modelo de la doble capa consiste en suponer una película correspondiente al gas y al líquido mediante la cual, existe transferencia del gas sobre el líquido por medio de la difusión molecular, es decir, cuando ocurre el movimiento browniano. La cantidad de masa que se transfiere al líquido puede expresarse a través de:

$$\frac{N}{V} = \frac{dC}{dt} = \frac{KA}{V} (C_s - C) \quad (2)$$

Sin embargo, es realmente complicado conocer  $A$ , que representa al área por la cual se transfiere el gas en el líquido, en cuyo caso es más útil simplificar la expresión al término:

$$Kla = KA/V \quad (3)$$

Donde:

$N$ :  $dm/dt$  es la transferencia del gas por efecto de la difusión, g/s.

$Kla$ : Coeficiente global de transferencia del gas,  $h^{-1}$

$A$ : área de transferencia por donde se difunde el gas,  $m^2$

$K$ : coeficiente de difusión del gas o velocidad de transferencia, m/s

$C_s$ : concentración de la saturación del gas, mg/L

$C$ : concentración de gas en la fase líquida para el tiempo  $t$ , mg/L

$V$ : Volumen de la fase líquida, L

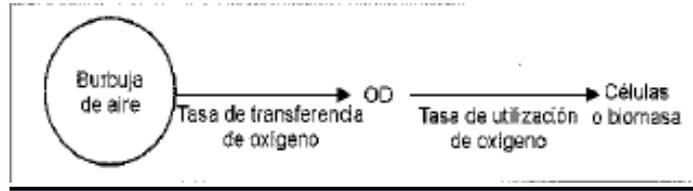
$dC/dt$ : tasa de cambio en la concentración del gas, mg/L s

### 1.4.3 Diseño de Sistema de Aireación

Los equipos de aireación se clasifican comúnmente por la capacidad de inyección de oxígeno, ( $Kg$  de  $O_2$ /  $KW-h$ ), pero estas condiciones son tomadas generalmente a  $20\text{ }^\circ C$  suponiendo cero oxígenos disueltos. Para condiciones reales es necesario corregir el valor  $K_{ia}$  in situ mediante ensayos de laboratorio o pruebas en planta piloto, el sulfito de sodio emplea para desoxigenar la muestra y proceder con el suministro de oxígeno, una explicación gráfica de lo que ocurre en el interior de una laguna cuando se empieza a airear es mostrado en la figura 1.2 y la forma final se presenta con la ecuación 8 (Romero, 2004).

**Fig. 1.2**

*Esquema representativo de utilización y generación de biomasa en condiciones de aireación*



*Nota.* Figura representativa de transferencia de Oxígeno, Adaptado de Romero Rojas, Tratamiento de Aguas Residuales, 2004, p. 402.

$$N = N_o \left( \frac{\beta C_{walt} - C_L}{C_{s20}} \right) \theta^{T-20} \alpha \quad (4)$$

**N:** transferencia en condiciones reales, kg O<sub>2</sub>/kW-h.

**N<sub>o</sub>:** transferencia hacia el agua a 20°C que es la concentración de nula de oxígeno disuelto.

**β:** factor de correlación de saturación entre agua residual y agua potable.

**C<sub>walt</sub>:** concentración de saturación de oxígeno en el agua de la red de suministro a temperatura y altitud determinadas, mg/L.

**C<sub>s20</sub>:** Concentración de saturación de oxígeno de la red de agua de suministro a 20°C, mg/L.

**C<sub>L</sub>:** concentración de oxígeno de agua.

**T:** temperatura en °C.

**α:** factor de corrección de la transferencia de oxígeno en el agua residual.

**θ:** factor de corrección de la temperatura del agua residual, aceptado comúnmente como 1.024 (Romero, 2004).

A su vez:

$$\alpha = K_{1a} \text{agua residual} / K_{1a} \text{agua limpia} \quad (5)$$

$$\beta = C_s \text{ Agua residual} / C_s \text{ agua limpia} \quad (6)$$

Sin embargo, existen otras consideraciones importantes al momento de estimar la inyección del oxígeno al tanque o volumen en cuestión, para ello se presentarán una serie de ecuaciones derivadas de la ecuación 8 en cuanto a

su forma, no obstante, surgirán más variables que permitan precisar el uso de esta tomando otros autores.

#### 1.4.3.1 Consideración del factor theta.

Esta ecuación presenta la modificación del factor theta para la estimación de la capacidad de inyección en kg de oxígeno por potencia ejercida, mantenido los mismos parámetros o valores para las otras variables (Sanitarie, sf).

$$N = N_o \left( \frac{\beta C_{walt} - C_L}{C_{s20}} \right) \theta^{T-20} \alpha \quad (7)$$

$\theta$ : factor de corrección de temperatura de agua residual (28 grados centígrados), en este caso ajustada a condiciones de campo de 1.209 (Sanitaire, sf).

#### 1.4.3.2 Consideración de la profundidad y tipo de burbuja

Esta ecuación presenta la modificación de la concentración de saturación en el agua potable mediante la incorporación de un factor de corrección de profundidad y tipo de burbuja empleada en la aireación sea fina o gruesa (Doaa M et al., 2012).

$$N = N_o \left( \frac{\beta C_{walt*} - C_L}{C_{s20}} \right) \theta^{T-20} \alpha \quad (8)$$

$$C_{walt*} = C_{field} (1 + kZ) \quad (9)$$

$C_{field}$ : Concentración de saturación de oxígeno en campo mg/L.

$k$ : Factor de corrección para el tipo de burbuja, 0.008 burbuja gruesa y 0.016 burbuja fina.

$Z$ : Profundidad a la cual se ubican los difusores en metros.

#### **1.4.3.3 Requerimiento de Oxígeno para oxidación Biológica.**

El requerimiento de oxígeno puede calcularse dependiendo de los materiales disponibles, comúnmente se emplean las relaciones estequiométricas, datos obteniendo por ensayos de laboratorio o aplicando ecuaciones semi empíricas. En el caso de las lagunas aireadas facultativas, teóricamente el oxígeno requerido por microorganismos para oxidación biológica debe igualar a la DBO removida, no obstante, debe se considera un factor de desviación típico siguiendo la relación siguiente:

$$\text{Oxigeno requerido} = (\text{Factor})(\text{DBO Removida})$$

La ecuación que describe el requerimiento de oxígeno se describe de la siguiente forma:

$$\text{OR} = F S_o Q \times 10^{-3} ; \text{kg O}_2 / \text{h} \quad (10)$$

Donde (F) es una relación entre la DBOU y la DBO estándar,  $Q$  es el caudal expresado en  $\text{m}^3/\text{h}$  y  $S_o$  es DBO de diseño del afluente que ingresa a la laguna en  $\text{mg/L}$  (Romero, 2004).

#### **1.4.3.4 Potencia del compresor**

Para el cálculo de la potencia (kW) del ventilador puede usarse una relación entre el requerimiento de oxígeno junto con la transferencia en condiciones reales de campo, a esto se debe añadir y suponer una eficiencia teórica de 80% por lo cual se puede representar con la ecuación 14 (Doaa M et al., 2012).

$$P = 1.25 O_R / N ; \text{kW} \quad (11)$$

#### **1.4.3.5 Difusores de burbuja Fina**

Los Difusores de burbuja fina se componen de pequeños poros que permiten crear una burbuja de hasta 5 mm de diámetro, pero hasta

la fecha actual no está bien definido el límite entre burbuja fina y gruesa, no obstante, por literatura se conoce que existe una transferencia de entre 2.5 a 3.5 kg O<sub>2</sub>/h cuando se consideran los difusores de cerámica. Un aspecto negativo de los difusores de burbuja fina es el requerimiento de mantenimiento frecuente para impedir que los poros sufran algún tipo de daño por material particulado o polvo. Por tal, es indispensable instalar filtros de aire antes del ventilador o compresor para mantener en las tuberías una atmosfera limpia (Aparici, 2019).

La eficiencia en la transferencia de oxígeno (SOTE) depende de varios factores que influyen en el rendimiento de los difusores entre los cuales destaca la geometría, la profundidad del tanque, la dimensión del tanque y la densidad de difusor por área. En la tabla 1.3 se puede mostrar algunos tipos de difusores y sus características.

**Tabla 1.3**  
*Eficiencia de transferencia de Oxígeno de los difusores en agua limpia.*

<i>Tipo de Difusor</i>	<i>Flujo de aire (scfm/difusor)</i>	<i>SOTE a 15 pies aproximadamente, porcentaje.</i>	<i>Número de difusores por 100 pie<sup>2</sup></i>
Platos de cerámica-cuadro	2.0-5.0	26-33	32
Discos de cerámica- cuadro	0.4 – 3.4	25-40	26
Domos de cerámica-cuadro	0.5-3.5	27-39	15

*Nota.* Cuadro representativo del rango del flujo de aire para diferentes difusores con su capacidad de transferencia de oxígeno y área recomendada por número de difusores. Fuente: EPA, Fine Pore Aeration System Design Manual, p. 26.

#### **1.4.3.6 Diseño de conductos de aire.**

Las tuberías que transportan aire comprimido desde los sopladores hacia los difusores en general son ligeras y frecuentemente se usa el PVC, entre las tuberías se encuentran válvulas, medidores y piezas especiales que controlan el paso del fluido. Las presiones que

manejan son reducidas e inferiores a los 0.7kg/cm<sup>2</sup> y para facilitar el dimensionamiento de las tuberías se emplea velocidades típicas de diseño como las mostradas en la tabla 1.4 (Metcalf and Eddy, 1995).

**Tabla 1.4**

*Velocidad típica del aire en las conducciones principales.*

<b>Diámetro de la tubería, mm</b>	<b>Velocidad, m/s</b>
25-75	6.10-9.15
100-250	9.15-15.25
300-600	13.70-20.30
750-1500	13.30-33.00

*Nota.* Velocidad y diámetro recomendado en condiciones normales. Fuente: Metcalf and Eddy, p.645.

Antes de realizar un diseño se debe considerar las asunciones que me permitan simplificar parte del problema, para este caso se toman las siguientes premisas:

- 1) La presión del gas a la salida estará entre 4 a 25 psia.
- 2) El aumento de temperatura no excederá los 85 grados Celsius.
- 3) Existe una distribución equitativa del aire dentro de la tubería y existe el mismo flujo para el primer y último difusor.
- 4) No existe transferencia de calor entre el aire y el agua circundante entre las tuberías sumergidas.

Con estas premisas se permite estimar las pérdidas ocasionadas por las tuberías a una máxima temperatura, en este caso, el máximo aumento de temperatura se puede encontrar con la ecuación de la compresión adiabática representada por:

$$\Delta T_{ad} = T1 \left[ \left( \frac{P2}{P1} \right)^{0.283} - 1 \right]; C^o \quad (12)$$

Donde T1 es temperatura absoluta a la entrada en kelvin, P2 es presión absoluta a la salida en atm, P1: presión absoluta a la entrada,

en atmosferas. Se debe considerar que este cambio de temperatura no permanece en el sistema, puesto que existe una transferencia de calor cuando el aire entra en la sección de tubería sumergida en el agua, por tanto, solo habría un cambio estimado entre 5 y 10 grados Celsius (Metcalf and Eddy, 1995).

Otra consideración importante al momento del dimensionamiento tuberías es incorporar las pérdidas por fricción ocasionada por la rugosidad del material, una forma de tomar en cuenta las pérdidas energéticas provocadas por la fricción es la ecuación de Darcy-Weishbarch (Metcalf and Eddy, 1995):

$$h_L = f * \frac{L}{D} * h_i ; m. c. a \quad (13)$$

Siendo  $h_L$  la pérdida de carga por fricción en m.c.a, la  $f$  que es el factor de fricción adimensional que puede ser encontrado bajo la ecuación de Hagen-Poiseuille en condiciones de Reynold laminar o por la ecuación de Pavlov bajo régimen turbulento (Turton et al., 2018),  $L$  es longitud de la tubería en metros,  $D$  es diámetro de la tubería en metros y  $h_i$  la energía de la velocidad del aire.

$$f = \frac{16}{Re} ; Re < 2100 \quad (14)$$

Ecuación de Hagen-Poiseuille

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4 \text{Log}_{10} \left( \frac{e}{3.7D} + \left( \frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right) ; Re > 4000 \quad (15)$$

Ecuación de Pavlov.

