



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS).

**COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AGUA-AIRE Y LA ESTRATIFICACIÓN
TÉRMICA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA**

Inga. Ana Saraí Montoya López

Ing. Juan Francisco Gattorno Fúnez

Asesorado por el M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AGUA-AIRE Y LA ESTRATIFICACIÓN
TÉRMICA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

INGA. ANA SARAI MONTOYA LÓPEZ

ING. JUAN FRANCISCO GATTORNO FÚNEZ

ASESORADO POR EL M.SC. ING. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE
**MAESTRO/A (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	PhD. Ing. Félix Douglas Aguilar

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración nuestro trabajo de graduación titulado:

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AGUA-AIRE Y LA ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA

Tema que nos fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 08 de noviembre de 2017.

Ana Saraí Montoya López

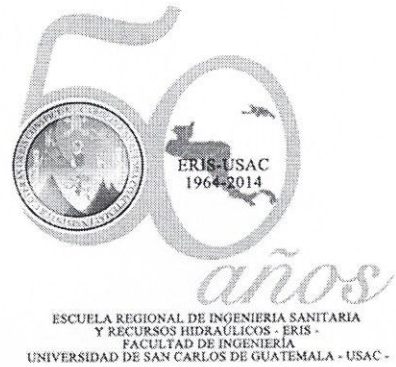
Correo electrónico:
ana.sarai22@gmail.com

Carnet No. 201790262

Juan Francisco Gattorno Fúnez

Correo electrónico:
gattorno.juan@gmail.com

Carnet No. 201790264



Guatemala, 05 de septiembre de 2018

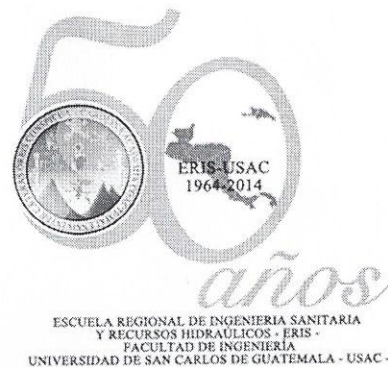
El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos y, Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Ruth Nohemí Cardona Mazariegos, Colegiada No. 12498, al trabajo de los estudiantes Inga. Ana Sarai Montoya López e Ing. Juan Francisco Gattorno Fúnez, titulado: **COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AGUA-AIRE Y LA ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala al quinto día del mes de septiembre de 2018.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



Guatemala, 04 de septiembre de 2018

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AGUA-AIRE Y LA
ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA EN UNA LAGUNA FACULTATIVA**

Presentado por los estudiantes:

Inga. Ana Saraí Montoya López y el Ing. Juan Francisco Gattorno Fúnez

Les manifiesto que los estudiantes cumplieron en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC

USAC
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos
-ERIS-

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Porque es Él quien permite cada logro en mi vida y hace manifiesta su voluntad y bendición en mi caminar.
- Mis padres** Ana Rosaura López Barahona y German Montoya Ramírez, por ser mi inspiración para buscar ser una mejor persona.
- Mi hermana** Neisy Paola Montoya López, por ser mi amiga inseparable y estar siempre para mí.
- Mi sobrina** Sofia Anahy Villalta Montoya, por ser alegría para la vida de nuestra familia y un ángel de Dios.
- Mis abuelos** Cristina Ramírez y Pedro Gómez, por ser un ejemplo de humildad y de que lo más preciado es el amor de la familia.

Ana Saraí Montoya López

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme cumplir una meta más en mi vida, por guiarme y bendecirme con su infinito amor.

Mis padres

Merlyn Aracely Fúnez, por ser mi mejor amiga, mi apoyo incondicional, una inspiración en luchar por mis sueños y alcanzar mis metas, y por todo su amor y comprensión. Y a Juan Francisco Gattorno (q.e.p.d.), por el cariño y apoyo que me brindó.

Mis hermanas

Merlyn y Gabriela Gattorno, por ser un apoyo en todo momento, por su cariño y sus palabras de aliento y motivación.

Mi abuela

Rosaura Matute, por su cariño, comprensión, alegrar mi vida con su carisma y apoyarme en momentos difíciles.

Juan Francisco Gattorno Fúnez

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Porque Él es bueno y su gran amor perdura para siempre.
Mi mamá	Ana Rosaura López Barahona, por ser mi mejor ejemplo de perseverancia, por dedicar su vida a sus hijas y por amarnos.
Mi papá	German Montoya Ramírez, por su sabiduría para tener las palabras idóneas siempre, por motivarme, apoyarme y ser un ejemplo de gentileza, bondad y amor.
Mi hermana	Neisy Paola Montoya López, por estar al pendiente de mí siempre, escucharme y comprenderme.
Mi sobrina	Sofia Anahy Villalta Montoya, por ser una motivación más en mi vida.
Familiares y amigas	Quienes me acompañaron en este proceso y me expresaron sus muestras de cariño al estar pendiente de mí, especialmente a: familia Varela López, familia López Chávez, Yamy López, Geovany López, Fanny López,

Rosa López, Brenda Gómez, Erick Gómez,
Cindy Romero e Ismelda Vijil.

**Juan Francisco
Gattorno**

Por ser un apoyo incondicional y un
compañero excepcional durante todo el
proceso de la maestría.

DAAD

Por depositar su confianza en mí y
apoyarme económicamente para lograr esta
meta.

ERIS-USAC

A los maestros y compañeros, quienes
contribuyeron en mi formación y tuvieron
gestos de amabilidad, gentileza y calidad
humana.

Muchas gracias.

Ana Saraí Montoya López

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Porque por su voluntad y fidelidad estoy alcanzando un paso más en mi vida profesional.
Mi mamá	Merlyn Aracely Fúnez, por apoyarme, estar pendiente de mí, motivarme y mostrarme su amor.
Mis hermanas	Merlyn y Gabriela Gattorno, por ser una motivación de superación y tenerme en sus oraciones.
Familiares y amigos	Quienes estuvieron al pendiente de mí durante este proceso, dándome palabras de ánimo y fortaleza.
Ana Saraí Montoya	Por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante todo el proceso de maestría.
DAAD	Por el apoyo económico que me brindaron para mis estudios de posgrado.

ERIS-USAC

A los maestros, compañeros, y personal administrativo que con su gestión, colaboración y empeño contribuyeron en el proceso de formación.

Juan Francisco Gattorno

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIX
JUSTIFICACIÓN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
HIPÓTESIS	XXV
ANTECEDENTES	XXVIII
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXXI
INTRODUCCIÓN	XXXIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Temperatura en lagunas de estabilización	1
1.1.1. Importancia de la temperatura en lagunas	1
1.1.2. Temperatura de diseño	3
1.1.3. Correlaciones de temperatura del aire vs. temperatura del agua	4
1.2. Comportamiento hidráulico y estratificación térmica en lagunas de estabilización	8
1.2.1. Características hidráulicas	8
1.2.2. Ensayo de trazadores	13
1.2.3. Ocurrencia de estratificación térmica en lagunas ...	16
1.2.4. Efecto de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de lagunas	20

2.	METODOLOGÍA	23
2.1.	Descripción del sitio de estudio	23
2.2.	Descripción de la unidad experimental.....	25
2.2.1.	Diseño de la laguna facultativa piloto	25
2.2.2.	Configuración y aspectos constructivos	27
2.2.3.	Condiciones de operación	28
2.3.	Procedimiento experimental.....	29
2.3.1.	Parámetros analizados.....	29
2.3.2.	Medición de temperatura.....	29
2.3.2.1.	Puntos de recolección de datos de temperatura.....	30
2.3.2.2.	Equipo de medición.....	33
2.3.3.	Prueba de trazador.....	34
2.3.3.1.	Puntos de muestreo del trazador	38
2.3.3.2.	Equipo de medición.....	39
2.4.	Procesamiento de datos y análisis estadístico.....	39
2.4.1.	Análisis descriptivo de los datos de temperatura	39
2.4.2.	Análisis de correlación entre datos de temperatura del agua y temperatura del aire.....	41
2.4.3.	Análisis de regresión de temperatura de agua y ambiente.....	43
2.4.4.	Contraste de hipótesis para comparaciones de la temperatura	45
2.4.5.	Estratificación térmica en la laguna facultativa.....	46
2.4.5.1.	Cálculo del gradiente térmico.....	46
2.4.5.2.	Tiempo de estratificación	47
2.4.6.	Análisis de datos prueba de trazadores	47

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1.	Correlación de equipo de medición de temperatura HOBO con estación automática.....	51
3.2.	Correlación de mediciones de temperatura en la entrada, centro y salida de la laguna.....	52
3.3.	Comportamiento de la temperatura media del agua y aire.....	55
3.3.1.	Patrón de comportamiento entre la temperatura del aire-agua.....	58
3.3.2.	Diferencias entre la temperatura media del agua y temperatura del aire.....	60
3.4.	Correlación y modelo de regresión para la temperatura media de la laguna y la temperatura del aire.....	64
3.5.	Estratificación térmica en la laguna piloto.....	71
3.5.1.	Influencia de las condiciones climáticas en la formación de la estratificación térmica.....	73
3.5.2.	Patrones de estratificación.....	80
3.5.3.	Variación de la profundidad de la termoclina.....	82
3.5.4.	Ubicación del dispositivo de salida en función de la termoclina.....	89
3.6.	Influencia de la estratificación en el comportamiento hidráulico de la laguna.....	90
3.6.1.	Interpretación de parámetros hidráulicos.....	90
3.6.2.	Implicaciones del cloruro de sodio en la temperatura y estudio hidráulico de las lagunas.....	95
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	APÉNDICE.....	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curvas de ensayos de trazadores para diferentes valores de dispersión.....	13
2.	Ubicación del sitio de estudio.....	24
3.	Esquema de laguna piloto.....	26
4.	Laguna facultativa primaria piloto. a) durante el proceso de construcción b) unidad construida.....	28
5.	Ubicación de la estación meteorológica automática.	31
6.	Ubicación de los registradores de datos.	32
7.	Gráfico y ecuación de conversión de CE a concentración de NaCl.	38
8.	Comparación de temperatura entre dispositivos de medición.....	52
9.	Correlaciones de temperatura entre pedestales	53
10.	Variación de la temperatura del aire y la temperatura media de la columna de agua, en el período el 24 de enero al 31 de mayo.....	56
11.	Temperatura media del aire y de la laguna, para condiciones frías (a) y cálidas (b).....	57
12.	Desfase temporal entre las temperaturas máximas y mínimas del aire.	60
13.	Distribución de frecuencia de la diferencia entre la temperatura media de la laguna y temperatura del aire.	62
14.	Horas del día donde la temperatura del aire es mayor a la temperatura media de la laguna, para el periodo del 25 de enero al 31 de mayo	63
15.	Gráfico de dispersión para correlación de valores promedios horarios (a) y diarios (b).	65

16.	Línea de mejor ajuste para los datos promedios semanales, a partir de las temperaturas de toda la profundidad.....	66
17.	Línea de mejor ajuste para los promedios semanales, a partir de las temperaturas superficiales de la laguna.	68
18.	Comparación de modelos de regresión calculados con modelos existentes en la literatura	70
19.	Porcentaje del tiempo donde la laguna estuvo estratificada con gradiente $>1^{\circ}\text{C}$	72
20.	Registros de radiación solar y velocidad del viento entre el 1 de febrero al 31 de mayo del 2018	74
21.	Registros de temperatura a diferentes profundidades, para períodos de estratificación térmica diarios.....	76
22.	Registros de temperatura a diferentes profundidades, para períodos de estratificación térmica continua.....	78
23.	Registro de temperatura del caudal de entrada en la laguna.	80
24.	Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de febrero	85
25.	Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de marzo...	86
26.	Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de abril.....	87
27.	Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de mayo	88
28.	Curva de concentración vs. tiempo, primer ensayo.	91
29.	Estratificación durante la prueba No. 1	91
30.	Curva de concentración vs. tiempo, segundo ensayo.....	92
31.	Relación entre la temperatura y la concentración de NaCl.	96
32.	Efecto de la variación de la temperatura durante el segundo ensayo con el trazador NaCl.	99

TABLAS

I.	Correlaciones entre la temperatura del agua y la temperatura del aire.	5
II.	Clasificación para el grado de dispersión de reactores.....	12
III.	Características físicas y operacionales de laguna facultativa piloto.....	25
IV.	Metodología de análisis aplicada para los parámetros estudiados.	29
V.	Resumen de ensayos pruebas de trazadores.....	36
VI.	Orden de los datos de las pruebas de trazadores, para los cálculos hidráulicos	50
VII.	Comparación de temperaturas medias del aire medidas con datos históricos	58
VIII.	Cálculos estadísticos de regresión lineal	66
IX.	Comparación de temperaturas del agua con modelos encontrados en la literatura	69
X.	Condiciones climáticas y períodos de estratificación de febrero-mayo	74
XI.	Días de cada mes con patrones de estratificación.....	81
XII.	Ubicación de la termoclina cada mes expresado como porcentaje del tiempo	83
XIII.	Parámetros hidráulicos calculados.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
"	Pulgadas
%	Porcentaje
±	Más/menos
Δt_i	Incremento de tiempo respecto
Σ	Sumatoria
°	Grados
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
$\mu\text{S/cm}$	MicroSiemens por centímetro
APHA	Asociación Americana de Salud Pública
CE	Conductividad eléctrica
C_i	Concentración en la i-ésima medición
d	Número de dispersión
DBO_5	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
dgt	Dígito
DQO	Demanda química de oxígeno
DTR	Tiempo de residencia
Ed	Estratificación diaria
E_m	Estratificación mensual en días
g/L	Gramo por litro
g/mol	Gramos por mol
G_T	Gradiente térmico
h	Hora

H₀	Hipótesis nula
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala
iOS	Sistema operativo móvil de la multinacional Apple Inc.
Kg	Kilogramos
Kg/L	Kilogramo por litro
km/h	Kilómetro por hora
kt (viento)	Nudo, medición velocidad del viento
L	Litro
L/s	Litros por segundo
LCD	Sistema de representación visual por cristal líquido
M	Masa
m	Metro
m/s	Metro por segundo
m³	Metro cúbico
m³/día	Metro cúbico por día
Máx	Valor máximo
Min	Minutos
Mín	Valor mínimo
mm	Milímetro
mm/hr	Milímetro por hora
mph	Metro por hora
mph/kts	Metros por hora por nudo
mS	MiliSiemens
m_{T,out}	Masa recuperada del trazador
n	Número de ensayos o datos
NaCl	Cloruro de sodio
N_{SCTR}	Número de reactores
°C/m	Grado centígrado por metro

PVC	Policloruro de vinilo
Q	Caudal
Qa	Caudal activo
r	Correlación muestral de Person
T	Tiempo de retención hidráulico teórico o temperatura
T(x-0.25)	Temperatura a la profundidad X menos 0.25 metros
TDS	Total de sólidos disueltos
\bar{t}	Tiempo real medio de residencia
ti	Tiempo en la i-ésima medición
TRH, τ	Tiempo de retención hidráulico
Tx	Temperatura a la profundidad X
UV	Ultravioleta
V	Volumen
Va	Volumen activo
Vd	Volumen muerto
VR	Volumen del reactor
W/m²	Vatios por metro cuadrado
X, X_i	Variable X, valor i-ésimo de X
xls	Extensión de archivos de Microsoft Excel
Y, Y_i	Variable Y, valor i-ésimo de Y
α	Nivel de significación
σ	Desviación estándar
σ^2	Varianza
$\sigma_{\theta 2}$	Forma adimensional de la varianza
ϕ	Índice de cortocircuitos
\bar{X}	Media
%Em	Porcentaje de estratificación mensual

GLOSARIO

Aforo	Determinación del caudal que ingresa a la unidad de tratamiento.
Aguas residuales	Cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por la influencia antropogénica.
Aparatos de registro de datos	Aparato electrónico configurado para hacer lecturas y almacenar datos de temperatura o conductividad.
Bluetooth	Especificación industrial para redes inalámbricas.
Caudal	Volumen por unidad de tiempo.
Clima	Condiciones de la atmósfera que influyen sobre una determinada zona.
Concentración	Cantidad de masa por unidad de volumen.
Conductividad eléctrica	Capacidad para conducir electricidad.
Corto circuito hidráulico	Parte del flujo que entra la una unidad de tratamiento y sale instantáneamente.

Demanda Bioquímica de Oxígeno	Cantidad de oxígeno requerido para degradar la materia biodegradable, transcurridos 5 días desde que inicia la reacción de oxidación.
Efluente	Agua tratada que sale de la planta de tratamiento.
Epilimnio	Agua por encima de la termoclina en una masa de agua estratificada.
Espacio muerto	Zona donde el fluido permanece retenido por cierto tiempo.
Estación meteorológica automática	Es un equipo de adquisición de datos en el que los instrumentos efectúan, almacenan y transmiten las observaciones de forma automática, sin necesidad de la presencia de personal.
Estratificación térmica	Variación de temperatura en el agua igual o mayor a 1°C/m.
Flujo pistón	Circulación de la mezcla reaccionando por un tubo con perfil radial.
Gradiente térmico	Variación de la temperatura respecto a la profundidad de la laguna.
Hipolimnio	Agua por debajo de la termoclina en una masa de agua estratificada.

Inyección de impulso	Vertido instantáneo de un trazador en un reactor.
Laguna a escala piloto	Laguna a escala reducida.
Laguna facultativa	Lagunas que poseen una zona aerobia y una zona anaerobia.
Mezcla completa	Mezcla homogénea y flujos continuos de entrada y salida del reactor.
Parámetro de agua	VARIABLES o características físicas, químicas o microbiológicas del agua.
Prueba de trazadores	Ensayo con sustancia química que es agregada a un fluido para seguir su movimiento en la unidad de tratamiento.
Radiación solar	Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol.
Reactor	Unidad de tratamiento a la que ingresa el agua residual y sufre transformaciones físicas, químicas y/o biológicas.
Régimen o patrón hidráulico	Conjunto de variaciones del estado y de las características hidráulicas que se repiten regularmente en el tiempo y el espacio.

Solución estándar	Sustancia que contiene una concentración conocida de un elemento o compuesto.
Temperatura	Magnitud física que refleja la cantidad de calor de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.
Termoclina	Capa en que la temperatura desciende bruscamente con la profundidad en un cuerpo de agua.
Tiempo de retención hidráulico	Tiempo de residencia de las moléculas del líquido en el reactor.
Total, de sólidos suspendidos	Residuos no filtrables de una muestra de agua.
Trazador	Sustancia química conservativa utilizada para la evaluación del comportamiento hidráulico en lagunas.
Viento	Movimiento del aire presente en la atmósfera por causas naturales.
Volumen activo	Volumen efectivo de tratamiento en una unidad.
Volumen muerto	Volumen total de una unidad de tratamiento menos el volumen activo.

RESUMEN

El comportamiento de la temperatura, así como el fenómeno de estratificación térmica y su efecto en el comportamiento hidráulico en una laguna facultativa a escala piloto fueron investigados en este estudio. Sensores fueron ubicados en la parte interior y exterior de la laguna, para medir las variaciones de temperatura continuamente a intervalos de 30 minutos, mientras que ensayos de trazadores con la técnica estímulo-repuesta fueron realizados para determinar los tiempos de retención hidráulicos usando cloruro de sodio (NaCl).

Los resultados mostraron una buena correlación entre la temperatura media del agua y temperatura media del aire ($R^2=0.8714$), así como un alto nivel de estratificación en la laguna, la cual estuvo bajo esas condiciones durante el 79.62 % del tiempo de estudio. Los tiempos de retención hidráulicos de la laguna fueron mayores que los esperados en todos los casos, y parecen no haber estado sujetos a cortos circuitos hidráulicos producto de los largos períodos de estratificación; sin embargo, se encontró que la densidad y cantidad del trazador pudieron tener una marcada influencia en los resultados y que el uso de NaCl como trazador en reactores profundos como lagunas facultativas podría no ser adecuado. De esta manera, un modelo de regresión entre las temperaturas agua-aire fue encontrado, así como información sobre el estado térmico de la laguna. Además, se discuten las posibles implicaciones de usar cloruro de sodio en el estudio de comportamiento hidráulico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, se carece de un modelo propio para predecir, el comportamiento de la temperatura de agua, a partir de la temperatura del aire, teniendo que recurrir a los diversos modelos matemáticos existentes. La temperatura es un parámetro de suma importancia en las lagunas de estabilización, las cuales son tecnologías de tratamiento altamente utilizadas en la región y al usar como referencia modelaciones desarrolladas en países con condiciones climáticas diferentes o incluso no representativas de este país, puede inducir al uso inadecuado de estimaciones para estudios de diseño o de evaluaciones del desempeño de las unidades de tratamiento mencionadas.

A parte que la información existente relacionada al tema se ha hecho con base a condiciones climáticas disímiles, se ha encontrado además que los estudios de comportamiento hidráulico y evaluación de las variaciones de temperatura que intervienen en la eficiencia de los procesos de las lagunas como: tiempo de retención hidráulico, condiciones de mezcla, remoción de DBO_5 , actividad biológica, velocidad de fotosíntesis, digestión de lodos, transferencia de oxígeno, entre otros; se han realizado por intervalos cortos de tiempo o en forma puntual.

Con base a lo anterior, se carece de fundamento teórico y práctico suficiente para hacer estimaciones reales de la temperatura del agua de las lagunas facultativas, a partir de la temperatura del aire, que permita mejorar los criterios de diseño y operación, para minimizar al máximo posible las consecuencias adversas de las oscilaciones de temperatura para este tipo de tratamiento.

JUSTIFICACIÓN

La eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales debe ser tal que cumpla con los requerimientos legales del país en pro de la protección del medio ambiente, para el caso de Guatemala se encuentra el reglamento de las descargas, reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos que define los parámetros a regular, Acuerdo Gubernativo 236-2006; estos sistemas deben ser sostenibles y se deben emplear tecnologías amigables para su mantenimiento y operación, la inversión debe ser alcanzable y las eficiencias deben ser altas, por lo tanto, se deben considerar con sumo cuidado aspectos de diseño, operación y mantenimiento que puedan impactar económicamente ya sea por requerimientos de área, equipos, etc. Es conocido que las lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento ampliamente utilizados en la región y que la temperatura es un parámetro que brinda pautas sobre su eficiencia, por lo que su conocimiento exhaustivo y detallado es importante, para garantizar un proceso óptimo, acorde a la ley nacional y a las necesidades de la población.

Resulta necesario contar con un modelo matemático propio que establezca una relación entre las variables temperatura del aire que usualmente es conocida y monitoreada y la temperatura del agua en lagunas de estabilización, aplicable a áreas con temperaturas medias mensuales del aire entre 17°C y 24°C, y que además pueda servir como un insumo de referencia en el diseño de sistemas lagunares eficientes.

Además, el estudio del comportamiento de la temperatura permite conocer de forma más detallada el fenómeno de estratificación térmica en las diferentes estaciones del año comprendidas en el período de estudio, así como su duración, frecuencia y los patrones que sigue, aportando de esta manera información

valiosa acerca del estado de las lagunas bajo estas condiciones, lo cual desempeña un papel importante en la evaluación de la calidad del agua en el efluente, operación y mantenimiento de estos sistemas.

OBJETIVOS

General

Determinar la relación entre la temperatura del agua y aire, y el comportamiento de la estratificación térmica en una laguna de estabilización facultativa primaria.

Específicos

1. Determinar la ecuación que relacione los valores de la temperatura del aire y la temperatura media del agua en la laguna de estabilización.
2. Evaluar la frecuencia y duración de la estratificación térmica, para los intervalos de tiempo en forma horaria, diaria y mensual.
3. Clasificar la estratificación térmica de acuerdo a los patrones observados.
4. Determinar la altura óptima del dispositivo salida con base a las condiciones de estratificación térmica.
5. Evaluar el comportamiento hidráulico en función de la estratificación térmica usando cloruro de sodio como trazador.

HIPÓTESIS

Las temperaturas medias agua-aire de una laguna facultativa presentan una correlación con un coeficiente de determinación de al menos 0.80, al obtener ecuaciones de cálculo de la temperatura media del agua, a partir de temperaturas medias mensuales del aire entre 18-23°C; las variaciones de estas temperaturas dan lugar a una duración de la estratificación térmica superior al 50 % del tiempo, con un patrón predominante estratificado durante el día y mezclado durante la noche.

ANTECEDENTES

Los cambios de temperatura en las lagunas facultativas pueden darse en mayor medida, debido a las variaciones de la radiación solar y condiciones de viento, dichos cambios dan lugar a que ocurra el fenómeno de estratificación térmica, caracterizado por la formación de dos capas en la masa de agua, una superior llamada epilimnio y otra inferior llamada hipolimnio, las cuales no se mezclan y se dividen por un estrato que presenta un gran descenso de temperatura con la profundidad llamado termoclina (Sperling 2007, Mara 2003). En Guatemala, no se ha realizado un estudio de temperatura y su relación con la estratificación térmica y el efecto de estos factores sobre las características hidráulicas de los sistemas de lagunas facultativas primarias.

Abis & Mara (2006) encontraron correlaciones lineales entre la temperatura media del agua y del aire en un rango de 3-18 °C al realizar mediciones de temperatura en tres lagunas facultativas a escala piloto en el Reino Unido; además, pudieron concluir que las lagunas se encontraban la mayor parte del tiempo estratificadas al igual que en climas cálidos, sugiriendo que no había mezcla gran parte del tiempo bajo estas condiciones, lo cual no pareció deberse al caudal del afluente ni velocidad del viento, más bien los cambios en la temperatura del aire. No obstante, de acuerdo a sus comentarios el excelente rendimiento en la calidad del efluente resultante sugiere que la estratificación puede ser beneficiosa para el tratamiento. Cabe destacar que el caudal entrante a la laguna se realizó por la parte inferior, pudiendo influir en el comportamiento de la estratificación caracterizada, lo que difiere en su mayoría de Guatemala y Centro América, donde las lagunas convencionales presentan un funcionamiento en su mayor parte realizando la descarga en la parte superficial de las mismas.

Yáñez (1993) por otra parte, presenta una serie de modelos matemáticos para determinar la relación temperatura agua-aire desarrollados en países con climas tropicales, señalando que estos deben usarse bajo condiciones climáticas similares y su variación en función de la latitud.

En climas como Novo Horizonte, Brasil con temperaturas medias mensuales entre 22.8 y 26.1°C se ha encontrado que la estratificación térmica ha dado lugar a la presencia de zonas muertas, números de dispersión altos y corto circuitos, al hacer la evaluación teórica y experimental de una laguna de estabilización sobre cómo influye este fenómeno en el comportamiento hidráulico (Kellner, João Fernandes & Pires, 2009), ya que se observaron períodos de mezcla principalmente durante la noche que dieron como resultado la homogeneización térmica de las unidades. Además, se observó que la estratificación térmica influenció el transporte del trazador en el interior de la laguna, formando capas con diferentes concentraciones a lo largo de la profundidad en los tres ensayos hidrodinámicos que se realizaron. Los resultados de las pruebas de trazadores indicaron que los tiempos de retención hidráulicos reales fueron menores a los teóricos, que las características hidráulicas del comportamiento de las lagunas mostraron mezcla completa, y que el volumen activo estuvo entre 25.4 y 61.4 %.

Gu & Stefan (1995) caracterizaron la dinámica de la estratificación térmica en lagunas de estabilización en Estados Unidos al desarrollar un modelo matemático para simularla, a partir de la recolección de datos de temperatura, clasificándola en tres tipos, cuando ocurre mezcla completa durante el día y la noche en forma consecutiva, estatificado durante el día y mezclado durante la noche y continuamente estratificado durante varios días y noches. Estos patrones de estratificación pueden mostrar una variación espacio-temporal en la región dada las diferencias climatológicas.

Diversos estudios sobre temperatura en lagunas de estabilización han indicado que el fenómeno de estratificación tiene una influencia importante en el tiempo de retención hidráulico de las lagunas de estabilización, al impedir la mezcla vertical de la masa de agua que hace que disminuya su volumen útil disponible y crea zonas muertas a lo largo de su profundidad, provocando de esta manera una disminución de la eficiencia del tratamiento (Kellner & Pires, 1998,1999,2009). Sin embargo, poco es conocido acerca del tema en estudios que involucren mediciones continuas de temperatura en intervalos cortos y períodos de tiempo mayores en condiciones climatológicas similares a las de Guatemala, con temperaturas medias mensuales entre 18.10 y 21.20 °C a lo largo del año.

ALCANCES Y LIMITACIONES

La investigación comprende el estudio de la temperatura del aire y de la temperatura del agua en una laguna de estabilización facultativa primaria piloto durante el período del 24 de enero al 15 de julio en la ciudad de Guatemala; a partir de los datos recolectados, se aplicó la estadística descriptiva para visualizar el comportamiento de los datos, a través de medidas de tendencia central y de dispersión, se hizo prueba de hipótesis y se aplicó la estadística correlacional aplicando un modelo de regresión y calculando la correlación que hay entre los datos, obteniendo así una ecuación aplicable a condiciones climáticas similares que permite estimar la temperatura del agua como variable dependiente de la temperatura del aire; también se analiza los posibles patrones de la temperatura en el intervalo de tiempo en que se intervino.

La información recolectada fue la base para el análisis de la estratificación térmica en la laguna, fenómeno que es producto de las variaciones de temperatura y se sugiere podría afectar el comportamiento hidráulico de la laguna, por lo cual se realizó un análisis con dos pruebas de trazadores utilizando cloruro de sodio como trazador.

Entre las limitaciones se tienen:

- El estudio fue realizado en una laguna piloto de 27.13 m² de área superficial, es posible que los resultados difieran en lagunas con mayores dimensiones de área.
- La prueba de trazadores se realizó con cloruro de sodio por ser de fácil detección con la utilización de un conductivímetro, sin embargo, hay trazadores más precisos como la rodamina WT, el cual no se pudo utilizar

por carecer de un fluorómetro que detecta la concentración de este tipo de trazadores.

- La ecuación encontrada es aplicable a climas con temperaturas medias mensuales entre 17 y 24 °C.
- El tiempo de desarrollo del estudio fue limitado a 6 meses. Se considera valioso haber realizado el estudio por al menos un año para contar con datos de todos los meses para el análisis; además cuando se realizan pruebas de trazadores se debe considerar la repitencia de los ensayos, debido a las variaciones de las condiciones climáticas que pueden alterar significativamente los resultados y por lo que, al realizar más pruebas, se puede constatar del comportamiento usual que deberá tener.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas son más sencillas de diseñar, construir, operar y mantener que cualquier otro proceso de tratamiento, además se requiere mucho menos inversión (Oakley, 2005). Lo anterior explica el por qué son ampliamente utilizadas en países en desarrollo como Guatemala, garantizar el funcionamiento eficiente de los sistemas de depuración de las aguas residuales es una responsabilidad municipal y de todo aquel involucrado en el diseño, operación y mantenimiento de los mismos, con el fin de cumplir con los requerimientos de descarga a los cuerpos receptores y en general para tomar acciones de protección del medio ambiente y el bienestar social.

La temperatura juega un papel decisivo en el diseño y desempeño de las lagunas de estabilización. Los procesos de estabilización de la materia orgánica, la asimilación y crecimiento bacteriano son dependientes de este parámetro, el conocimiento de esta variable en la masa de agua puede disminuir los requerimientos de área disponible, así como aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes y hacer factible los procesos de tratamiento naturales por medio de lagunas (Yáñez, 1993).

Por lo antes expuesto, es de suma relevancia contar con datos de temperatura del agua de las lagunas en función de la temperatura del aire que es un dato meteorológico que las instituciones competentes monitorean con regularidad, así se podrían estimar y predecir comportamientos en el desempeño de las lagunas que están estrechamente relacionados a las temperaturas locales de cada región, siendo uno de los objetivos de este estudio encontrar una ecuación que relacione ambas variables al encontrar una correlación alta con datos de temperatura recopilados durante casi 6 meses en intervalos de tiempo

de 30 minutos y tomados con sensores de temperatura, tanto en el agua como en el aire, también se toman datos de temperatura del aire con una estación meteorológica automática.

Por otra parte, las variaciones de temperatura en el agua afectan el fenómeno de estratificación térmica en las lagunas, en el cual la capa más superficial y caliente no se mezcla con la más profunda y fría, formándose una capa central donde se da un cambio brusco de temperatura llamada termoclina, esto influye en el desempeño de la laguna en la formación de corto circuitos, zonas muertas, des homogenización de la distribución vertical de la DBO_5 , transporte de algas y oxígeno, actividad bacteriana, etc. (Von Sperling, 2007). En el presente estudio, se analiza los períodos de estratificación de manera diaria y mensual con variaciones de temperatura de al menos $1^{\circ}C/m$, y se relaciona con características hidráulicas para conocer su influencia sobre éstas, se realizaron dos pruebas de trazadores con cloruro de sodio empleando la técnica de estímulo respuesta propuesta por Levenspiel (1999), específicamente por inyección de impulso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Temperatura en lagunas de estabilización

Las lagunas facultativas son sistemas de agua naturales poco profundos (1.5 -2.0 m) por lo general reciben aguas residuales con grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes. Dentro de estos sistemas, ocurre una serie de procesos complejos de reacciones físicas, químicas y bioquímicas, que dan lugar al crecimiento de microorganismos, los cuales a su vez se encargan de estabilizar los desechos presentes. Tales procesos, se ven influenciados por distintos factores ambientales, de los cuales la temperatura es el más crucial.

1.1.1. Importancia de la temperatura en lagunas

Temperaturas cálidas mejoran los procesos de conversión, aumentan la eficiencia de remoción y ayudan a disminuir los requerimientos de área necesarios, haciendo que el tratamiento por lagunas en muchos casos sea factible (Sperling, 2007; Yáñez, 1993). El aumento de la temperatura en 10 °C puede llegar a aumentar la actividad biológica en cerca del 57 % o causar su reducción en proporciones similares cuando se produce una caída de la temperatura en la misma magnitud (Metcalf y Eddy, 2003).