$e$ : rugosidad del material en cuestión.

Para calcular el coeficiente de fricción se necesita el número de Reynold por lo que es necesario el uso de la expresión:

$$Re = 25.47 qs/(d * \mu) \quad (16)$$

Donde  $qs$  representa el caudal de aire que circula por la tubería  $m^3/h$ ,  $d$  es diámetro interior en metros y  $\mu$  representa la viscosidad del aire en centipoises. Para un rango de temperatura entre -15 y 90 grados centígrados es posible encontrar la viscosidad dinámica mediante (Metcalf and Eddy, 1995):

$$\mu, \text{centipoises} = (170 + 0.504 * T) \times 10^{-4} \quad (17)$$

Al dimensionar equipos de conducción de gases es normal que varias propiedades se vean afectadas debido al aumento o disminución de temperatura, por lo general la densidad es una de ellas. Para el caso del aire y su densidad puede manejarse mediante la ecuación:

$$\rho_a = \frac{1.293}{1+0.00367T} * \frac{H}{76} ; \text{kg aire}/m^3 \quad (18)$$

En la cual  $H$  representa la presión en cm Hg,  $T$  es la temperatura de grados Celsius y  $\rho_a$  es la densidad del aire en  $kg/m^3$ .

Por último,  $hi$  es la energía de la velocidad del aire que puede ser calculada mediante la ecuación:

$$hi = \left(\frac{V}{140}\right)^2 \times \rho_a ; \text{m. c. a} \quad (19)$$

#### 1.4.3.7 Potencia del compresor según compresión adiabática

Los sopladores se diseñan con capacidad suficiente para el suministro de aire para en el día más caluroso del verano y para usarse durante el frío invernal. Por tal, la ecuación que describe la potencia necesaria para llevar a cabo el proceso de compresión adiabática es (Metcalf and Eddy, 1995) :

$$P_w = \left(\frac{WR T_1}{29.7 n e}\right) \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0.283} - 1 \right]; \text{KW} \quad (20)$$

Donde  $W$  es el flujo masico en kg/s,  $R$  es la constante universal de los gases (8.314 KJ/kmol k),  $n=0.283$  para aire y  $e$  es la eficiencia de los compresores (0.8), las demás variables son las mismas que conforman la ecuación 12.

#### 1.4.3.8 Simulación del Comportamiento del sistema bajo modelo Bemister.

Existen diferentes modelos matemáticos para simular la dinámica de una laguna aireada facultativa, muchos estudios publicados se han enfocado en aspecto hidrodinámicos, otros incluyen composición y transformación de procesos y otros necesitan caracterizaciones avanzadas con software especializados. Para este trabajo el modelo Bemister generado a partir de un balance de masa posee lo necesario para bosquejar la dinámica de DBO en el efluente y predice la formación de los lodos dentro de la laguna (Ábrego et al., 2015).

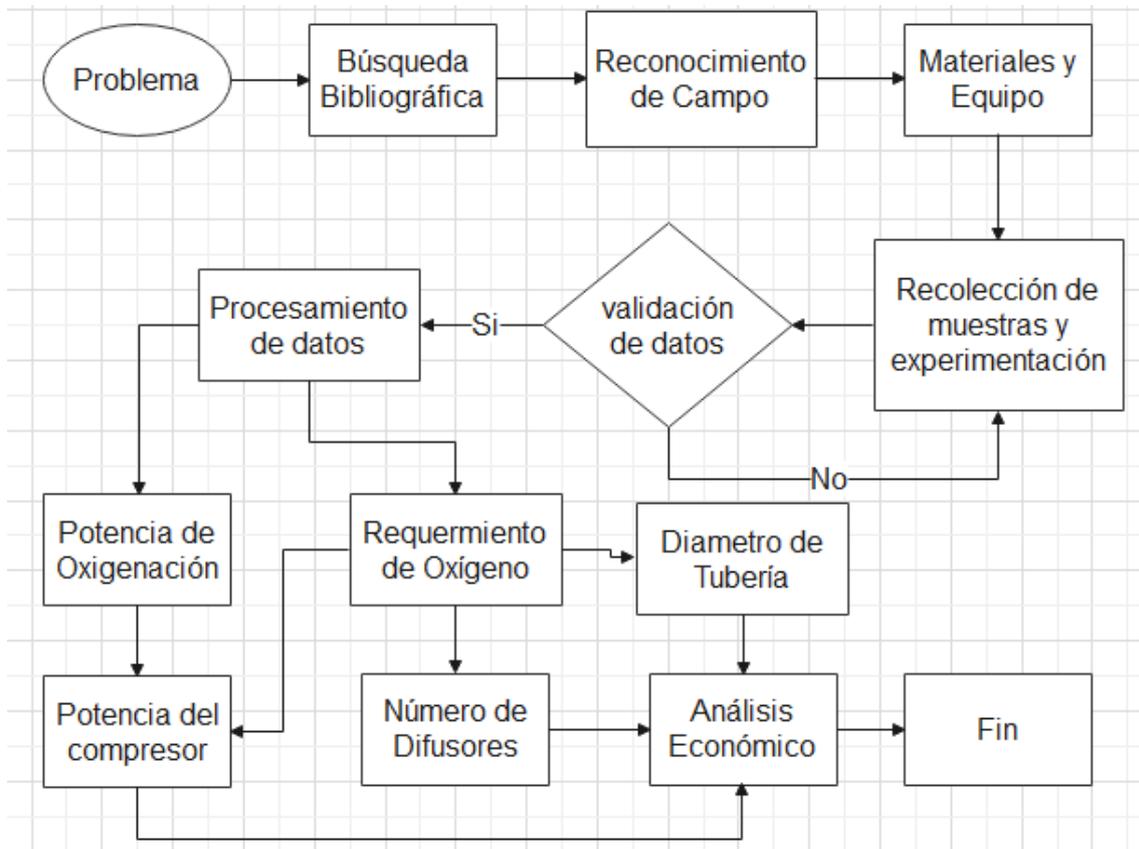
$$\frac{dS}{dt} = i_p \frac{S_i}{R} - k_s S - \frac{S}{R} + \frac{S_p K_L L_t 10^3}{f_{DBOU} (V_o - \frac{fl L_t}{\rho})}$$

$$\frac{dL_t}{dt} = (1 - i_p) f_{DBOU} S_i Q 10^{-3} - K_L L_t$$

Donde  $S_i$  y  $S$  son la DBO del afluente y efluente respectivamente en mg/L,  $V_o$  es el volumen total de la laguna en metros cúbicos,  $k_s$  es la constante de degradación aerobia de la laguna en días<sup>-1</sup>,  $K_L$  es la constante de fermentación de los lodos en unidades de uno sobre días,  $R$  es el tiempo de retención de la laguna en días,  $i_p$  es la fracción del afluente DBOU dispersada dentro del cuerpo de la laguna (adimensional),  $L_t$  es la masa total de los lodos en kg DBOU,  $f_{DBOU}$  es la relación de la DBOU sobre la DBO5 y  $fl$  es el indice de acumulación de lodos adimensional.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA



**Nota:** Esquema del proceso metodológico aplicado.

### 2.1 Reconocimiento de Campo.

El complejo lagunar está conformado por 9 lagunas: tres lagunas anaerobias, tres facultativas y tres de maduración, su función es recibir una gran cantidad de aguas residuales para ser tratadas y posteriormente enviadas al mar. Sin embargo, el sistema no posee un sistema de desbaste para recolectar las partículas de gran tamaño que ingresan a la laguna lo que implica saturación de arenas, botellas y otros cuerpos sólidos al inicio del tratamiento.

La laguna de maduración de Punta Carnero se encuentra en Salinas – Ecuador y su ubicación geográfica tiene una latitud 2°15'31.34" Sur y longitud 80°55'5.28" Oeste. Esta Laguna recibe alrededor de 145L/s de aguas residuales, tiene un volumen

de 33275 metros cúbicos, su afluente es constante intermitente puesto que existen períodos en los cuales no se bombea agua residual. En esta laguna se tomó muestras y se realizaron los análisis de laboratorio. El primero de los análisis realizados fue la DBO para seis días con el objetivo de identificar la DBO5, DBOU y constante cinética, a su vez, se realizó otro experimento en el que se midió la concentración de oxígeno disuelto incorporado por medio de un difusor y compresor tomando muestras de 3.21 y 25.5 litros. Los datos fueron tomados en dos tiempos con tres ensayos para obtener datos representativos de la laguna. Posterior a la recolección de datos se determinó el coeficiente global de transferencia de oxígeno en agua residual de la laguna en mención.

**Fig. 2.1**

*Laguna Anaerobia de Punta Carnero – Salinas.*



*Nota.* Vista superior de la laguna Anaerobia de punta carnero fotografiada desde Google Earth Pro.

## **2.2 Materiales y Equipos**

A continuación, se detallan los equipos, reactivos y materiales empleados para el desarrollo de este trabajo:

### **2.2.1 Equipos.**

- Incubadora de semillas es de marca Freile & Co serie 0700-002, se incubaron las botellas Winkler de 300 mL con sello hidráulico por un tiempo de 6 días a una temperatura graduada de 20 grados centígrados. La puerta del equipo solo

fue abierta brevemente para retirar la botella correspondiente al día donde se realizó la medición de oxígeno disuelto.

**Fig. 2.2**

*Incubadora de botellas winkler para demanda de DBO.*



*Nota.* Fotografía de la incubadora de botellas winkler, fuente: autor.

- Medidor de oxígeno disuelto marca HACH modelo HQ40d serie 171100002530 con electrodo, el cual permitió medir el oxígeno disuelto en los distintos días seleccionados para determinar la DBO incluso, la cantidad de oxígeno disuelto en agua residual hasta su punto de saturación.

**Fig. 2.3**

*Medidor de oxígeno disuelto marca HACH.*



*Nota.* Fotografía de equipo usado para medir la concentración de oxígeno disuelto en aguas residuales, fuente: autor.

- El Aireador de pecera, equipo marca JAD con presión de 0.012MPa y capacidad de flujo 3.2 L/min con 2.5 W de potencia modelo SC-3500, fue usado para airear la muestra de agua residual, medir luego la cantidad de oxígeno

disuelto en las aguas residuales y airear el agua de dilución para la incubación de semillas en las botellas Winkler.

**Fig 2.4**  
**Aireador marca JAD para peceras.**



Nota: fotografía tomada del aireador para ensayos de laboratorio, fuente: autor.

### 2.2.2 Reactivos.

Se usaron reactivos previamente preparados de la empresa HACH (almohadillas tampón de nutrientes DBO) lote A9079 para alimentar a los microorganismos aerobios, los nutrientes fueron incorporados (una ampolla) en cada una de las seis botellas Winkler de 300 ml.

**Fig. 2.5**  
**Ampollas de nutrientes marca HACH.**

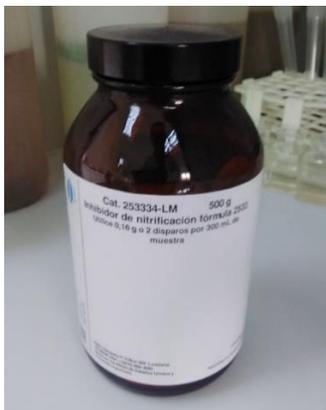


Nota. fotografía de nutrientes usados para la determinación de DBO, fuente: autor.

A su vez se incorpora 300mg de 2-cloro-6 (triclorometil) piridina por cada 300 ml de en las botellas Winkler con el objetivo de mitigar el proceso de nitrificación comúnmente desarrollado en los procesos de suficiencia de oxígeno.

**Fig. 2.6**

*Inhibidor de nitrificación.*



*Nota.* Fotografía de inhibidor de nitrificación código 253334 Marca HACH, fuente: autor.

## **2.3 Recolección de muestras y procesamiento de datos**

### **2.3.1 Recolección de muestras y determinación de DBO**

Para tomar una muestra representativa de las aguas residuales se usó un muestreo simple, en un intervalo de 1.5 horas iniciando a las 9:10 am, se recogió cada 15 minutos entre 150 a 200 ml de agua residual cruda (afluente) que fueron depositados en el contenedor hasta completar el litro de muestra. Al finalizar se trasladó la muestra al laboratorio para incubar las semillas en las botellas Winkler y realizar el ensayo respectivo de DBO para 6 días. El tiempo de traslado de la muestra no excedió las 5 horas desde su recolección para la incubación.

El ensayo de laboratorio para determinar la DBO se realizó en seis botellas Winkler de 300 ml con recubrimiento externo oscuro. En primer lugar, se separó agua destilada suficiente para el volumen de las 6 botellas Winkler, seguido de una aireación intensiva con un compresor de aire para peceras

durante 1 hora, el propósito es que el agua destilada empleada para dilución llegue al punto de saturación de oxígeno.

Inmediatamente después de airear el agua destilada, se llenó las dos terceras partes de la botella Winkler con el agua en mención, seguido, se incorporó los nutrientes de fosfato, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y cloruro férrico mencionados en el Standard Methods (AWWA et al.,2005). En contraste a la literatura, no se prepararon individualmente los químicos para luego añadir 1 ml de cada solución química a la botella Winkler, en su lugar, la empresa "HACH" provee los equipos y químicos necesarios a la empresa de tratamiento de aguas "AGUAPEN-EP" para realizar sus análisis. Entre los químicos se encuentra las ampollas de nutrientes para DBO que poseen los mismos componentes que se mencionan en el procedimiento del Standard Methods. Cada una de las ampollas fue disuelta en el volumen de 300 mL como recomienda su uso.

Con ayuda de una pipeta graduada, se incorporó 6 mL de agua residual a cada una de las botellas Winkler seguido de una agitación breve que permita homogenizar el contenido en el interior. Por último, es necesario un inhibidor de nitrificación y por cada 300mL se agregó 300 mg de 2-cloro-6 (triclorometil) piridina completando después el volumen de la botella con el agua destilada aireada.

Luego, las botellas fueron llenadas y selladas con agua hasta completar su volumen, estas incubaron a 20 grados centígrados por un periodo de seis días y fueron abiertas cuando se necesitó medir el oxígeno disuelto al día correspondiente, en total fueron 6 las botellas que se emplearon para el

ensayo. Usando la ecuación de demanda biológica de oxígeno sin siembra se calculó DBO mediante la ecuación mostrada a continuación (Rumana, 2012).

$$DBO_t = \frac{(D_1 - D_t)}{P}$$

D<sub>1</sub>: Concentración de oxígeno disuelto en la botella Winkler antes de incubar, mg/L.

D<sub>t</sub>: Concentración final de oxígeno disuelto después de los t días, mg/L.

P: volumen de agua residual usada sobre 300 ml de la botella.

### **2.3.2 Recolección de muestras y ensayo para estimación de constante global de oxigenación**

En total se realizaron tres experimentos en diferentes fechas, el primero se llevó a cabo el 17 de Diciembre de 2022 cuyo desarrollo fue el siguiente:

#### **Experimento de burbuja fina.**

- Se recolecta una muestra de 3.21 litros de agua residual del fondo de la laguna.
- Se omitió el sulfito de sodio para desoxigenar muestra por presentar el oxígeno disuelto despreciable.
- Colocar al extremo de la manguera al difusor de cerámica cuadrado y conectar el otro extremo al aireador de pecera.
- Registrar el oxígeno disuelto en la muestra antes de empezar la aireación.
- Encender el aireador manteniendo un flujo de 2.5 litros minutos y registrar el oxígeno disuelto en la muestra de agua residual cada 5 minutos hasta que el oxímetro estabilice su lectura.

Los dos experimentos restantes se realizaron el 27 de diciembre del 2022, no obstante, presentaron cambios con el objetivo de muestrear y obtener

la mayor cantidad de datos representativos del sistema, los cambios se enfocaron en el volumen de la muestra, flujo de aire inyectado y el tipo de burbuja empleado, por tal, se precisará una descripción detallada para cada tipo de experimento.

#### **Experimento de burbuja fina.**

- Recolección de una muestra de 5.5 litros de agua residual del fondo de la laguna y una muestra de 20 litros proveniente del afluente de la laguna.
- Homogeneizar las muestras para proceder con el experimento, dimensión del tanque, longitud igual a 1 metros, diámetro interno igual a 10 pulgadas.
- Omitir el uso de sulfito de sodio para desoxigenar muestra por presentar oxígeno disuelto despreciable en los rangos de medición.
- Colocar al extremo de la manguera el difusor de cerámica cuadrado y conectar el otro extremo al aireador de pecera.
- Registrar el oxígeno disuelto en la muestra antes de empezar la aireación.
- Encender el aireador manteniendo un flujo de 8 litros por minuto y registrar el oxígeno disuelto en la muestra de agua residual cada 5 minutos hasta que el oxímetro se estabilice su medición.

#### **Experimento de burbuja gruesa.**

- Recolección de una muestra de 3.21 litros de agua residual de la corriente del efluente de la laguna.
- Omitir el uso de sulfito de sodio para desoxigenar muestra de agua residual por presentar el parámetro de oxígeno disuelto despreciable en los rangos de medición.
- Conectar el extremo de la manguera al aireador de pecera.
- Registrar el oxígeno disuelto en la muestra antes de empezar la aireación.
- Encender el aireador manteniendo un flujo de 2.5 litros por minuto y registrar el oxígeno disuelto en la muestra de agua residual cada 5 minutos hasta que el oxímetro se estabilice su medición.

### 2.3.3 Registro de Caudal mensual.

Aguapen-EP realiza análisis o mediciones de parámetros de calidad en todos los sistemas que están bajo su gestión (tratamiento de aguas residuales y potabilización de aguas), por tal, valiéndose del registro historial del caudal se procedió a escoger el caudal máximo para el diseño del sistema de aireación difusa. La tabla 2.1 presenta un resumen de lo mencionado que se llevó a cabo por un período de un año, tomando en cuenta que el incremento del caudal se efectúa entre los meses Junio y Diciembre.

**Tabla 2.1**

*Caudal medido mensualmente por el período de un año en la empresa Aguapen-EP.*

<b>Fecha</b>	<b>Caudal (Litros/segundo)</b>
Diciembre 2020	419
Enero 2021	397
Febrero 2021	318
Marzo 2021	324
Abril 2021	324
Mayo 2021	324
Junio 2021	415
Julio 2021	319
Agosto 2021	410
Septiembre 2021	417
Octubre 2021	425
Noviembre 2021	435
Diciembre 2021	419

*Nota.* Registro mensual de la cantidad de aguas residuales que salen de la laguna de oxidación, Fuente: Datos compartidos por empresa Aguapen-EP.

Para determinación del caudal que ingresa a la laguna se tomó como premisa un balance de masa, la cantidad total de agua que ingresa es igual a la cantidad de agua total que sale del sistema, el caudal máximo fue dividido para tres y con ello se procedió a calcular el requerimiento de oxígeno.

### 2.3.4 Procesamiento de datos para DBO

Con los datos obtenidos de oxígeno disuelto se procedió al cálculo de la DBO en los diferentes días y con este registro se procedió al cálculo de la constante Cinética  $K$  ( $\text{día}^{-1}$ ) y la DBOU o  $L$  (mg/L).

El método usado para encontrar dichos datos fue el proceso de los mínimos cuadrados que parten de la ecuación mostrada a continuación:

$$y = L(1 - e^{-kt})$$

También puede representarse de manera diferencial de la siguiente forma:

$$\frac{dy}{dt} = k(L - y)$$

Por tanto, la ecuación previamente escrita es lineal debido a su  $\frac{dy}{dt}$  y  $y$ , es decir puede obtenerse expresiones para  $L$  y  $k$  por mínimos cuadrados, siendo  $\frac{dy}{dt}$  la pendiente de la curva que se ajusta a los diferentes pares de valores observados de  $y$  en el tiempo  $t$ ; en tanto por errores experimentales, los términos de la ecuación mencionada anteriormente no serán iguales y habrá una diferencia  $R$  según las ecuaciones:

$$R = k(L - y) - \frac{dy}{dt}$$

Aplicando propiedad distributiva se obtiene lo siguiente:

$$R = kL - ky - \frac{dy}{dt}$$

Cuya representación es congruente con un modelo lineal:

$$R = a + by - y'$$

La última ecuación mostrada tiene como incógnitas  $a$  y  $b$ , para satisfacer las soluciones en la ecuación es necesario conocer que valores pueden satisfacer el modelo, entonces:

$$a = KL$$

$$b = -K$$

El método de mínimos cuadrados requiere que la suma de los cuadrados de las  $N$  diferencias o muestras sea un mínimo, por lo tanto, al realizar la suma de los cuadrados, e igualando la ecuación a una cota inferior se tiene:

$$\Sigma R^2 - \Sigma(a + by + y')^2 = \text{un m\u00ednimo}$$

En tanto que la ecuaci\u00f3n previa se cumple cuando la primera derivada de  $\Sigma R^2$ , con respecto a  $a$  y  $b$  se igualan a cero, generando el sistema de ecuaciones requerido para satisfacer los grados de libertad y posibilitar la soluci\u00f3n del sistema.

$$\frac{\partial \Sigma R^2}{\partial a} = 2 \Sigma R \frac{\partial R}{\partial a} = 2 \Sigma (a + by - y') = 0$$

$$\frac{\partial \Sigma R^2}{\partial b} = 2 \Sigma R \frac{\partial R}{\partial b} = 2 \Sigma (a + by - y')y = 0$$

Al generalizar un con conjunto de datos  $N+1$  que son pares de los valores observados de DBO a un tiempo de medida  $t$  se dan las siguientes ecuaciones normales que son resueltas de manera matricial o anidada, por tal:

$$Na + b\Sigma y - \Sigma y' = 0$$

$$a\Sigma y + b\Sigma y^2 - \Sigma yy' = 0$$

Tomando en cuenta que se usa un conjunto de datos medidos, la relaci\u00f3n entre constante cin\u00e9tica y DBO se expresan como soluciones de  $a$  y  $b$ :

$$k = -b \quad \Lambda \quad L = -\frac{a}{b}$$

Para representar los valores de  $y'$  se calcula el  $\Delta t$  constante de la siguiente forma:

$$\frac{dy}{dt} = y' = \left( \frac{y_{N+1} - y_{N-1}}{2\Delta t} \right)$$

Tambi\u00e9n, para  $\Delta t$  variable, el c\u00e1lculo se hace de la siguiente forma:

$$y' = \frac{(y_N - y_{N-1}) \left( \frac{t_{N+1} - t_N}{t_N - t_{N-1}} \right) + (y_{N+1} - y_N) \left( \frac{t_N - t_{N-1}}{t_{N+1} - t_N} \right)}{t_{N+1} - t_{N-1}}$$

Donde:

$y_N$  y  $t_N$  son la magnitud y tiempo del punto para el cual se calcula  $y'$ .

$y_{N-1}$  y  $t_{N-1}$  son los valores para el punto inmediatamente anterior.

$y_{N+1}$  y  $t_{N+1}$  son los valores para el punto inmediatamente siguiente.

### 2.3.5 Procesamiento de datos para $K_{1a}$

Para calcular el coeficiente global de transferencia de oxígeno a una muestra de agua residual se empleó una linealización logarítmica versus tiempo (horas). Usualmente la tasa másica de transferencia está gobernada por la fase líquida debido a que posee la difusividad menor. La ecuación diferencial que describe la concentración del gas en el líquido a un tiempo  $t$  es:

$$\frac{dC}{dt} = K_{1a}(C_s - C)$$

Aplicando propiedad distributiva a los términos diferenciales se obtiene:

$$\frac{dC}{C_s - C} = K_{1a} dt$$

donde:

$C_s$  es la saturación del gas en el líquido en mg/L.

$C$  es la concentración en el tiempo  $t$  en mg/L.

$C_o$  es la concentración inicial de la muestra de agua.