Dentro de los procesos más importantes de los cuales la temperatura es responsable son: la velocidad de fotosíntesis, tasa de mortalidad bacteriana y condiciones de mezcla dentro de una laguna, así como la regulación de presencia de formas de vida, digestión de los lodos y transferencia de oxígeno. Las algas presentan su máximo crecimiento en un rango de temperatura entre los 25-30 °C disminuyendo la actividad fotosintética por encima de los 35 °C, puede llegar a

inhibirse totalmente (Yáñez, 2003). Con el aumento de la temperatura las algas verdes (Chlorophytas) disminuyen y las Euglenas (Euglenophytas) predominan, con temperaturas por encima de los 35 °C prevalecen las algas verdes (Cyanophitas) y oscillatorias (Mendoca, 2000).

De igual manera la tasa de descomposición bacteriana está asociada con las altas temperaturas a las que puede estar expuesta una laguna. Durante las horas de mayor insolación solar se produce un aumento de la temperatura, ocasionando un rápido incremento en velocidad los procesos de fotosíntesis de las algas, estas al no satisfacer su demanda de CO₂ que normalmente es suplido por las bacterias, causan un desequilibrio en los iones de carbonato-bicarbonato causando su disociación y liberando iones de hidróxido (OH⁻) que se acumulan y elevan el pH a valores tan altos como pH ≥ 9.4 o pH > 10, estos valores no permiten a las bacterias mantener su pH óptimo intracelular de 7.4-7.7 unidades, causando su mortalidad rápidamente, especialmente cerca de la superficie de la laguna, donde se encuentran las más altas temperaturas (Mara, 2003).

Por otro lado, Mendoca (2000) señala que a temperaturas menores de 17 °C, la actividad de fermentación de los lodos no ocurre de manera significativa y que ésta aumenta en una proporción de cuatro veces por cada 5 °C de incremento de temperatura en un rango de 4-22°C.

Otro aspecto principal en el cual la temperatura tiene un efecto directo sobre el desempeño de las lagunas de estabilización son las condiciones de mezcla. A medida que la masa de agua gana calor, y en ausencia de viento o un mecanismo externo con la energía necesaria para realizar la mezcla, se produce el fenómeno de estratificación térmica, el cual no permite la mezcla ni una distribución homogénea a lo largo de la profundidad de la laguna, puede tener efectos adversos en la eficiencia del tratamiento. Debido a que el estudio de este fenómeno forma parte de uno de los objetivos principales de la investigación, una

descripción de la literatura existente acerca del tema se presenta en la sección 1.2.3.

1.1.2. Temperatura de diseño

La sección anterior, deja entrever la importancia y dependencia de múltiples factores de la temperatura, tanto en el diseño como en la operación de los sistemas de lagunas. A razón de eso, la mayoría de procesos de diseño que se han desarrollado y se encuentran disponibles en la literatura han empleado el uso de la temperatura media del aire en el período más frío y/o la temperatura media del líquido en el mes más frío. Sin embargo, la primera de ellas es la que ha predominado por años por las siguientes razones:

- Al usar la temperatura media del aire en el mes más frío, se obtiene un factor de seguridad, ya que la temperatura del agua será ligeramente más alta 2-3 ° C que la temperatura del líquido de la laguna. (Sperling, 2007).
- La obtención de la temperatura del aire se hace de registros meteorológicos históricos que son más fáciles de obtener por medio de estaciones meteorológicas cerca del sitio de proyecto o instalaciones. Por otro lado, muy difícilmente se logra contar con datos históricos de la temperatura del líquido, lo que involucraría su registro continuo en diferentes localidades, ya que ésta variable depende principalmente de las condiciones climatológicas de cada localidad.
- La falta de modelos que permitan predecir la temperatura media del líquido en función de las condiciones climáticas locales.

Una forma de obtener la temperatura mensual media del aire es la establecida por Mara (2003), el cual indica que la temperatura mensual media, es la media de los promedios entre las temperaturas máximas diarias y mínimas diarias de todos los días del mes, que usualmente se miden en una estación meteorológica.

La sensibilidad de la temperatura del líquido como función de la temperatura del aire es notoria, especialmente en lugares donde la temporada en invierno es susceptible a bajar hasta cerca de los 10 °C, lo cual representa un valor bastante bajo para climas tropicales o subtropicales. Por ejemplo, una temperatura del aire de 10 °C en el mes más frío, manteniendo una diferencia de 3 °C en relación a la temperatura de la laguna, tal como lo indica la literatura, da como resultado un factor de seguridad del 30 %. Por lo que se hace claro el impacto que esto podría generar en los costos de los proyectos. Yáñez (1993) por otra parte, destaca que un incremento de 4- 8 °C de la temperatura del agua sobre la temperatura del aire, puede reducir de manera considerable los requerimientos de área para las lagunas.

1.1.3. Correlaciones de temperatura del aire vs. temperatura del agua

Estudios de correlaciones entre la temperatura del líquido y la temperatura del aire han sido desarrollados por distintos investigadores en diferentes instalaciones y condiciones climáticas, esto con el objeto de obtener un modelo que permita predecir el comportamiento de esta variable. La tabla I, presenta un resumen de estos estudios y una revisión de cada uno de ellos se hace a continuación.

Tabla I. **Correlaciones entre la temperatura del agua y la temperatura del aire**

No.	Ecuación	R ²	Lugar	Observación
1	$T_S=9.336+0.780T_a$	0.831	Lima, Perú	-
2	$T=10.433+0.688T_a$	0.828	Lima, Perú	-
3	$T_S=10.966+0.611T_a$	0.744	Campina Grande, Brasil	-
4	$T_S=2.688+0.945T_a$	0.975	Al Samra, Jordania	-
5	$T_S=3.685+1.137T_a$	0.970	Melipilla, Chile	-
6	$T_S=-0.236+1.404T_a$	1.00	Melipilla, Chile	-
7	$T_S=12.7+0.54T_a$	-	-	Promedio de ecuaciones anteriores

Nota: T_s , temperatura media superficial; T_a , temperatura media del aire

Fuente: Adaptado de Yáñez (1993).

Uno de los estudios más importantes y que es tomado como referencia en Guatemala y Centro América fue llevado a cabo por Burgers (1982) durante los meses de marzo, abril y mayo en una laguna primaria del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) San Juan en Lima Perú. La recolección de los datos fue realizada con sensores de temperatura que fueron instalados a profundidades de 0.15, 0.30, 0.60 y 1.20 m registrando en intervalos de tiempo de 2 minutos obteniendo promedios de temperatura a cada dos horas. Este estudio encontró como resultado dos correlaciones; la primera de ellas, entre la temperatura del aire y la temperatura superficial de la laguna, y la segunda entre la temperatura del aire y la temperatura promedio obteniendo las ecuaciones (1) y (2) de la tabla I, para cada uno de los casos respectivamente. Estas ecuaciones fueron calculadas realizando mediciones a diferentes profundidades de la laguna.

Otra conclusión de Burgers (1982) fue que la temperatura de la laguna siempre excedía la temperatura ambiental, con diferencias entre 5-7 °C por la noche y llegando a ser bastante pequeña hasta las 2:00 am con una caída de 2 °C. Sin embargo, las ecuaciones, así como conclusiones reportadas fueron realizadas con mediciones continuas de temperatura durante las 24 horas del día, los datos no fueron tomados con una continuidad diaria dentro cada mes, sino más bien entre 15-16 días de cada uno de ellos, teniendo así datos del 50 % para cada mes medido, con semanas donde las mediciones se realizaban solo 1 día en algunos casos y un máximo de 4-5 días, en otros. Otro aspecto que es importante destacar, es que, los resultados fueron realizadas con mediciones en los primeros 60 cm de profundidad de la laguna. Estos factores mencionados hacen que los resultados puedan no mostrar un espectro completo de las temperaturas durante todo el período de estudio y profundidad de la laguna, así como afectar la precisión del modelo de predicción desarrollado.

Por otro lado, Yáñez (1993) reporta correlaciones realizadas en Campina Grande Brasil (Auerswald, 1978), Al Samra, Amman, Jordania (Yáñez y pescod, 1988) y dos más en Melipilla Chile (Vargas y Sanchez, 1972, 1982). El primero de ellos realizado en condiciones de clima tropical en función de la temperatura superficial de la laguna, ecuación (3) y el segundo en condiciones de clima desértico en función de la temperatura promedio de la laguna, ecuación (4). Los modelos desarrollados en Chile, a partir de promedios mensuales de los años 1972 y 1982 respectivamente fueron la ecuación (5) y (6). Yáñez (1993) señala que de las ecuaciones anteriormente mencionadas todas presentan coeficientes de correlación aceptables, con excepción del estudio desarrollado en Brasil ($r^2=0.74$) y además nota una convergencia de los gráficos entre los 15 y 17 °C, condiciones representativas de temperaturas mínimas promedios mensuales de climas tropicales y subtropicales.

Sperling, V. (2007) por su parte, calculó una ecuación basado en los valores de los estudios presentados por Yáñez (2003) y Brito *et al.* (2000) obteniendo como resultado la ecuación (7). A partir de los valores obtenidos en un rango de 20-30 °C con esta expresión, coincide con los comentarios hechos por Mara *et al.* (1997) el cual menciona que durante la temporada fría la temperatura de las lagunas se encuentra de 2-3 °C más caliente que la temperatura del aire, ocurriendo lo inverso en la temporada caliente. No obstante, Yáñez (2003), a partir de los estudios de Auerswald (1978), Bartone *et al.* (1985), Yáñez (1986) y Vargas y Sánchez (1972), sugiere lo contrario, indicando que la mayor parte del año la temperatura de las lagunas permanece varios grados arriba de la temperatura del aire, presentando diferencias menores en invierno.

A pesar que en la mayor parte de Latinoamérica las condiciones de clima predominantes son tropicales y subtropicales, estudios como el realizado por Abis & Mara (2006) reportan un mejor ajuste en las correlaciones, a partir de los promedios semanal y mensual de temperatura, en climas más templados como el de Reino Unido. Los resultados de esta investigación fueron las dos siguientes expresiones: $T = 0.959T_{ai}$, $r^2 = 0.988$ para los promedios semanales y $T = 0.907T_{ai}$, $r^2 = 0.965$ para los promedios mensuales, validas en un rango de temperatura 3-18 °C. Si bien es cierto, en Guatemala un clima tropical prevalece, lugares como los altiplanos muchas veces pueden encontrarse la mayor parte del tiempo y ser representativo de tales condiciones.

Sin embargo, las características climáticas de cada lugar difieren entre sí, la aplicación de cada uno de los modelos mencionados anteriormente se encuentra limitado a lugares que posean características similares.

1.2. Comportamiento hidráulico y estratificación térmica en lagunas de estabilización

Esta sección tuvo como objetivo revisar la información bibliográfica existente acerca de la estratificación térmica y comportamiento hidráulico en las lagunas de estabilización y la relación que existe entre ambas variables.

1.2.1. Características hidráulicas

En lagunas de estabilización, la tasa de remoción de materia orgánica sigue una reacción cinética de primer orden, en la cual, la remoción es directamente proporcional a la concentración de contaminante, a través del tiempo. De manera que, a una concentración más alta de DBO se logra una mayor tasa de remoción y lo inverso sucede en el caso contrario. Sin embargo, la concentración y distribución de las partículas que ingresan al reactor están estrechamente ligadas al régimen hidráulico bajo el cual este está funcionando. De tal manera que, en reactores con un patrón de flujo denominados “flujo pistón” caracterizados por una forma longitudinal más alargada y que permiten una mayor concentración de DBO, la cual decrece progresivamente (concentración variable a lo largo del reactor, con un valor máximo en la entrada y mínimo en la salida) presentarán mayor eficiencia de remoción que aquellos reactores de concentración homogénea o de flujo completamente mezclados, los cuales causan la rápida dispersión del contaminante entrante igualándolo a una concentración mínima. Por lo que es evidente el papel del régimen o patrón hidráulico de los reactores en la eficiencia del sistema.

Shilton y Harrison (2003) producto de investigaciones de laboratorio, pruebas de campo y el involucramiento de modelaciones computarizadas en lagunas de Nueva Zelanda, determinaron que los principales factores que afectan

los patrones hidráulicos de las lagunas de estabilización a los cuales llamaron entradas en influencias son:

- Caudal – Altas tasas de flujo aumentan el impulso en la entrada;
- Tamaño de dispositivo de entrada – dispositivos de entrada más pequeños, incrementan la velocidad y por ende, el impulso de entrada;
- Posición y orientación de la entrada – define la forma en la cual el impulso en la entrada es introducido y como resultado influencia en el patrón de flujo;
- Posición de la salida – Establece la distancia desde la entrada y, por tanto, el tiempo en el cual el flujo principal alcanzará la salida;
- Geometría de la lagunas y deflectores – tiene una fuerte influencia en los patrones de flujo y define el grado de canalización;
- Efectos de temperatura/densidad – puede influenciar la canalización y circulación del flujo principal;
- Fuerza cortante del viento – altas velocidades de viento y grandes áreas superficiales de lagunas incrementan el impulso ingresado y como resultado influencia el patrón de flujo;
- Aireadores mecánicos – si están presentes, constituyen un significativo impulso de entrada y como resultado puede tener una gran influencia en el patrón de flujo;

En lagunas de estabilización tres patrones han sido utilizados para describir el comportamiento del flujo interno, flujo tipo pistón, flujo mezclado completamente, los cuales representan condiciones ideales, y flujo disperso, el cual se encuentra en un estado intermedio, entre ambos, y describe el mejor funcionamiento de estos reactores en la práctica. Una descripción de cada uno de ellos se hace a continuación:

Flujo tipo pistón, es un flujo ideal donde las partículas entran en forma ordenada sin mezclarse con ningún otro elemento, de forma que no se produce una mezcla en la dirección del flujo o dispersión longitudinal, pero sí en la dirección perpendicular al mismo, recorriendo toda la longitud y permaneciendo en el reactor por un tiempo igual al tiempo de retención hidráulico. La concentración de las partículas varía a lo largo del eje longitudinal, pero no en los ejes perpendiculares, decreciendo progresivamente hasta llegar a su valor mínimo al salir. Un ejemplo de este tipo de reactores son lagunas con grandes relaciones de largo-ancho, donde se presentan valores de dispersión bastante bajos. En flujo completamente mezclado, las partículas entran al tanque y son completamente dispersadas a lo largo de todo el reactor, obteniendo una misma composición de sustrato en todo su volumen. De acuerdo a Levenspiel (1999), los contenidos están bien revueltos y uniformes, por lo que el fluido en la salida tiene la misma composición que el fluido en cualquier parte dentro del reactor. Este tipo de reactores también son conocidos como: reactor de mezcla inversa, reactor de tanque agitado ideal, C, CSTR o CFSTR (reactor de tanque agitado de flujo constante). Normalmente este régimen hidráulico ocurre en reactores cuadrados o circulares con flujo constante y sin recirculación. El diseño de lagunas aireadas usualmente se realiza bajo este patrón de flujo.

Los dos modelos descritos anteriormente, se consideran ideales, debido a que, en la realidad, presentan desviaciones respecto a sus patrones de flujo, las cuales llevan a una reducción del volumen del fluido, debido a cortos circuitos hidráulicos, causando una disminución del tiempo que las partículas necesitan para ser tratadas, más conocido como tiempo de retención hidráulico (TRH) dado por la expresión (1), donde se considera que las partículas del contaminante recorren cada espacio del volumen del reactor antes de salir. Levenspiel (1999) y Metcalf y Eddy (2003) indican que las principales causas de cortos circuitos se deben a: zonas inactivas/estancadas (por diferencia de temperaturas o

inadecuada mezcla), Recirculación del fluido (hacia la salida o su interior), Canalización del fluido y dispersión. Problemas que pueden estudiar por medio de un estudio de trazadores.

$$T = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V=volumen del reactor en m³

Q= caudal promedio de entrada al reactor en m³/día

En la práctica, un flujo tipo pistón, siempre tendrá cierto grado de dispersión longitudinal (en el sentido del flujo), permitiendo mezcla entre partículas, dando lugar a un patrón de flujo diferente que se encuentra en un estado intermedio entre los dos patrones idealizados "flujo pistón" y "mezcla completa", el cual recibe el nombre de flujo pistón disperso o simplemente flujo disperso y representa de mejor manera el comportamiento del flujo de un fluido en un reactor. Para cuantificar el grado de "dispersión" Levenspiel (1965) introdujo el término "número de dispersión" (d), el cual se puede calcular, a partir de la siguiente expresión:

$$d = \frac{D}{vL} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

D= dispersión longitudinal en m²/h

V= velocidad media de las partículas en el reactor

L= longitud de la trayectoria que recorren las partículas

Cuando no existe dispersión longitudinal, $d=0$, caso de un flujo pistón ideal y con dispersión infinita, el valor de $d=\infty$, indica flujo de mezcla completa. En un flujo disperso los valores se encuentran en el rango de $0 < d < \infty$. Metcalf y Eddy (2003) presentan la siguiente clasificación para el grado de dispersión:

Tabla II. **Clasificación para el grado de dispersión de reactores**

Grado de dispersión	Número de dispersión
Sin dispersión	$d=0$
Baja dispersión	$d \leq 0.05$
Moderada dispersión	$0.05 < d < 0.25$
Alta dispersión	$d \geq 0.25$ $d \rightarrow \infty$

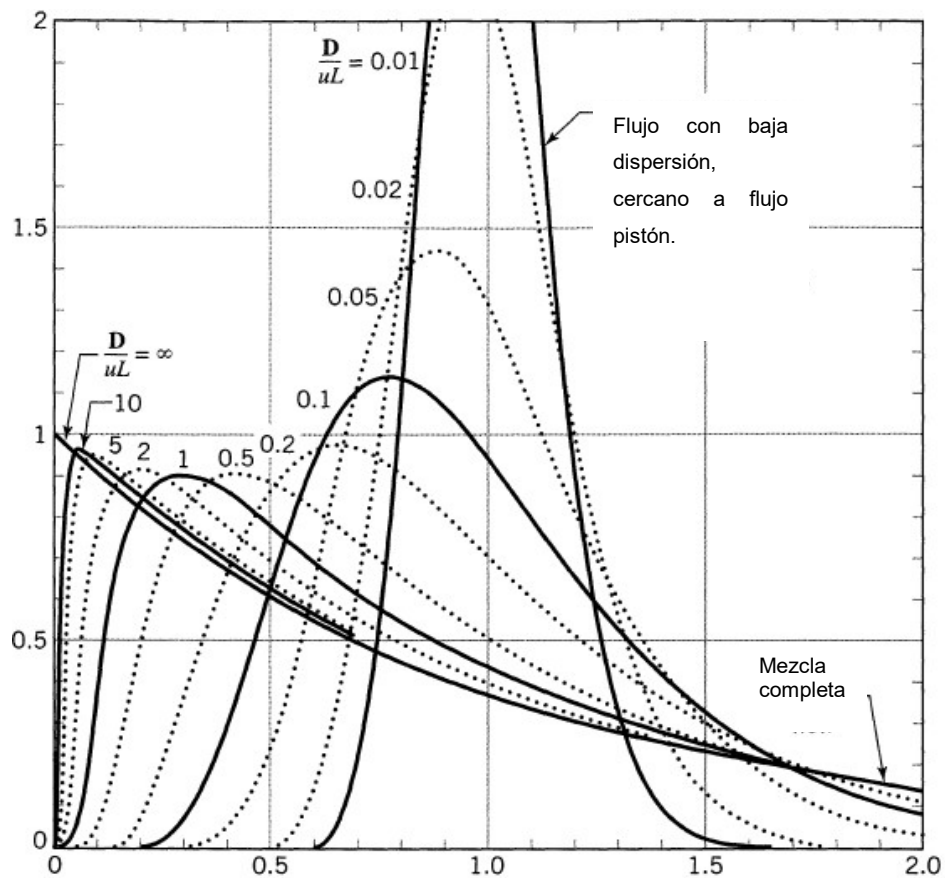
Fuente: Metcalf y Eddy (2003).

Conocer precisamente el verdadero comportamiento del fluido dentro de lagunas de estabilización implicaría tener un mapa de distribución de velocidades de todo el fluido, lo cual es complejo e impráctico. En realidad, el comportamiento se puede determinar sabiendo cuanto tiempo permanece cada partícula dentro del reactor, o dicho de otra manera conociendo distribución de tiempos de residencia (DTR), Lo cual puede ser determinado, a través de un método de ensayo de estímulo-respuesta, mejor conocido como ensayo de trazadores (Levenspiel, 1999).

1.2.2. Ensayo de trazadores

El comportamiento hidráulico de una laguna puede ser determinado, mediante pruebas de trazadores, la cual consiste en inyectar un trazador en la entrada del reactor ya sea de manera instantánea (inyección de impulso) o continua y medir su concentración a la salida del mismo a diferentes intervalos de tiempo (Yáñez, 1993). Como resultado, se gráfica las variaciones de la concentración en el tiempo, obteniendo una curva tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1. **Curvas de ensayos de trazadores para diferentes valores de dispersión**



Fuente: Adaptado de Levenspiel (1999).

Los parámetros más importantes a interpretar de la prueba son: el tiempo real medio de residencia \bar{t} , la varianza σ^2 , número de dispersión “d” y la recuperación de la masa m_T del trazador. El tiempo medio \bar{t} se define como el centroide de la curva obtenida, este se compara con el tiempo de retención hidráulico teórico “T” del reactor, diferencia entre ambos muestra la ocurrencia de zonas muertas, espacios muertos y los correspondientes corto circuitos, imprecisiones en la medición del caudal o cálculo del volumen del reactor. La varianza σ^2 da una medida de la extensión de la curva o ensanchamiento en la base respecto al tiempo de retención teórico T, y el número de dispersión “d” para caracterizar el patrón de flujo del diluido. Por otro lado, la recuperación de la masa m_T calculada producto de un balance de masa, se compara con la masa inicialmente arrojada durante la prueba, Yáñez (1993) menciona que es deseable obtener el 85 % de la masa del trazador agregado para que la prueba sea válida.

Levenspiel (2012) señala que para reactores con espacios muertos o estancamiento el volumen activo es menor que el volumen real del reactor ($V_{\text{activo}} < V$, $V_{\text{activo}}/V < 1$) y si el tiempo real medio es mayor que el tiempo de retención teórico ($\bar{t} > T$) ha habido un error de medición o el trazador paso el punto de medición más de una vez (esto puede suceder cuando algún fluido se difunde de vuelta al punto de medición y se mide más de una vez). Para curvas que presentan largas colas al final de la prueba, se puede terminar la prueba a algún valor “t”, el cual sugiere sea 3-4 veces el tiempo medio de retención real. Un fluido que permanezca por más tiempo que el anterior se considera estancado.

Diferentes sustancias trazadoras han sido utilizadas, a través del tiempo para la evaluación de reactores, entre las que destacan: sales, radioisótopos, sustancias colorantes, sustancias no colorantes, microorganismos, entre otras.

En general, las características más importantes que debe reunir la sustancia a utilizar deben ser (Metcalf y Eddy, 2003; Levenspiel 2012):

- Debe tener la misma densidad del fluido y no afectar el flujo.
- No debe absorberse ni reaccionar con las partículas en las aguas residuales.
- Debe medirse apropiadamente y de bajo costo.
- El trazador debe inyectarse correctamente a lo largo de la sección transversal, proporcional al caudal.
- La difusividad molecular del trazador debe ser baja.
- El trazador debe ser conservativo de manera que se pueda realizar un balance de masa.

La cantidad de trazador a utilizar depende, tanto de factores como el nivel mínimo de detección, de acuerdo al equipo con que se cuente, grado de mezcla y concentración inicial de la sustancia en el reactor. Shilton y Harrison (2003) indican que suponiendo que el trazador añadido a la laguna será completamente mezclado, se puede calcular la cantidad de trazador que se debe agregar al volumen total, para garantizar que la concentración del trazador en el efluente se encuentra en un rango que se pueda medir con precisión.

La revisión de literatura muestra que la Rodamina como sustancia trazadora ha sido ampliamente usada para el estudio de lagunas; sin embargo, la realización y repetividad de estas pruebas es altamente costosa, debido a los altos costos que presiden los equipos de medición y sustancias, en muchos casos puede dificultar el uso en instalaciones de tratamiento más pequeñas realizar estudios de comportamiento hidráulico. Otros trazadores como el cloruro de sodio (NaCl) presentan ventajas como bajos costos y una medición más simple, a través de un conductivímetro. En este estudio, se utilizará como trazador cloruro

de sodio (NaCl), para evaluar el comportamiento hidráulico de una laguna facultativa a escala piloto y tener una mejor comprensión sobre el uso de este trazador en reactores a menor escala.

1.2.3. Ocurrencia de estratificación térmica en lagunas

La mezcla en lagunas de estabilización se da principalmente por tres mecanismos principales: viento, diferencia de temperaturas y diseño del dispositivo de entrada (Mara, 2003; Sperling, 2007). En ausencia de mezcla o un bajo grado de mezcla, se puede presentar el fenómeno de estratificación. Donde debido a la alta turbiedad de las lagunas y el efecto de la radiación solar, las capas superiores absorben mayor energía térmica en comparación con las inferiores, dando lugar a la formación de una capa superior más cálida y menos densa (epilimnio) y otra inferior, fría y de mayor densidad (hipolimnion), divididas por una región o barrera donde se produce un cambio brusco de temperatura llamado termoclina. La ubicación de la termoclina en un cuerpo de agua de acuerdo a Welch (1952), se puede determinar sabiendo donde la temperatura cae a razón de más de 1 °C por metro de profundidad. Pires y Keller (2001), a partir de evaluaciones entre modelos matemáticos y datos de campo encontraron resultados que sugieren que el fenómeno de estratificación térmica puede ocurrir en lagunas de estabilización a gradientes de temperatura tan bajos como de 0.7 °C/m. En este estudio, debido a la precisión del equipo de medición utilizado se consideró la formación de una termoclina para gradientes de temperatura > 1 °C/m.

La formación de la estratificación térmica tiene una marcada dependencia de las condiciones climáticas de cada localidad. Yáñez (1993) reportó resultados de las lagunas san Juan en Lima Perú, donde encontró que bajo condiciones frías y bastantes nubladas la temperatura siempre fue uniforme en profundidad, y la estratificación térmica ocurrió ocasionalmente en días soleados con períodos no

mayores a 6 horas (entre 10:00 am a 6:00 pm) y diferencias de temperatura de 3 °C, mientras que en verano la estratificación, se presentó casi todos los días en períodos más largos de tiempo de 13 horas (9:00 am a 10:00 pm) y diferencias de temperatura de 7.5 °C. Marais (1966), por otra parte, estudiando lagunas de Lusaka, Zambia, reportó estratificaciones cíclicas entre las 9:00 am y 7:00 pm con ubicaciones de la termoclina a profundidades promedios de 0.30 m en verano y 0.90 m en invierno. Yáñez (1993) señala de igual manera que la radiación solar, viento y profundidad de las lagunas tienen marcada influencia en la duración e intensidad de la estratificación, siendo mayor la intensidad y duración en condiciones más tropicales y pudiéndose esperar estratificaciones más continuadas en lagunas más profundas.

Dentro de los efectos adversos que puede causar la estratificación térmica en lagunas se encuentran: la falta de mezcla y distribución no uniforme del oxígeno disuelto en el cuerpo de la laguna, puede llegar a su estado crítico cuando la oxipausa (profundidad a la cual es O.D es cero) alcanza la termoclina (Yáñez, 1993) bajo estas condiciones, la cantidad de oxígeno bajo la termoclina es mínima puede estar el estrato inferior bajo condiciones predominantemente anaeróbicas. El transporte y asentamiento de las algas también se ve influenciado durante períodos de estratificación, las algas no móviles al no haber una mezcla uniforme que las transporte hacia la superficie tienden a asentarse en el fondo de la laguna deteniendo su producción de O.D y ejerciendo a una demanda del mismo, mientras que las algas móviles tienden a alejarse de la superficie más caliente (35° C o más) formando así una banda de algas algunos centímetros por encima de la termoclina (Gloyna, 1971; Mara, 2003; Sperling 2007), lo que puede aumentar las concentraciones de DBO y sólidos suspendidos asociados en gran parte a las algas (Mara, 2003). De igual manera, la estratificación térmica produce la estratificación de las características físico-químicas en la profundidad de la laguna. Sin embargo, esto último, se ha

demostrado que puede llevar a valores altos de pH subiendo a 9-10 unidades y provocando una extinción bacteriana a las horas de mayor temperatura. De acuerdo a Yáñez (1993), la estratificación térmica causa un efecto negativo en la eficiencia, debido a los cortos circuitos hidráulicos que produce. Literatura acerca del efecto de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de lagunas se presenta en la sección 1.2.4.

Para contrarrestar o reducir los períodos de estratificación se ha atribuido al viento como uno de los principales mecanismos de mezcla en lagunas, de tal manera que, lagunas que se encuentren expuestas a condiciones de viento más favorables tendrá una mejor mezcla y favorecerán la destrucción y reducción de este fenómeno. De acuerdo a Gloyna (1971), la energía eólica que ejerce el viento depende del área de la laguna, sucediendo el efecto máximo del viento en un camino de 100-200 m sin obstáculos, por lo que es más probable que lagunas pequeñas puedan permanecer más tiempo estratificadas que las más grandes. Asimismo, la destratificación puede ocurrir también mediante un mecanismo natural denominado “vuelco” o inversión térmica, el cual puede suceder a diario de la siguiente manera (Gloyna, 1971; Marais 1966):

- Durante la mañana, si hay viento, hay un período de completa mezcla en la que la temperatura es uniforme en toda la laguna, debido a la absorción de radiación, la temperatura aumenta gradualmente. En algún momento, generalmente durante una breve ausencia en el viento, la estratificación se desarrolla abruptamente y se forma una termoclina. La temperatura sobre la termoclina aumenta hasta un máximo y luego disminuye, mientras que debajo de la termoclina la temperatura cae rápidamente a un valor aproximadamente de la tierra y después de eso permanece prácticamente constante.

- En la tarde y la noche, un segundo período de mezcla puede iniciarse de la siguiente manera: (a) Sobre la termoclina, en condiciones de viento bajas, las capas superiores pierden su calor más rápidamente que las capas inferiores. Las capas superiores más frías se hunden, lo que induce la mezcla, con el resultado de que la temperatura hasta la termoclina permanece aproximadamente uniforme, pero disminuye gradualmente. La termoclina se hunde gradualmente y con un enfriamiento adicional, la mezcla iniciada y sostenida en toda la laguna. (b) En condiciones de viento, generalmente durante el período de temperaturas decrecientes, la energía impartida por el viento al agua sobre la termoclina en algún momento supera las fuerzas de estratificación, (haciendo que la temperatura sea uniforme en todo). Es posible que, durante el verano, cuando las velocidades del viento son bajas, el enfriamiento por radiación no sea suficiente para igualar las temperaturas en toda la laguna y la termoclina persista.

Otro aspecto importante de la estratificación térmica en lagunas de estabilización son sus patrones diarios, que por lo general brindan información acerca del grado de estratificación y mezcla dentro de la misma. Gu y Stefan (1995) con base en la variabilidad que experimentó la estructura térmica de las lagunas Harrison de Minnesota, que se encontraban estudiando clasificaron los patrones como: tipo I, completamente mezclado durante día y noche; tipo II, estratificado durante el día y mezclado durante la noche y tipo III, continuamente estratificado durante día y noche. Años más tarde Abis & Mara (2006), al evaluar tres lagunas facultativas pilotos en Reino Unido encontraron que estas lagunas experimentaban los mismos patrones, apareciendo otro más en condiciones de invierno al que llamaron tipo IV, donde ocurría una inversión durante el día siendo las capas superficiales más frías que las inferiores. Aunque al parecer los patrones muestran una tendencia general en ambos estudios las condiciones

donde fueron encontrados corresponden a climas templados puede diferir de las condiciones tropicales que prevalecen en Centro América.

Por último, Yáñez (1993) menciona que, debido al efecto negativo que produce la estratificación en la eficiencia del tratamiento en algunas el conocimiento de las condiciones de estratificación térmica para cada instalación en particular es importante para la adecuada ubicación de niveles de los dispositivos de entrada y salida, ya que este fenómeno se produce de acuerdo con las características meteorológicas y físicas de cada lugar. Misma conclusión establece Mara (2003) indicando que la toma del efluente debe estar debajo de la profundidad de la banda de algas (cerca de la termoclina) para minimizar la DBO y sólidos suspendidos diarios del efluente.

1.2.4. Efecto de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de lagunas

De acuerdo a Shilton y Harrison (2003), la estratificación puede ser perjudicial para el comportamiento hidráulico de un sistema lagunar. Es posible que un flujo de entrada pueda cortocircuitar, a través de la parte superior de una laguna estratificada en lugar de ser mezclado en su volumen completo. De esta manera, las aguas residuales entrantes confinadas a una capa causarán una reducción significativa en el tiempo de retención y, por lo tanto, en la eficacia del tratamiento.

Torres *et al.* (1997) al estudiar el comportamiento hidráulico de una laguna de estabilización en condiciones de verano e invierno, encontraron que el volumen activo de la laguna fue 70 % en invierno y 22 % en verano y que bajo condiciones de invierno la zona activa de la laguna varió entre la superficie y 1 m de profundidad en períodos cortos de tiempo cuando se presentaba estratificación térmica, y la superficie y el fondo cuando esta estaba ausente. En

cambio, en verano la zona activa se extendió desde la superficie hasta 0.60-1.0 m de profundidad, debido a la existencia de una termoclina estable. Sin embargo, a pesar de no haber mezcla en la mayor parte del verano las curvas de los ensayos de trazadores y modelos de dispersión mostraron un comportamiento hidrodinámico de un reactor de mezcla completa, lo cual se le atribuye solamente a la zona activa o epilimnio de la laguna. De esta manera, el volumen de la laguna en condiciones de verano fue 1/5 del volumen físico real. Torres *et al* (2000) obtuvieron conclusiones similares estudiando las mismas instalaciones alimentando la laguna a 3.5 m de profundidad.