Integrando la ecuación desde un tiempo  $C_o$  hasta llegar  $C_s$  se tiene:

$$\int_{C_o}^{C_s} \frac{dC}{C_s - C} = \int_0^t K_{1a} dt$$

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_o} = e^{-k_{1a} t}$$

$$\ln \left( \frac{C_s - C_o}{C_s - C} \right) = k_{1a} t$$

Para convertir los datos de logaritmo natural a logaritmo base diez, se ajusta la ecuación introduciendo un factor de conversión, por tal la ecuación empleada para encontrar el coeficiente global de transferencia de masa es (Romero, 2004):

$$\log \left( \frac{C_s - C_o}{C_s - C} \right) = \frac{k_{1a}}{2.3} t$$

El pseudo código para hallar la constante de transferencia de gas se presenta a continuación:

Tiempo (h)= array(); OD (mg/l)=array(); lista=[]

Cs\_agua\_residual=max (OD) + 0.01

For i, j in Tiempo , OD:

Razón=(Cs-OD[0])/(Cs-j)

Logaritmo=log<sub>10</sub>(Razón)

Kla=Logaritmo\*2.3/i

Lista.append(kla)

Kla\_real=mean(lista)

## 2.4 Calculo para el diseño de tuberías

### 2.4.1 Requerimiento de Oxigeno OR

Con fin de conocer la cantidad de necesaria para que ocurra la oxidación biológica dentro de las aguas residuales, se calculó el requerimiento de oxígeno mediante la ecuación 10, además usando los datos del registro historial en la empresa para el caudal, junto a la consideración de diseño (DBO) y los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio se obtiene:

$$OR = F S_o Q \times 10^{-3} \text{ kg } O_2/h$$

$$OR = (1.14) \times \left( \frac{435.22 \text{ mg}}{L} \right) \times \left( \frac{522 \text{ m}^3}{h} \right) \times 10^{-3} ; \text{ kg } O_2/h$$

$$OR = 260.51 \text{ kg } O_2/h$$

### 2.4.2 Presión Ejercida en el sistema por la profundidad del agua y la atmosfera.

Como se mencionó anteriormente, el aire debe suministrarse bajo un proceso de compresión que permita salir de los poros y vencer la presión ejercida por el agua residual; esto es solo posible si, la presión del aire en el interior de las tuberías es superior a la presión absoluta ejercida sobre los difusores, en pocas palabras deben vencer la presión ejercida por la atmosfera y la ejercida por el agua a la profundidad donde se sitúan los difusores.

La presión hidrostática del agua es:

$$P_{\text{agua}} = \rho gh = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 5.5 \text{m} = 64680 \text{ Pa}$$

Usando la conversión de unidades de Pascal a libras por pulgada cuadrada se obtuvo la siguiente cantidad.

$$P_{\text{agua}} = 9.3810 \text{ psi}$$

Por lo tanto, cuando se suman las presiones para encontrar la presión absoluta se tiene la cantidad de:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{atmosférica}} + P_{\text{agua}} = 14.70 \text{ psi} + 9.38 \text{ psi} = 24.08 \text{ psia}$$

### 2.4.3 Calculo de temperatura máxima ejercida por la compresión del gas.

El siguiente paso fue calcular el aumento de temperatura por compresión adiabática del aire, la ecuación 12 describe las variables necesarias y aproxima el aumento de temperatura generado por los compresores, a su vez, se asumirá que la temperatura atmosférica promedio ronda los 31 grados Celsius, la eficiencia del motor es del 80% entonces:

$$\Delta T_{\text{adiabática}} = \frac{T_1}{n} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] = \frac{273+31}{0.8} \left[ \left( \frac{24.08}{14.70} \right)^{0.283} - 1 \right] = 56.97 \text{ C}^\circ$$

Por lo tanto, la temperatura a la que sale el aire del compresor es:

$$T_2 = T_1 + \Delta T_{\text{adiabática}} = 31 + 56.97 = 80.84^\circ \text{C}$$

### 2.4.4 Determinación de las propiedades termodinámicas del Aire.

Se empleó la temperatura para el cálculo de las propiedades de termodinámicas de la densidad y viscosidad dinámica (ecuaciones 17 y 18), cuyo resultado posteriormente será usado para dimensionar la cantidad de flujo volumétrico que ingresa a la tubería y la fricción ejercida por la rugosidad dentro de la tubería.

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1.293}{1 + 0.0036T} \times \frac{\text{H}}{76} = \left( \frac{1.293}{1 + 0.0036 * 80.84^\circ \text{C}} \times \frac{124.53 \text{ cm Hg}}{76} \right)$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.63 \text{ kg Aire/m}^3$$

Ahora se determina la viscosidad dinámica:

$$\mu, \text{ centipoises} = (170 + 0.504 * (80.84^\circ\text{C})) \times 10^{-4}$$

$$\mu = 0.0211 \text{ centipoises}$$

#### 2.4.5 Calculo del flujo real inyectado a la laguna por corrección de SOTE.

Se calcula el flujo real inyectado por el sistema de aireación partiendo del requerimiento de oxígeno.

$$260.51 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{100 \text{ kmol aire}}{21 \text{ kmol O}_2} \times \frac{28.96 \text{ kg Aire}}{1 \text{ kmol aire}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Aire}}{1.61 \text{ kg Aire}} = 687.09 \text{ m}^3 \text{ Aire/h}$$

Luego se tomará el difusor de platos de cerámica para corregir mediante su eficiencia tabla 1.3 la cantidad de aire inyectado real al agua residual, para obtener resultados conservadores, se escoge el menor porcentaje de eficiencia y por tal el resultado es:

$$687.09 \text{ m}^3 \frac{\text{Aire}}{\text{h}} \times \frac{100\% \text{ aire inyectado}}{26\% \text{ aire transferido}} = 2642.68 \text{ m}^3 \frac{\text{Aire}}{\text{h}}$$

#### 2.4.6 Número de difusores empleados para la aireación.

Cada uno de los difusores posee límites del flujo permitidos para su operación, en el caso del difusor de platos de cerámica se empleó un flujo medio entre los rangos presentados en la tabla 1.3.

$$2642.68 \frac{\text{m}^3 \text{ Aire}}{\text{h}} \times \frac{\# \text{ dif platos de carámica}}{\frac{5.95 \text{ m}^3}{\text{h}}} = 445 \text{ dif platos de carámica}$$

Asumiendo una configuración cuadrada para el desarrollo del sistema de aireación se obtiene que U es número de difusores en una sola línea conectada a la tubería de distribución de gas.

$$U = \sqrt{445} = 21.08 \sim 21 \text{ difusores de platos de cerámica en una tubería}$$

#### 2.4.7 Diámetro de las tuberías principales del sistema.

Para escoger el diámetro de la tubería directamente conectada a los difusores, se calculó en base al flujo medio del aire que pasa a través de cada difusor y multiplicando por la cantidad de difusores presente en esa línea de tubería, se tiene:

$$\text{Caudal en una tubería 1} = U * \text{flujo permitido por 1 difusor}$$

$$\text{Caudal en una tubería} = 125.36 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Bajo la recomendación de diámetros y velocidades de diseño que se mostraron en la tabla 1.4 y empleando la ecuación de continuidad, se escogió una velocidad interna en la tubería de 10 m/s y se procedió a escoger un diámetro para tener las condiciones iniciales para el desarrollo del proceso iterativo. Si el diámetro y velocidad se encuentra entre el rango permitido por la tabla 1.2, se usan como diseño, en caso contrario, se repite el proceso.

No obstante este proceso requiere múltiples pruebas y repeticiones de forma manual, por esta razón para simplificar y agilizar el proceso del cálculo del diámetro de tubería junto con la velocidad interna, se usó la herramienta solver de Excel bajo el método de resolución GRG Non linear, pues esta herramienta permite encontrar soluciones iterativas incorporando las variables a optimizar, una función objetivo, restricciones respectivas y una condición inicial, no obstante, antes de usar la herramienta es necesario corroborar las unidades respectivas para no generar desviaciones del resultado.

En este trabajo no se aborda la deducción matemática detrás del método GRG Non Linear, más bien, se emplea la herramienta para encontrar la

velocidad y diámetro interno de la tubería, siguiendo las condiciones de la tabla 1.4.

Entonces se planteó de la siguiente forma:

$$\text{Función objetivo 1} = \text{Caudal en una tubería} - \pi \frac{(\text{D interno})^2}{4} \times V \text{ del aire} = 0$$

Las celdas variables para optimizar son:

$$\mathbf{V \text{ del aire} \ \& \ \mathbf{D \text{ interno}}}$$

Teniendo como restricciones:

$$\mathbf{V \text{ del aire} \leq 15 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{D \text{ interno} \leq 250 \text{ mm}}$$

Para las tuberías directamente conectadas a los difusores se obtuvo una velocidad de 8.54 metros sobre segundo y un diámetro de 72.02 milímetros.

En tanto que la tubería matriz que abastece directamente el aire desde el compresor hasta las tuberías de los difusores plantea el siguiente método iterativo:

$$\text{Función objetivo 2} = U * \text{Caudal en tubería} - \pi \frac{(\text{D interno 2})^2}{4} \times V \text{ del aire 2} = 0$$

Las celdas variables para optimizar son:

$$\mathbf{V \text{ del aire 2} \ \& \ \mathbf{D \text{ interno 2}}}$$

Teniendo como restricciones:

$$\mathbf{V \text{ del aire 2} \leq 20 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{D \text{ interno} \leq 600 \text{ mm}}$$

Obtenido una velocidad de 13.42 metros por minuto y un diámetro de 263.88 milímetros.

Para el cálculo de la longitud de las tuberías conectadas a los difusores, solo se escogió una división simple en donde se estima la cantidad de área requerida para situar la cantidad de 445 difusores, luego se sacó una raíz cuadrada y se obtuvo la

longitud de una tubería, con el resultado de 11.35 metros, sin embargo, se consideró después una separación de 1 metro entre cada tubería con lo cual se amplió la red presente en el diseño.

#### 2.4.8 Perdidas de presión ocasionadas por los accesorios.

Las tuberías que transportan fluidos poseen rugosidades propias del material del que fueron fabricadas, esta característica debe considerarse al momento de dimensionar tuberías o líneas de transporte de fluido, razón por la cual se evaluará la pérdida y se reincorporará a la presión dos de la ecuación 12.

Extrayendo la ecuación 16 para emplear la ecuación 15 y usando las propiedades termodinámicas (ecuación 18 y 19) bajo la consideración de T2 se obtendrá el Reynold y con los diámetros y velocidades optimizados se calcula el factor de fricción, nótese que la rugosidad absoluta para el PVC es 0.0015mm:

$$Re = 25.47 \times 154.70 \frac{m^3}{h} / \left( \left( \frac{72.02mm}{1000} \right) * 0.0211cP \right)$$

$$Re = 35063.68$$

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4 \text{Log}_{10} \left( \frac{0.0015mm}{3.7 \times 77.79mm} + \left( \frac{6.81}{35063.68} \right)^{0.9} \right)$$

$$f = 5.67 \times 10^{-3}$$

Luego utilizando la ecuación 15:

$$hi = \left( \frac{v \text{ de aire} 1}{140} \right)^2 \times \rho_{aire}$$

$$h_i = \left( \frac{8.54\text{m}}{140} \right)^2 \times 1.63 \text{ kg} \frac{\text{Aire}}{\text{m}^3} = 6.092 \times 10^{-3} \text{m. c. a}$$

Finalmente se incorpora la pérdida total para las tuberías conectadas directamente a los difusores, usando la ecuación 13:

$$h_{L1} = 5.47 \times 10^{-3} \times \frac{239.44\text{m}}{\frac{72.02\text{mm}}{1000}} \times 6.092 \times 10^{-3} \text{m. c. a} = 1.13 \times 10^{-1} \text{m. c. a}$$

Realizando una conversión entre unidades de presiones, de metros de columnas de agua (m.c.a) a psi se tiene:

$$1.13 \times 10^{-1} \text{m. c. a} = 1.61 \times 10^{-3} \text{psi}$$

A esto debe añadirse también las pérdidas ocasionadas por las tuberías de mayor diámetro, por lo tanto, se usará el mismo procedimiento para el cálculo de la presión pérdida, exceptuando que en este caso se utiliza el caudal suministrado por el compresor.

$$\text{Re} = 25.47 \times 2642.68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / \left( \left( \frac{263.38\text{mm}}{1000} \right) \times 0.0211 \text{cP} \right)$$

$$\text{Re} = 201722.25$$

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -4 \text{Log}_{10} \left( \frac{0.0015\text{mm}}{3.7 \times 263.38\text{mm}} + \left( \frac{6.81}{201722.25} \right)^{0.9} \right)$$

$$f = 3.87 \times 10^{-3}$$

Luego se procedió a usar nuevamente la ecuación 18:

$$h_i = \left( \frac{v \text{ de aire}^2}{140} \right)^2 \times \rho_{\text{aire}}$$

$$h_i = \left( \frac{13.42\text{m}}{140} \right)^2 \times 1.63 \text{ kg} \frac{\text{Aire}}{\text{m}^3} = 1.50 \times 10^{-2} \text{m. c. a}$$

Usando la ecuación 10, e incorporando en L la longitud equivalente de los dispositivos que permiten el funcionamiento del sistema de aireación difusa tabla 2.1, se tiene:

**Tabla 2.2**

*Longitud Equivalente de los dispositivos empleados en la tubería de mayor diámetro.*

Dispositivo	Cantidad	Longitud Equivalente (pies)
Ángulos 90grados DN 10	2	166.00
Tubería PVC DN 10 in	1	101.97
Válvula de globo DN 10 in	1	332.00
Tes de PVC DN 10	18	59.60
Tubería DN 3 in	1	785.58

*Nota.* Cuadro resumen de los accesorios que fueron incorporados a la tubería principal, tomados fuente: Piping Handbook, L Mohinder, p. C.788

$$h_{L2} = 3.72 \times 10^{-3} \times \frac{511.32 \text{ m}}{263.38 \text{ mm}} \times 1.50 \times 10^{-2} \text{ m.c.a} = 1.12 \times 10^{-1} \text{ m.c.a}$$

Llevando las columnas de agua a psi:

$$1.12 \times 10^{-1} \text{ m.c.a} = 1.60 \times 10^{-3} \text{ psi}$$

Sumando las pérdidas totales de  $h_{L1}$  y  $h_{L2}$ , se tiene que las tuberías y dispositivos generan una caída de presión de  $3.22 \times 10^{-3} \text{ psi}$ .

Para corregir mediante proceso iterativo, se debe sumar a la presión dos de la ecuación 12 la pérdida de presión ocasionada por las tuberías y dispositivos presentes volviendo a realizar el cálculo.

## 2.5 Calculo para requerimiento de potencia

Para encontrar la potencia primero es necesario encontrar la relación alfa mediante la ecuación 5 y la relación entre la saturación con el factor beta usando la ecuación 6, conociendo el  $k_{la}$  de agua limpia de  $2.06 \text{ h}^{-1}$  y  $N_o$  de  $1.42 \text{ kgO}_2/\text{kW-h}$  (Romero, 2004), a su vez calculando por medio de la ley de Henry el valor de saturación de oxígeno en agua limpia a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $7.86 \text{ mg/L}$ ) se obtuvieron los siguientes resultados.

$$\alpha = \frac{K_{la} \text{ agua residual}}{K_{la} \text{ agua limpia}} = \frac{1.69 \text{ h}^{-1}}{2.06 \text{ h}^{-1}} = 0.82$$

Mientras que la relación beta:

$$\beta = \frac{C_s \text{ Aguaresidual}}{C_s \text{ agualimpia}} = \frac{7.16 \text{ mg O}_2 / \text{L}}{7.86 \text{ mg O}_2 / \text{L}} = 0.91$$

Mientras que al usar la ecuación 4 se tiene:

$$N = N_o \left( \frac{\beta C_{\text{walt}} - C_L}{C_{s20}} \right) 1.209^{T-20} \alpha$$

Al reemplazar los valores:

$$N = 1.42 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kW-h}} \left( \frac{0.91 \times \frac{7.86 \text{mg}}{1} - \frac{1.5 \text{mg}}{1}}{9.1 \frac{\text{mg}}{1}} \right) 1.209^{28-20} \times 0.82$$

$$N = 3.32 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kW-h}}$$

Por último, se emplea la ecuación 11 y se reemplaza los valores previamente encontrados:

$$P = 1.250R/N$$

$$P = 1.25 \times \frac{260.51 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}}}{3.32 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kW-h}}}$$

$$P = 98 \text{ kW} \times \left( \frac{1 \text{HP}}{0.745 \text{kW}} \right) = 131.58 \text{ HP}$$

## 2.6 Análisis Económico.

Para el cálculo económico de implementación y puesta en marcha del sistema de aireación debe seccionarse la inversión requerida para su funcionamiento. Por lo general se divide en costo de inversión y costo operativo.

Para el primer caso solo se tomarán en cuenta los costos generados a partir de la adquisición del compresor, de la longitud de la tubería empleada y la cantidad de difusores empleado. Debe notarse que hay una cantidad mucho más alta en cuanto a la inversión pues se omitieron aspectos de diseño eléctrico, civil, incorporación de controladores para automatización, mano de obra y entre otros.

### 2.6.1 Inversión en equipos, tuberías y difusores.

Para estimar el costo de los materiales principales invertidos en el proyecto se tomará en cuenta las longitudes de tuberías, accesorios y equipos con el fin de aproximar el costo a un proyecto real.

**Tabla 2.3**

*Costo de los equipos y materiales principales de los cuales se compone el sistema de aireación difusa.*

<b>Dispositivo</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor parcial</b>
<b>Compresor centrifugo</b>	4500\$	1	4500\$
<b>Tubería PVC DN 3 in</b>	1.25\$/m	290 metros	362.5\$
<b>Tubería PVC DN 10 in</b>	6.77\$/m	30 metros	203.1\$
<b>Válvula de globo DN 10 in</b>	20\$/unidad	1	20\$
<b>Tes de PVC DN 10</b>	3.75\$/unidad	24 unidades	90\$
<b>Difusores de platos de cerámica.</b>	21.5\$/unidad	445 unidades	9567.5\$
<b>Flujómetro de alta precisión supmea DN 10</b>	230\$/unidad	1	230\$
<b>Manómetro</b>	3.25\$/unidad	2	6.50\$
<b>Valor total de inversión parcial</b>			<b>14979.6\$</b>

*Nota.* los valores fueron tomados de página web alibaba para el uso didáctico.

**Tabla 2.4**

*Costo de electricidad consumido por el equipo según una base de cálculo mensual.*

<b>Potencia (kW)</b>	<b>Horas de trabajo mensuales</b>	<b>Costo de electricidad en Santa Elena</b>	<b>Total \$ mensual</b>
<b>98</b>	<b>720</b>	<b>0.10\$/kW-H</b>	<b>7056\$</b>

*Nota.* este cuadro muestra el gasto de energía que consume el equipo para mantener la laguna aireada durante los 30 días y las 24 horas.

## **2.7 Simulación en AVEVA PRO II**

Con el fin de conocer como es el comportamiento del sistema se precisó el uso del simulador (AVEVA PRO II), este permitió observar la caída de presión generada por el diámetro de la tubería principal y también la caída de presión con la incorporación de más dispositivos mediante la suma su longitud equivalente.

Para esto, se escogió un compresor en el cual se ingresó la potencia del equipo de 98 kw, eficiencia adiabática y mecánica 0.8, a su vez se mantuvo una condición isotérmica de salida 80.84 grados Celsius y mediante un separador de

corrientes se distribuyó el caudal general para 21 flujos igual conectadas a tuberías más pequeñas de 72 mm de diámetro interno.

A la tubería principal se le ingresó la mayor parte de los dispositivos presentados en la tabla 2.1 y en la tubería pequeña se incorporó el reductor de diámetro, mantenido una rugosidad absoluta de 0.0015mm para ambas. Por último, se simuló mediante la incorporación del modelo termodinámico Peng Robinson por ser un modelo de ecuación de estado que ajusta el comportamiento de un gas.

## 2.8 Simulación en Python.

El código a continuación se ejecutó en Python y se usó las librerías de numpy, matplotlib.pyplot y scipy.integrate para extraer la función odeint() y poder graficar el comportamiento del sistema. Para simular se usó el promedio de la constante cinética que fue introducida manualmente tanto para condiciones aerobias ( $2.5 \text{ dia}^{-1}$ ) (Metcalf and Eddy, 1995, p. 691) como anaerobias encontrada por los ensayos de laboratorio junto con otros parámetros por ejemplo la relación de DBOU sobre DBO5, la de DBOU de diseño, el volumen general de la laguna, la densidad del agua en la laguna, el caudal que ingresa a la laguna, a continuación, el código.

```
import numpy as npy
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
def funLagoon(x,t):
    S=x[0] ; # DBO influente
    Lt=x[1] ;# masa de lodos totales
    #Differential Equation
    dSdt=(ip*Si/R) - (ks*S)- (S/R) +Sp*kl*Lt*(1*10**3)/(fdbou*(Vo-(fl*Lt/gamma)))
```

```

dLdt=(1-ip)*fdbou*Si*Q*(1*10**-3)-kl*Lt
return[dSdt,dLdt]

Si=435;# DBO mg/L del afluente
Vo=33275;#volumen de la laguna en m3
#Lt=400;# (kg DBOU) total de lodos activados
Q=12528; #flowrate influente (m3/dia)
fl=0.7; # Acumulation de lodos (dimensionless)
gamma=1200; ## densidad de los lodos kg/m3
Sp=0.4; ## fraction of DBOU entering lagoon liquid phase after sludge fermentation
ks=2.7*1.085**(28-20); # constant aerobic degradation (0.4618*(1.035**(28-20)))
kl=0.001*1.35**(28-25); # fermentacionde lodos dias -1; (0.002*1.35**(28-20))
ip=0.726; # fraccion del influente DBOU dispersado within the body of lagoon
fdbou=1.1467 #ration of DBOU vs DBO5
R=4.35 # tiempo de retencion en dias.

####
# CONDICIONES INICIALES
y0 = [435,0]
t = npy.linspace(0,8,100)
comportamiento = odeint(funLagoon,y0,t)
plt.plot(t,comportamiento[:,0],"blue",label="DBO mg/L EFLUENTE")
plt.plot(t,(comportamiento[:,1]/10),"orange", label=" 1x10^-1 kg sluge generated")
plt.title("Evolution of BEMISTER model for AFL")
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1.0, 0.3, 0.2), loc='upper left')
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1.0), loc=2, borderaxespad=0)
plt.xlabel("Time (days) ")
plt.ylabel("ESTIMATION")
plt.grid()
plt.show()

```

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados de los análisis de laboratorio que permitieron el diseño del sistema de aireación difusa, a su vez se genera una breve comparación entre los métodos usados con diferentes modelos matemáticos o ecuaciones que generan respuestas tanto para DBO y potencia del sistema.

### 3.1 Resultados de la DBO

Antes de iniciar con los respectivos cálculos fue necesario encontrar datos suficientes y confiables, esto con el fin de poder dimensionar los equipos y otros dispositivos que conforman el sistema de aireación difusa. Por lo general, se presentan duplicados entre diferentes modelos, corroborando resultados para su validación.

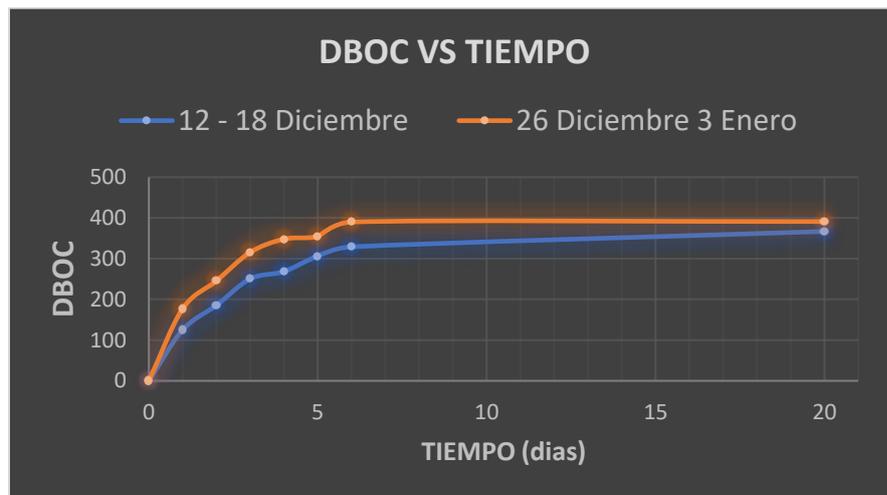
En el caso de las curvas DBO, la línea azul de la tabla 3.4 muestra el ensayo realizado del 12-18 de Diciembre con una muestra que se tomó del afluente y del fondo de la laguna. La tendencia de la curva mencionada es ascendente con una cota superior aproximada de 400 mg/L, en tanto que el ensayo realizado del 26 de diciembre al 3 enero generó la curva color naranja con una tendencia similar, es necesario mencionar que, las curvas tienen un incremento suave y no han desarrollado nitrificación debido a la disolución completa del inhibidor 2-cloro-6 (triclorometil) piridina.