Pires y Kellner (2001) mencionan que la estratificación térmica provoca la disminución del volumen de la zona activa (volumen útil), y consecuentemente del tiempo de detención hidráulico. Al encontrarse la laguna bajo condiciones de estratificaciones estables, la capa superior o epilimnio estará más calientes y rica en oxígeno, mientras que la capa inferior, más fría y en condiciones anaeróbicas, y si los dispositivos de entrada y salida se encuentran ubicados en la parte superior, el caudal afluente cortocircuitaría y sería tratado solo por el epilimnio, debido a la falta de mezcla inducida por la termoclina, limitando así la zona activa o volumen útil de la laguna a la capa superior, puede causar de esta manera grandes reducciones de los tiempos de retención hidráulicos. Años más tarde Kellner *et al* (2009) al realizar una evaluación experimental y teórica de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de una laguna encontraron tiempos de retención considerablemente menores a los teóricos encontrándose las lagunas con volúmenes útiles variando entre 33.6 -61.4 %.

Con el objetivo de analizar el efecto de la estratificación térmica en el tiempo de retención hidráulico de la laguna piloto, en este estudio, ensayos de trazadores usando cloruro de sodio fueron conducidos y comparados con los períodos de estratificación diarios.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del sitio de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Guatemala, zona 13, colonia Aurora II, en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales “Arturo Pazos Sosa”, área experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (ver figura 2). Las coordenadas geográficas del lugar son latitud 14°34'42"N y longitud 90°32'12"O, la altitud aproximada es de 1460 metros sobre el nivel del mar.

De acuerdo a la información de INSIVUMEH (2018) el clima de la zona es subtropical con variaciones de temperatura máxima y mínima media entre 29.9°C y 11.40°C respectivamente, y una precipitación promedio anual de 105 mm.

La planta de tratamiento recibe el agua residual de tipo doméstico de la población de la colonia Aurora II, donde se trata a través de diferentes unidades experimentales, entre las cuales se tiene: Sedimentador primario, lagunas de estabilización, filtros percoladores, reactores anaerobios de flujo ascendente, humedales, entre otros.

Figura 2. Ubicación del sitio de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

Para el desarrollo del estudio, se diseñó y construyó una laguna facultativa a escala piloto en las instalaciones descritas, lo cual se desvió el caudal de agua cruda a tratar desde el tratamiento preliminar, las mediciones y ensayos experimentales en el sitio fueron realizados en el período comprendido del 24 de enero al 11 de agosto del 2018.

2.2. Descripción de la unidad experimental

2.2.1. Diseño de la laguna facultativa piloto

La laguna facultativa a escala piloto fue diseñada y construida para un caudal de diseño de 0.035 L/s (3.02 m³/día) y con un tiempo de retención hidráulico nominal mayor o igual a 11.80 días. A la unidad se le suministra agua residual doméstica que recibe del pretratamiento por medio de un sistema de rejillas. El método de diseño utilizado fue el de carga superficial por medio de radiación solar (ver apéndice I). A continuación, se presentan las características físicas y operacionales de la unidad:

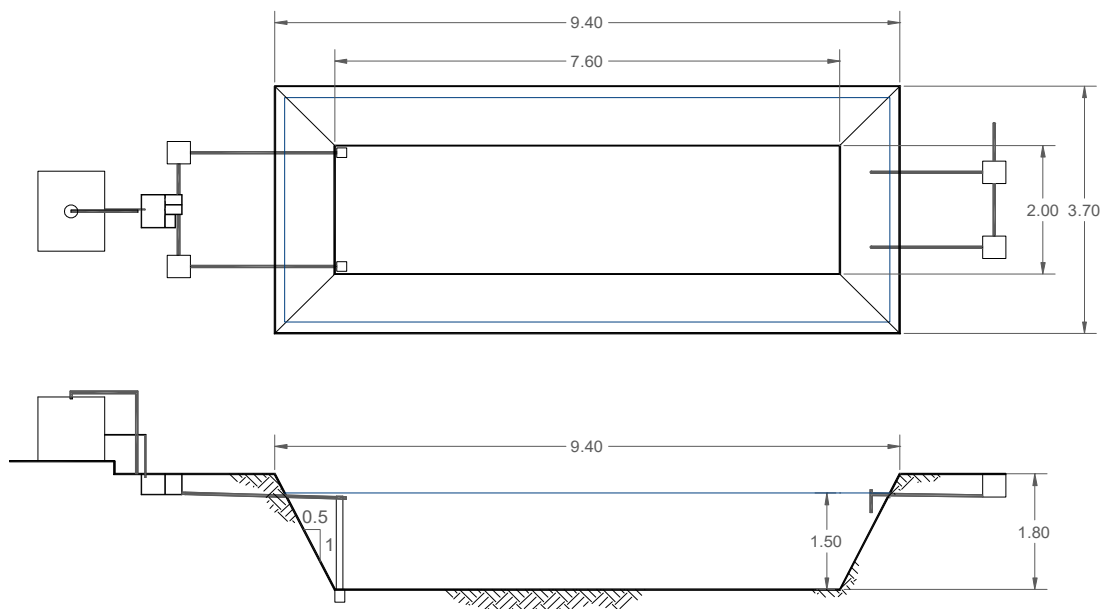
Tabla III. **Características físicas y operacionales de laguna facultativa piloto**

Caudal de diseño	$Q_{\text{diseño}} =$	3.02	m ³ /día
Caudal de operación promedio	$Q_{\text{op}} =$	2.42	m ³ /día
Tiempo de retención hidráulico teórico	TRH =	11.80	días
Relación de taludes	H:V =	0.5:1	adimensional
Dimensiones			
Profundidad	P =	1.50	m
Largo a nivel del agua	$L_1 =$	8.75	m
Ancho a nivel del agua	$a_1 =$	3.10	m
Largo en la base	$L_2 =$	7.60	m
Ancho en la base	$a_2 =$	2.00	m
Largo en la corona	$L_3 =$	9.40	m
Ancho en la corona	$a_3 =$	3.70	m
Área superficial	A =	27.13	m ²
Volumen útil de laguna	$V_u =$	35.68	m ³

Fuente: elaboración propia.

Se tomó una radiación de $1.70E+08$ kJ/ha-día, siendo el valor mínimo mensual correspondiente al mes de septiembre para la ciudad de Guatemala de acuerdo a información obtenida de la Administración de Aeronáutica y Espacio (NASA) de los Estados Unidos de América, específicamente de su sitio web Meteorología Superficial y Energía Solar, el dato es proporcionado con base al promedio de 10 años de insolación solar en una superficie horizontal para cualquier parte del mundo (Oakley, 2005). Otros de los parámetros considerados para el diseño, según información recopilada de 30 estudios especiales previos en los que se ha caracterizado el afluente de la planta de tratamiento son: la DBO₅ promedio de 254 mg/L y sólidos suspendidos promedio de 283 mg/L (Peralta, 2015).

Figura 3. Esquema de laguna piloto



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2.2.2. Configuración y aspectos constructivos

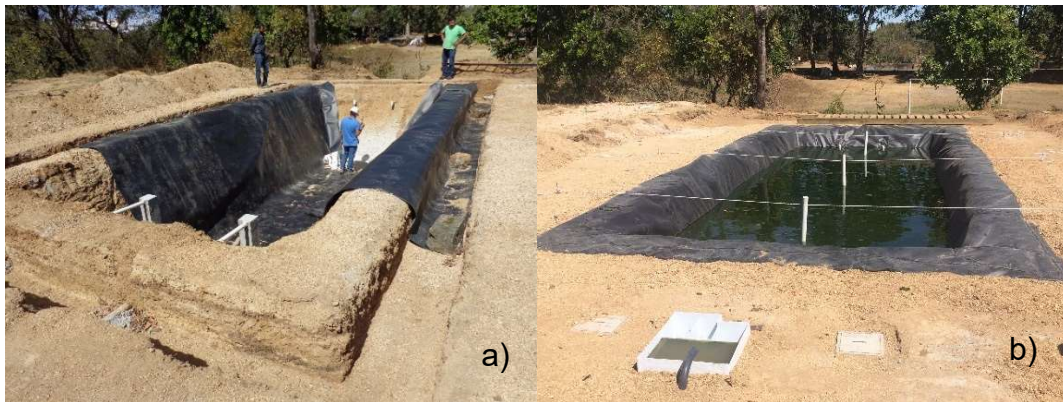
La laguna fue impermeabilizada con una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 mm de espesor. El agua residual es suministrada por medio de una tubería de polietileno de 1 ½" de diámetro y 180 m de largo, la cual recolecta el agua pretratada mediante rejilla y la lleva por gravedad hasta un tanque de 1,000 litros utilizado para la regulación del caudal, a través de un sifón construido con tubería de PVC de ½" de diámetro sobre el cual actúa una carga constante al mantener un nivel de agua definido en el tanque; además, este reservorio permite la sedimentación de sólidos de gran tamaño que pudieran obstruir el sifón, el depósito cuenta con un rebalse que permite evacuar el excedente de agua que ingresa al sistema.

El agua que pasa, a través del sifón se dirige a una caja distribuidora de fibra de vidrio con dimensiones de 0.50 m y 0.60 m de ancho y largo respectivamente y una profundidad de 0.50 m. Esta a su vez consta de dos vertederos triangulares con capacidad de derivar un caudal máximo de 0.0175 L/s (la mitad del caudal de diseño) cada uno y un vertedero rectangular que funciona para derivar el excedente que pueda llegar a la caja, mismo que tiene una capacidad de derivación 0.035 L/s, este posible excedente es llevado por medio de una tubería de PVC de 2" de diámetro a un Bypass construido.

El sistema de entrada a la laguna se hace a través de dos tuberías de PVC de 2" de diámetro, ubicadas cada una a 1/3 del ancho de la lámina de agua respecto al talud, estando separadas entre ellas 2/3 del ancho, el agua residual es descargada a la unidad a una profundidad de 5 cm bajo el nivel del agua. El sistema de salida está compuesto por dos tuberías de PVC de 2" de diámetro ubicadas a una altura de 1.50 m, se ubican a 1/3 del ancho de la lámina de agua, a partir de los taludes y se encuentran separadas entre ellas la misma distancia, a las tuberías de salida se les colocó una "Tee" como accesorio que permite la

recolección del efluente a 30 cm bajo el nivel del agua. El llenado de la laguna se hizo, mediante camiones cisternas que suministraron agua de pozo sin cloración.

Figura 4. **Laguna facultativa primaria piloto. a) durante el proceso de construcción b) unidad construida**



Fuente: planta piloto de tratamiento de aguas residuales Arturo Pazos Sosa.

2.2.3. Condiciones de operación

El funcionamiento de la laguna para el experimento comenzó el día 24 de enero del 2018. Ésta fue operada bajo condiciones de caudal continuo, con un caudal medio que se mantuvo en un rango de 0.025 L/s ($2.16 \text{ m}^3/\text{día}$) a 0.035 L/s ($2.16 \text{ m}^3/\text{día}$), siendo el caudal promedio igual a 0.028 L/s ($2.42 \text{ m}^3/\text{día}$). El caudal se aforó a diario (2 veces al día) con una probeta de 100 ml y un cronómetro, para cerciorarse de la continuidad del flujo de entrada a la laguna, con la misma frecuencia se hizo la limpieza de la laguna con un tamiz y de la tubería del sifón del tanque regulador, en forma semanal se realizó la limpieza de estructuras de interconexión y mensualmente se limpió el tanque de carga constante.

2.3. Procedimiento experimental

2.3.1. Parámetros analizados

El procedimiento experimental del estudio, se hizo en torno al análisis de la temperatura del agua de la laguna, de la temperatura del aire y del comportamiento hidráulico de la unidad de tratamiento, a través de pruebas de trazadores, el estudio de los parámetros de interés se realizó de acuerdo a los métodos descritos en la tabla IV.

Tabla IV. **Metodología de análisis aplicada para los parámetros estudiados**

Parámetro	Método APHA (2017)	Símbolo	Unidad	Equipamiento utilizado
Temperatura	2550 B	T	°C	Termómetro
Conductividad	2510 B	CE	μS/cm	Conductivímetro

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Medición de temperatura

Las mediciones de la temperatura en la laguna facultativa y el ambiente fueron realizadas, mediante aparatos de registro de datos HOBO MX2201. Los dispositivos fueron colocados en tres puntos estratégicos dentro de la laguna y fueron realizadas lecturas de temperatura a diferentes profundidades, estas son: en la superficie, a 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y a 1.25 m, a partir del nivel del agua; también se tomó la temperatura en un sitio fuera de la misma.

Los equipos fueron configurados y programados para hacer la toma de datos de temperatura a cada 30 minutos en forma simultánea en las diferentes profundidades dentro de la laguna, y con la misma frecuencia el dispositivo instalado a 1.10 m sobre el nivel del terreno natural fuera de ella para recolectar los datos de la temperatura del aire, la recolección de los datos se realizó del 24 de enero al 30 de junio de 2018.

La recolección de los datos se realizó con frecuencia semanal, extrayendo los pedestales a los que se fijaron los sensores dentro de la laguna durante un período de tiempo oportuno a manera de no interferir en las lecturas automáticas que estos realizaron, y con el mismo cuidado se obtuvieron los datos del dispositivo ubicado fuera de la laguna, la información fue descargada en formato xls, mediante bluetooth a un dispositivo celular.

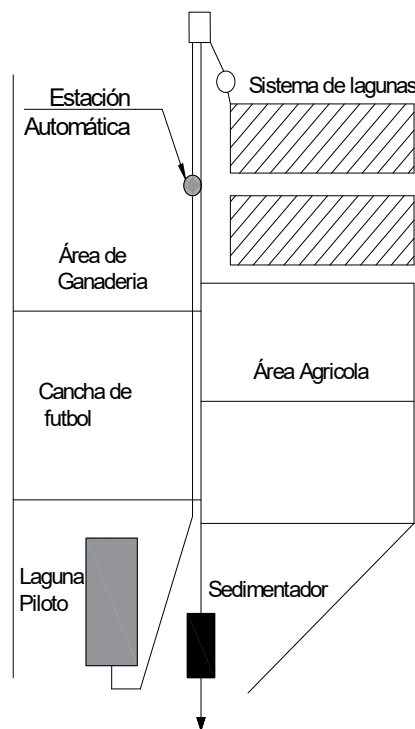
Para tener una referencia de la precisión de las lecturas de temperatura tomadas por los aparatos HOBO MX2201 y para contar con datos de variantes climáticas relacionados al estudio como lo son la radiación solar y el viento, se instaló en el mismo predio de la unidad experimental una estación meteorológica automática modelo Davis Instruments Vantage pro2. Este aparato también fue configurado para hacer lecturas a cada 30 minutos, el período de recolección de datos es el mismo que en el que se tomó la temperatura con los registradores de datos.

2.3.2.1. Puntos de recolección de datos de temperatura

Los equipos registradores de temperatura fueron colocados en tres puntos a lo largo de la laguna y en el exterior de la misma. En total se instalaron 9 dispositivos, 8 dispositivos fueron fijados en pedestales que se sumergieron dentro de la laguna; el primer pedestal fue colocado al inicio de la laguna al pie del talud, en este pedestal (P No.1), se colocó un registrador de datos; en el

segundo pedestal, se colocaron 6 registradores de datos a cada 25 cm, a partir de la superficie hasta llegar a 1.25 m de profundidad; este segundo pedestal fue colocado en el centro de la laguna (P No.2), y el tercer pedestal con un registrador de datos instalado fue colocado al final de la laguna al pie del talud (P No.3); como se mencionó anteriormente, en los pedestales P No. 1 y P No. 3, se instaló un registrador de temperatura en cada uno, los cuales se rotaron en las profundidades de 0.25, 0.75 m y en la superficie para comparar los datos de temperatura a la misma profundidad a lo largo de la laguna en los tres pedestales y así analizar la representatividad de los datos de temperatura recolectados en el pedestal del centro y validar si el comportamiento de la temperatura es uniforme en la masa de agua a la misma profundidad, todos los pedestales fueron situados en el eje central de la laguna.

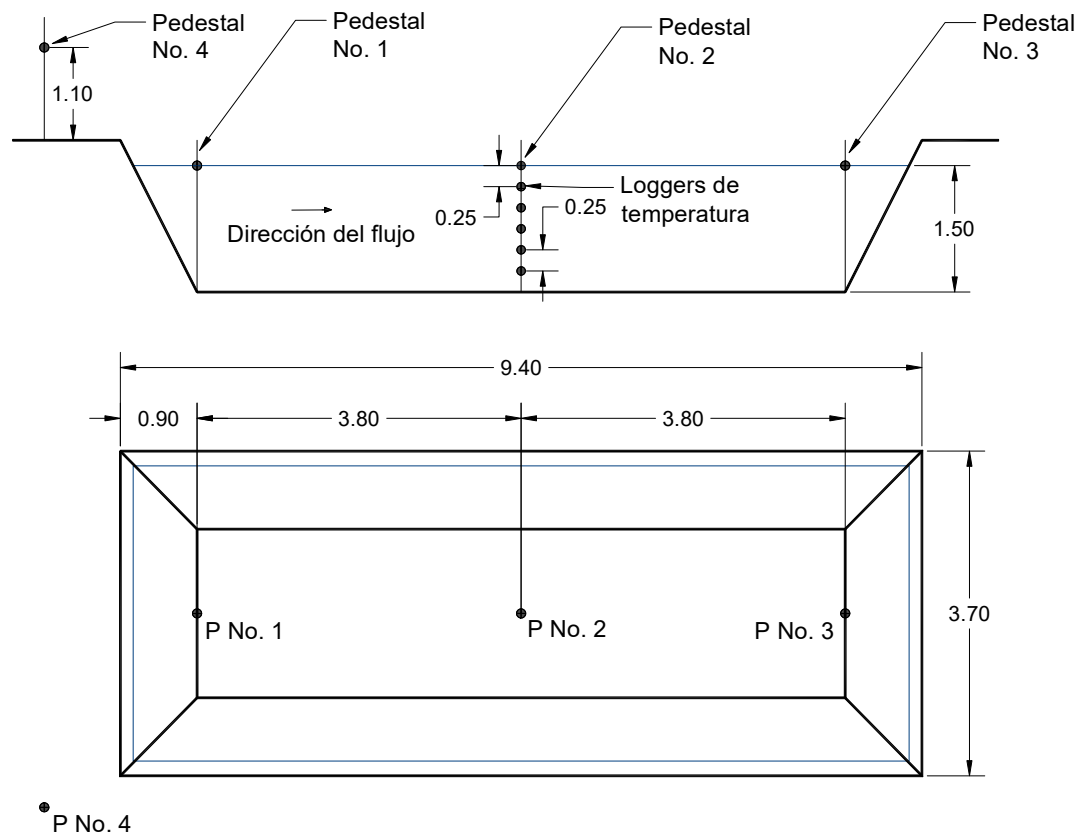
Figura 5. **Ubicación de la estación meteorológica automática**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

En el exterior de la laguna sobre la borda fue colocado el dispositivo de medición (P No. 4) de la temperatura del aire, en un poste de madera de 1.10 m de altura y dentro de un abrigo de protección. Los esquemas de instalación de los equipos dentro del área de estudio se pueden ver en las figuras 5 y 6.

Figura 6. **Ubicación de los registradores de datos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2.3.2.2. Equipo de medición

Registrador de temperatura HOBO MX2201

Es un dispositivo a prueba de agua con una resistencia de hasta 30.5 m de profundidad que aprovecha la potencia de Bluetooth Low Energy (BLE) para proporcionar mediciones de temperatura directamente a un dispositivo móvil iOS o Android. Con 3.35 cm de diámetro y características ideales, para medir la temperatura en arroyos, lagos, océanos y suelos, tienen una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -20° a 70°C (-4° a 158°F), tiene un rango de acción de -20 a 70°C en aire y de -20 a 50°C en agua y un rango de transmisión de aproximadamente 30.5 m, su tasa de registro es de 1 segundo a 18 horas y puede almacenar hasta 96,000 mediciones, la vida útil del dispositivo es 1 año típico a 25°C con intervalo de registro de 1 minuto y con el Bluetooth desactivado.

Estación meteorológica Davis Instruments Vantage pro2

Es una estación con transmisión inalámbrica que integra sensores externos en un solo kit, consiste en un sistema radio de espectro ensanchado por salto en frecuencia para la transmisión de datos desde el conjunto integrado de sensores hasta una consola que puede ser ubicada hasta 300 m de distancia; incluye pluviómetro de cazoletas, anemómetro, y sensores de temperatura, humedad, radiación solar y UV. Los sensores de temperatura y humedad están ubicados en un protector solar, para evitar la interferencia de otras fuentes de calor irradiado o reflejado.

La consola consta de una pantalla LCD para facilitar la lectura de los datos y de un teclado, para acceder a la información meteorológica como ser condiciones actuales, pronóstico, gráficos, alarmas para alertar peligros, esto a través del software WeatherLink instalado en una computadora. La estación tiene

capacidad de realizar actualizaciones a cada 2.5 segundos, para efectos del estudio fue programada para realizarlas a cada 30 minutos.

En cuanto a las variables meteorológicas de interés, la estación tiene las siguientes especificaciones de resolución, rango y precisión nominal respectivamente:

Pluviometría: 0.01" (0.2 mm), 96" /hr (2438 mm/hr), mayor que 5 % o 0.04" /hr (1 mm/hr).

Radiación solar: 1 W/m², 0 a 1800 W/m², 5% de la escala completa.

Temperatura interior: 0.1°F (0.1°C), +32°±140°F (0±60°C), 1°F (0.5°C).

Temperatura exterior: 0.1°F (0.1°C), -40°±150°F (-40±65°C), 1°F (0.5°C).

Índice UV: Índice 0.1, 0 a 16, 5% de la escala completa.

Dirección del viento: 1°, 0 a 360°, 3°.

Velocidad del viento: 1 mph (1kt, 0.4 m/s, 1km/h, 2 a 180 mph (2 a 156 kts, 3 a 290 km/h, 1 a 80 m/s), Mayor que 2 mph/kts (1 m/s, 3 km/h ó 5 %).

2.3.3. Prueba de trazador

Para análisis del comportamiento hidráulico de la laguna, se aplicó la técnica de estímulo-respuesta propuesta por Levenspiel (1999), mediante la prueba de trazadores por inyección de impulso, la cual consiste en introducir instantáneamente una masa M (kg o moles) de trazador en la entrada del reactor y se monitorea y recolecta los datos de concentración y tiempo transcurrido en la salida de la unidad.

Los trazadores salinos son usualmente baratos y de fácil adquisición, incluso puede ser usado un simple conductivímetro para determinar su concentración, no son tóxicos y no presentan riesgo para el ambiente o para la salud humana (Sperling *et al.*, 2016), para este estudio se seleccionó cloruro de sodio (NaCl) como trazador, específicamente sal refinada industrial, la cual por el tamaño de las partículas facilita su disolución en agua, aunque es de consumo humano, por su contenido, no es recomendada por no ser yodada, característica que permite una mayor pureza; las especificaciones del producto utilizado son: marca VitaSal de RedeSal, pureza NaCl mínimo 99 %, peso molecular 58.4 g/mol, densidad 0.90-1.34 Kg/L, humedad 0.25 %, partículas insolubles en agua 0.10 %, no contiene aditivos.

Se realizaron dos ensayos: el primero, el 14 de abril, y el segundo, el 11 de junio de 2018, la cantidad de sal utilizada en cada experimento, se determinó exploratoriamente monitoreando la conductividad eléctrica en el efluente durante 5 días previos, con el fin de conocer la concentración de fondo de cada ensayo para estimar la cantidad de trazador, esta fue calculada para obtener una concentración de 3 a 4 veces la concentración de fondo, teniendo en cuenta el no sobrepasar el valor de solubilidad de la sal en agua que es de 360 g/L ni el límite máximo de detención del conductivímetro que es 200 mS.

En el primer ensayo, se preparó la solución vertiendo 30,000 g (30 Kg) de sal en 150 L de agua, teniendo una concentración de 200 g/L de sal, y en la segunda prueba, se mezclaron 45,450 g (45.45 kg) en 180 L de agua obteniendo una concentración de trazador de 252.5 g/L, para ambos casos la sal y el agua fue agregada poco a poco y alternadamente en un tonel, agitando vigorosamente la mezcla para lograr una mejor disolución y homogeneidad. Las soluciones en cada prueba fueron inyectadas a la laguna a un caudal de 0.025 L/s en 100 minutos (0.07 días) y 120 minutos (0.08) respectivamente, período de tiempo

inferior al 2 % del TRH, con el fin de no alterar las características de inyección de impulso, según ha recomendado Bracho *et al* (2009), se utilizó un recipiente plástico de 100 L al cual se instaló una válvula globo, una tee y niples para derivar el caudal en dos partes, una hacia cada uno de los dos vertederos de la caja distribuidora de caudal.

La concentración de NaCl fue determinada, a partir de las mediciones de conductividad en la salida de laguna con un conductivímetro provisto de un registrador de datos, el aparato fue calibrado en el laboratorio con una solución estándar de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ programado para tomar lecturas a cada 30 minutos por el período en que el que la conductividad volvió a ser igual a la concentración de fondo o el valor más próximo, durante el período de los ensayos, se estuvo regulando dos veces al día el caudal de entrada a 0.028 L/s para asegurar un caudal constante, la tabla resumen de los ensayos se muestra en la tabla V.

Tabla V. **Resumen de ensayos pruebas de trazadores**

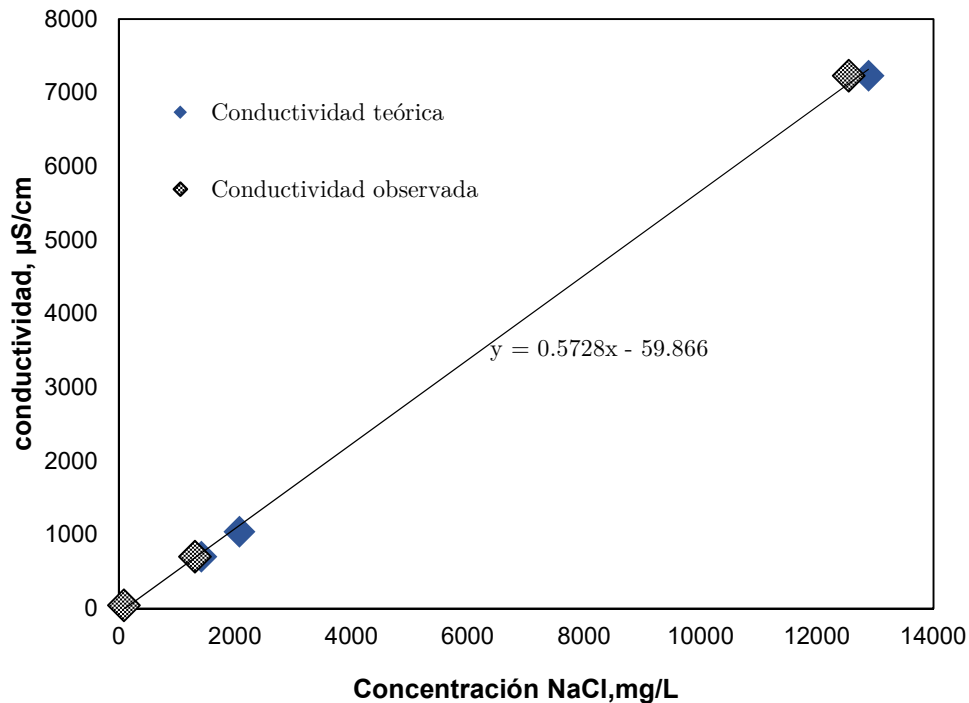
No. prueba	Período	Masa de NaCl adicionada (Kg)	Volumen de solución (L)	Tiempo de inyección (h)	Caudal de entrada (L/s)	TRH teórico (día)
1	14/04/2018-03/06/2018	30.00	150	1.67	0.028	14.75
2	11/06/2018-11/08/2018	45.45	180	2.00	0.028	14.75

Fuente: elaboración propia.

Los valores de conductividad fueron convertidos a concentración de NaCl, aunque la conductividad presente en los efluentes es producto de diferentes iones disueltos y no exclusivamente de la presencia de NaCl, la transformación de la conductividad permite reducir los valores preexistentes a los valores

encontrados con el trazador adicionado al sistema (Possmoser, 2014). Para la conversión se utilizaron soluciones estándar de la marca HANNA Instrument de 84, 1,413 y 12,880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la calibración de conductividad con concentración de NaCl conocida, es decir, utilizando la equivalencia teórica de los dos parámetros, las soluciones corresponden a concentraciones de 38.4, 702.1 y 7,230 mg/L de NaCl respectivamente a 25°C, como se puede observar, se utilizaron concentraciones baja, media y alta para hacer la relación. Posteriormente, se hizo la lectura de la conductividad y la temperatura de las soluciones estándar con el conductivímetro, utilizado en el estudio, para obtener la relación de las concentraciones de NaCl conocidas de las soluciones y los valores de conductividad a 25°C observadas, y así de esta manera relacionar los valores teóricos y observados y obtener, así la ecuación de conversión encontrada $y = 0.5728 x - 59.866$ como se muestra en la figura 7, donde “y” es la concentración de NaCl (mg/L) y “x” es la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Figura 7. **Gráfico y ecuación de conversión de CE a concentración de NaCl**



Fuente: elaboración propia.

2.3.3.1. Puntos de muestreo del trazador

El punto de muestreo para la medición de la conductividad consistió en una caja de registro que une las dos salidas con las que cuenta la laguna. Una vez configurado el aparato para tomar lecturas de conductividad a cada media hora, se instaló por el período en que duró cada ensayo sumergiendo la sonda dentro de la caja, y el registrador de datos del conductímetro almacenó los datos de conductividad en la tarjeta de memoria del aparato. De igual manera, se realizaron mediciones puntuales de conductividad en los tres diferentes puntos de la planta, donde se colocaron los registradores de datos de temperatura a profundidades de 1.25, 1.00, 0.75, 0.50, 0.25 m y en la superficie, estos últimos

datos fueron la base para evaluar la distribución de la concentración de NaCl, según la profundidad.

2.3.3.2. Equipo de medición

El equipo utilizado para medir la conductividad es una sonda portátil de la marca "REED instruments SD-4307" capaz de medir la conductividad, los sólidos totales disueltos (TDS), los niveles de salinidad en el agua y la temperatura. cuenta con una pantalla LCD retroiluminada, un registrador de datos, y funciones de máx/mín, y utilizando una tarjeta de memoria, se puede seleccionar una tasa de muestreo deseada y generar rápidamente un archivo de Excel sin uso de software. El rango de medición de la conductividad es de 200 μ S, 2mS, 20mS, 200 mS, con una precisión de $\pm 2\% + 1$ dgt y una resolución de 0.1 μ S, 0.001mS, 0.01mS, 0.1 mS; la temperatura de operación es de 0 a 50 °C del medidor y de 0 a 60 °C de la sonda, la temperatura de almacenamiento es de -10 a 60°C, para la conductividad el aparato ajusta un valor de compensación de temperatura de la sonda del 2% por °C.

En el apéndice V pueden observarse las fotografías de la unidad experimental, equipo y materiales utilizados en el experimento.

2.4. Procesamiento de datos y análisis estadístico

2.4.1. Análisis descriptivo de los datos de temperatura

Con los estudios descriptivos, se busca especificar las propiedades, características y los perfiles de fenómenos que se sometan a un análisis. Únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refiere (Sampieri, 2014). Este tipo de análisis se encarga de la recolección, agrupación y presentación de

los datos de una manera tal que los describa fácil y rápidamente, y ayuda a comprender la estructura de los datos, de manera de detectar, tanto un patrón de comportamiento general como apartamientos del mismo. Una de las formas comunes de describir los datos analizados es resumirlos en uno, dos o más números que caractericen al conjunto de datos con fidelidad. En el presente estudio, se tomaron las siguientes medidas de posición y de dispersión (Orellana, 2011):

Promedio o media aritmética: representa el centro de gravedad o el punto de equilibrio de los datos, se suman todos los valores y se divide por el número total de observaciones. Si se tiene una muestra de n observaciones denotadas por X_1, X_2, \dots, X_n , la media muestral \bar{X} se define del siguiente modo:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El símbolo $\sum_{i=1}^n X_i$ indica la suma de todos los valores observados de la variable desde el primero ($i=1$) hasta el último ($i=n$).

En el caso de una media poblacional, al disponer de la información de una variable X para las N unidades de análisis de la población, se define como:

$$\mu = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Desviación estándar: mide cuán lejos se encuentran los datos de la media muestral. La varianza de una muestra de observaciones X_1, X_2, \dots, X_n , cuya meda es \bar{X} , se define como:

$$s^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La desviación estándar muestral se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Si se dispone de la información de una variable X para las N unidades de análisis de la población, se denota con σ^2 y σ (sigma) la varianza y la desviación estándar de la población respectivamente y se define del siguiente modo:

$$\sigma^2 = \frac{(X_1 - \mu)^2 + \dots + (X_n - \mu)^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{N} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Otros valores considerados fueron los máximos ($X_{\text{máx}}$) y mínimos ($X_{\text{mín}}$) de los rangos de datos analizados en los períodos de interés (horarios, diarios, semanales, mensual).

2.4.2. Análisis de correlación entre datos de temperatura del agua y temperatura del aire

El análisis de correlación emplea métodos para medir la significación del grado o intensidad de asociación entre dos o más variables, mide cuán cercanos se encuentran los puntos alrededor de una línea recta que indique la tendencia central. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión; además el coeficiente de correlación debe ser: grande cuando el grado de asociación es alto (cerca de +1 o -1), y pequeño cuando es bajo, cerca de cero, independiente de las unidades en que se miden las variables.

Al tener dos variables (X, Y) registradas en cada uno de los n sujetos de una muestra. Sean (X_i, Y_i) las observaciones realizadas para cada variable en el sujeto i -ésimo. La covarianza muestral entre X y Y se define como (Orellana, 2011):

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ e $\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$ (Ecuaciones 10 y 11)

La covarianza es el promedio de los productos de las desviaciones de las variables respecto a las correspondiente medias.