Pese a ser muestras diferentes con respecto al período de tiempo, existe un cambio insignificante de la DBO ejercida en los días donde se tomó la lectura, esto sirvió como un set de datos pequeño que permitió no solo generar la DBOU y DBO5, sino también hallar la cinética de reacción del sistema lagunar, siendo esta última un importante dato para el dimensionamiento

básico de un reactor biológico, mismo que no es parte de este trabajo. En tanto, se corrobora que la cinética que desarrollan los microorganismos depende de los componentes orgánicos de los desperdicios presentes en el agua residual, motivo por el cual existe diferencia entre las curvas mostradas a continuación en la figura 3.1.

**Fig. 3.1**

*Gráfica de las DBO ejercida para los distintos días.*

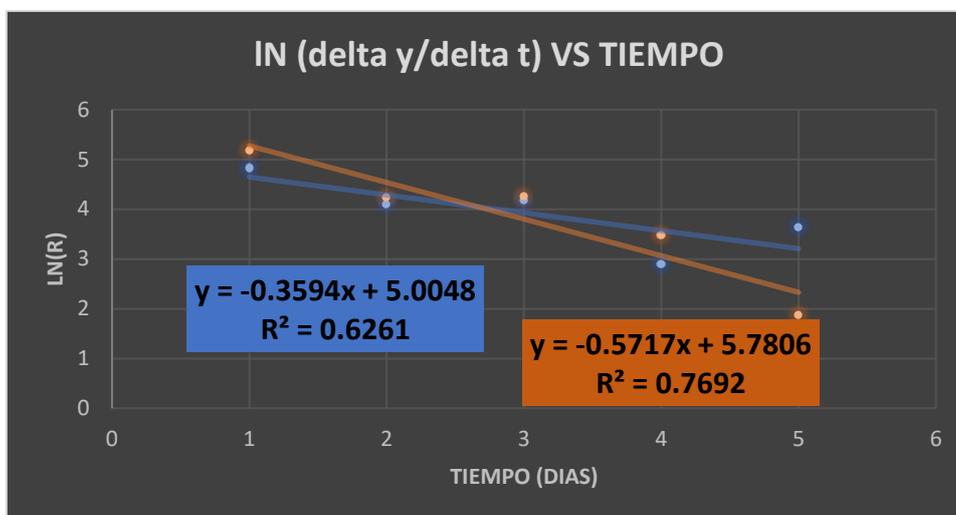


*Nota.* La curva mostrada fue generada en Excel, fuente: autor.

Los resultados de la constante cinética, DBO5 y DBOU son presentados en la tabla 3.1, también se muestran otros valores determinados con otros modelos, por ejemplo, el método logarítmico que es el relativamente útil y fácil de manejar, este último muestra un resultado aproximado al valor encontrado con el modelo de mínimos cuadrados. A esto se añade, que el modelo lineal logarítmico se ajusta a sus datos con una precisión  $R^2$  de 0.62, mientras que el ajuste de la curva naranja es mayor, siendo 0.76 como se muestra en la figura 3.2.

**Fig. 3.2**

*Figura tendencia logarítmica del cambio de la DBO respecto al tiempo.*



*Nota.* El gráfico del método logarítmico para encontrar la DBOU ajustando los datos una regresión, fuente: autor.

Para el cálculo del requerimiento de oxígeno que debe inyectarse a la laguna, se precisó encontrar una concentración de DBOU denotada con la variable  $S_0$ , se usó una media entre los distintos resultados generados por el modelo logarítmico y de mínimos cuadrados, esto por encontrarse limitado de recursos para desarrollar más ensayos de laboratorio y validar los resultados, además la empleabilidad del modelos logarítmico explicaría la tendencia de la DBOU con dos resultados adicionales, mediante un promedio entre estos valores encontrados, se procedió al cálculo del requerimiento de oxígeno. Mientras que, la relación entre la DBOU con la DBO5 comúnmente denotada como  $F$ , generó un resultado de 1.14, valor confiable puesto que en la literatura esta relación fluctúa entre los rangos de 1.1 a 1.5 para aguas residuales domésticas (Romero, 2004).

**Tabla 3.1**

Tabla de los resultados generados por el procesamiento de mínimos cuadrados y con el modelo logarítmico.

Variables	12-18 Diciembre		26 Diciembre-3 Enero		S <sub>o</sub>	F=DBOU/ DBO5
	Mínimo Cuadrado	Logarítmico	Mínimo cuadrado	Logarítmico		
DBO5 (mg/L)	306.50	306.50	354.50	354.50	-	330.50
DBOU (mg/L)	366.87	416.26	391.09	566.64	435.22	378.98
K (día <sup>-1</sup> )	0.3655	0.3594	0.5509	0.5717	-	F=1.14

Nota. Cuadro resumen de los datos encontrados en las distintas muestras, fuente: autor.

### 3.2 Resultados de dimensionamiento respecto a los difusores y tuberías

Estos resultados se basan en la incorporación de SOTE que depende del tipo del difusor como se muestra en la tabla 3.2 y con ello se pretende aproximar la cantidad de aire, el número de difusores, con su diámetro y longitud de tubería. Se recalca que el diámetro fue optimizado bajo consideraciones de velocidad y diámetro, sin incorporar el factor económico. La tabla 3.2 resumen estos resultados.

**Tabla 3.2**

Resumen de los materiales y dispositivos empleados para proceso de tratamiento de aguas residuales con aire difuso.

Tipo de difusor	Tuberías directamente conectadas al difusor					
	Caudal en tubería pequeña (m <sup>3</sup> /h)	Velocidad en tuberías pequeñas (m/s)	Número de tuberías pequeñas Separadas a 1 metro	Número total de difusores	Diámetro interno de la tubería (in)	Número de difusores por cada línea de tubería
Platos de cerámica	125.36	8.54	21	444	2.8	11.35m 21
Discos de cerámica	94.19	8.58	29	851	2.5	17.44m 29
Domos de cerámica	92.99	8.58	27	749	2.4	21.53m 27

Nota. La tabla muestra los valores que deben considerarse al momento del diseño de las tuberías pequeñas directamente conectadas al difusor junto con las variables de operación, fuente: autor.

**Tabla 3.3**

*Resumen de los materiales y dispositivos empleados para proceso de tratamiento de aguas residuales con aire difuso en tuberías principales.*

Tipo de difusor	Caudal de aire en tuberías principales (m <sup>3</sup> /h)	Velocidad en tuberías (m/s)	Longitud total empleada (m)	Diámetro interno de la tubería (in)
Platos de cerámica	2642.68	13.42	31.08	10.4
Discos de cerámica	2748.39	13.42	39.17	10.6
Domos de cerámica	2544.80	13.42	37.36	10.2

*Nota.* La tabla muestra los valores que deben considerarse al momento del diseño de las tuberías principales directamente conectadas al compresor junto con las variables de operación, fuente: autor.

Se puede notar que la influencia del SOTE provoca variación significativa en los caudales necesarios para el tratamiento de aguas residuales, incrementa también el número de difusores por longitud de tubería e inclusive la longitud de tubería empleada. Sin embargo, el diámetro interno permitido para el transporte de aire es similar cuando se comparan los difusores de discos de cerámica y domos de cerámica (diámetro de tubería pequeña), mientras que, para los platos de cerámica se podría usar un diámetro de 2.5 pulgadas pero se aumentaría la velocidad al momento de inyectar el aire desde el difusor, incrementando también el estrés en el dispositivo por el aumento del número de Reynolds, no obstante, es recomendable usar un diámetro interno mayor, en este caso de 3 pulgadas por temas de seguridad.

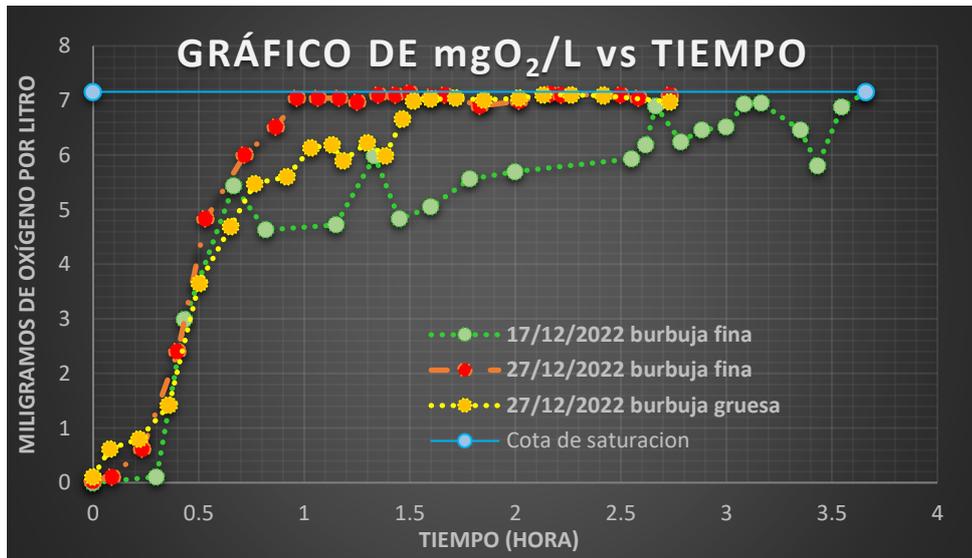
### **3.3 Análisis respecto al coeficiente $K_{La}$**

Antes de realizar el respectivo análisis es necesario medir el comportamiento del agua residual frente a la incorporación aire difuso, por tal, valiéndose de un experimento a escala de laboratorio se recabaron datos importantes y representativos para su posterior uso en los cálculos de diseño, el objetivo de los muestreos en diferentes escalas era cubrir los escenarios

posibles de la incorporación de oxígeno al agua residual, el cambiar los niveles como la cantidad muestra, aumento de flujo de aire, exceso de sedimentos y el empleo de difusores ayudaría a bosquejar la tendencia del valor  $k_{la}$ .

**Fig. 3.3**

*Comportamiento de la concentración de oxígeno en agua residual provocado por inyección de aire.*



*Nota.* El gráfico describe el comportamiento de las muestras de aguas residuales variando el volumen de la muestra, tipo de burbuja y usando diferente caudal en la inyección de aire, Fuente: autor.

El primer ensayo se realizó el 17/12/2022 y generó la curva verde presentada en la figura 3.3, el ensayo duró un poco más de 3 horas, esto por la imposibilidad del oxígeno de transferirse al agua residual, este fenómeno ocurre por la alta presencia de sólidos orgánicos, materiales surfactantes, aceites y arena que imposibilita la transferencia. A su vez, se puede observar que los microorganismos empezaron a consumir oxígeno al minuto 40 aproximadamente, puesto que la medición empezó a oscilar y el sensor no estabilizaba su lectura.

Los otros dos ensayos se realizaron el 27/12/2022 y tuvieron un comportamiento menos oscilante que el anteriormente mencionado, la curva

roja se generó con el uso del difusor de burbuja fina, presentando un incremento sin picos debido a que la mayor parte del agua residual no presentaba sedimentos ni otros compuestos que imposibilite la transferencia del oxígeno, además, casi la totalidad del agua residual aún no entraba en la laguna y no ejercía reacción biológica todavía, no desarrollaba en su totalidad los microorganismos consumidores del oxígeno. Esto último junto al empleo de los difusores y un caudal de aire alto tuvo repercusión en la absorción del oxígeno pues, esta muestra de agua residual llegó a la saturación en menor tiempo con respecto a las demás.

Por último, el segundo ensayo de la fecha 27/12/2022 a diferencia de las otras dos muestras, esta no empleó un difusor y se registró una zona de transición oscilante antes de llegar a la saturación, nótese que esta parte de la curva fue menos prominente en comparación al ensayo de alta carga de sedimentos, pero fue retardado con respecto al uso del difusor de burbuja fina cuando se aireó la muestra de 25.5 litros.