Sean (X_i, Y_i) las observaciones realizadas en cada uno de los n sujetos de una muestra de tamaño n . Se define el coeficiente de correlación muestral de Pearson entre X e Y como:

$$r = Corr(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{s_X s_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X s_Y} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Las propiedades del coeficiente de correlación de Pearson son (Orellana, 2011):

- r toma valores entre -1 y 1 ($-1 \leq r \leq 1$).
- r mide la fuerza de la asociación lineal entre X e Y.
- $r = 0$ implica que no hay relación lineal entre las variables.
- $r = +1$ implica que todos los puntos caen sobre una recta de pendiente positiva (asociación positiva).

- $r = -1$ implica que todos los puntos caen sobre una recta de pendiente negativa (asociación negativa).
- Mientras mayor el valor absoluto de r mayor la fuerza de la asociación.
- El valor de r no depende de las unidades de medición.
- El coeficiente de correlación trata a X e Y simétricamente, no identifica cual es la variable dependiente y cual la independiente.
- Para efectos de este estudio, si el r presentaba un grado de correlación aceptable (arriba de 0.80) para los datos de temperatura recolectados, se procedía a realizar un modelo de regresión, como en efecto se hizo.

2.4.3. Análisis de regresión de temperatura de agua y ambiente

Es un modelo estadístico para estimar el efecto de una variable sobre otra. Está asociado con el coeficiente r de Pearson. Brinda la oportunidad de predecir las puntuaciones de una variable, a partir de las puntuaciones de la otra variable. Entre mayor sea la correlación entre las variables (covariación), mayor capacidad de predicción (Sampieri et al, 2014).

De acuerdo a Kothari, 2004 en la regresión simple, se tienen solo dos variables, una variable (definida como independiente) es la causa del comportamiento de otra (definida como variable dependiente). La regresión solo puede interpretar lo que existe físicamente, es decir, debe haber una forma física en la que la variable independiente X puede afectar a la variable dependiente Y . La relación básica entre X y Y es dada por:

$$Y = a + bX \quad \text{(Ecuación 13)}$$

El símbolo Y denota el valor estimado de Y para un valor dado de X . Esta ecuación se conoce como la ecuación de regresión de Y en X (también representa la línea de regresión de Y en X cuando se dibuja en un gráfico). El

método generalmente utilizado para encontrar el mejor ajuste que puede dar una línea recta de este tipo es el método de mínimos cuadrados. Para usarlo de manera eficiente, primero se determina:

$$\sum x_i^2 = \sum X_i^2 - n\bar{X}^2 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\sum y_i^2 = \sum Y_i^2 - n\bar{Y}^2 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\sum x_i y_i = \sum X_i Y_i - n\bar{X} \cdot \bar{Y} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Entonces, $b = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2}$, $a = \bar{Y} - b\bar{X}$ (Ecuaciones 17 y 18)

Estas medidas definen y darán el mejor ajuste posible, a través de los puntos X y Y originales y el valor de r se puede calcular como sigue:

$$r = \frac{b\sqrt{\sum x_i^2}}{\sqrt{\sum y_i^2}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Por lo tanto, el análisis de regresión es un método estadístico para tratar la formulación del modelo matemático que representa la relación entre las variables que pueden usarse para predecir los valores de la variable dependiente, dados los valores de la variable independiente.

En este estudio, la temperatura del aire fue la variable independiente y la temperatura del agua constituyó la variable dependiente.

La estimación de los coeficientes de las ecuaciones determinadas, se realizó mediante la estimación de los promedios semanales de las temperaturas de la columna de agua de la laguna (superficie, 1.25, 1.00, 0.75, 0.50 y 0.25 m de profundidad) y los promedios semanales de temperatura del aire, así como de las temperaturas promedio superficiales del agua (superficie, 1.25 y 1.00 m de profundidad).

2.4.4. Contraste de hipótesis para comparaciones de la temperatura

Para las diferentes comparaciones de la temperatura se empleó el contraste de hipótesis o test de hipótesis estadístico, la cual es una prueba de significación o una prueba estadística, que indica el proceso, mediante el cual se decide si una proposición respecto de la población debe ser aceptada o no. Es una regla de decisión que indica cuándo aceptar y rechazar las hipótesis.

Un contraste de hipótesis consiste, por tanto, en estudiar dos hipótesis: H_0 (hipótesis nula), H_1 (hipótesis alternativa), de manera que se dividen los resultados muestrales en dos zonas: una zona de rechazo y otra de aceptación, de manera que, según como se obtenga el resultado, se acepta o se rechaza la hipótesis. Se tiene una región de rechazo o región crítica formada por el conjunto de los valores del estadístico de contraste que lleva a rechazar la hipótesis nula H_0 y una región de aceptación o región de no rechazo formada por el conjunto de valores del estadístico de contraste que lleva a aceptar la hipótesis nula H_0 .

Se tomó un valor de $\alpha = 0.05$ como nivel de significación (valores del estadístico que lleva a la decisión de rechazar la hipótesis nula) o nivel de riesgo y un valor de $1 - \alpha = 0.95$ como nivel de confianza (valores del estadístico que

lleva a la decisión de aceptar la hipótesis nula); también se empleó el concepto de nivel de significación (p-valor), a partir de la cual la hipótesis nula, H_0 , se rechaza.

El p-valor puede considerarse como el valor límite que un contraste sea significativo, es decir, elegido un nivel de significación α , se rechaza H_0 si $p \leq \alpha$.

2.4.5. Estratificación térmica en la laguna facultativa

2.4.5.1. Cálculo del gradiente térmico

A partir de los datos de temperatura medidos en la superficie del agua y en las profundidades de 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 m, se calculó el gradiente térmico a cada 30 minutos. El cálculo del gradiente, se realizó por la diferencia de temperatura entre dos profundidades consecutivas, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$G_T = \frac{T_x - T_{(x+0.25)}}{h} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

G_T = al gradiente térmico en °C/m, T_x y $T_{(x-0.25)}$ son las temperaturas del agua a las profundidades de “x” y “x+0.25” respectivamente y h es la diferencia de profundidades en las que se tomaron las lecturas en análisis, es decir, h=0.25 m.

Para cada 30, minutos se obtuvieron 5 gradientes térmicos de la columna de agua ($T_0-T_{0.25}$, $T_{0.25}-T_{0.50}$, $T_{0.50}-T_{0.75}$, etc.), se estimó para que se diera estratificación debía haber un gradiente igual o superior a 1 °C/m y que el mayor valor de gradiente indicaba la ubicación de la termoclina al representar el mayor cambio brusco de temperatura.

2.4.5.2. Tiempo de estratificación

El tiempo que la laguna permanece estratificada cada día, se calculó contabilizando el número de horas que ésta permanece estratificada por día de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_d = \frac{\text{número de horas donde } G_T \geq 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}}{24 \text{ horas/día}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde: E_d representa el número de días expresado como fracción en el cual la laguna permanece estratificada, de esta forma el tiempo de estratificación mensual en días y el porcentaje de estratificación se expresa de la siguiente forma:

$$E_m = \sum_1^i E_i \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\% E_m = \frac{\sum_1^i E_i}{\text{número de días del mes}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

2.4.6. Análisis de datos prueba de trazadores

Para el análisis hidráulico de la laguna, se determinó el tiempo de retención hidráulico teórico, para esto, se midió el caudal promedio diario que entraba a la laguna facultativa, mediante aforos con una probeta de 1 litro en intervalos de tiempo de una hora, se tomó el tiempo con un cronómetro en que el agua residual alcanzaba cierto volumen en la probeta para poder encontrar el caudal, mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\sum_1^i \frac{V_i}{t_i}}{n} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

V_i = volumen medido en la probeta en cada ensayo i , L.

t_i = tiempo en que el flujo alcanzaba el volumen medido V_i , s.

n = número de ensayos realizados.

Posteriormente, se procedió a calcular el tiempo de retención hidráulico teórico, a partir de la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 2003):

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

τ = tiempo de retención hidráulico, s.

V = volumen del reactor, L.

Q = caudal volumétrico, L/s.

Durante el período de cada ensayo, se obtuvieron 2,394 datos de concentración de NaCl tomados a cada 30 minutos en el primero, y en el segundo ensayo fueron 2,709 datos recopilados en el mismo intervalo, se trazó la curva del trazador por distribución discreta en el tiempo t_i y concentración de trazador C_i , con la información recolectada, se evaluó el comportamiento hidráulico de la laguna determinando, las siguientes características hidráulicas (Yáñez, 1993; Levenspiel, 1999; Metcalf & Eddy, 2003): el tiempo medio de residencia \bar{t} , la varianza σ^2 , la forma adimensional de varianza σ_θ^2 y el número de dispersión d , las respectivas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad \Delta t = \text{constante} \quad \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 2d - 2d^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{d}\right) \right] \quad (\text{Ecuación 29})$$

Otros parámetros hidráulicos que se determinaron son: número de reactores N_{SCTR} (Levenspiel, 1999), índice de corto circuitos φ (Metcalf & Eddy, 2003), masa recuperada del trazador $m_{T,out}$ (Teefy, 1996), volumen activo V_a y volumen muerto V_d (Torres, 1997).

$$N_{SCTR} = \frac{\bar{t}^2}{\sigma^2} \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$\varphi = \frac{t_i}{\tau} \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$m_{T,out} = Q \sum C_i \Delta t_i = \frac{V_R}{\bar{t}} \sum C_i \Delta t_i \quad (\text{Ecuación 32})$$

$$V_a = Q_a \times \bar{t} \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$V_d = V_R - V_a \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

\bar{t} = tiempo medio de detención, basado en mediciones discretas de pasos de tiempo, min.

σ^2 = varianza, min².

σ_{θ}^2 = forma adimensional de la varianza.

d = número de dispersión.

N_{SCTR} = número de reactores, unidad.

φ = índice de cortocircuitos.

$m_{T,out}$ = masa recuperada del trazador, mg.

V_a = volumen activo.

V_d =volumen muerto de la laguna, L.

t_i = tiempo en la i-ésima medición, min.

C_i =concentración en la i-ésima medición, mg/L.

Δt_i = incremento de tiempo respecto t_i , min.

V_R =volumen del reactor, L.

Q_a = caudal activo de la laguna, L/min.

τ = tiempo de retención hidráulico, s.

Para hacer los cálculos, los datos fueron ordenados conforme a la siguiente tabla:

Tabla VI. **Orden de los datos de las pruebas de trazadores, para los cálculos hidráulicos**

No.	Fecha	Hora	t_i (min)	Δt_i (min)	Lectura CE (mS)	Lectura CE (μ S)	Lectura Ci NaCl (mg/L)	Ci NaCl (mg/L)	$t_i C_i \Delta t_i$ (min ² .mg/L)	$C_i \Delta t_i$ (min.mg/L)	$t_i^2 C_i \Delta t_i$ (min ³ .mg/L)
-----	-------	------	----------------	-----------------------	-----------------------	--------------------------	------------------------------	----------------------	--	--------------------------------	--

Fuente: elaboración propia.

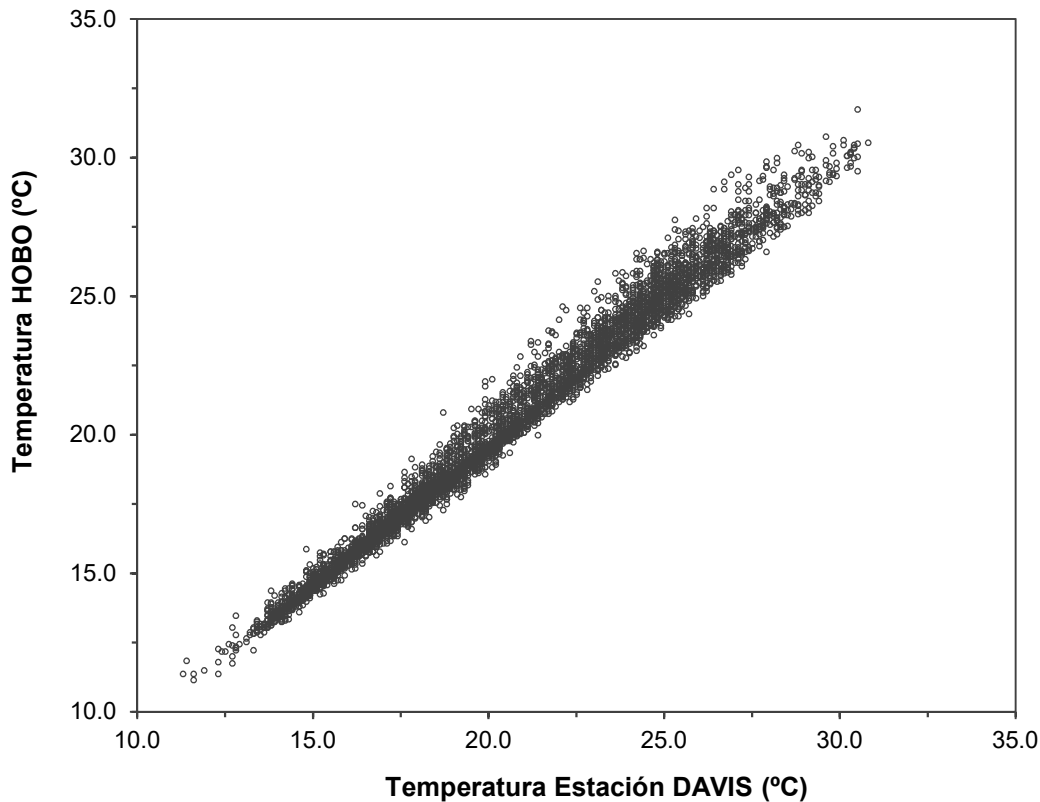
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Correlación de equipo de medición de temperatura HOBO con estación automática

En este estudio, el monitoreo continuo de la temperatura del aire y temperatura del agua de la laguna facultativa piloto de 1.50 m de profundidad a intervalos de tiempo de 30 min con sensores HOBO, ubicados en su interior y exterior fue realizado. Las temperaturas del aire medidas con los sensores con precisión de 0.50 °C fueron comparadas con las temperaturas medidas por una estación automática de la marca DAVIS PRO con precisión de 0.1 °C ubicada a 90 m de la laguna, para validar la confiabilidad de la información registrada. La figura 8 muestra el gráfico de dispersión entre ambos equipos.

Las mediciones mostraron una menor dispersión a temperaturas menores a 20 °C y mayor dispersión arriba de este valor. Se puede observar mayor desviación entre las lecturas a temperaturas más altas, lo cual pudo deberse a la diferencia en ubicación y altura entre ambos equipos 90.0 m y 3.0 m, respectivamente. Sin embargo, los valores de temperatura medidos entre ambos dispositivos mostraron una correlación altamente significativa y positiva ($R^2=0.985$) y la diferencia entre los valores medios de las lecturas fue de $0.20\text{ °C} \pm 0.54\text{ °C}$. Los dispositivos HOBO generalmente registraron temperaturas más bajas que la estación. Asimismo, la diferencia de medias no fue estadísticamente mayor de 0.75 °C (*prueba-t*, $p < 0.0001$). Lo anterior muestra la confiabilidad y precisión que presentaron los aparatos utilizados en contraste con un equipo más sofisticado como lo es una estación automática para el monitoreo continuo de temperatura realizado en este estudio.

Figura 8. **Comparación de temperatura entre dispositivos de medición**



Fuente: elaboración propia.

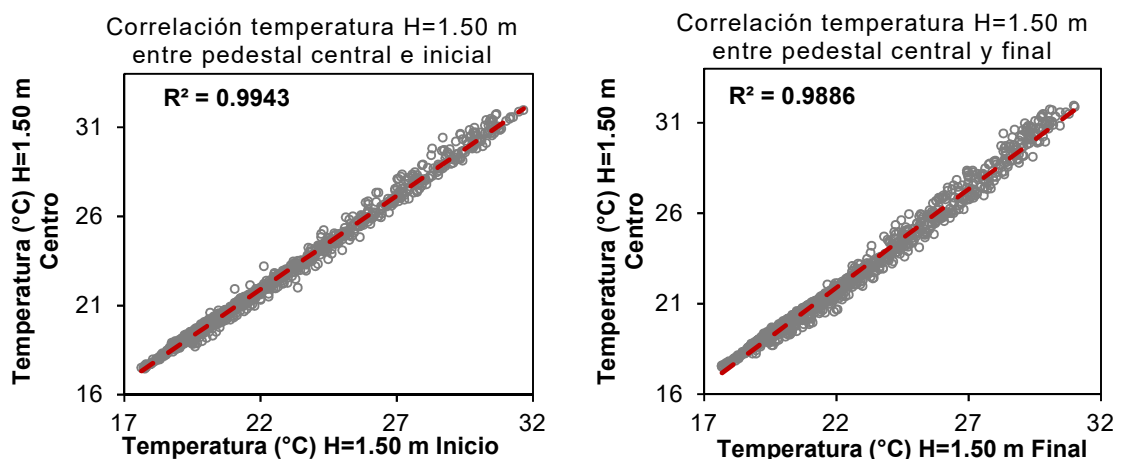
3.2. Correlación de mediciones de temperatura en la entrada, centro y salida de la laguna

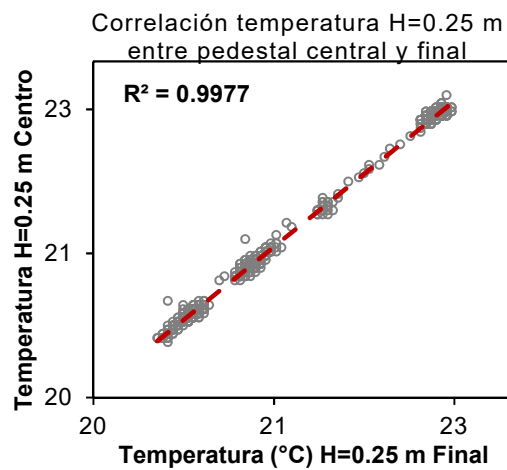
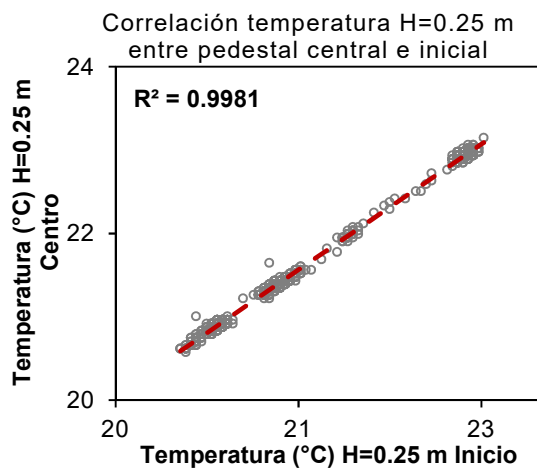
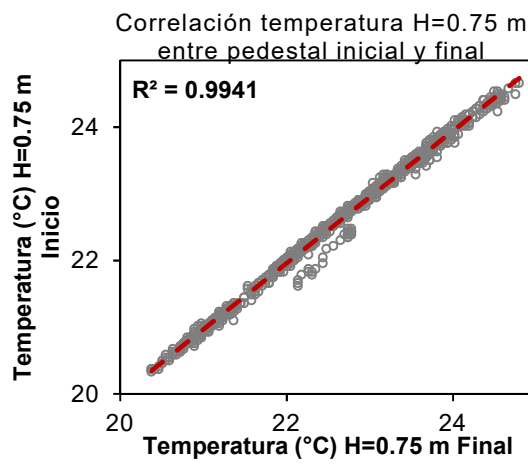
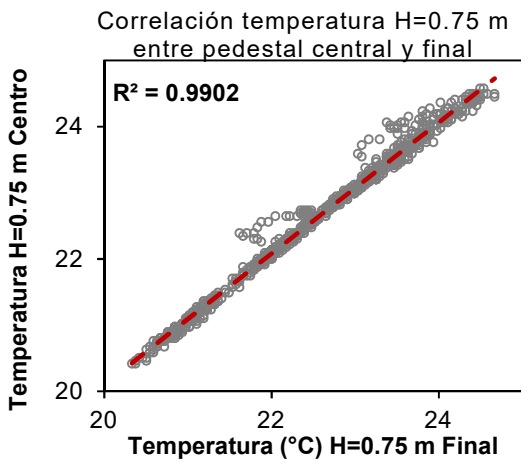
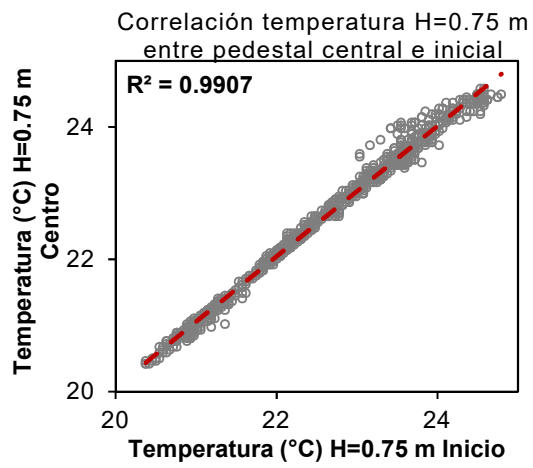
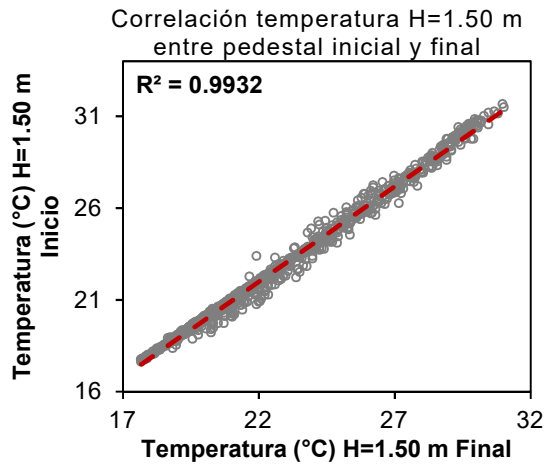
Como se mencionó en la sección 2.3.2 Medición de temperatura sensores fueron colocados en la entrada, centro y salida de la laguna a la misma profundidad de 1.25, 0.75 m y en la superficie; para conocer si los datos tomados con los seis sensores del pedestal P No. 2, ubicado en el centro eran representativos de la temperatura a lo largo del sistema en la misma profundidad. En periodos de 24 días a intervalos de 30 minutos 1,140 datos de temperatura fueron recolectados con cada sensor a cada una de las profundidades

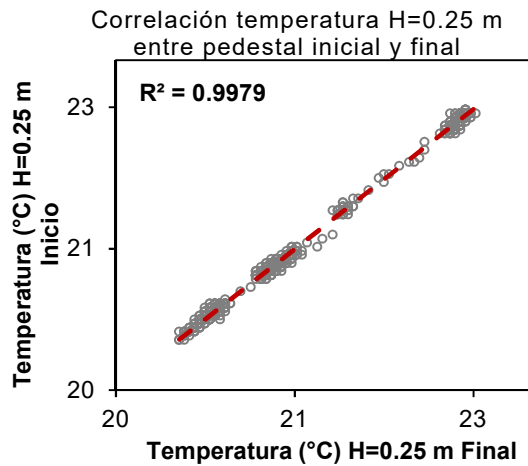
mencionadas, teniendo simultáneamente tres sensores en la misma ubicación horizontal, para cada caso se obtuvieron 3,420 lecturas que fueron correlacionadas, entre sí.

En la superficie de la laguna los datos de temperatura fueron tomados en el período del 24 de enero al 17 de febrero de 2018, valores que estuvieron entre 17.46°C - 31.96 °C, se correlacionaron las lecturas de temperatura de los sensores ubicados en el centro-inicio, centro-final e inicio-final (ver figura 9) obteniendo coeficientes de determinación R^2 de 0.9943, 0.9886 y 0.9932 respectivamente; en el mismo orden de comparación, según la ubicación de los sensores para la profundidad de 0.75 m se obtuvieron resultados de R^2 de 0.9907, 0.9902 y 0.9941, datos tomados del 11 abril – 08 de mayo de 2018, temperatura máximas y mínimas de 24.79 °C y 20.33 °C respectivamente; y para la profundidad de 1.25 m los resultados de R^2 fueron 0.9981, 0.9977 y 0.9979, el período de recopilación de los datos fue del 24 de junio al 18 de julio de 2018, temperatura máxima de 22.65 y mínima de 20.03. A partir de los valores obtenidos de R^2 (valores entre 0.9886 y 0.9981) se deduce que los datos de temperatura en las distintas profundidades a los que se instalaron los sensores en el pedestal P No. 2, son representativos e isotermos a lo largo de la laguna.

Figura 9. Correlaciones de temperatura entre pedestales





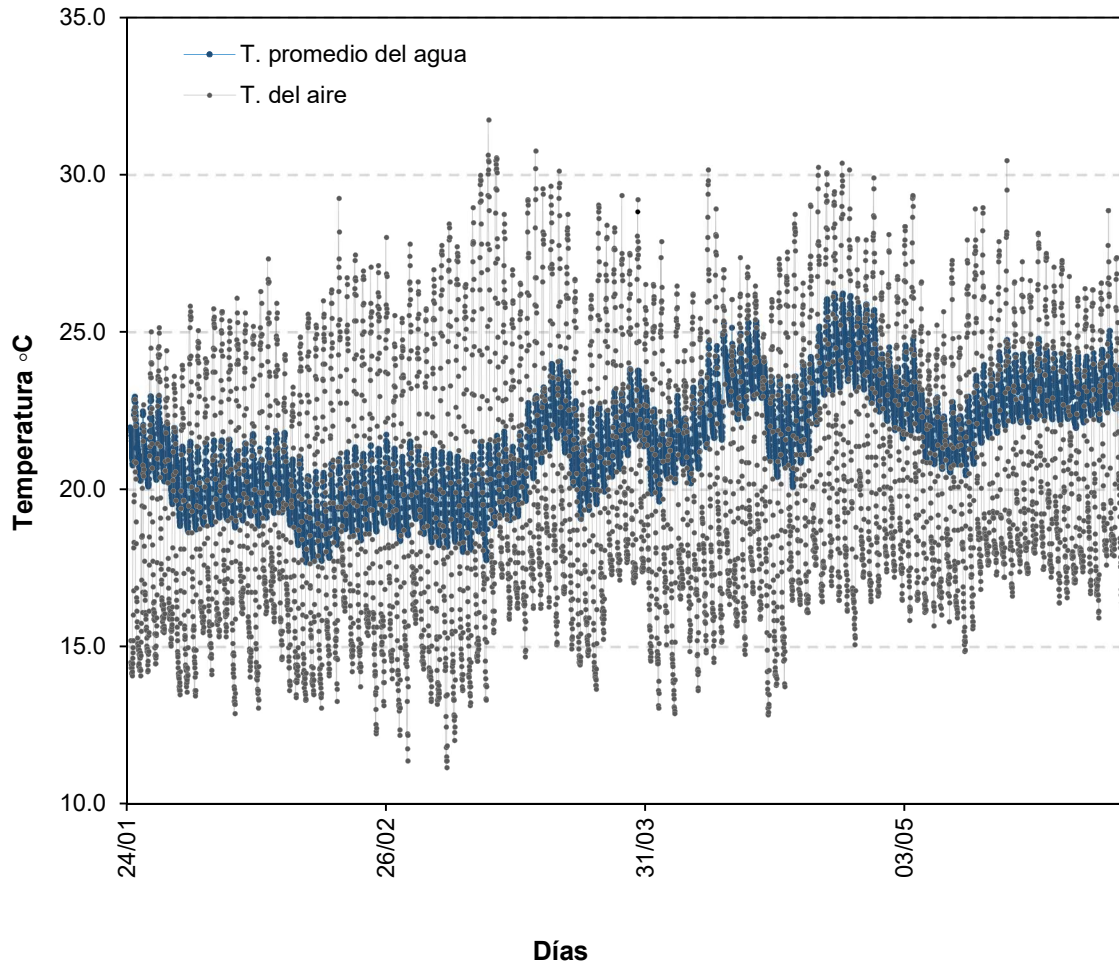


Fuente: elaboración propia.

3.3. Comportamiento de la temperatura media del agua y aire

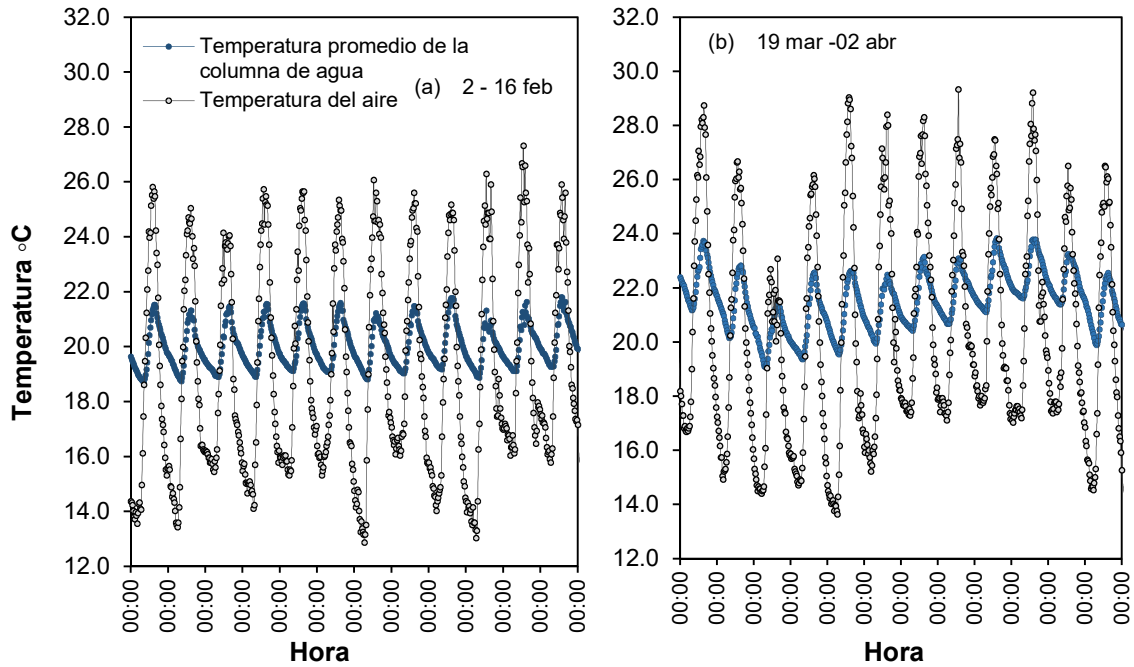
La figura 10 muestra el comportamiento de ambas variables para registros a cada 30 min en el período del 24 de enero – 31 de mayo. La temperatura del aire estuvo entre 11.15 °C y 31.74 °C, y la temperatura media de la laguna (promedio de los seis sensores ubicados a cada profundidad) entre 17.70 °C y 26.25 °C. Durante la temporada más fría de medición del 24 de enero al 10 de marzo, la temperatura media de la laguna se mantuvo más estable (19.95 ± 1.05 °C) en comparación con la temporada más cálida (22.28 ± 1.53 °C), del 10 de marzo al 8 de mayo, donde presentaron cambios más bruscos con caídas e incrementos de 3-5 °C en cortos períodos de tiempo (figura 11); estos cambios se debieron principalmente a las diferencias en las condiciones ambientales en ambas temporadas, donde la radiación solar y las condiciones de viento en las instalaciones ejercieron el papel principal. A pesar de ello, la temperatura de la laguna creció gradualmente hasta estabilizarse nuevamente cerca del 8 de mayo.

Figura 10. Variación de la temperatura del aire y la temperatura media de la columna de agua, en el período el 24 de enero al 31 de mayo



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Temperatura media del aire y de la laguna, para condiciones frías (a) y cálidas (b)



Fuente: elaboración propia.

Los valores promedios mensuales de la temperatura del aire se presentan en la tabla VII. Las temperaturas medias mensuales del aire fueron comparadas con los datos históricos de la estación INSIVUMEH para el período de 1990-2016. Se comprobó que la diferencia entre las temperaturas medias registradas, y las temperaturas históricas no fue estadísticamente mayor a 0.80 °C (*prueba-t*, $p < 0.05$), lo cual indica la representatividad de las mediciones registradas durante la investigación. En el mes de febrero, se experimentó una temperatura más baja respecto a la media histórica, sucediendo lo mismo para los meses de abril, mayo y junio.

Tabla VII. **Comparación de temperaturas medias del aire medidas con datos históricos**

Temperatura	Enero*	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	junio
<i>Medidas</i>						
Media	17.92	18.87	20.21	20.35	20.68	19.65
Máx. promedio	23.95	25.97	28.17	27.56	27.18	25.90
Mín. promedio	14.35	14.05	14.96	15.36	16.70	16.26
Máx. absoluta	25.14	29.26	31.74	30.37	30.46	28.74
Mín. absoluta	13.47	12.18	11.15	12.82	14.84	14.58
<i>Históricas INSIVUMEH</i>						
Media	18.10	19.07	20.10	21.10	21.20	20.44
Máx. promedio	24.35	25.75	26.82	27.73	27.13	25.77
Mín. promedio	13.25	13.69	14.64	16.15	16.86	16.84
Máx. ABS	27.87	29.40	30.08	30.70	30.34	28.40
Mín. absoluta	9.66	10.43	11.08	13.33	15.00	15.10

Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Patrón de comportamiento entre la temperatura del aire-agua

La temperatura del aire, así como la temperatura media de la laguna siguieron un patrón cíclico de comportamiento diario, teniendo ambas un tiempo de respuesta diferente a las condiciones ambientales, el cual se describe en los siguientes párrafos.

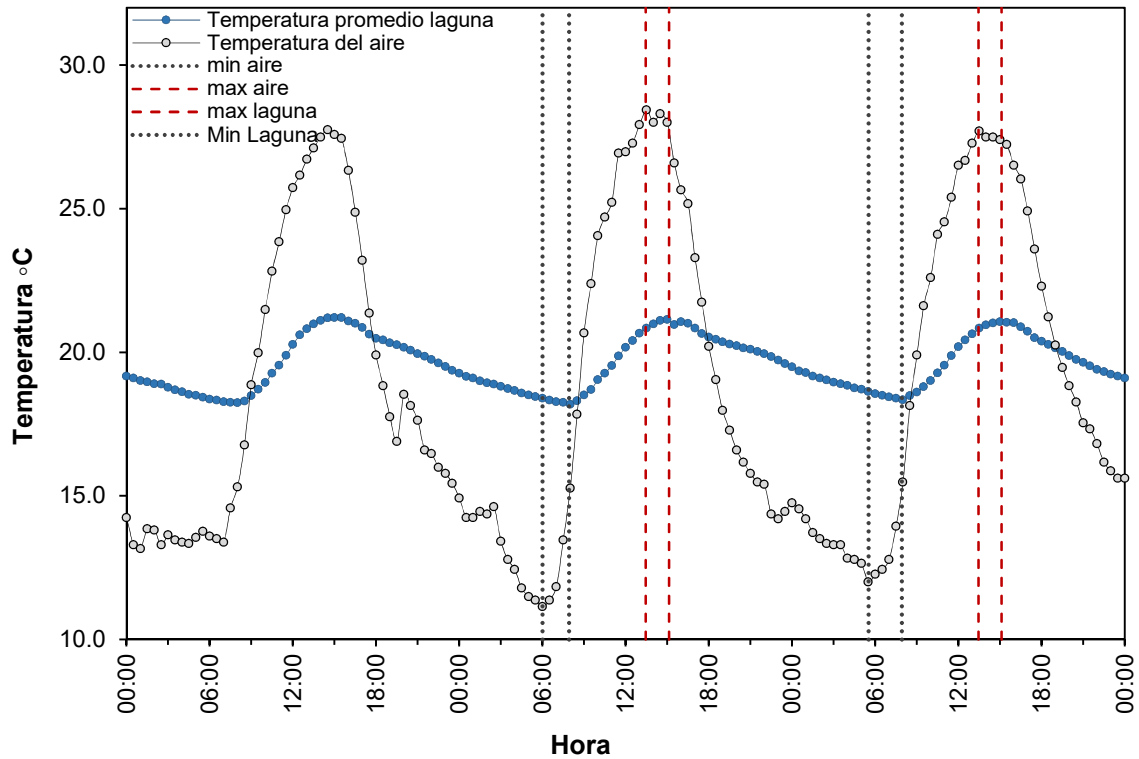
Durante las madrugadas, a partir de las 0:00 horas, la temperatura del aire decreció a gradientes entre 0.01-0.80 °C/hora encontrando su punto de inflexión y valor mínimo diario entre las 0:30 - 7:00 horas (entre las 3:00-6:30 horas el 91.34% del tiempo), mientras que la temperatura media de la laguna decreció a gradientes más bajos entre 0.06-0.23 °C/hora hasta llegar su valor mínimo, entre las 6:00-8:30 horas durante todo el tiempo (figura 12). Esto permitió un desfase

entre el tiempo en que ambas temperaturas alcanzan sus valores mínimos. La temperatura del agua de la laguna tuvo un tiempo de respuesta más lento y tarda más en enfriarse en comparación con la temperatura del aire. Este desfase ocurrió siempre y fue de 0 a 7 horas (entre 0-5 horas el 95.28 % del tiempo).

Con la salida del sol cerca de las 6:00 horas, ambas temperaturas comienza a incrementar progresivamente, luego de haber alcanzado su valor mínimo, hasta llegar a las 8:00-9:00 horas donde se producen los mayores incrementos, debido al intenso aumento de la radiación solar. La temperatura del aire aumenta a gradientes de 0.41 – 2.89 °C/hora hasta alcanzar su valor máximo del día entre las 11:30 -16:00 horas (entre las 12:00 – 15:30 el 93.70 % del tiempo). Asimismo, la temperatura media de la laguna incrementa, con la diferencia que experimenta gradientes más bajos de 0.11-0.61 °C/hora encontrando su valor máximo diario entre las 12:00-16:00 horas (entre las 13:00-16:00 el 96.85 % del tiempo).

El desfase entre el tiempo en el cual ambas temperaturas alcanzan sus valores máximos, fue de 0 a 4 horas; sin embargo, este desfase solo ocurrió el 69.29 % del tiempo, ya que el tiempo restante alcanzaron sus valores máximos a la misma hora del día. Desde las 16:00 a las 0:00 horas la temperatura del aire y temperatura media de la laguna comienzan a decrecer nuevamente con gradientes entre 0.12 -1.53 °C/hora y 0.08 – 2.8 °C/hora, para cada caso respectivamente, terminando así un ciclo diario. El conocimiento de los intervalos de tiempo, donde suceden las temperaturas máximas de la laguna, puede marcar una pauta de la ocurrencia de un mayor o menor desempeño de la laguna para ciertos procesos, como, por ejemplo, la extinción bacteriana, debido al incremento del pH producto de las altas temperaturas y mayor actividad de las algas, así como la mayor producción de oxígeno disuelto, lo cual de acuerdo a lo encontrado tomaría lugar entre las 13:00 – 16:00 horas la mayor parte del tiempo.

Figura 12. **Desfase temporal entre las temperaturas máximas y mínimas del aire**



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Diferencias entre la temperatura media del agua y temperatura del aire

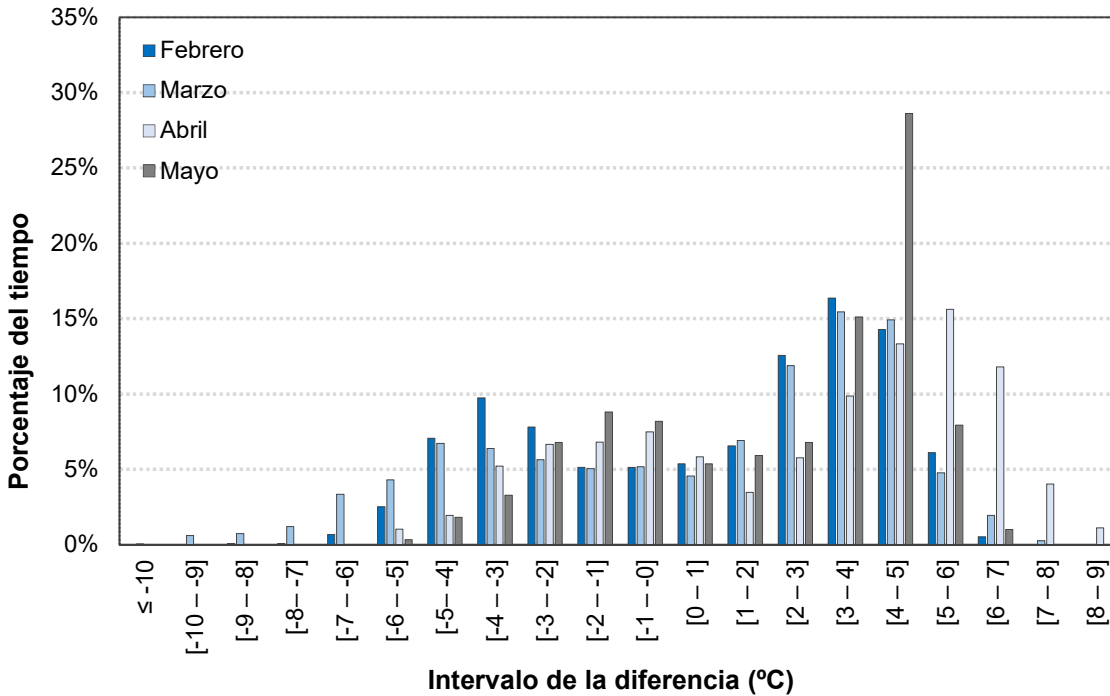
Mara (1997) y Sperling (2007), indican que la temperatura media de las lagunas es de 2-3 °C más caliente que la temperatura del aire en la temporada fría y de 2-3 °C más fría en la temporada cálida. Burgues (1982) encontró que la temperatura media de las lagunas en un clima tropical siempre excedió de 5-7 °C la temperatura del aire. Debido a conclusiones similares, se ha sugerido como temperatura de diseño para lagunas la temperatura media del aire del mes más frío, ya que se espera que este valor será mucho más bajo que la temperatura

real de la laguna en la temporada más crítica, brindado así un factor de seguridad. Con el fin de determinar la diferencia en grados que experimentaron ambas temperaturas en este estudio, se analizó mediciones a cada 30 minutos para la temperatura del aire y la temperatura media de la columna de agua (promedio de todos los sensores) entre los meses de febrero y mayo de 12,192 registros de temperaturas. Los resultados para cada mes se muestran en la figura 13. El eje horizontal representa los intervalos de la diferencia entre ambas temperaturas, agrupados en rangos de 1 °C, donde los rangos negativos expresan una mayor magnitud de la temperatura del aire sobre la temperatura media de la laguna y los rangos positivos lo opuesto.

Las diferencias variaron entre -10 °C a 9 °C. La temperatura media de la laguna estuvo por encima de la temperatura del aire el 66.73 % (mayor distribución a la derecha del gráfico), mientras que el resto del tiempo lo fue la temperatura del aire (33.27 %, distribución a la izquierda del gráfico), ambas con valores frecuentemente en el rango de 1-6 °C. En los períodos más fríos de febrero y marzo se encontró los valores más extremos siendo la temperatura del aire (cola izquierda del gráfico) ≥ 6 °C y los meses más calientes abril y mayo los valores extremos de la temperatura de la laguna por encima de la temperatura del aire (cola derecha del gráfico) ≥ 7 °C. A pesar de esto, en todos los meses se pueda notar una distribución similar en los intervalos desde [-6– -5] hasta [6– 7], es decir, se observa, tantos incrementos de la temperatura del aire sobre la del agua y viceversa.

La falta de constancia de que una temperatura no haya sido mayor que la otra en alguna temporada en específico, se debe a que la laguna no está sujeta a climas extremos (por ejemplo, temperaturas ≤ 0 °C) continuos que permitan romper los patrones diarios que ambas presentan, los cuales como se ha mencionado previamente permitieron una fluctuación cíclica diaria.

Figura 13. **Distribución de frecuencia de la diferencia entre la temperatura media de la laguna y temperatura del aire**

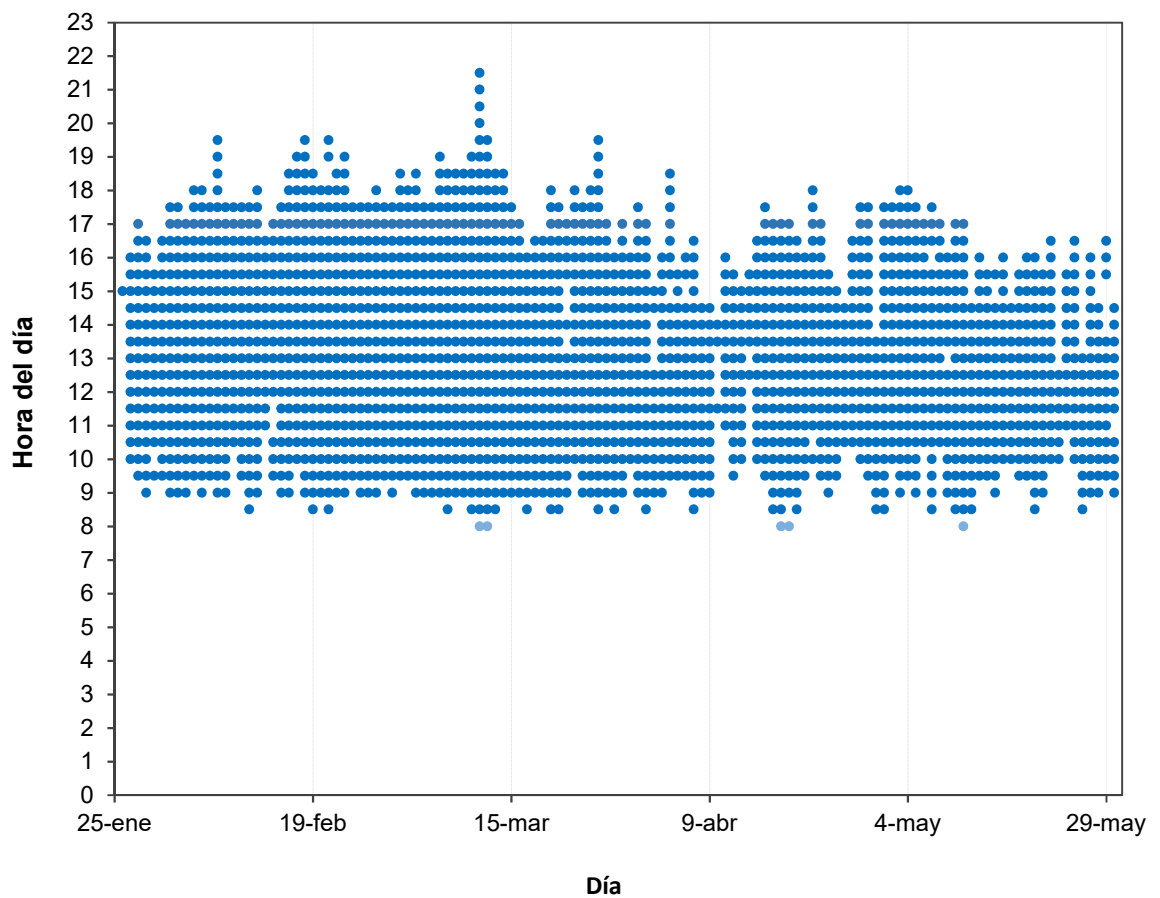


Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la figura 14 muestra las horas del día donde la temperatura del aire fue mayor a la temperatura del agua (puntos azules) y viceversa (espacios en blanco) entre 25 de enero al 31 de mayo. Se puede notar mayores valores de la temperatura media de la laguna sobre la temperatura del aire comúnmente entre las 0:00– 9:00 y las 19:00-0:00 horas, y valores mayores de la temperatura del aire sobre la de la laguna entre las 9:00 – 19:00 horas, aumentando y disminuyendo cada una su rango en la temporada de verano. De esta manera, es evidente que la ocurrencia de ambos casos fue un hecho diario, no temporal. La temperatura media de la laguna no siempre se encuentra por arriba de la temperatura del aire en un clima como el de Guatemala. Asimismo, cuando llegaron a suceder diferencias entre 7-10 °C, se pudo constatar que los

valores de la temperatura media de la laguna se encontraron por debajo de la temperatura promedio del mes más frío o de diseño; sin embargo, su frecuencia fue bastante baja limitándose a algunas horas.

Figura 14. **Horas del día donde la temperatura del aire es mayor a la temperatura media de la laguna, para el periodo del 25 de enero al 31 de mayo**



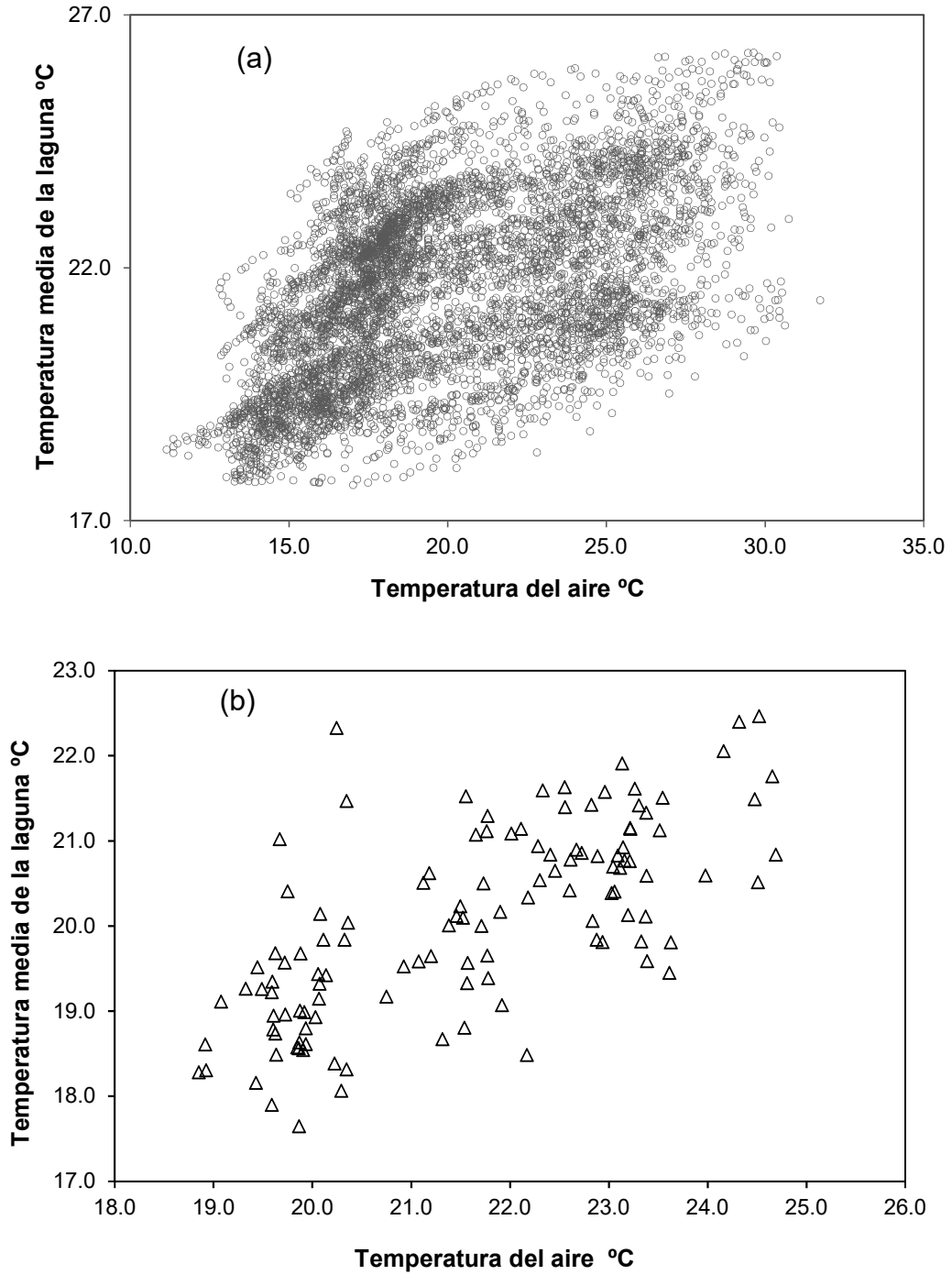
Fuente: elaboración propia.

3.4. Correlación y modelo de regresión para la temperatura media de la laguna y la temperatura del aire

Un análisis de regresión lineal simple por el método de mínimos cuadrados fue utilizado para ajustar los datos y explicar el comportamiento de la temperatura del aire sobre la temperatura media de la laguna. Los promedios de temperatura horarios, diarios y semanales fueron evaluados, donde los últimos resultaron con el mejor ajuste, siendo consistente con estudios previos (Yáñez, 1993; Abis y Mara, 2006). A pesar que las correlaciones para los promedios horarios aire-agua mostraron una tendencia lineal (figura 15 (a) y (b)), presentaron una muy alta dispersión respecto a la parte central de la concentración de datos. Esto se puede asociar a las variaciones en los datos promedios horarios, durante horas de la madrugada la temperatura media del agua fue mayor temperatura del aire y lo contrario durante el día, cayendo los primeros por encima del centro de la dispersión y los segundo por debajo de la misma, en una distancia proporcional a los incrementos o decrementos en el orden de 3-5 °C entre ambas, y las temperaturas extremas en la temporada cálida y fría (≥ 8 °C) lo que permitió una gran desviación respecto a la pendiente media de los datos. Resultados similares y con el mismo comportamiento, se observó en los datos los promedios diarios.

La correlación entre ambas variables mostró una mayor relación lineal y menor dispersión para los promedios semanales en los datos de los meses de estudio (febrero-mayo), comprendiendo temperaturas en un rango de 18.81 – 21.55 °C. La tabla VIII y figura 16 contienen los resultados estadísticos y gráficos de los datos ajustados a la recta $T_o = \beta_1 T_a + \beta_0$ en un intervalo del 95% de confianza, donde β_1 , es la pendiente y β_0 intercepto/coeficiente y T_a la temperatura del aire respectivamente. El valor-p <0.05 fue altamente significativo para la pendiente, evidenciando la linealidad e indicando que la temperatura media del agua fue afectada por los cambios en la temperatura del aire.

Figura 15. Gráfico de dispersión para correlación de valores promedios horarios (a) y diarios (b)



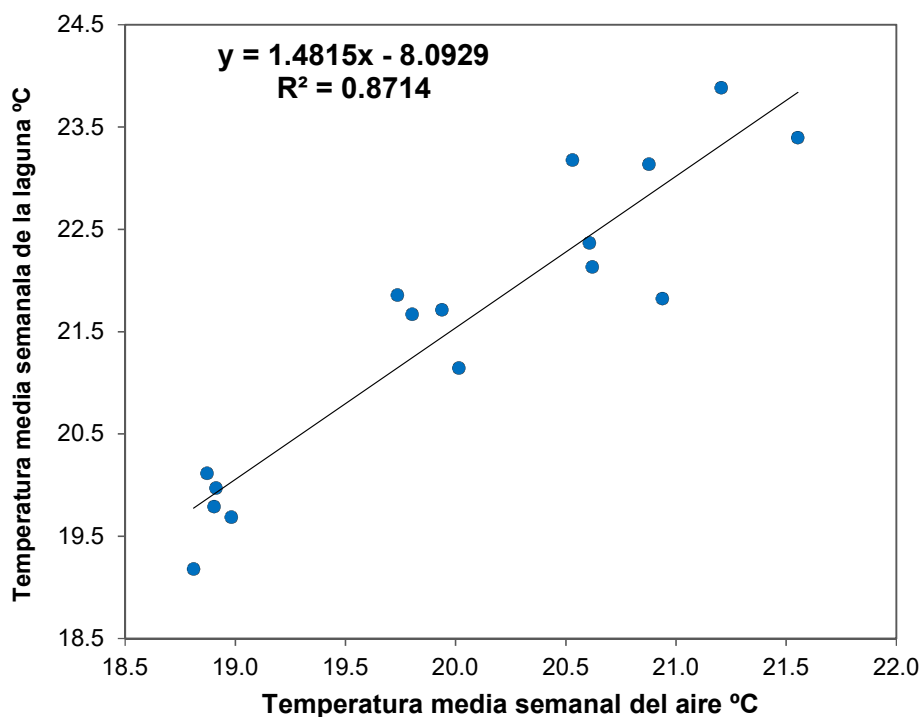
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Cálculos estadísticos de regresión lineal

Valores	Coef.	desviación típica	Valor t	Valor p	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-8.092	3.048	-2.654	0.018	-14.6314	-1.5544
Pendiente	1.481	0.152	9.738	0.000	1.1552	1.8078
Estadísticas de la regresión						
Coeficiente de correlación múltiple						0.933
Coeficiente de determinación R ²						0.8714
R ² ajustado						0.862
Error típico						0.543
Observaciones						16.000

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Línea de mejor ajuste para los datos promedios semanales a partir de las temperaturas de toda la profundidad



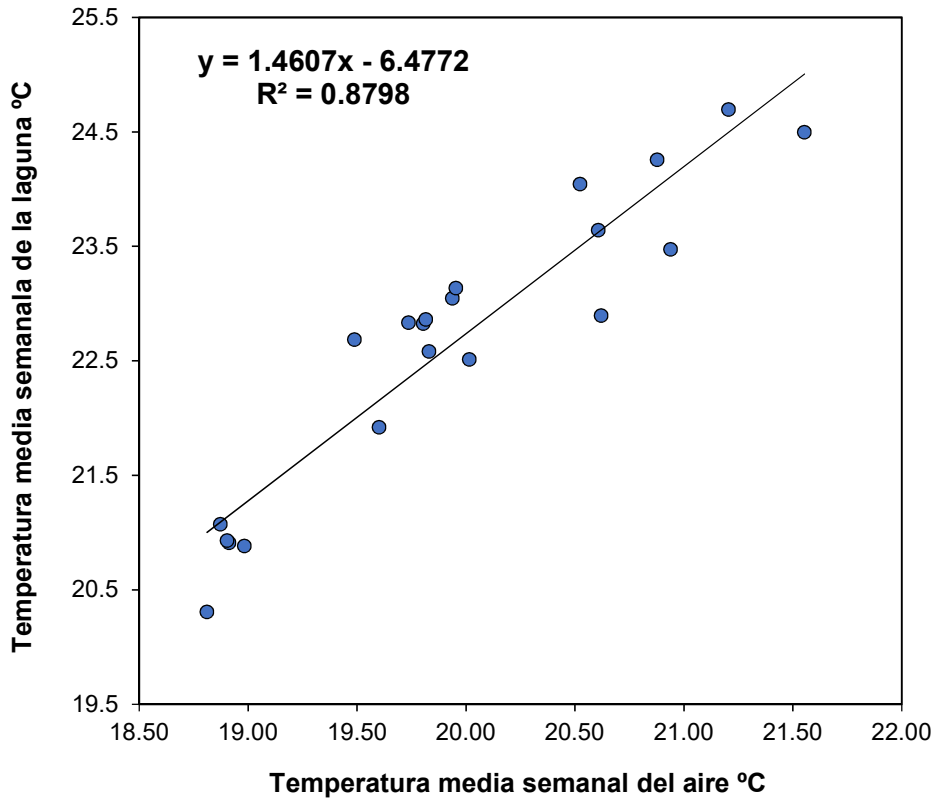
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el ajuste del modelo para el promedio semanal fue bueno, con un coeficiente de determinación $R^2=0.8714$, mostrando que el 87.14 % de la variación en la temperatura media de la laguna es explicada por los cambios en la temperatura del aire en el modelo de regresión.

Un modelo similar fue obtenido para la temperatura superficial media semanal (promedio de 3 sensores hasta 0.50 m de profundidad) de la laguna con un coeficiente de determinación $R^2=0.8798$ para los meses de febrero-junio del 2018 (figura17). Una reducción en la dispersión de los datos puede ser observada respecto al gráfico de temperatura media semanal de toda la profundidad de la laguna, la principal causal de esto, se atribuye a que en los primeros 50 cm el efecto de la radiación solar es mayor con respecto al fondo, debido a la alta turbiedad, y la falta de mezcla a lo largo de la profundidad contribuye a que se produzcan mayores temperaturas en la parte superficial y estas sean más estables y susceptibles a las variaciones que se producen por la temperatura del aire.

Esta hipótesis se sustenta en los datos medidos por los sensores a diferentes profundidades, donde se pudo identificar que la laguna presentó baja mezcla y experimento el efecto del fenómeno de estratificación térmica (ver sección 3.4). Lo anterior permite que los valores calculados a partir de la ecuación promedio semanal superficial sobreestimen en valores ≥ 1.20 °C los valores calculados, a partir de la ecuación de los promedios semanales de toda la profundidad, en temperaturas ≤ 20 °C haciéndose menor el rango por encima de este límite hasta alcanzar diferencias entre 0.90-1.0 °C. Sin embargo, es posible notar que la ecuación se encuentra dentro del intervalo de 95 % de confianza de la ecuación para los promedios semanales de toda la profundidad, y brinda resultados similares, lo que indica la fuerza que proporcionan los datos medidos en la superficie cuando se calcula la temperatura media de la laguna.

Figura 17. Línea de mejor ajuste para los promedios semanales, a partir de las temperaturas superficiales de la laguna



Fuente: elaboración propia.

La tabla IX y figura 18 muestran una comparación entre las ecuaciones que se encuentran en la literatura y las obtenidas en este estudio para un rango de temperatura del aire entre 17-24 °C. Se puede observar que, a valores más bajos de la temperatura del aire, las ecuaciones obtenidas en este estudio presentan menores valores en comparación con otros modelos, las condiciones climáticas donde fueron desarrolladas cada una de ellas es el factor principal de tal diferencia. En Guatemala, la temperatura media del aire medida para el mes de febrero durante el estudio fue 18.87 °C (19.07 la histórica de acuerdo a INSIVUMEH), donde se registró que la temperatura media mensual de la laguna

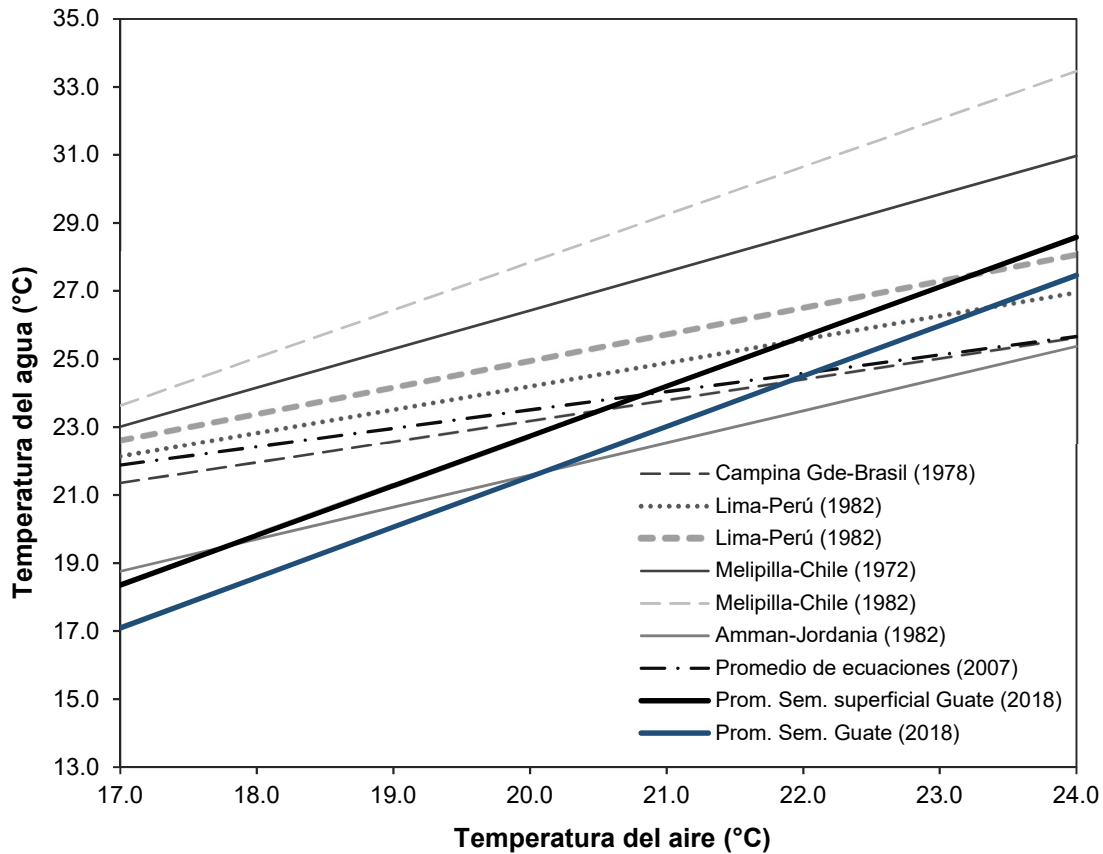
fue de 19.76 °C, menos de 1 °C de diferencia. Durante los meses de febrero y las primeras dos semanas de marzo, se presentó el período más frío del estudio, lo cual se puede ver representado en los datos de dispersión de los modelos de regresión. Asimismo, la tasa de incremento o pendiente de las rectas es mayor y solo similar a la ecuación de Chile (1982) y Chile (1972); en temperaturas del aire entre 17- 20 °C, la ecuación de los promedios semanales superficiales y promedios semanales de la columna de agua indican que la laguna se encontraría más caliente de 1.35-1.75 °C y 1-1.55 °C, respectivamente. Mientras que a temperaturas del aire en el rango de 20-24 °C, la temperatura de la laguna subiría de 2.75-4.60 °C y 1.55-3.50 °C, para ambos casos en el mismo orden.

Tabla IX. Comparación de temperaturas del agua con modelos encontrados en la literatura

T. del aire	Brasil (1978)	Lima-Perú (1982)	Lima-Perú (1982)	Chile (1972)	Chile (1982)	Jorda. (1982)	Prom. (2007)	Prom. Semanal Superficial Guatemala (2018)	Prom. Semanal Guatemala (2018)
17.00	21.35	22.14	22.60	23.01	23.63	18.75	21.88	18.35	17.09
18.00	21.96	22.83	23.38	24.15	25.04	19.70	22.42	19.82	18.57
19.00	22.58	23.52	24.16	25.29	26.44	20.64	22.96	21.28	20.06
20.00	23.19	24.20	24.94	26.43	27.84	21.59	23.50	22.74	21.54
21.00	23.80	24.89	25.72	27.56	29.25	22.53	24.04	24.20	23.02
22.00	24.41	25.58	26.50	28.70	30.65	23.48	24.58	25.66	24.50
23.00	25.02	26.27	27.28	29.84	32.06	24.42	25.12	27.12	25.98
24.00	25.63	26.96	28.06	30.97	33.46	25.37	25.66	28.58	27.46

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Comparación de modelos de regresión calculados con modelos existentes en la literatura



Fuente: elaboración propia.