Las variaciones en los experimentos mostraron que, es necesario considerar el flujo de aire inyectado al agua residual, puesto que, al aumentar el caudal de aire también incrementará la transferencia del gas hacia el medio líquido, a su vez, la burbuja gruesa puede usarse para airear el sistema, pero esta transferirá el oxígeno de forma lenta en comparación al uso de los difusores. También es necesario recalcar que la cantidad de sedimentos que posea la laguna aumentará o disminuirá la transferencia de oxígeno pues como se mencionó, el material particulado, aceites y otros componentes presentes en el agua residual actuarán como interferencia para la transferencia de masa gaseosa a la líquida y se debe considerar esta variación al momento de

plantear un sistema de lagunas aireadas corrigiendo el flujo de inyección de aire.

**Tabla 3.4**

*Resultados de los coeficientes de transferencia de oxígeno de los experimentos en mención.*

Muestreo	Valor $K_{La}$ ( $h^{-1}$ )
17/12/2022 burbuja fina	0.9689
27/12/2022 burbuja fina	2.4068
27/12/2022 burbuja gruesa	1.6941
Promedio Agua residual	1.6899
Ensayo de agua limpia	2.0571
Alfa (adimensional)	0.8215

*Nota.* valores generados con el método linealización logarítmica versus tiempo de las diferentes muestras, fuente: autor.

Continuando con el análisis, los resultados mostraron que el coeficiente del experimento llevado a cabo el 17/12/2022, tuvo el menor valor de todos los coeficientes de transferencia, su valor fue de  $0.9689 h^{-1}$ , esto se debe al sedimento con el que se aireó la muestra. Mientras que en uno de los experimentos del 27/12/2022, precisamente el que tuvo un mayor caudal de aire junto con un difusor mejoró la transferencia a  $2.40 h^{-1}$ . Por último, la burbuja gruesa permitió estimar un coeficiente de transferencia de  $1.69 h^{-1}$  menor al generado por la burbuja fina, lo cual concuerda con la literatura que recomienda el uso de difusores para disminuir la burbuja y aumentar la transferencia del gas.

**Fig. 3.4**

*Análisis de sensibilidad de la potencia requerida.*



*Nota.* Potencia requerida para aireación de la laguna, fuente: autor.

Los resultados mostrados en la figura 3.4 son los generados por diferentes ecuaciones matemáticas para la estimación de la potencia del compresor de aire, el objetivo de esto fue corroborar los resultados de la potencia, encontrar los kilovatios necesarios del equipo para suministrar aire al sistema y observar la sensibilidad de este resultado con respecto al aumento o disminución de los parámetros involucrados en su determinación.

La ecuación 4 posee varios factores, en este caso se analiza el factor con crecimiento exponencial cuya base regularmente se recomienda una theta de 1.024, este factor afecta directamente al resultado de la potencia del equipo por crecer exponencialmente y su uso inconsistente genera regularmente un sobredimensionamiento o subdimensionamiento, esto por usar un valor inconsistente a las condiciones de campo. Al usar el valor de 1.024 como base teniendo una temperatura ambiente de 28 grados centígrados junto a la concentración deseada de oxígeno disuelto de 2mg/L generó un resultado de 544.97 HP.

En tanto si usamos las ecuaciones 7 y 11, empleadas por la empresa Sanitare (USA) que corrige la constante theta presentes en la misma ecuación 4, existirá una reducción de la potencia considerable, en este caso, se redujo la concentración de oxígeno a 1.5 mg/L que se desea mantener en el sistema y junto al cambio en theta de 1.024 a 1.209 que es la temperatura a la cual se mantienen la atmosfera y medio circundante de la laguna. Estos valores generaron una potencia de 131.58 HP, una cuarta parte del resultado anterior.

Otra consideración importante al momento de diseñar el sistema de aireación difusa es incluir la profundidad a la cual se sitúan los difusores y el

tipo de burbuja que se empleará al momento de airear la laguna. Para este caso, la ecuación modificada de M. Doaa y T. Hassen (ecuación 8, 9 y 11) corrige mediante dos factores que representa la burbuja gruesa y burbuja fina, la saturación de oxígeno a una profundidad conocida. Manteniendo el factor theta invariable con una concentración de oxígeno en la laguna de la 1.5 mg/L y una temperatura ambiental de 28 grados Celsius regenerando el resultado de potencia 122.13 HP.

Por último, el cálculo rápido de la ecuación usada en Metcalf and Eddy (ecuación 20) pronuncia que, para el cálculo de la potencia se debe tener la suficiente capacidad para el suministro de aire en el día más caluroso del año y para soportar el frío invernal. En el caso de la laguna Punta Carnero 1, esta cumple solo una de las condiciones, el calor en la temporada invernal debe considerarse, por tal la temperatura de diseño es de 25 grados pues no es usual sobrepasar los 30 grados centígrados. La ecuación generó un resultado de 88.93 HP.

La ecuación 4 mostrada en el marco teórico debe ser corregida con el fin de evitar el sobredimensionamiento del equipo y evitar el sobrecosto de su adquisición, por tal, las consideraciones y correcciones usadas con otros autores pueden usarse para estimar la potencia necesaria del equipo, esto por mostrar resultados cercanos entre sí, la tendencia de los resultados sugiere que la potencia del equipo está entre 88 y 131 HP.

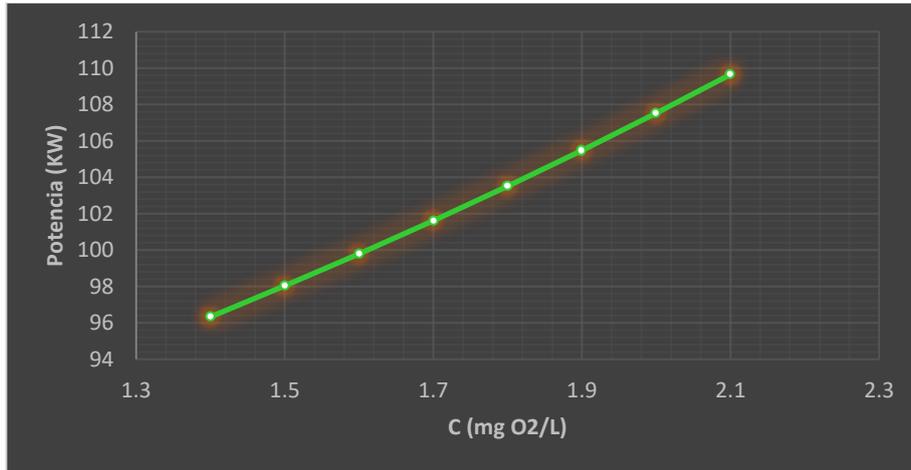
### **3.4 Análisis Económico**

Se considera el costo de los materiales y el costo operativo mensual del ventilador o compresor, sin embargo, se debe conocer que mantener la

concentración del oxígeno en el agua residual genera también un incremento en el costo operativo, por tal, se muestra también la tendencia y relaciones entre el costo, concentración de oxígeno y potencia del equipo.

**Fig. 3.5**

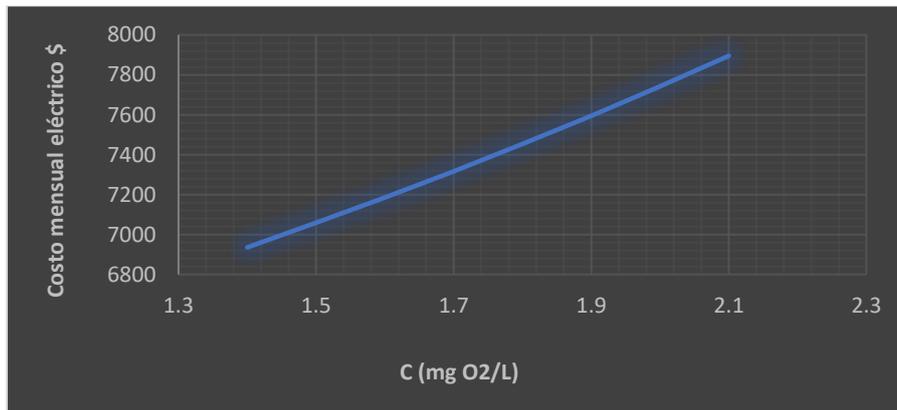
*Incremento de la potencia ocasionada por la concentración de oxígeno disuelto en la laguna.*



*Nota.* Esta gráfica muestra el incremento de la potencia según oxígeno disuelto en la laguna en base a las ecuaciones 7 y 11, fuente: autor.

**Fig. 3.6**

*Incremento del gasto operativo mensual provocado por el incremento de oxígeno disuelto en la laguna.*



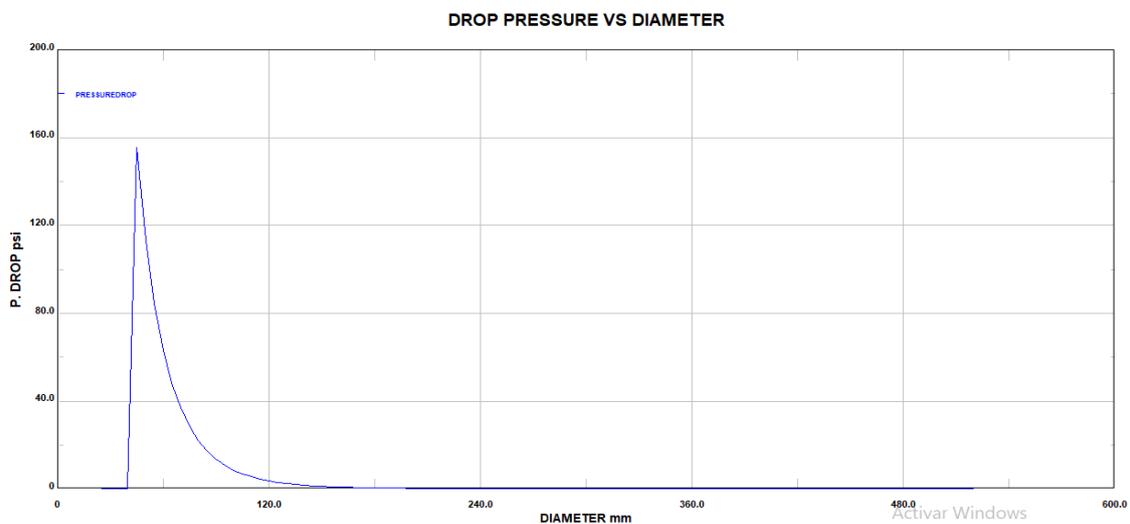
*Nota.* En base a la ecuación 11 y con el costo de electricidad en la provincia de Santa Elena (0.10\$/kW-h), se estima la tendencia del costo mensual de la laguna en base al oxígeno disuelto, Fuente: autor.

### 3.5 Resultados del simulador AVEVA PRO II

Los resultados mostrados a continuación fueron generados con la opción caso de estudio del programa AVEVA Pro II para simular procesos industriales, el programa fue usado para caracterizar la caída de la presión con respecto a dos variables que son importantes en el diseño de tuberías, como la longitud de su tubería y sus diámetros, por tal, se muestran los resultados a continuación.

**Fig. 3.7**

*Caso de estudio de la caída de presión versus el diámetro de las tuberías.*

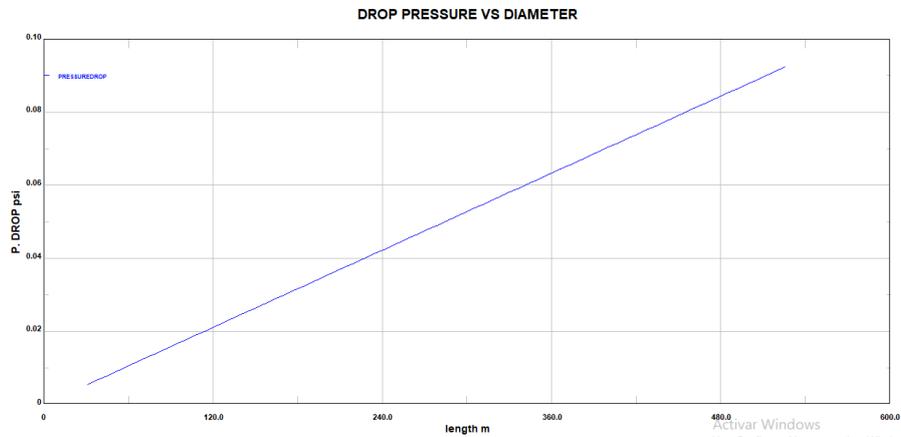


*Nota.* Gráfico generado con la opción caso de estudio del programa AVEVA Pro II bajo una presión de servicio de 30 psi.