Las relaciones lineales encontradas, se pueden utilizar para predecir la temperatura media de una laguna de estabilización en climas tropicales similares al de la región de Centroamericana, donde la temperatura media mensual del aire se encuentre en el rango de 17 – 24 °C. Dentro de este rango, la temperatura media de toda la profundidad de la laguna es:

$$T_{\text{MediaP}} = 1.4815T_{\text{aire}} - 8.0929$$

Debido a que los tiempos de retención de lagunas en climas cálidos varían normalmente entre 15-45 días, se considera la ecuación promedio semanal anterior como un buen estimador, con fines de diseño de lagunas facultativas. Asimismo, y dentro del mismo rango de la temperatura del aire, la temperatura media superficial de la laguna (en los primeros 50 cm) se puede calcular, a partir de la siguiente expresión:

$$T_{\text{Media}} = 1.4607T_{\text{aire}} - 6.4772$$

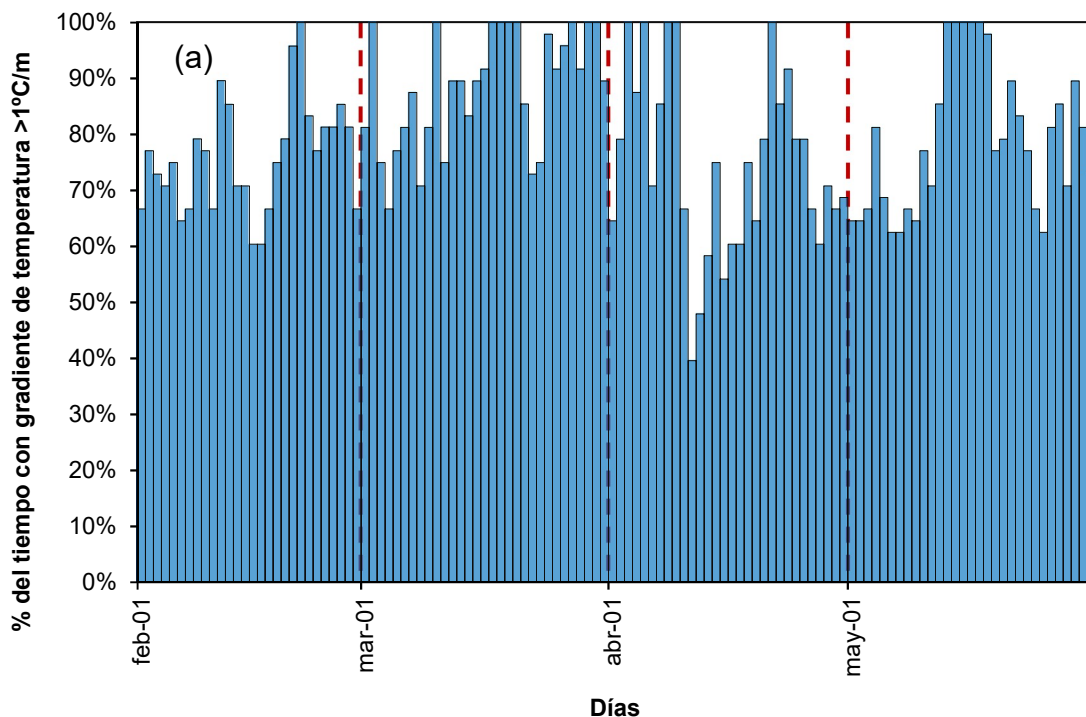
3.5. Estratificación térmica en la laguna piloto

La figura 19 muestra el porcentaje del tiempo diario donde la laguna estuvo estratificada para el período del 1 de febrero al 31 de mayo del 2018. Se consideró que sucedía el fenómeno de estratificación térmica cuando se presentaban gradientes de temperatura ≥ 1 °C/m. Con base a esto, los resultados muestran que la laguna estuvo altamente estratificada, durante el 79.62 % del tiempo, mostrando claramente un bajo grado de mezcla. Se pudo observar diferencias dentro de cada uno de los meses con respecto a la fluctuación de los períodos de tiempo, donde ocurría el fenómeno con una mayor o menor dimensión, principalmente debido a las variaciones abruptas en las magnitudes de la radiación solar, viento y con mayor fuerza la temperatura del aire. Sin embargo, el alto grado de estratificación fue consistente durante cada uno de ellos, en febrero, abril y mayo con valores de 75.98 %, 74.58 % y 79.03 % respectivamente, y en una mayor medida durante el mes de marzo con un valor de 88.37 %.

Asimismo, no se contabilizó ningún día continuo sin la ocurrencia de estratificación térmica en la laguna, lo cual indica que las condiciones de viento,

la temperatura del caudal afluente o su momentum, y ubicación de los dispositivos de entrada y salida, no fueron suficientes para destruir la estratificación y promover la mezcla y homogenización, lo cual es notable, por lo general las lagunas facultativas primarias son diseñadas para funcionar como reactores de mezcla completa, donde hay una distribución uniforme de las propiedades físico-químicas en toda su profundidad; sin embargo, los resultados encontrados muestran que en la práctica presentan un comportamiento distinto, debido a que este efecto no es comúnmente tomado en cuenta en los métodos de diseño. En cambio, la pequeña área superficial de la laguna podría haber contribuido a reducir la interacción entre el viento y la superficie activa necesaria, para promover la mezcla, lo que podría haber contribuido en cierto grado, a alcanzar los valores de estratificación encontrados.

Figura 19. **Porcentaje del tiempo donde la laguna estuvo estratificada con gradiente >1°C/m**



Fuente: elaboración propia.

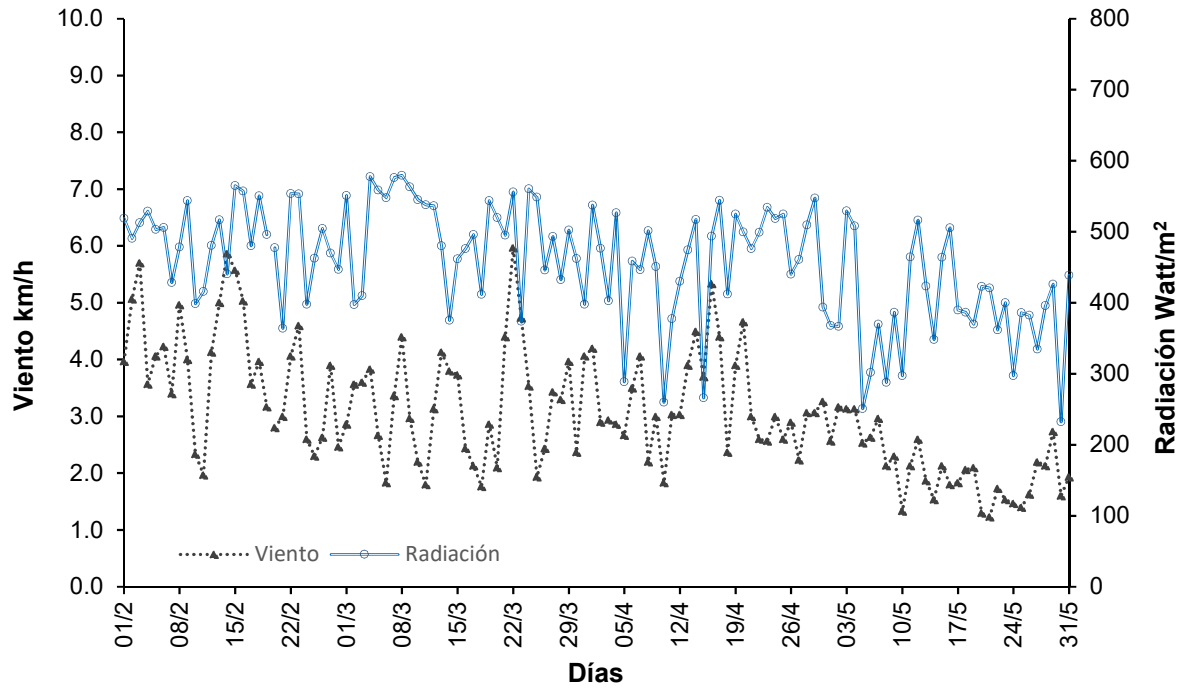
3.5.1. Influencia de las condiciones climáticas en la formación de la estratificación térmica

Las condiciones ambientales a la que estuvo expuesta la laguna se detallan en la tabla X y figura 20. Como era esperado, días altamente estratificados están asociados a altas radiaciones y bajas velocidades del viento, y días con un más bajo nivel de estratificación a bajas radiaciones y altas velocidades del viento, rara vez se pudo observar niveles de estratificación por debajo del 60 %, casos excepcionales a esto fueron los días 11 y 12 de abril donde se midió radiaciones entre 300-430 watt/m² y velocidades del viento promedio de hasta 3.10 km/hr, lo que al parecer fue suficiente para mezclar un mayor porcentaje del día la laguna, pero esto no fue común.

Las radiaciones promedio más altas se presentaron durante el mes de marzo y más bajas durante el mes de mayo, es posible notar que a pesar de una más baja radiación en mayo el grado de estratificación se mantuvo similar a los demás meses, lo cual se puede explicar con los bajos vientos promedios que se presentaron durante todo el mes. A pesar que es bien sabido la influencia del viento sobre la laguna es uno de los factores determinantes para romper la estratificación térmica, durante este estudio se encontró que la temperatura del aire desempeñó un papel de mayor importancia cuando las condiciones de viento no eran buenas, principalmente durante las horas de la noche y madrugada, de lo cual se da una explicación en los siguientes párrafos.

Los eventos de estratificación y destratificación en la laguna presentaron un comportamiento común, caracterizados por ciclos diarios, influenciados por la radiación, viento y temperatura del aire. Una descripción general de tal comportamiento se da a continuación:

Figura 20. Registros de radiación solar y velocidad del viento entre el 1 de febrero al 31 de mayo del 2018



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Condiciones climáticas y períodos de estratificación de febrero-mayo

Valores promedios mensuales				
Mes	% del tiempo Estratificada	Viento (km/hr)	Radiación (watt/m ²)	Temperatura del aire °C
febrero	75.98%	3.86	487.16	18.87
marzo	88.37%	3.20	497.11	20.21
abril	74.58%	3.24	459.67	20.35
mayo	79.03%	2.09	388.10	20.68

Fuente: elaboración propia.

Frecuentemente entre las 0:00 – 6:00 horas la temperatura de la laguna se encontraba uniforme en toda su profundidad. Cerca de las 6:00 horas con la salida del sol, la parte superficial de la masa de agua comenzaba a ganar calor rápidamente, debido al aumento de la radiación solar, donde luego de cerca de 3 horas de sol con una radiación promedio, a partir de 125 watts/m² entre las 8:30-9:30 horas se producía el fenómeno de estratificación térmica, caracterizado por una termoclina en los primeros 0.25 m de la laguna con gradientes > 1°C/m.

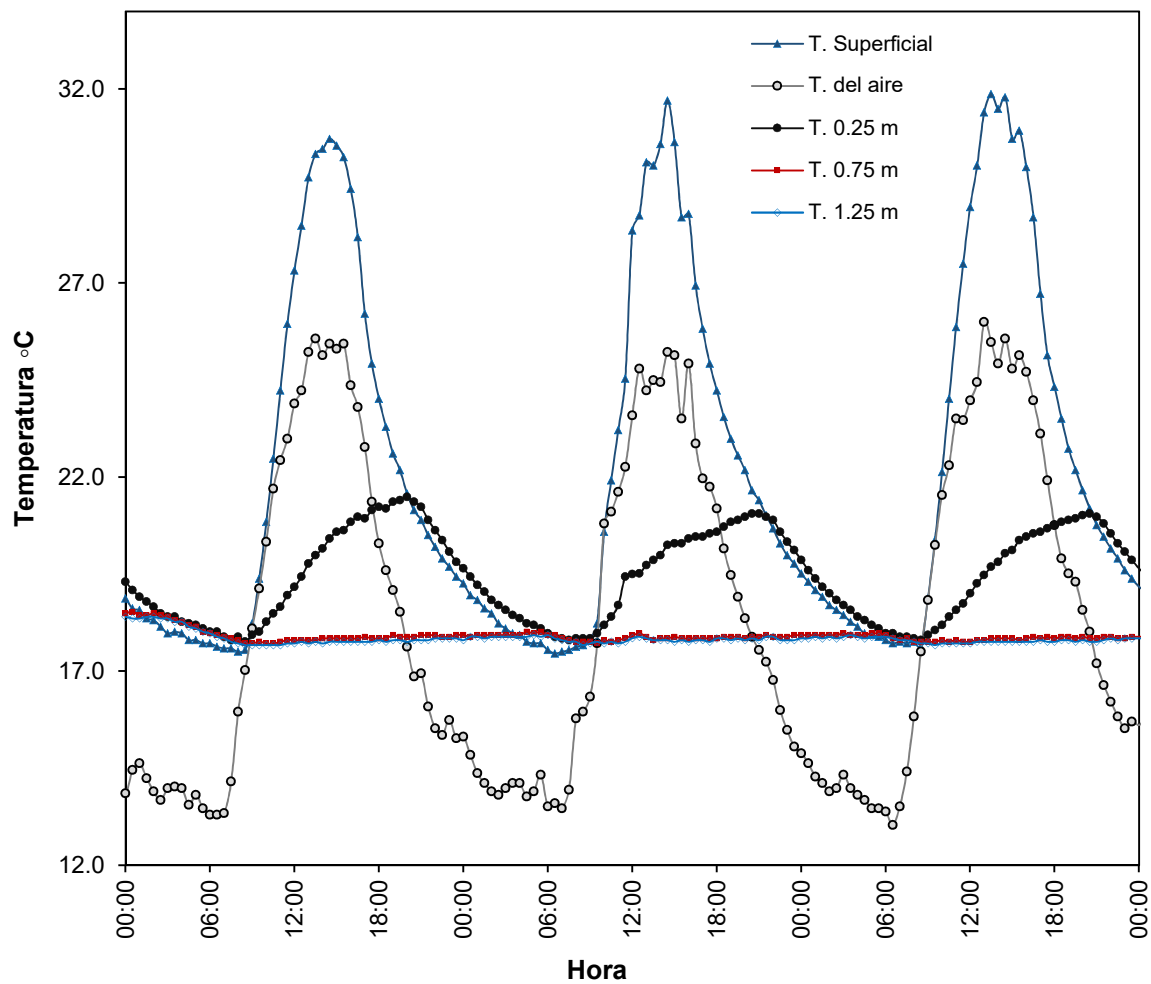
No obstante, la temperatura bajo la primera capa de 0.25 m (los restantes 1.25 m de la laguna) se mantenía invariable (Figura 21). A media mañana, la temperatura superficial de la laguna supera la temperatura del aire, llegando a su cenit entre las 13:00 – 16:00 horas, en este punto la laguna alcanzaba una diferencia de temperatura en los primeros 0.25 m entre 5 – 16 °C, llegando a ser de hasta 8-20 °C entre la superficie y el fondo.

Lo anterior daba lugar a que se generaran gradientes térmicos mayores a 15 °C/m y tan altos como de 40 °C/m; sin embargo, a pesar de tales condiciones, y vientos entre 1-8 km/hr no se producía mezcla o transferencia de calor entre la primera capa de 0.25 m y los restantes 1.25 m de profundidad marcando así un claro epilimnio e hipolimnion. Cuando la tarde caía, la radiación solar disminuía y tanto la temperatura superficial de la laguna como la temperatura del aire decrecían.

Luego de la puesta del sol, entre las 18:00 – 22:00 horas, la temperatura del aire se convertía en el principal factor de enfriamiento del volumen de agua, la cual al caer bajo la temperatura más baja de la laguna (del fondo), junto con los vientos de menor intensidad que se presentaban (1-6km/hr y ausencia de viento en algunos casos), favorecían la mezcla en los primeros 0.25 m uniformando así estas capas, y permitiendo que la termoclina bajara y se ubicara un poco más arriba de la profundidad media de la laguna; pero manteniendo la

laguna siempre estratificada con una clara diferencia entre la capa superior y el fondo. La destratificación solo ocurrió generalmente pasadas las 0:00 horas, cuando la temperatura del aire se encontraba cerca de su valor máximo (parte más baja), lo cual provocaba que la parte superior de la laguna llegara a temperaturas cercanas a las del fondo y estas pudiesen mezclarse.

Figura 21. **Registros de temperatura a diferentes profundidades, para períodos de estratificación térmica diarios**



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, parece ser que la estratificación continuada por más de un día en la laguna estuvo ligada a la fluctuación de los valores máximos y mínimos diarios de la temperatura del aire. Debido a la poca variabilidad que presenta la temperatura del fondo de la laguna, esta se mantiene casi constante, por lo que un aumento de aproximadamente > 1.5 °C en la temperatura máxima diaria del aire respecto a la temperatura del día previo, acompañada de incrementos en la temperatura mínima diaria del aire, provocó que las capas superiores de la laguna, no pudieran ser homogenizadas.

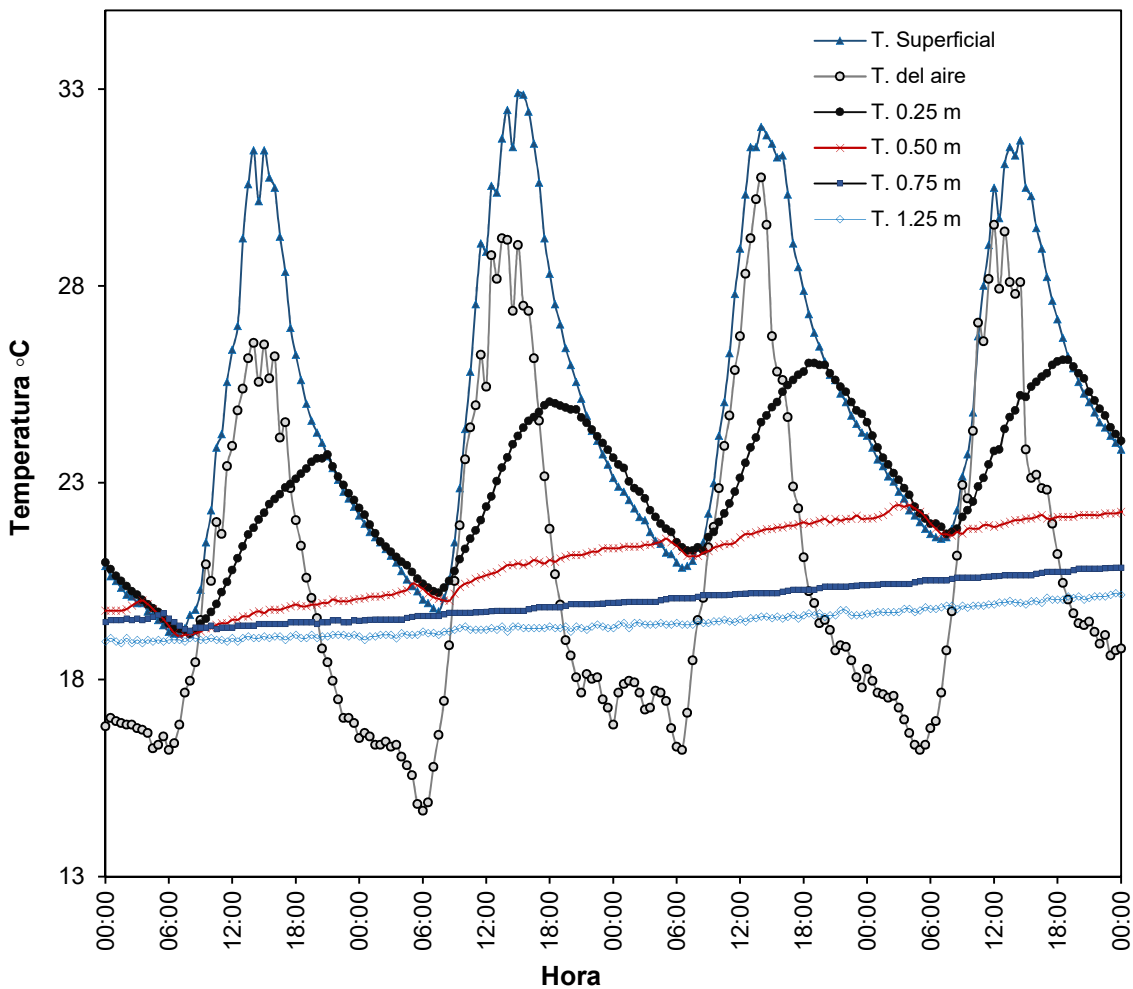
Al llegar la noche el enfriamiento que habitualmente realiza la temperatura del aire sobre las capas superiores de la laguna era menor, producto de los mayores valores alcanzados por la temperatura mínima del aire, no permitiendo que estas tomen temperaturas más bajas y se logren mezclar con las capas del fondo, las cuales no sufren cambios significativos cuando suceden estos cambios repentinos en comparación.

Lo anterior, originó la formación de una termoclina en las partes más bajas de la laguna, permitiendo que esta continuase estratificada durante varios días hasta suceder una caída en los valores máximo y mínimo diario de la temperatura del aire. Esto indica que lagunas bajo las mismas condiciones con profundidades > 1.50 m, podrían permanecer estratificadas continuamente por periodos mucho más largos de tiempo.

Lo antes descrito, se muestra en la figura 22, donde la temperatura del aire (línea gris) está alcanzando valores máximos diarios y mínimos diarios mayores cada día, favoreciendo el alejamiento de las capas superiores sobre las inferiores (líneas rojas y negras), por la falta de enfriamiento y no permiten que estas sean uniformes durante la noche.

Dando lugar de esta manera a una estratificación continuada. Es importante señalar que, este fenómeno permitió que aun cuando se presentaron valores de radiación bajos, y siempre y cuando hubiese cambios significativos en los valores máximos y mínimos diarios de la temperatura del aire, la laguna permaneciera estratificada continuamente.

Figura 22. **Registros de temperatura a diferentes profundidades, para períodos de estratificación térmica continua**



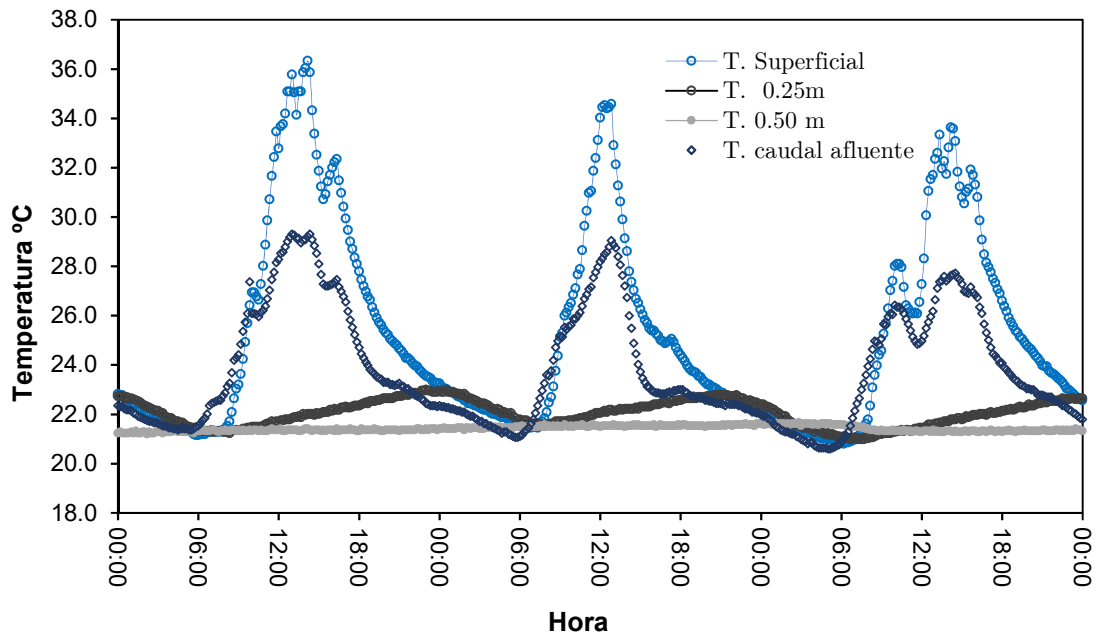
Fuente: elaboración propia.

Además, se encontró que el efecto de la temperatura del caudal de entrada a la laguna no fue suficiente para destruir la estratificación térmica formada. Esto pudo ser en mayor medida, debido a que el caudal entra por la parte superior a 5 cm bajo el nivel del agua, y usualmente con una menor temperatura (menos densa) que la temperatura de la laguna a 0.25 m (más densa), con la cual puede a llegar a alcanzar diferencias de 2-8 °C, puede emerger así cerca de la parte superficial producto de sus diferencias de densidades y siendo obstaculizada por una termoclina bastante estable en los primeros 0.25 m, la cual le impide mezclarse con las capas inferiores (figura 23).

Esto último pudo haber dado lugar a la generación de corto circuitos hidráulicos por la parte superficial de la laguna. Adicionalmente, se pudo observar que las variaciones de temperatura del caudal entrante tuvieron un comportamiento marcado por el clima, lo que permitió que, durante horas de la mañana, entre las 6:00 – 10:00 horas la temperatura del líquido entrante fuese ligeramente mayor que la temperatura en la laguna, contribuyendo así junto a la radiación solar a que las capas superficiales ganaran calor más rápidamente.

Similarmente, en horas de la noche, la temperatura del caudal de entrada bajaba un poco más que la temperatura de la laguna ayuda a favorecer el enfriamiento causado principalmente por las condiciones de viento y la temperatura del aire.

Figura 23. Registro de temperatura del caudal de entrada en la laguna



Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Patrones de estratificación

Aun cuando la ocurrencia de la estratificación térmica en la laguna, se presentó bajo condiciones bastante similares durante el período de estudio, se pudo observar variaciones en su frecuencia y duración durante el día, dando lugar a que se originen diferentes tipos de patrones. Gu y Stefan (1995) estudiando las condiciones de estratificación de las lagunas Harrison en Minnesota, describieron tres tipos patrones que observaron como: Tipo I: completamente mezclado durante un día consecutivo; Tipo II: estratificado durante el día y mezclado durante la noche y Tipo III: continuamente estratificado durante un día. Abis & Mara (2006) adicionalmente a estos, encontraron otro patrón al que denominaron

Tipo IV, donde sucedía una inversión durante el día en la capa superficial respecto a las temperaturas del fondo.

De estos patrones, se encontró que los tipos I y II fueron experimentados por la laguna piloto, pudiéndose observar un patrón más, el cual se ha definido como Tipo V: Estratificado durante el día y mezclado durante parte de la noche. Este último patrón se ha propuesto, debido a que se trata de distinguir con un poco más de precisión que la laguna no siempre estuvo mezclada durante todo el período que se entiende normalmente por la noche lo cual abarca entre las 0:00-6:00 y las 18:00- 0:00 horas, ya que casi todo el tiempo la mezcla sucedió durante la madrugada (0:00- 6:00 horas) y algunas horas del día (6:00-8:00) y rara vez entre las 18:00 – 0:00 horas, donde normalmente se encontraba estratificada.

Los días que sucedió cada uno de estos patrones dentro cada mes, se presentan en la tabla XI, donde puede ser observado que la estratificación tipo V fue la más frecuente, dando lugar a que la laguna solo tuviera mezcla parte de la noche el 77.50 % del tiempo, así también como llegó a impedirse completamente ~ 18.33 % del tiempo cuando sucedió el patrón tipo III.

Tabla XI. Número de días de cada mes con patrones de estratificación definidos por Gu y Stefan (1995) y encontrados en este estudio

Tipo	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total	Porcentaje
II	0	1	2	2	5	4.17
III	1	10	5	6	22	18.33
V	27	20	23	23	93	77.50

Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Variación de la profundidad de la termoclina

La tabla XII presenta el porcentaje del tiempo y ubicación estimada de la termoclina en los 1.50 m de profundidad de la laguna cuando se producía estratificación térmica. Los cálculos fueron realizados a partir de 34,560 registros continuos de temperatura en la superficie y a profundidades de 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 m. La termoclina se ubicó donde ocurría el cambio más brusco de temperatura que produjera un gradiente > 1 °C/m, cuando se presentó más de un gradiente entre profundidades, se tomó el de mayor magnitud. Los resultados muestran que el 85.27 % del tiempo de estudio la termoclina se situó en los primeros 0.50 m, con una mayor frecuencia en esa ubicación durante los meses de febrero y mayo, extendiéndose hasta 0.75 m con más constancia en los meses de marzo y abril. Rara vez se encontró por debajo de la profundidad media de la laguna (1.03 % del tiempo).

Diferencias entre la temporada más fría y cálida, se pudo notar, teniendo una mayor profundidad la termoclina en la temporada cálida y siendo más estable en la primera capa en la temporada fría, lo cual no fue consistente con estudios previos (Marais, 1966; 1971). La alta frecuencia de ubicación en la capa superior (0-0.25 m) en febrero y mayo, se debió a la menor magnitud de cambios drásticos en las temperaturas máximas y mínimas de la temperatura del aire, que permitían mayor desviación entre las temperaturas de las capas superior e inferior, lo que como se ha mencionado en las secciones anteriores, fue el principal mecanismo de enfriamiento y mezcla en la laguna, durante horas de la madrugada, siendo más recurrente este fenómeno en los meses de abril y mayo.

De esta manera, se pudo identificar una menor altura del epilimnio durante la más temporada fría con respecto a la temporada más caliente. Lo cual sugiere que durante la primera de ellas se podría encontrar condiciones, con una menor distribución de oxígeno disuelto (pudiendo verse limitado a los primeros 0.25 m),

y una alta estratificación fisicoquímica, debido a la barrera horizontal estable que forma la termoclina muy cercana a la superficie.

Tabla XII. Ubicación de la termoclina cada mes expresado como porcentaje del tiempo

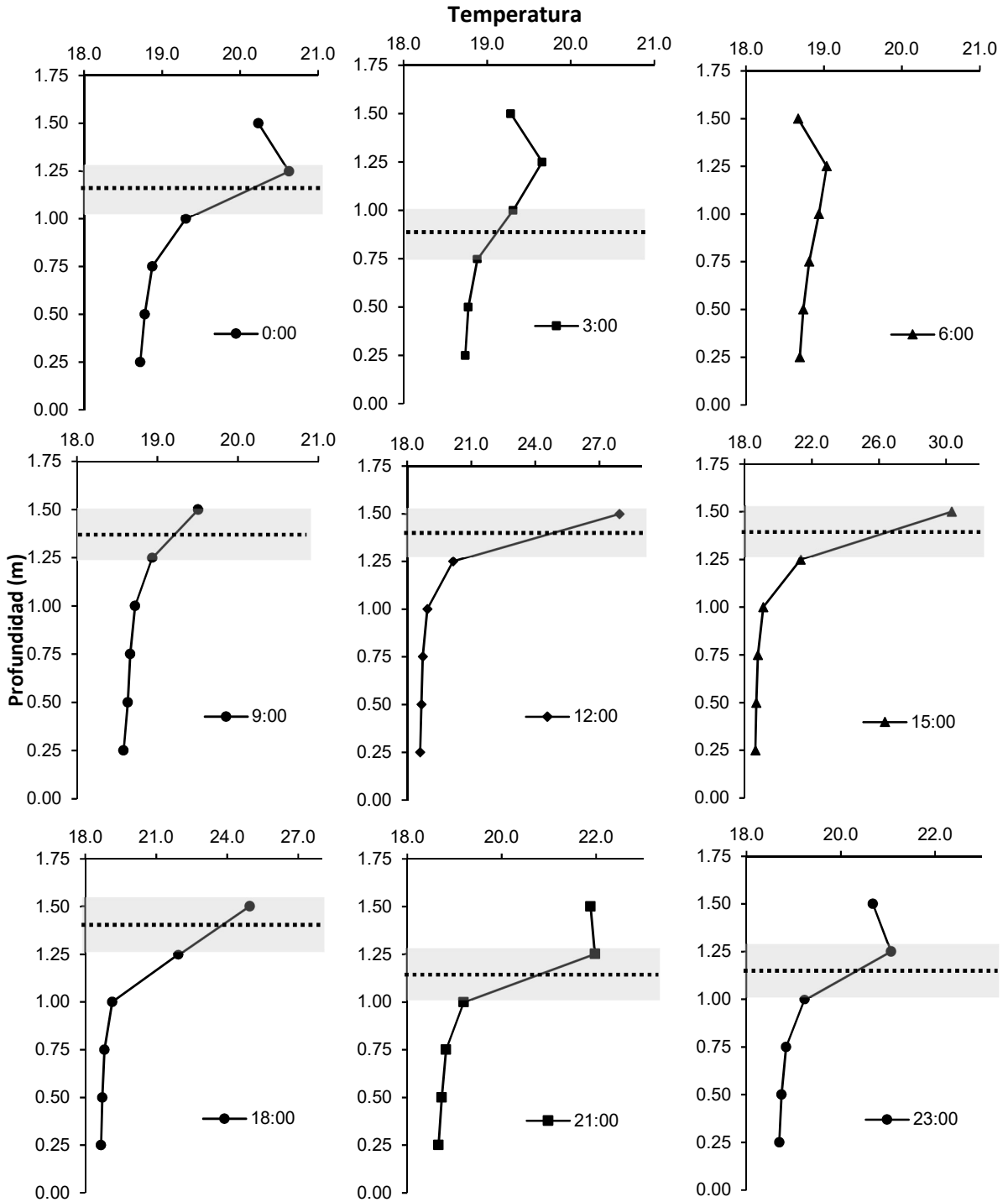
Estrato donde se localiza termocl. (m)	% del tiempo									
	Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Total	
	relativo	acum.	relativo	acum.	relativo	acum.	relativo	acum.	relativo	acum.
0.0-0.25	49.70	49.70	38.90	38.90	31.60	31.60	55.00	55.00	46.77	46.77
0.25-0.50	44.70	94.30	36.10	75.00	38.80	70.40	37.30	92.30	38.50	85.27
0.50-0.75	5.70	100.00	23.80	98.80	25.50	95.90	7.50	99.80	13.70	98.97
0.75-1.00	0.00	100.00	1.20	100.00	4.10	100.00	0.20	100.00	1.03	100.00
1.00-1.25	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

Cuando la termoclina se ubicaba a profundidades de 0-0.25 m, durante la temporada fría, su continuidad se extendía regularmente entre las 9:00 - 18:00 horas, para luego bajar hasta los primeros 0.50 m durante la noche. Pasadas las 0:00 horas, ocasionalmente y previo a la homogenización y mezcla en la laguna, esta se podía encontrar cerca de la profundidad media (0.75m). Durante la temporada más caliente se pudo notar una alternancia de la termoclina entre las profundidades de 0-0.25 m y 0.25-0.50 entre las 6:00 – 18:00, siendo más

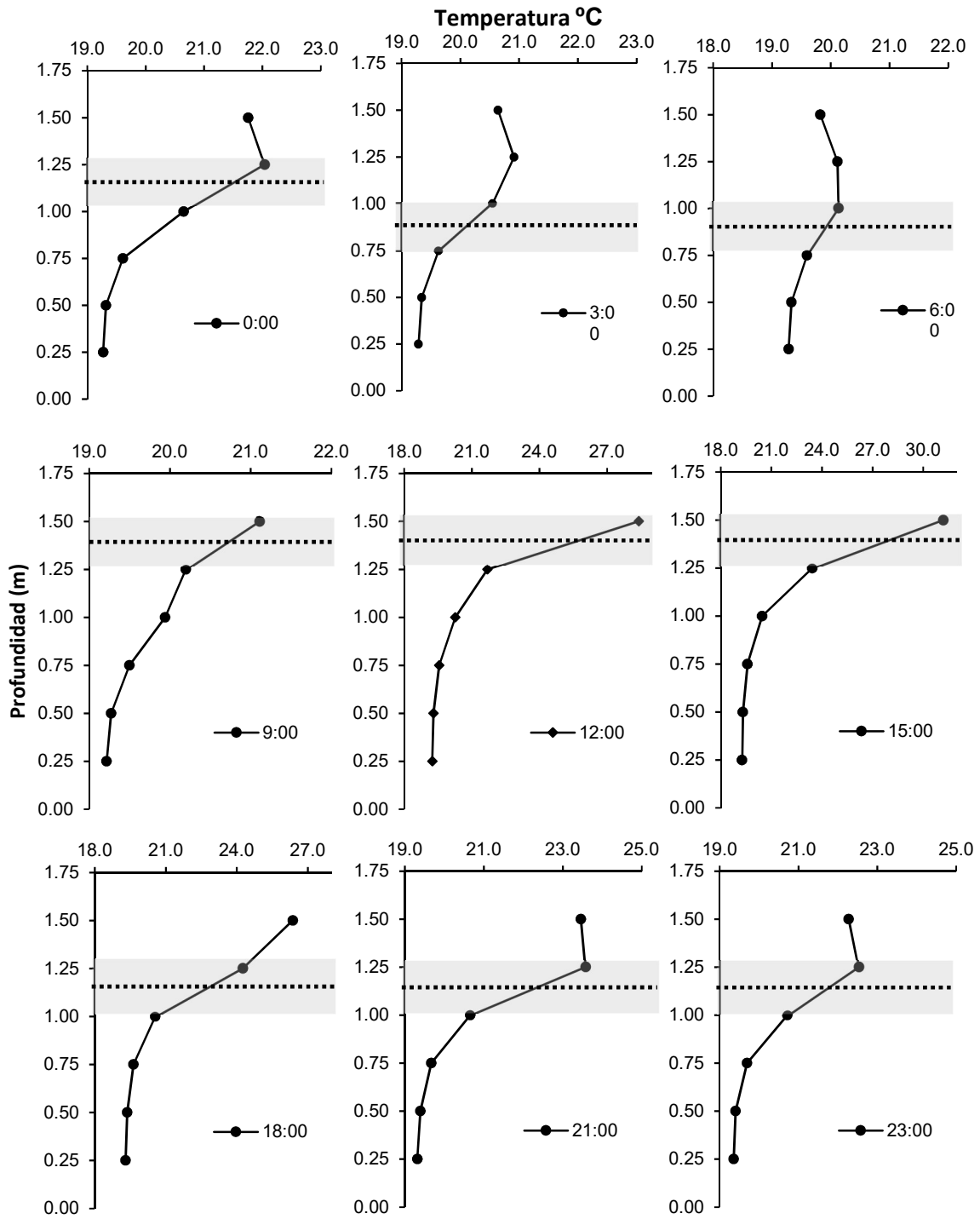
consistente durante la noche a una profundidad de 0.50 m, y extendiéndose ocasionalmente hasta cerca de la profundidad media de la laguna, a partir de las 21:00 horas, para luego desaparecer durante los períodos de mezcla que usualmente tomaban lugar en la madrugada. Las figuras 24,25,26 y 27 muestra las variaciones horarias de la termoclina durante cada mes, calculadas a partir de datos promedios horarios mensuales de las diferentes profundidades.

Figura 24. Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de febrero



Fuente: elaboración propia.

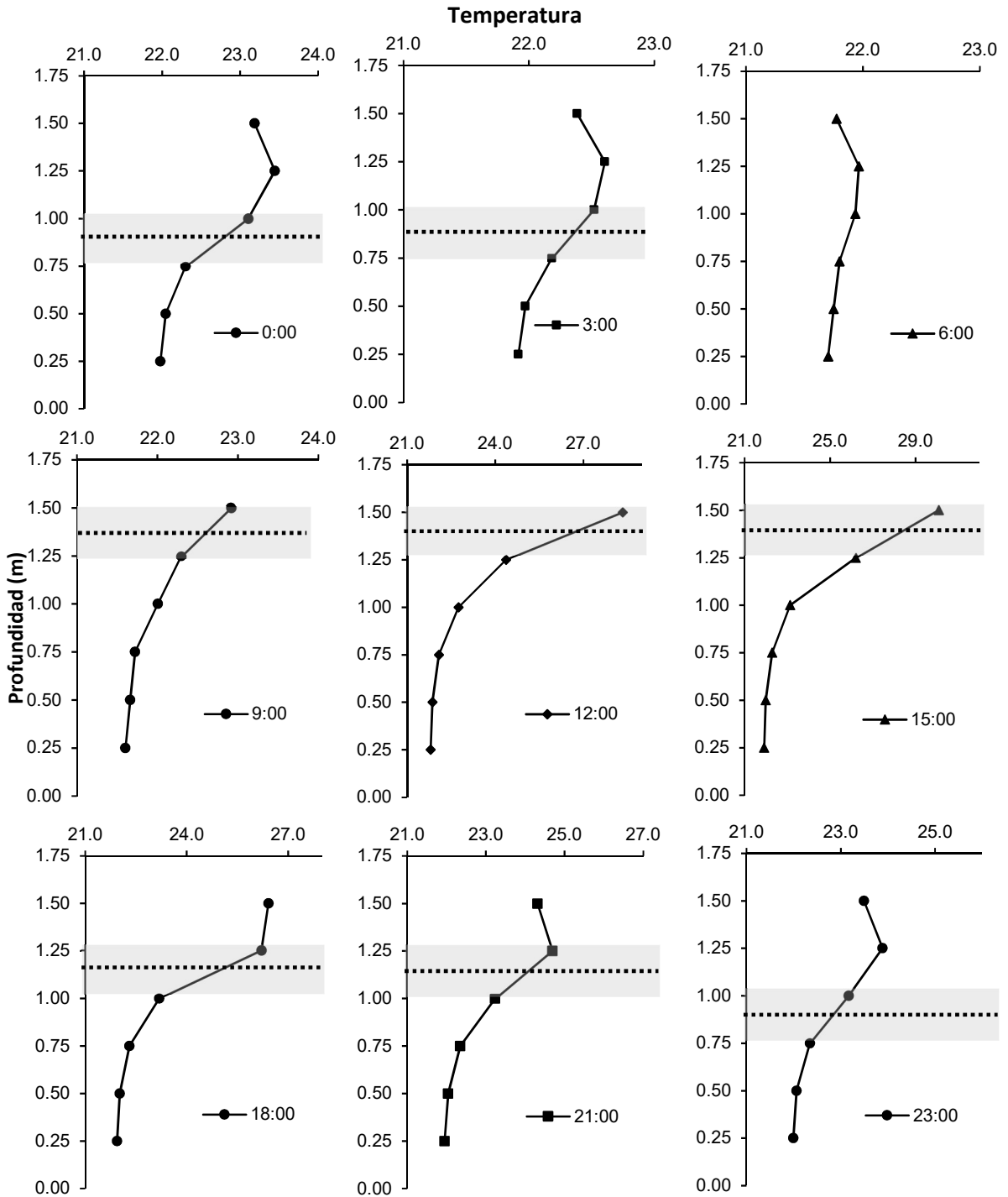
Figura 25. Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de marzo



Fuente: elaboración propia.

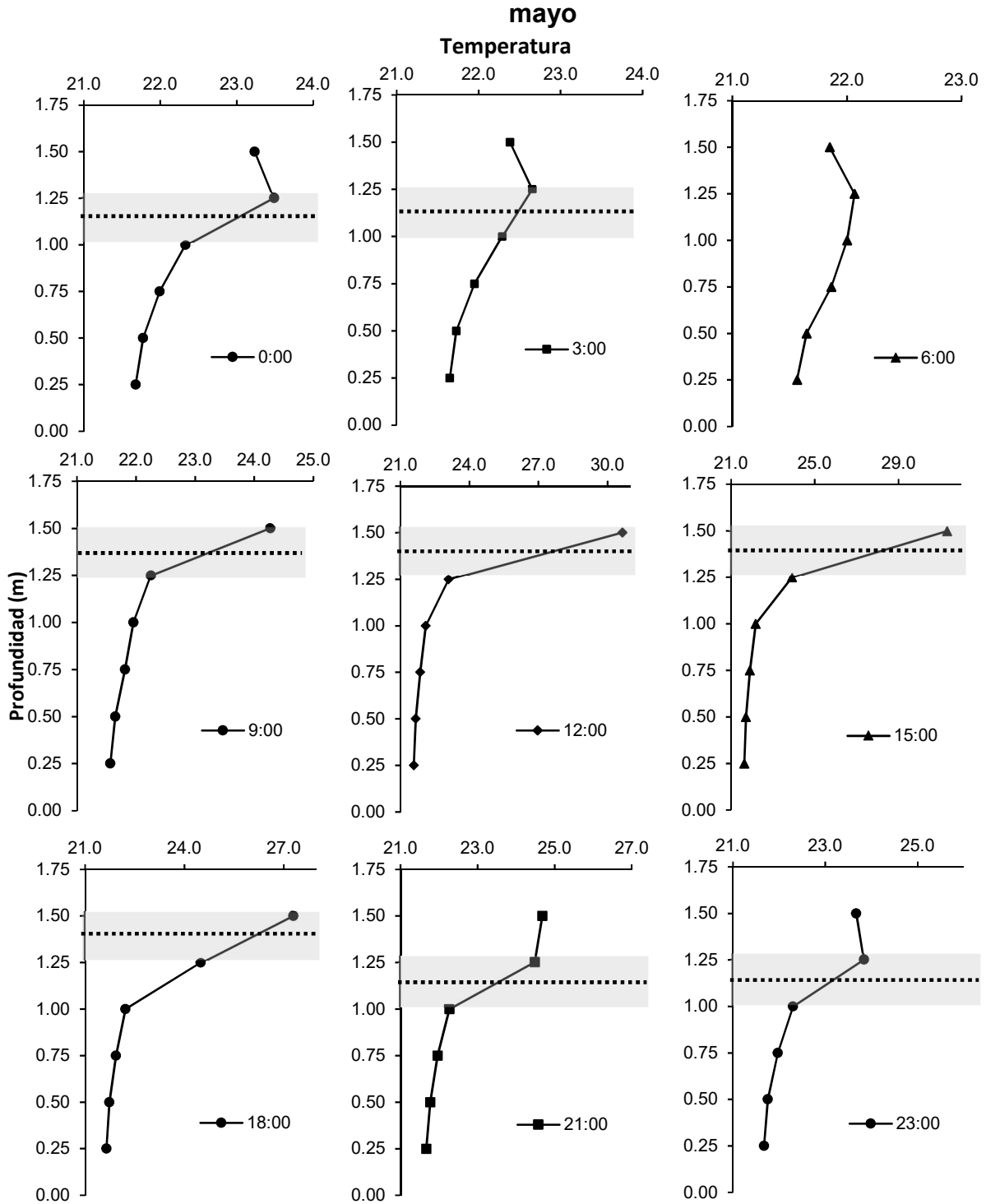
Figura 26. Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de

abril



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Variaciones promedio horarias de la termoclina en el mes de



Fuente: elaboración propia.

3.5.4. Ubicación del dispositivo de salida en función de la termoclina

De acuerdo a Yáñez (1993), la ubicación de los niveles de entrada y salida de una laguna debe hacerse en función de las características de la estratificación térmica en cada caso particular, para promover la destratificación y reducción de posibles cortos circuitos hidráulicos. Mara (2003), destaca similarmente la importancia de las condiciones de estratificación para la ubicación del nivel de salida o muestreo, debido que este fenómeno induce una banda de algas en la parte superficial de la laguna donde se concentra mayor energía térmica, producto de la falta de mezcla entre capas inducida por la termoclina. Esta banda de algas ayuda a que la cantidad de DBO y sólidos suspendidos aumenten en el efluente debido a su mayor concentración.

En función de estas recomendaciones y de acuerdo a los resultados obtenidos, los cuales muestran una termoclina ubicada el 98.27 % del tiempo entre 0 – 0.75 m de profundidad, se recomienda una toma de salida del efluente a una profundidad entre 0.60 – 0.75 m, lo cual podría ser suficiente para romper la estratificación promoviendo la circulación desde las partes superiores hasta este punto y evitando la posible concentración de algas en el efluente.

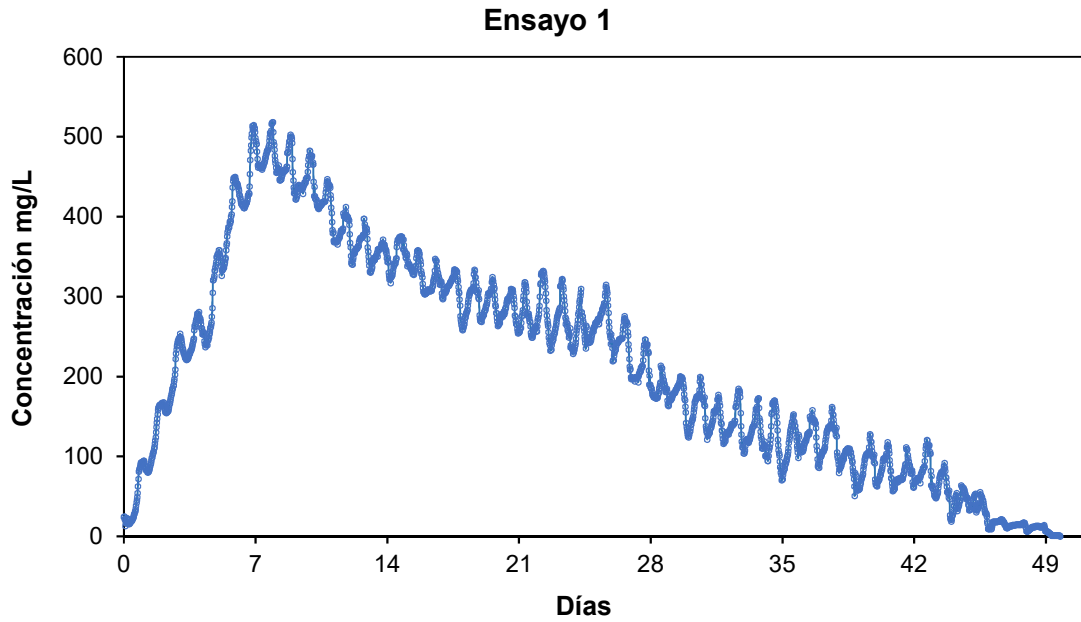
3.6. Influencia de la estratificación en el comportamiento hidráulico de la laguna

Con el objetivo de evaluar el efecto de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de la laguna, dos ensayos de trazadores utilizando la técnica de estímulo-respuesta propuesta por Levenspiel (1999) fueron realizados. El primero de ellos, del 14 de abril – 03 de junio de 2018, y el segundo del 11 de junio-11 de agosto de 2018. Cloruro de sodio (NaCl) como trazador fue inyectado a la entrada de la laguna, mientras un registrador continuo de conductividad tomó lecturas cada 30 minutos. Los datos de concentración de NaCl fueron contrastados con los cálculos realizados de estratificación diaria, a partir de los datos de temperatura medidos a cada 0.25 m en la profundidad de la laguna en intervalos de tiempo de 30 min. Las figuras 28 y 29 muestran la curva de concentración vs. tiempo, para el primer ensayo, y el gráfico de porcentajes diarios de estratificación; mientras que la figura 30, muestra la curva de concentración vs. tiempo para el segundo ensayo.

3.6.1. Interpretación de parámetros hidráulicos

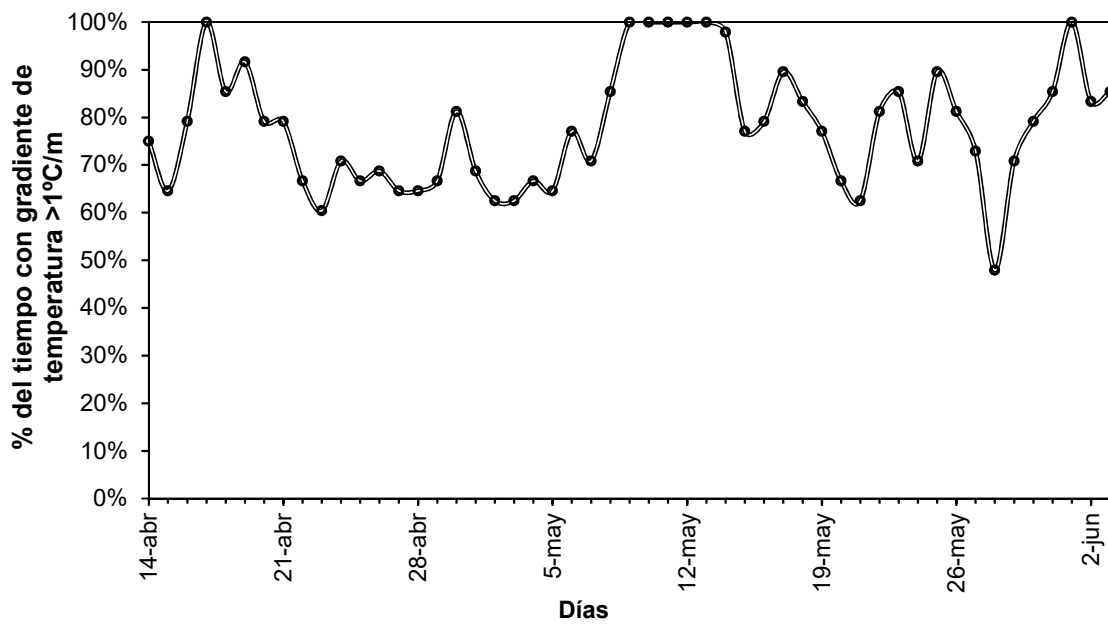
Se puede notar, que la curva del ensayo 1 muestra una tendencia de comportamiento de mezcla completa y moderada dispersión ($d=0.24$) de acuerdo a la clasificación de Metcalf y Eddy (2003), con un el valor pico de concentración 7 días después de introducir el trazador, y un patrón de oscilaciones diarias y no suave como es lo esperado; asimismo, la curva del ensayo 2 presenta una forma bastante irregular y atípica, con un alto retardo e inconsistencia en la salida de la concentración de sal, la cual alcanzó su valor máximo de manera súbita hasta el día 33 del ensayo, el número de dispersión para este caso fue de $d= 0.074$, pudiéndose clasificar como un reactor de moderada dispersión (Metcalf y Eddy, 2003). Los parámetros hidráulicos calculados para ambos ensayos se muestran en la tabla XIII.

Figura 28. Curva de concentración vs. tiempo, primer ensayo



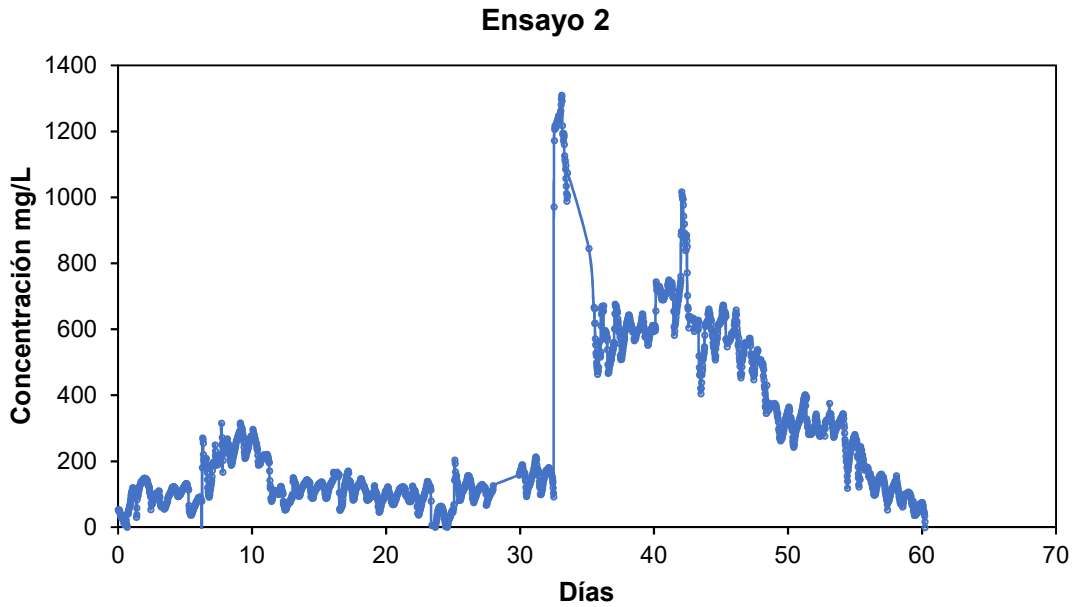
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Estratificación durante la prueba No. 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Curva de concentración vs. tiempo, segundo ensayo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Parámetros hidráulicos calculados**

Ensayo	TRH teórico (días)	TRH medio (días)	dispersión (d)	Número de reactores (N_{SCTR})	Índice de corto circuitos $\varphi\varphi$	% de Volumen muerto	% Volumen activo	% de recuperación de masa
1	14.75	18.04	0.24	2.76	0.032	7.95	122.29	86
2	14.75	36.26	0.074	7.32	0.053	145	245	92

Fuente: elaboración propia.

La duración del ensayo 1 fue de 50 días; mientras que el ensayo 2, se extendió un poco más, hasta los 61 días, tardando la concentración de sal en salir 3 y 4 veces más el tiempo de retención hidráulico real de la laguna, respectivamente, lo cual es aceptable de acuerdo a las recomendaciones de

Levenspiel (2012), el cual sugiere una duración de entre 3-4 veces el tiempo medio de retención real considerándose un fluido estancado con tiempos mayores a estos. Sin embargo, los tiempos de retención hidráulico (TRH) calculados resultaron ser ligeramente mayor para el ensayo 1 y excesivamente mayor para el ensayo 2, en contraste con el tiempo de retención hidráulico teórico de la laguna piloto, el cual es de 14.75 días (con un caudal promedio de 0.028 L/s y volumen de $\sim 35.68 \text{ m}^3$), lo que sugeriría que el alto nivel de estratificación bajo el cual se encontró la laguna, no influyó en su desempeño hidráulico, no coincidiendo con lo esperado durante la investigación, y los resultados de estudios previos que sugieren que un alto grado de estratificación de la laguna provoca corto circuitos hidráulicos entre la entrada y la salida, cuando estas se encuentran dispuestas en la parte superior y con una termoclina estable cerca de la superficie. Condiciones que prevalecieron durante las pruebas (figura 29). Por lo que, con un valor tan alto de estratificación como $\sim 78 \%$ durante el tiempo de la prueba, un TRH considerablemente menor al THR teórico era lo esperado. Además de ser un factor común esta circunstancia ($\text{TRH}_{\text{real}} < \text{TRH}_{\text{teórico}}$) en la mayoría de evaluación de reactores los cuales no trabajan bajo condiciones ideales, esencialmente en lagunas facultativas primarias que normalmente no se diseñan con baffles y condiciones de flujo pistón.

Adicionalmente, de acuerdo a Levenspiel (1999) y Metcalf y Eddy (2003), los TRH calculados $>$ TRH teórico, pueden deberse a: errores de medición en el cálculo de caudal, en el cálculo del volumen de la laguna o debido a recirculación interna del fluido (cuando este se difunde de vuelta al punto de medición y se mide más de una vez), lo que no sucedió en este caso, debido al considerable cuidado que se tuvo asegurando la regulación del caudal al menos dos veces al día y las ubicación del dispositivo de medición en una caja de muestreo en el exterior de la laguna.

En la tabla XIII, se puede observar que el resto de parámetro hidráulicos calculados, de igual manera presentaron inconsistencias como volúmenes activos y muertos mayores al volumen de la laguna y bajo índice de corto circuitos, cuando en la práctica ocurrieron grandes estancamientos. Por lo que, resulta muy difícil realizar inferencias acerca de la influencia o no influencia de la estratificación térmica en el comportamiento hidráulico de la laguna. Por otro lado, es importante señalar que el balance de masa para la concentración de NaCl fue bastante bueno, obteniendo valores mayores arriba del 85 % de recuperación de la masa del trazador de acuerdo a lo recomendado por Yáñez (1993) para que las pruebas tengan validez.

La falta de consistencia en los resultados anteriormente mencionados y el comportamiento de las curvas, fue observado en la misma medida por un estudio recientemente publicado (cuando este estudio ya se encontraba en curso) por Passos *et al* (2018), quienes utilizaron cloruro de sodio como trazador para evaluar el comportamiento de lagunas de maduración con baffles de poca profundidad. Donde encontraron curvas de concentración-tiempo con respuestas similares, caracterizadas por ciclos ondulatorios y tiempos de retención excesivos.

De acuerdo con los autores, esto sucede debido a la mayor densidad de la sal que le permite alojarse en el fondo de la laguna y los ciclos diarios de la estratificación térmica que suceden, que podrían causar que la sal emerja cuando se presentan períodos de mezcla completa de forma intermitente. Tales aseveraciones pudieron ser comprobadas en este estudio, al encontrarse que al medir de forma directa los valores de la concentración del trazador a diferentes profundidades, para verificar los niveles de estratificación del mismo se encontraba la mayor concentración en el fondo. Cuando se presentaban períodos de mezcla completa cerca de las 6:00 horas la concentración de sal en el fondo

podía ser hasta 4-5 veces mayor que en la superficie. De la misma manera concentraciones similares se observaron cuando sucedían períodos de estratificación térmica. Sin embargo, uno de los hallazgos más importante encontrado durante esta parte del estudio, del cual no se encontró información bibliográfica similar, y además no lograron experimentar las lagunas de maduración del estudio previamente mencionado, fue los grandes cambios de temperatura que sucedieron en la laguna inducidos por altas concentraciones del trazador salino. A continuación, se discuten los hallazgos encontrados acerca del uso de la sal y su efecto en la temperatura y estudios de trazado en lagunas.

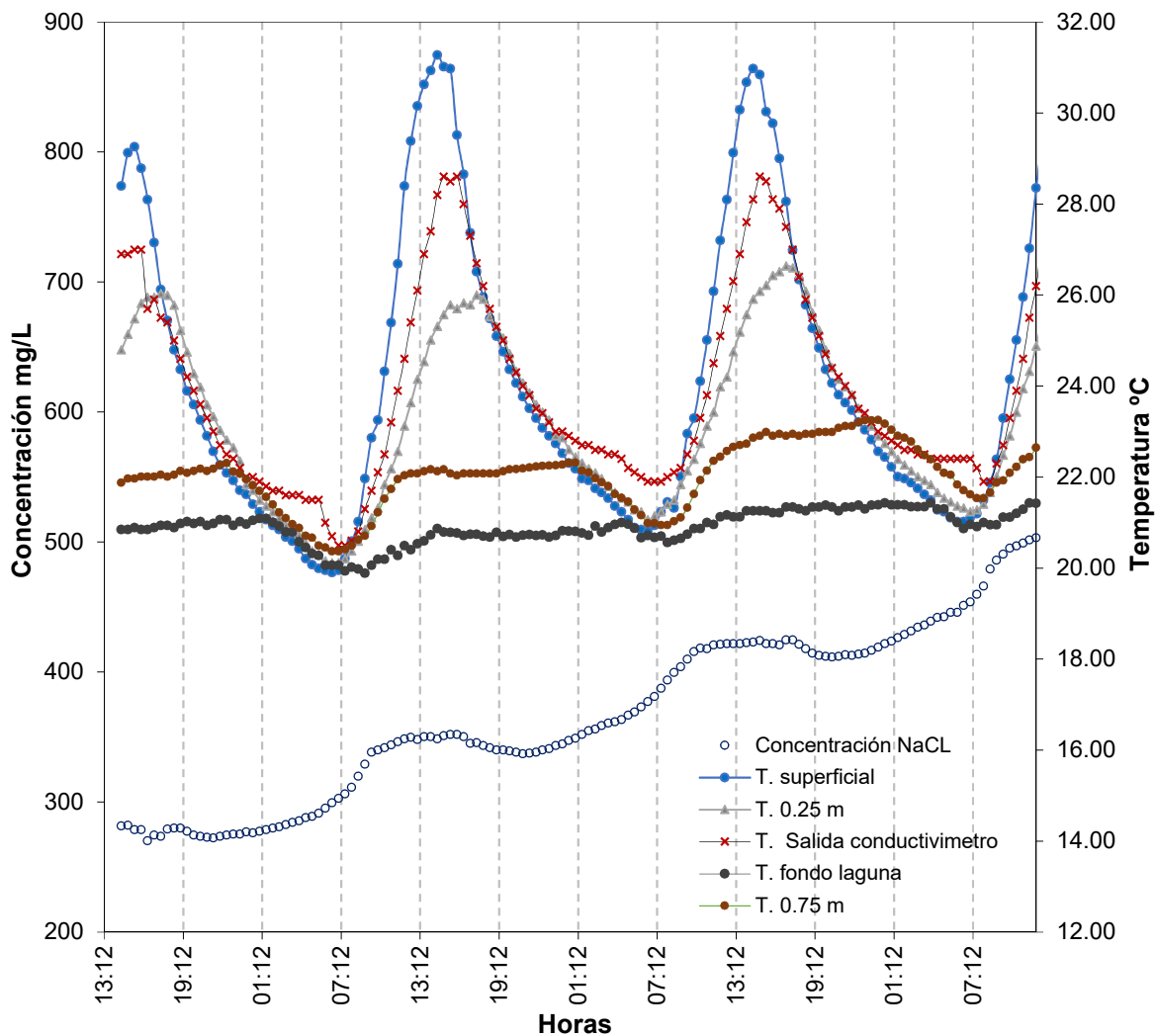
3.6.2. Implicaciones del cloruro de sodio en la temperatura y estudio hidráulico de las lagunas

La hipótesis y análisis formulado por Passos *et al.* (2018), acerca del efecto de la densidad del trazador y los eventos de estratificación en la laguna se ven sustentados en la figura 31, donde se muestra la temperatura superficial, a 0.25 m, 0.75 m y la temperatura del fondo de la laguna en contraste con la concentración de sal medida por el conductivímetro y los registros de temperatura del mismo. La relación entre las oscilaciones de la concentración de sal medida y los registros de temperatura en la laguna pueden verse claramente como un patrón diario, tal como se describe en los siguientes párrafos.

Durante el día, la laguna se encuentra estratificada por altos gradientes de temperatura, como se observa en la figura 31, las amplias diferencias entre las líneas azul claro, negra, café y gris normalmente entre las 8:00 y 22:00 horas, la temperatura del conductivímetro (línea roja) registra una temperatura intermedia entre las capas de 0-0.25m de la laguna indicando que el líquido que se encuentra entre esas capas es el que se encuentra saliendo, y la concentración de NaCl se mantiene aproximadamente uniforme, las mediciones de concentración en las distintas profundidades de la laguna, indican una alta

concentración en el fondo. Cerca de las 18:00, la temperatura superficial se mezcla con la temperatura a 0.25 m, homogenizando la parte superior de la laguna, las lecturas del conductiviméetro a la salida indican la misma temperatura que han adquirido ambas capas y la concentración de NaCl decrece ligeramente producto de la homogenización entre ellas.

Figura 31. Relación entre la temperatura y la concentración de NaCl



Fuente: elaboración propia.

Cerca de las 0:00 horas, la laguna se encuentra con una temperatura homogénea hasta cerca de su profundidad media, donde se encuentra una mayor concentración de NaCl, por lo que hay un aumento casi lineal de la concentración, la cual es registrada por el conductivímetro; sin embargo, el cambio más pronunciado en la concentración de NaCl medido en el efluente se registra cerca de las 6:00 horas, donde se puede ver una clara destratificación (temperatura uniforme) y por tanto, homogenización y mezcla de todas las capas de la laguna, produciendo así un vuelco desde la parte inferior donde se encuentra la mayor concentración de sal hacia la superficie ;la curva crece rápidamente durante el tiempo que dura este evento y la temperatura a lo largo de la profundidad de la laguna es homogénea, luego de eso, la estratificación vuelve a aparecer con una clara termoclina en los primeros 0.25 m, no permitiendo la mezcla y manteniendo la concentración de NaCl casi uniforme, un ciclo diario vuelve a aparecer.

Debido a lo expuesto anteriormente, es claro que el trazador no es distribuido uniformemente concentrándose en el fondo, sujeto a aparecer en la parte superior de la laguna solo cuando se produce mezcla, y liberándose substancialmente de manera diaria. Esto en la realidad no representa el verdadero patrón de flujo de las partículas en la laguna, el cual es el concepto y propósito principal del estudio de trazado y explica por qué la concentración pico del trazador apareció con un retardo y una lenta salida que se puede ver en las curvas. Por lo que se concluye que los resultados obtenidos para los ensayos 1 y 2 no son representativos de las condiciones hidráulicas de la laguna, no pudiéndose hacer inferencias acerca del efecto de la estratificación térmica de igual manera.