La Figura 3.7 muestra como la incorrecta selección del diámetro puede disminuir la presión con la que se transporta el aire, incluso puede desencadenar alguna situación de riesgo y dañar los dispositivos presentes en la tubería, esto ocurre por la acumulación de presión en las tuberías, sin embargo, a medida que se aumenta el diámetro, la caída de presión disminuye conservando la presión de servicio desde el compresor. Cuando alcanza el diámetro de 120 mm la caída de presión es casi despreciable.

**Fig. 3.8**

Caso de estudio de la caída de presión versus la longitud de las tuberías principales manteniendo un diámetro interno 264mm.



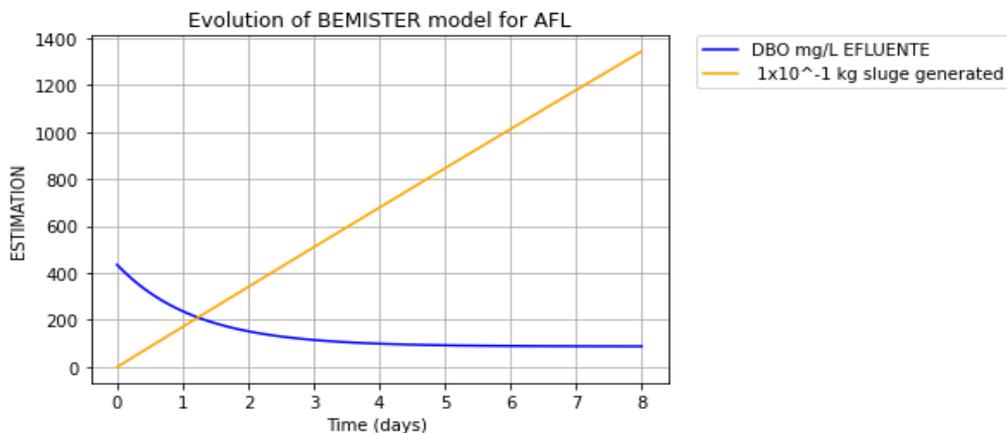
Nota. Gráfico generado con la opción caso de estudio AVEVA PRO II bajo una presión de servicio de 30 psi.

En la figura 3.8 se muestra como la incorporación de más dispositivos en la tubería puede provocar una caída de presión, nótese que los dispositivos ejercen una caída de presión equivalente a añadir un tramo extra de tubería del diámetro de 364mm y mientras se mantengan abiertas las válvulas para el paso del aire, estos no generan grandes pérdidas de presión.

### 3.6 Resultados de simulación en Python.

**Fig.3.9**

Simulación generada a partir de la constante cinética encontrada en el laboratorio y la relación entre la DBOU y DBO5.



Nota. Gráfico generado a partir del modelo matemático Bemister con datos propios de la laguna.

Se puede observar que, en un medio anaerobio, la DBO tarda en ser removida y llega a un valor de 100 mg/L cuando llega el día 5, en tanto que la generación de lodos es considerable y su producción empieza desde el primer momento que se ingresa a la laguna.

**Fig.3.10**

*Simulación generada a partir de la constante cinética en condiciones aireadas y la relación entre la DBOU y DBO5 encontrada en el laboratorio.*



*Nota.* Gráfico generado a partir del modelo matemático Bemister con datos propios de la laguna excepto del cambio de la constante cinética para un medio aerobio.

Al inyectar aire para favorecer el proceso de degradación biológica, la remoción de la DBO se lo hace en un periodo corto de tiempo a diferencia del medio anaerobio, disminuyendo también la DBO en el efluente, pero produciendo mayor cantidad de lodos.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se concluye en base a la experimentación de campo que, la transferencia de oxígeno disuelto es influenciada por la cantidad de sedimentos que se encuentra en el agua residual, en el supuesto caso de cubrir la totalidad de la laguna, probablemente no realice la remoción adecuada de contaminantes orgánicos. En tanto, si se emplea un difusor, se intensifica el flujo de aire y se remueve el exceso de los lodos cada cierto tiempo, el sistema removerá los contaminantes orgánicos eficientemente.
- La potencia requerida para inyectar oxígeno a la laguna es directamente proporcional a la concentración de oxígeno disuelto que se desea mantener en la laguna, por ende, esto afectará también el costo operativo del sistema.
- La DBOU encontrada para el dimensionamiento del sistema es de 435 mg/L y la constante cinética  $K$  ( $\text{día}^{-1}$ ) es de 0.4818, esto en base a los ensayos de laboratorios empleados en este trabajo y al promedio de los resultados generados por el método logarítmico y mínimos cuadrados, no obstante, se recalca que las muestras tomadas para este ensayo no fueron refrigeradas a 4 grados centígrados como recomienda el Stándar Methods, por tal, existe posibilidad de desviación con respecto a este valor.
- La sensibilidad de la ecuación 4 con el objetivo de determinar la potencia necesaria del compresor es alta y una mala selección de los factores que la componen desencadena un subdimensionamiento o sobredimensionamiento en el equipo, esto ocurre porque varios de los factores que se emplean para generar la ecuación 4 son sensibles a la

temperatura, algunos ejemplos son el factor de corrección theta, la profundidad en la cual se satura el agua residual y también a la concentración de oxígeno disuelto mg/L que se desea mantener en la laguna.

- El diámetro y velocidad deben ser los apropiados para el transporte de aire en las tuberías, además se necesita mantener la presión para inyectar la cantidad de aire requerida por el agua residual. También es necesario disminuir la fricción generada por los dispositivos y tuberías, por ende, la caída de presión en el sistema debe minimizarse, en este caso, se prefiere el diámetro interno de 10.4 pulgadas y 13.42 m/s para las tuberías principales y 2.8 pulgadas con 8.54 m/s en las tuberías directamente conectadas a los difusores, pues cae en el rango sugerido para el diseño de tuberías de la tabla 1.4.
- El costo operativo mensual es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno que se desea mantener en la laguna, sin embargo, estos valores pueden disminuirse si se considera periodos intermitentes de aireación para disminuir el costo de funcionamiento.
- La longitud de tuberías y el número de difusores son directamente influenciados por la capacidad misma de los difusores de transferir oxígeno al agua, esto depende de la porosidad del dispositivo, en este caso, gracias al valor del porcentaje de transferencia de oxígeno (SOTE) se consideró que el difusor más apropiado es plato de cerámica por tener un número reducido en comparación a los demás.
- La longitud de la tubería no afecta drásticamente en la caída de presión, sin embargo, esto es congruente cuando se ha seleccionado el diámetro óptimo.

## Recomendaciones

- Es recomendable no escoger un diámetro interno de las tuberías de alimentación menor a los 200 mm, esto con el fin de prevenir daño a los dispositivos conectados a la tubera por la caída de presión y disminuir riesgo de sufrir una ruptura producto de la sobrepresión.
- Se recomienda realizar más ensayos de laboratorio en base al Standard Methods para la caracterización de las aguas residuales con el fin de validar los resultados de laboratorio, asegurándose que estos son correctos para el posterior dimensionamiento de los equipos.
- Se recomienda tomar más mediciones con el fin de obtener la tendencia de los valores alfa y beta obteniendo así resultados más precisos para el dimensionamiento del compresor o ventilador.
- Evaluar el intervalo de confianza del método logarítmico para validar la significancia del coeficiente de regresión  $b_1$  y  $b_0$ , en la descripción del modelo logarítmico.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Gobierno de la República del Ecuador, (s,f). Misión Agua para todos llega a Santa Elena para mejorar la calidad de vida de más de 57000 habitantes. Gobierno del Encuentro, <https://www.vicepresidencia.gob.ec/mision-agua-para-todos-llega-a-santa-elena-para-mejorar-la-calidad-de-vida-de-mas-de-57-000-habitantes/>
- Karmoker J, Kumari S, Kumer B, Sorowar S, Rahman A, Rahaman H, y Islam R, Characterization of wastewater from Jhenaidah municipality area, Bangladesh: A combined physico-chemical and statistical approach, *Environmental Science*, 3(4): 739-751, 10.3934/environsci.2018.6.389
- Metcalf and Eddy (1995), INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACION. España: Interamericana McGraw-Hill.
- Romero J (2004). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES teoría y principios de diseño, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- APHA/AWWA/WPCF. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23<sup>th</sup> Ed. American Public Health Association, New York, Washington, D. C.
- Ciencias de la Vida SINC (17 de marzo de 2017), El Fosforo ha pasado de ser un nutriente a ser un contaminante global. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-fosforo-ha-pasado-de-ser-un-nutriente-a-ser-un-contaminante-global>
- Rumana R (2012), Fundamental of Wastewater treatment and Engineering, IWA.
- Mara D, Horan N (2002), Handbook of Water and Wastewater Microbiology, United Kingdom.
- Mackenzie L (2010), WATER AND WASTEWATER ENGINEERING Design and Principles and Practice (7<sup>TH</sup> ed.). Mc Graw Hill.
- Matsumoto T, Sánchez I (Mayo 2010), EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS FACULTATIVAS E IMPLICACIONES EN LA SALUD PUBLICA, Scielo,

Volumen (12),  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072010000100009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072010000100009)

- United States Environmental Protection Agency (2002), Aerated, Partial Mix Lagoons, <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/apartlag.pdf>
- Cárdenas C, Perruelo T, Fernández D, Quero R, Chávez E, Saules L, Herrera L (Agosto 2002), Treatment for domestic wastewater by using aerated ponds, Scielo, Vol 25. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702002000200003](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702002000200003)
- Cárdenas L, Sánchez I (Junio, 2013), nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y salud pública. Scielo, Vol 15. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072013000100007#t01](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007#t01)
- Isea D, Vargas L, Durán J, Delgado J, Mendoza R (2015), Biokinetics parameters governing of BOD equation in a crab-processing industry wastewater, Scielo, Vol38. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702015000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702015000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Ratsey H (2019). UNDERSTANDING OXIDATION PONDS. IS DISSOLVED OXYGEN PROFILING THE KEY?. Water New Zeland, [https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment\\_id=4070](https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=4070)
- Anónimo (S.F), Diffuser Aeration Design Guide, Sanitaire, chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.webpages.uidaho.edu/ce431/Handouts/Sanitaire%20Diffused%20Air%20Design%20Guide.pdf
- Doaa M, Faten H, Ninet H, Hassen T (2012), Design and Control Strategy of Diffuser Air Aeration System, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/publication/256457780\\_Design\\_and\\_Contr ol\\_Strategy\\_of\\_Diffused\\_Air\\_Aeration\\_System](https://www.researchgate.net/publication/256457780_Design_and_Contr ol_Strategy_of_Diffused_Air_Aeration_System)
- Aparici J (2019), ESTUDIO Y OPTIMIZACION DE LA EFICIENCIA EN LA TRANSFERENCIA DE OXIGENO PARA PARRILLAS DE DIFUSORES PARA REACTORES BIOLOGICOS EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL USO DE ENSAYOS EXPERIMENTALES [Tesis de maestría], Escuela Superior de Tecnología y ciencias experimentales.

- United States Environmental Protection Agency (1989), Fine Pore Aeration Systems, Design Manual, <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/3000464S.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C86thru90%5CTxt%5C00000004%5C3000464S.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
- Turton R, Shaeiwitz J, Bhattacharyya D, Whiting W (2018), Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes (5<sup>th</sup> ed). Pearson.
- Mohinder L (2000), Piping Handbook, (7<sup>th</sup> Edition), McGraw-Hill.
- Abrego C, Briones R, Bermel L, Escalas A (2015), Evaluation of three dynamic models for Aereated Facultative Lagoon, ResearchGate, [https://www.researchgate.net/publication/282077425\\_Evaluation\\_of\\_Three\\_Dynamic\\_Models\\_for\\_Aerated\\_Facultative\\_Lagoons](https://www.researchgate.net/publication/282077425_Evaluation_of_Three_Dynamic_Models_for_Aerated_Facultative_Lagoons)