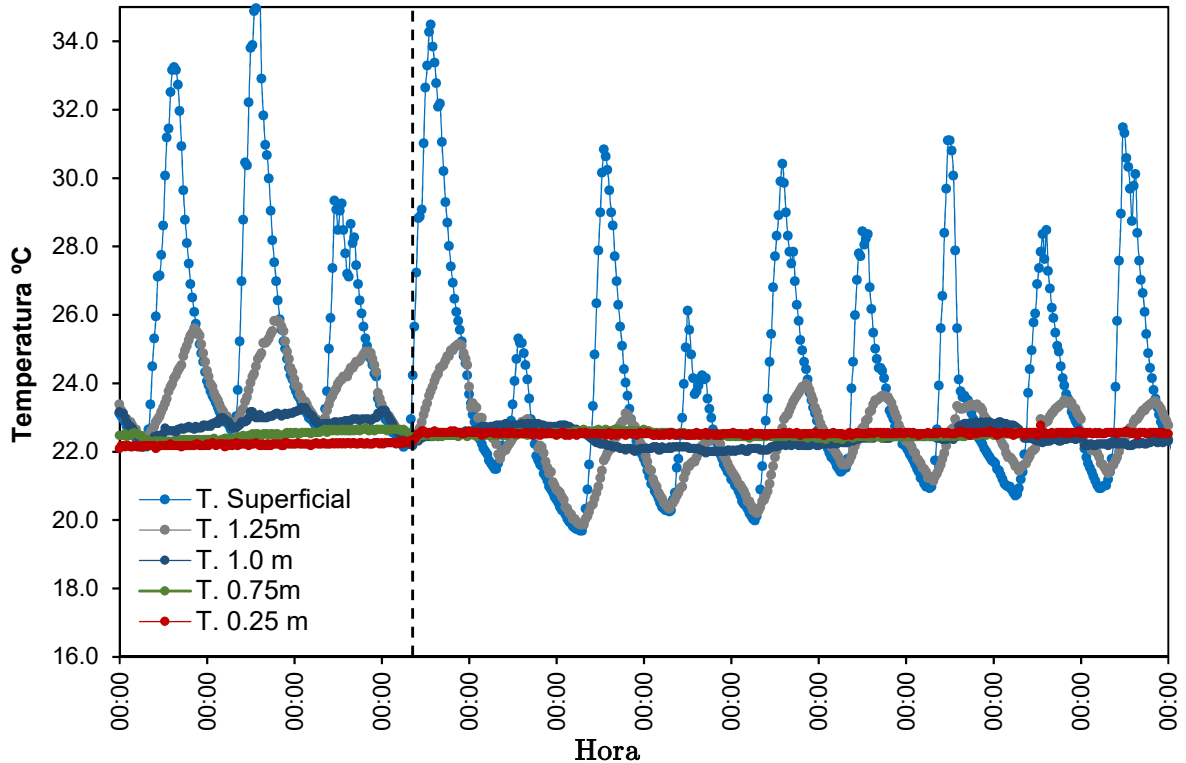
Del análisis anterior es claro observar que el cloruro de sodio no representa el mejor trazador, para realizar estudios de comportamiento hidráulico y deja

entrever que en lagunas de mayor profundidad, las cuales pueden encontrarse la mayor parte del tiempo sujetas a largos períodos continuos de estratificación y falta de mezcla, la concentración de NaCl permanecerá en el fondo sin emerger diariamente.

Por otro lado, el caso más grave del uso de NaCl para el estudio de trazado, se presentó en el ensayo 2. Donde se pudo observar un cambio dramático de las temperaturas a lo largo de la profundidad de la laguna cuando este fue inyectado, como puede verse en la figura 32. La diferencia de comportamientos entre el ensayo 1 y 2 y el no efecto de la sal en el primer ensayo, se debió a la cantidad de sal preparada para cada prueba. En el ensayo 1, se preparó una solución para medir una concentración de 2 veces más la concentración de fondo; mientras que, en el ensayo 2, se duplicó la cantidad a 4 veces más, con el fin de obtener una mayor precisión en el registro de la concentración pico, Sin embargo, debido a las características de la sal, alteró completamente los patrones diarios de temperatura.

En la figura 32, se puede apreciar de manera más detalla el efecto que causó en la temperatura el inyectar cloruro de sodio, en una cantidad de 4 veces que la concentración inicial de fondo, cantidad que es una práctica común y sugerida para ensayos de trazadores. Previo a la línea punteada se puede ver la temperatura a diferentes profundidades de la laguna con un comportamiento diario normal, con temperaturas mayores en la superficie decreciendo con la profundidad, luego al inyectar el trazador se ve como inicialmente las temperaturas experimentaron un aumento cerca de 1-2 °C, particularmente la temperatura del fondo (línea roja), lo cual sucedió instantáneamente.

Figura 32. Efecto de la variación de la temperatura durante el segundo ensayo con el trazador NaCl



Fuente: elaboración propia.

Las horas posteriores a la prueba los sensores detectaron temperaturas más elevadas en el fondo, mientras que la temperatura en los primeros 0.25 m no se vieron afectadas, esto se mantuvo durante casi todo el tiempo que duró la prueba (61 días), tomando su forma inicial nuevamente los últimos días previo a terminar la prueba una vez que la concentración de NaCl había salido casi completamente.

La explicación hipotética de este fenómeno, podría deberse probablemente a una reacción endotérmica entre la sal que se deposita en el fondo y el agua, debido a la alta concentración NaCl y la cantidad de energía que se necesita para realizar la disolución de sus moléculas, esta podría absorber calor de las capas

superiores, causando así un calentamiento de las capas del fondo de entre 1-2 °C, y no provocando un cambio significativo en los primeros 0.25 m, debido a la gran cantidad de energía térmica que está concentrada.

Por último, es importante indicar que tanto el ensayo 1 y 2 se prepararon en condiciones similares, proveyendo una mezcla homogénea y constante a la solución de sal, cuidando el punto de solubilidad de la misma en el agua con densidades de inyección menores a 250 kg/m^3 , por debajo de la densidad de saturación de 360 kg/m^3 , en tiempos de inyección de 1-2 horas. Así mismo, la laguna durante la prueba se encontraba con 7 meses de operación, por lo que se cree que la cantidad de lodos en el fondo no es significativa y no tuvo interferencia con los resultados encontrados.

Con base a lo anterior, se concluye el uso de cloruro de sodio como trazador en reactores profundos como lagunas facultativas no es adecuado. Consideraciones importantes sobre la cantidad de sal agregar, para no alterar la temperatura y por ende los patrones de flujo y aún más importante el entorno biológico y procesos físico-químicos que suceden en la laguna tendrían que ser tomados en cuenta, aun así los resultados obtenidos serían erróneos guiando a conclusiones en alguno casos incongruentes acerca del estado hidráulico de la laguna, más aún bajo condiciones de altos períodos de estratificación y baja mezcla, que no permiten la uniformidad del trazador, debido a su mayor densidad como lo fue en este caso.

CONCLUSIONES

1. El modelo de regresión empleado para correlacionar los datos de temperatura media del aire con la temperatura media semanal del agua y con la temperatura media semanal superficial del agua de la laguna piloto tuvo un buen ajuste (>0.80), los coeficientes de determinación obtenidos fueron de $R^2=0.8714$ y $R^2=0.8798$ respectivamente. Las variaciones de temperatura dieron lugar a que la estratificación térmica se diera en un porcentaje superior al 50 % del tiempo bajo la condición de gradiente $> 1^\circ\text{C}/\text{m}$, entre el 1 de febrero al 31 de mayo del 2018, siendo consistente durante todos los meses y con mayor efecto en marzo, mes con mayor radiación; el patrón de estratificación más frecuente, bajo el cual funcionó la laguna, éste fue y estratificado durante el día mezclado parte de la noche.
2. Las temperaturas medias del aire y del agua presentaron una tendencia lineal, por lo que se puede utilizar la temperatura media del aire para predecir la temperatura media del agua en lagunas facultativas en climas, donde la temperatura media mensual del aire se encuentre en el rango de $17 - 24^\circ\text{C}$. Dentro de este rango, la temperatura media de la laguna es: $T_{\text{Media-agua}}=1.4815T_{\text{Media- aire}} - 8.0929$ y la temperatura media superficial (en los primeros 50 cm) es: $T_{\text{Media-agua}}=1.4607T_{\text{Media-aire}} - 6.4772$.
3. La estratificación térmica, se presentó principalmente bajo condiciones iniciales de radiación solar de $125 \text{ watt}/\text{m}^2$ y 3 horas de sol entre las 8:30-9:30, dando lugar a la formación de gradientes térmicos durante el día bastante altos de hasta 17°C en 0.25 m. A partir de las horas al día de

estratificación, se obtuvo que la laguna se encontró estratificada el 79.62 % del tiempo y ningún día completo estuvo mezclada; el mes con mayor porcentaje de estratificación fue marzo con un 88.37 % del tiempo.

4. Los patrones de estratificación observados en la laguna fueron: Tipo II: Estratificado durante el día y mezclado durante la noche (4.17 % del tiempo); Tipo III: continuamente estratificado durante un día (18.33 % del tiempo), y un nuevo patrón propuesto Tipo V: estratificado durante el día mezclado durante parte de la noche (77.50 % del tiempo). El principal medio de destratificación y mezcla en la laguna sujeta a bajas condiciones de viento fue la temperatura del aire, la cual al caer por debajo de la temperatura del fondo de la laguna por las noche-madrugada promovía la homogenización entre capas.
5. Los resultados obtenidos a partir de los registros continuos de temperatura mostraron que la termoclina se posiciona establemente en los primeros 0.25 m de la laguna entre las 9:00 – 18:00 horas la mayor parte del tiempo, variando en su ubicación entre la superficie de la laguna y su profundidad media (0.75 m) el 98.97 % del tiempo; una toma de salida a una profundidad entre 0.60 – 0.75 m podría ser suficiente para romper la estratificación, promoviendo la circulación desde las partes superiores hasta este punto y evitar una posible concentración de algas, las cuales causan un aumento el DBO_5 y sólidos suspendidos.
6. El grado de influencia que tuvo la estratificación térmica durante el estudio de comportamiento hidráulico de la laguna fue limitado por la densidad del trazador, ya que éste emergió solo durante períodos de mezcla y destratificación, las pruebas de trazado indicaron mezcla completa y períodos de retención reales mayores a los teóricos, por lo que el NaCl

como trazador no es adecuado, principalmente en reactores de mayor profundidad como son las lagunas facultativas (1.50 m de profundidad en este caso) y expuestas a altos periodos de estratificación térmica. Además, la presencia de NaCl podría alterar los patrones de temperatura y producir el aumento de la misma substancialmente en el fondo del reactor, puede alterar de igual manera el entorno biológico y procesos físico-químicos que ocurren, cuando se utiliza en cantidades considerables como cuatro veces la concentración inicial de fondo, como lo fue en este caso.

RECOMENDACIONES

1. Replicar la investigación recopilando datos de temperatura durante un tiempo más prolongado, al menos de un año, para considerar todos los meses del año en el análisis.
2. Como se ha relatado a lo largo del estudio, la temperatura es importante en los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en las lagunas de estabilización, por lo que se propone investigar las variaciones de los parámetros que son normados por el Acuerdo Gubernativo 236-2006 en relación a la estratificación térmica.
3. Analizar y comparar el uso de diferentes tipos de trazadores en la evaluación del comportamiento hidráulico de las unidades de tratamiento de aguas residuales, y su influencia en los cambios de temperatura.
4. Realizar un estudio sobre la ubicación de los dispositivos de salida de la laguna con base al rompimiento de la estratificación térmica y mejora de la eficiencia del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABIS, Karen; MARA, Duncan. *Temperature measurement and stratification in facultative waste stabilisation ponds in the UK climate*. School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK: Environmental Monitoring and Assessment, 2006. 114: 35-47 p.
2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION & WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23 rd ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
3. AUERSWALD, W.A. *Estudio de lagoas facultativas na regioo nordeste do Brasil. Disertacao para grado de mestre en ciencias*. Universidad Federal de Paraiba, Brasil, 1978.
4. BARTONE, C., et al. *Monitoring and maintenance od treated water quality in the San Juan lagoons, supporting Aquaculture*. PAHO/CEPIS Report, Lima Perú, 1985.
5. BRITO, M.C.S.O.M.; CHERNICHARO, C.A.L., SPERLING, V.M. *Relação entre as temperaturas da água e do ar em uma lagoa de maturação na região sudeste do Brasil*. Inc: IX SILUBESA-Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro-BA, 9 a 14 Abril 2000. Anais eletrônicos (in Portuguese), 2000.

6. BURGERS, Miss Lizeth. *Temperature behavior in stabilization ponds under tropical conditions*. Lima, Perú: Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS)- Pan American Health Organization, 1982. São Paulo: ABES, 2016.
7. GLOYNA, Earnest. *Waste stabilization ponds*. World Health Organization Monograph Series No. 60, Geneva, 1971.
8. GU, R. C.; STEFAN, H. G. *Stratification dynamics in waste-water stabilization ponds*. *Water Res.*29(8),1995. 1909–1923 p.
9. KELLNER, E.; PIRES, E.C. *Desenvolvimento de modelo matemático para determinação do perfil vertical de temperatura e do volume útil de lagoas de estabilização*. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. 4, N. 1-2, 1999. 84-92 p.
10. KELLNER, E.; PIRES, E. C. *The influence of thermal stratification on the hydraulic behavior of waste stabilization ponds*, *Water Sci. Tech.* 45(1), 2002. 41–48 p.
11. KELLNER, E.; PIRES, E.C. *Lagoas de estabilização: Projeto e Operação*. Rio de Janeiro, ABES, 1998. 241p.
12. KELLNER, Erich; JOÃO FERNANDES, Viana Moreira; PIRES, Eduardo Cleto. *Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica*. Santo André, Brasil. *Eng Sanit Ambient*, v.14 n.1, 2009. 129-138 p.

13. KOTHARI, C.R. *Research Methodology, Methods and Techniques*. Second revised edition, Former Principal College of Commerce, University of Rajasthan, India: New age international publishers, 2004.
14. LEVENSPIEL, O.; SPIELMAN, L.A. *Chemical engineering Science*, 1965.
15. LEVENSPIEL, Octave. *Chemical Reaction Engineering*. New York: Wiley, 1999.
16. LEVENSPIEL, Octave. *Tracer Technology, Modeling the flow of fluids*. Chemical Engineering Department, Gleeson Hall, Oregon State University, USA, 2012.
17. MARA, Duncan. *Domestic Water Treatment in developing countries*. London, UK: MapSet, 2003.
18. MARAIS, R. *New factors in the design, operation and performance of waste-stabilization ponds*. Bull. Wld Hith Org, 34, 1966. 737-763 p.
19. MENDOCA, Sergio. *Sistemas de lagunas de estabilización: cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Bogotá: Editorial Mc Graw Hill, 2000.
20. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Boston: McGraw-Hill, 1991.
21. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Boston: McGraw-Hill, 2003.

22. NASA *Surface meteorology and Solar Energy, Atmospheric science data center*. [en línea] <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0> [Consulta 04 de diciembre de 2017.]
23. OAKLEY, Stewart M. *Lagunas de estabilización en Honduras: Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. EE.UU.,2005.
24. ORELLANA, Liliana. *Estadística Descriptiva*, 2011. [en línea] http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf [Consulta: 13 de agosto de 2018.]
25. PASSOS, R.G.; DIAS, D.F.C.; MATOS, M.P.; SPERLING, M.V. *Sodium chloride as a tracer for hydrodynamic characterization of a shallow maturation pond*. *Water Practice & Technology*, Vol 13 no. 1, 2018. 30-38 p.
26. PERALTA, Ivis. *Composición típica de las aguas residuales domésticas crudas en Guatemala*. *Agua, Saneamiento, & Ambiente*, Vol. 10 N0.1. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. 50-59 p.
27. PIRES, Eduardo Cleto; KELLNER, Erich. *Modelo matemático para estimativa do tempo médio de detenção hidráulico de lagoas de estabilização sob influência da estratificação térmica*,2001. 1-10 p.

28. POSSMOSER, Thiago Emanuel. *Lodo em lagoas de polimento: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema*. Tesis presentada para optar al título de Maestro el Saneamiento, Medio Ambiente Recursos Hídricos. Programa de Postgrado en Saneamiento, Medio Ambiente t Recuros Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais, 2014.
29. SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos; BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la Investigación*. 6ta. edición. México: Editorial, McGraw-Hill, 2014.
30. SHILTON, Andy; HARRISON, Jill. *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilisation Ponds*. New Zealand: Institute of Technology and Engineering, Massey University, (2003).
31. SPERLING, M.V.; R.G. PASSOS, R.G. DIAS, D.F.C.; MATOS, M.P.; POSSOMER, T.E. *Hydrodynamic characterization of shallow unbaffled and baffled maturation ponds using a saline tracer*. 11th IWA specialist group conference on wastewater pond technology, University of Leeds, 2016.
32. SPERLING, M.V. *Waste stabilization Ponds*. Biological Wastewater Treatment Series, Volume three. IWA Publishing, 2007.
33. TEEFY, Susan. *Tracer Studies in Water Treatment Facilities: A protocol and case studies*. U.S.A.: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1996.

34. Tema 4: *Inferencia, estimación y contraste de hipótesis*. [en línea] <https://www.ugr.es/~eues/webgrupo/Docencia/MonteroAlonso/estadisticaII/tema4.pdf> [Consulta: 14 de agosto de 2018.]
35. TORRES, J.; SOLER, A.; SÁEZ, J.; ORTUNO, J. *Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond*. Wat. Res. Vol 31, No. 4, Spain: Department of Chemical Engineering, University of Murcia, 1997. 679-688 p.
36. TORRES, J.; SOLER, A.; SÁEZ, J.; LLORENS, M. *Hydraulic performance of a deep stabilisation pond fed at 3.5 m depth*. Wat. Res. Vol 34, No. 3, Spain: Department of Chemical Engineering, University of Murcia, 2000. 1042-1049 p.
37. VARGAS, C.; SÁNCHEZ, A. *Puesta en marcha y 1ra. Etapa de experimentación en las lagunas de estabilización de Melipilla*. Publicación I-24, Universidad de Chile, 1972.
38. WELCH, S. Paul; *Limnology*. U.S.A: Editorial McGraw-hill, 1952.
39. YÁNEZ COSSIO, Fabián. *Lagunas de estabilización. Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Ecuador: Imprenta Molsalve, 1993.
40. YÁNEZ COSSIO, Fabián. *Manual métodos experimentales "Evaluación de lagunas de estabilización"*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), OPS-OMS, 1983.

41. YÁNEZ COSSIO, Fabián. *Reducción de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilización para países en desarrollo*. Seminario regional sobre lagunas de estabilización. CEPIS/OPS. Lima, Perú, 1986.
42. YANEZ, COSSIO Fabián.; PESCOD, M.B. *Wastewater treatment and reuse in Jordan*. UNDP/ World Bank Integrated Resource Recovery Project. Joint mission report, 1988.

APÉNDICE

Apéndice I. Resumen del diseño de la laguna facultativa piloto

Caudal medio	$Q_{med} =$	3.02	m ³ /día
Carga orgánica superficial máxima			
Radiación solar	$RS =$	1.70E+08	kJ/ha-día
Carga orgánica	$CS_m =$	329.83	kg DBO ₅ /ha - día
c. Área total de lagunas facultativas			
DBO ₅ promedio	$L_A =$	254	mg/L
Área Total	$A_T =$	23.2109	m ²
	$A_T =$	0.002321	ha
d. Dimensiones			
Talud dimensión horizontal	$d =$	0.5	m
Ancho libre	$F =$	0.3	m
Largo a profundidad media	$L =$	8.35	m
Ancho a profundidad media	$a =$	2.78	m
Profundidad	$P =$	1.50	m
Largo a nivel del agua	$L_1 =$	9.09	m
Ancho a nivel del agua	$a_1 =$	3.53	m
Largo en la base	$L_2 =$	7.59	m
Ancho en la base	$a_2 =$	2.03	m
Largo en la corona	$L_3 =$	9.39	m
Ancho en la corona	$a_3 =$	3.83	m
Volumen útil de laguna	$V_f =$	35.10	m ³
e. Tiempo de retención hidráulico teórico			
Tiempo de retención	$TRH =$	11.6	días
f. Acumulación de lodos por año			
SS época seca	$SS_{seca} =$	294	mg/L
SS época lluviosa	$SS_{lluviosa} =$	266	mg/L
SS promedio	$SS =$	283.0	mg/L
Volumen	$V_L =$	1.30	m ³ /año
g. Frecuencia de remoción 25% del volumen de laguna			
Frecuencia de remoción	$t_L =$	6.7	años

Fuente: elaboración propia.

Apéndice II. Temperaturas promedios horarios mensuales de la laguna

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
0:00	21.05	19.42	20.44	22.68	22.42
0:30	20.98	19.36	20.37	22.61	22.36
1:00	20.91	19.31	20.30	22.54	22.31
1:30	20.84	19.26	20.24	22.47	22.26
2:00	20.76	19.21	20.18	22.40	22.21
2:30	20.70	19.16	20.12	22.33	22.17
3:00	20.61	19.11	20.06	22.26	22.11
3:30	20.55	19.06	20.00	22.19	22.06
4:00	20.48	19.01	19.95	22.12	22.02
4:30	20.40	18.96	19.89	22.04	21.97
5:00	20.35	18.91	19.83	21.97	21.93
5:30	20.27	18.86	19.78	21.89	21.88
6:00	20.20	18.81	19.71	21.81	21.83
6:30	20.14	18.76	19.66	21.75	21.81
7:00	20.10	18.73	19.62	21.71	21.80
7:30	20.06	18.70	19.58	21.73	21.81
8:00	20.06	18.69	19.61	21.77	21.89
8:30	20.08	18.68	19.69	21.87	22.05
9:00	20.17	18.84	19.87	22.03	22.25
9:30	20.32	19.04	20.09	22.24	22.48
10:00	20.49	19.31	20.32	22.49	22.72
10:30	20.70	19.58	20.58	22.73	22.93
11:00	21.00	19.89	20.84	22.99	23.10
11:30	21.26	20.22	21.13	23.24	23.29
12:00	21.46	20.50	21.41	23.55	23.49
12:30	21.66	20.72	21.64	23.73	23.63
13:00	21.86	20.97	21.86	23.89	23.73
13:30	22.07	21.05	22.02	24.07	23.78
14:00	22.10	21.11	22.12	24.17	23.81
14:30	22.31	21.15	22.18	24.28	23.82
15:00	22.32	21.14	22.21	24.30	23.77
15:30	22.30	21.12	22.20	24.28	23.73
16:00	22.28	21.04	22.12	24.18	23.64
16:30	22.09	20.89	22.00	24.07	23.54
17:00	21.91	20.67	21.87	23.96	23.43

Apéndice II. (continuación de tabla)

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
17:30	21.78	20.49	21.70	23.82	23.31
18:00	21.65	20.37	21.58	23.70	23.22
18:30	21.56	20.27	21.48	23.59	23.14
19:00	21.48	20.19	21.38	23.48	23.07
19:30	21.38	20.11	21.29	23.39	23.01
20:00	21.30	20.04	21.20	23.30	22.94
20:30	21.22	19.96	21.10	23.21	22.87
21:00	21.14	19.88	21.01	23.11	22.81
21:30	21.06	19.79	20.92	23.04	22.73
22:00	20.99	19.70	20.82	22.97	22.66
22:30	20.92	19.62	20.74	22.90	22.60
23:00	20.85	19.54	20.66	22.84	22.54
23:30	20.78	19.47	20.58	22.77	22.48
T.Promedio	21.06	19.76	20.79	22.93	22.74
Desviación	0.697	0.810	0.859	0.828	0.666
Tmax	22.32	21.15	22.21	24.30	23.82
Tmin	20.06	18.68	19.58	21.71	21.80

Fuente: elaboración propia.

Apéndice III. Temperaturas promedios horarios mensuales de la laguna a diferentes profundidades para febrero y marzo

Hora	Febrero						Marzo					
	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25
0:00	20.23	20.62	19.30	18.87	18.78	18.72	21.76	22.03	20.65	19.61	19.32	19.27
0:30	20.04	20.42	19.31	18.88	18.78	18.73	21.54	21.81	20.65	19.62	19.33	19.27
1:00	19.87	20.26	19.32	18.87	18.78	18.74	21.33	21.62	20.63	19.62	19.34	19.29
1:30	19.72	20.09	19.34	18.88	18.78	18.73	21.15	21.42	20.63	19.63	19.33	19.28
2:00	19.56	19.94	19.35	18.89	18.79	18.73	20.96	21.24	20.60	19.63	19.34	19.28
2:30	19.43	19.78	19.33	18.89	18.78	18.72	20.81	21.08	20.59	19.63	19.34	19.28
3:00	19.28	19.66	19.31	18.89	18.78	18.74	20.64	20.91	20.55	19.63	19.34	19.29
3:30	19.18	19.55	19.28	18.87	18.78	18.73	20.49	20.76	20.50	19.63	19.33	19.28
4:00	19.04	19.43	19.21	18.87	18.78	18.72	20.34	20.62	20.44	19.63	19.35	19.29
4:30	18.94	19.33	19.15	18.86	18.77	18.72	20.20	20.48	20.37	19.63	19.34	19.29
5:00	18.84	19.23	19.08	18.85	18.76	18.71	20.08	20.35	20.32	19.62	19.35	19.29
5:30	18.76	19.13	19.00	18.84	18.74	18.69	19.95	20.23	20.24	19.62	19.34	19.30
6:00	18.67	19.04	18.93	18.81	18.73	18.69	19.82	20.11	20.13	19.59	19.33	19.28
6:30	18.60	18.97	18.86	18.78	18.72	18.66	19.75	20.01	20.02	19.56	19.32	19.28
7:00	18.60	18.91	18.80	18.74	18.70	18.65	19.72	19.93	19.95	19.54	19.30	19.26
7:30	18.59	18.86	18.75	18.71	18.67	18.63	19.71	19.87	19.89	19.51	19.29	19.23
8:00	18.62	18.83	18.73	18.69	18.65	18.61	19.88	19.87	19.87	19.50	19.28	19.24
8:30	18.66	18.81	18.69	18.67	18.64	18.59	20.31	19.98	19.89	19.50	19.27	19.21
9:00	19.50	18.93	18.72	18.66	18.63	18.58	21.10	20.20	19.94	19.50	19.27	19.22
9:30	20.53	19.06	18.75	18.67	18.63	18.59	22.09	20.41	20.00	19.51	19.28	19.23
10:00	21.89	19.25	18.78	18.69	18.65	18.59	23.22	20.63	20.06	19.52	19.29	19.23
10:30	23.26	19.45	18.83	18.70	18.65	18.59	24.46	20.87	20.11	19.53	19.28	19.23
11:00	24.81	19.68	18.88	18.71	18.65	18.60	25.74	21.12	20.16	19.52	19.29	19.24
11:30	26.46	19.92	18.92	18.73	18.66	18.61	27.09	21.39	20.21	19.54	19.29	19.25
12:00	27.91	20.15	18.94	18.74	18.66	18.61	28.39	21.69	20.26	19.55	19.30	19.25
12:30	28.95	20.38	18.97	18.76	18.68	18.62	29.41	22.00	20.31	19.56	19.30	19.25
13:00	30.14	20.63	18.99	18.76	18.67	18.62	30.34	22.34	20.35	19.58	19.31	19.25
13:30	30.37	20.83	19.04	18.76	18.68	18.62	30.95	22.65	20.38	19.59	19.32	19.26
14:00	30.54	21.01	19.04	18.79	18.68	18.63	31.16	22.94	20.43	19.59	19.32	19.27
14:30	30.54	21.17	19.08	18.79	18.69	18.63	31.21	23.20	20.46	19.58	19.33	19.27
15:00	30.30	21.34	19.10	18.79	18.69	18.64	31.17	23.44	20.47	19.59	19.32	19.28
15:30	29.96	21.48	19.10	18.80	18.70	18.65	30.82	23.66	20.49	19.61	19.34	19.27
16:00	29.38	21.60	19.12	18.80	18.70	18.63	30.11	23.85	20.51	19.61	19.34	19.28
16:30	28.37	21.70	19.12	18.81	18.70	18.64	29.24	24.00	20.53	19.62	19.35	19.29

Apéndice III. (continuación de tabla)

Hora	Febrero						Marzo					
	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25
17:00	26.95	21.78	19.14	18.80	18.70	18.65	28.30	24.14	20.54	19.62	19.34	19.29
17:30	25.80	21.84	19.13	18.81	18.71	18.65	27.16	24.20	20.54	19.62	19.35	19.30
18:00	24.94	21.93	19.14	18.80	18.72	18.67	26.36	24.25	20.56	19.63	19.37	19.30
18:30	24.23	22.03	19.14	18.81	18.72	18.66	25.71	24.25	20.57	19.64	19.37	19.31
19:00	23.65	22.12	19.15	18.82	18.72	18.67	25.15	24.21	20.59	19.64	19.36	19.31
19:30	23.12	22.17	19.17	18.82	18.71	18.66	24.68	24.14	20.60	19.64	19.36	19.32
20:00	22.64	22.19	19.17	18.82	18.73	18.67	24.23	24.01	20.63	19.67	19.37	19.32
20:30	22.24	22.14	19.18	18.82	18.73	18.67	23.80	23.80	20.64	19.66	19.38	19.32
21:00	21.88	21.97	19.19	18.82	18.73	18.66	23.46	23.57	20.66	19.67	19.39	19.32
21:30	21.54	21.78	19.20	18.83	18.73	18.69	23.13	23.31	20.68	19.68	19.38	19.33
22:00	21.21	21.55	19.21	18.83	18.74	18.68	22.80	23.04	20.70	19.67	19.39	19.33
22:30	20.94	21.31	19.21	18.84	18.75	18.68	22.52	22.78	20.71	19.69	19.39	19.33
23:00	20.68	21.06	19.23	18.84	18.74	18.69	22.27	22.52	20.72	19.69	19.40	19.35
23:30	20.47	20.85	19.23	18.84	18.75	18.70	22.02	22.29	20.73	19.71	19.40	19.36
T.promedio	22.87	20.46	19.08	18.80	18.71	18.66	24.09	22.03	20.41	19.60	19.33	19.28
Desviación	4.15	1.15	0.19	0.07	0.05	0.05	3.89	1.51	0.26	0.06	0.04	0.04
Tmax	30.54	22.19	19.35	18.89	18.79	18.74	31.21	24.25	20.73	19.71	19.40	19.36
Tmin	18.59	18.81	18.69	18.66	18.63	18.58	19.71	19.87	19.87	19.50	19.27	19.21

Nota: S: temperatura superficial; 1.25,1,0.75,0.5,0.25: temperaturas medidas desde la superficie

Fuente: elaboración propia.

Apéndice IV. Temperaturas promedios horarios mensuales de la laguna a diferentes profundidades para abril y mayo

Hora	Abril						Mayo					
	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25
0:00	23.15	23.44	23.10	22.30	22.05	21.98	23.23	23.48	22.33	21.99	21.78	21.68
0:30	22.98	23.28	23.02	22.29	22.04	21.99	23.08	23.32	22.33	21.99	21.77	21.69
1:00	22.81	23.12	22.93	22.28	22.04	21.99	22.90	23.17	22.34	21.99	21.77	21.70
1:30	22.67	22.99	22.83	22.26	22.02	21.97	22.77	23.03	22.33	21.99	21.77	21.69
2:00	22.58	22.84	22.72	22.24	22.02	21.94	22.63	22.88	22.32	21.98	21.77	21.68
2:30	22.41	22.72	22.62	22.22	21.99	21.95	22.52	22.76	22.31	22.00	21.77	21.68
3:00	22.32	22.61	22.52	22.18	21.97	21.92	22.38	22.65	22.28	21.95	21.73	21.65
3:30	22.20	22.50	22.42	22.15	21.95	21.90	22.28	22.54	22.25	21.94	21.73	21.64
4:00	22.09	22.39	22.32	22.10	21.92	21.86	22.17	22.43	22.22	21.94	21.71	21.63
4:30	21.97	22.28	22.23	22.03	21.89	21.82	22.07	22.34	22.18	21.92	21.71	21.62
5:00	21.87	22.17	22.13	21.95	21.86	21.80	21.99	22.23	22.12	21.91	21.71	21.61
5:30	21.77	22.06	22.03	21.88	21.82	21.76	21.91	22.15	22.07	21.88	21.68	21.59
6:00	21.69	21.97	21.94	21.80	21.75	21.70	21.85	22.07	22.00	21.86	21.65	21.56
6:30	21.64	21.89	21.87	21.73	21.69	21.64	21.83	22.01	21.96	21.83	21.64	21.56
7:00	21.67	21.86	21.82	21.67	21.64	21.60	21.88	21.98	21.91	21.82	21.64	21.55
7:30	21.78	21.88	21.81	21.65	21.63	21.58	22.00	21.98	21.89	21.81	21.63	21.55
8:00	21.97	21.95	21.83	21.65	21.62	21.58	22.41	22.03	21.91	21.80	21.64	21.56
8:30	22.31	22.09	21.92	21.69	21.64	21.59	23.25	22.14	21.92	21.81	21.63	21.55
9:00	22.90	22.30	22.01	21.72	21.66	21.60	24.27	22.25	21.95	21.82	21.65	21.57
9:30	23.66	22.55	22.12	21.77	21.69	21.65	25.47	22.36	21.98	21.82	21.65	21.57
10:00	24.51	22.87	22.27	21.83	21.74	21.68	26.77	22.49	22.01	21.83	21.66	21.57
10:30	25.37	23.22	22.39	21.89	21.77	21.71	27.83	22.63	22.03	21.84	21.67	21.59
11:00	26.30	23.59	22.52	21.96	21.80	21.74	28.66	22.78	22.05	21.84	21.67	21.60
11:30	27.24	23.95	22.62	22.03	21.82	21.76	29.59	22.95	22.07	21.86	21.68	21.60
12:00	28.47	24.36	22.74	22.08	21.86	21.80	30.62	23.10	22.10	21.86	21.67	21.59
12:30	29.08	24.73	22.80	22.13	21.87	21.79	31.25	23.26	22.12	21.87	21.67	21.60
13:00	29.55	25.07	22.86	22.15	21.88	21.81	31.68	23.40	22.14	21.88	21.69	21.61
13:30	30.10	25.43	22.93	22.19	21.92	21.85	31.81	23.55	22.15	21.89	21.69	21.60
14:00	30.39	25.69	22.98	22.20	21.91	21.85	31.82	23.69	22.16	21.89	21.69	21.61
14:30	30.46	25.99	23.08	22.26	21.99	21.92	31.74	23.80	22.18	21.89	21.70	21.61
15:00	30.31	26.20	23.12	22.28	21.99	21.91	31.29	23.92	22.18	21.90	21.71	21.63
15:30	30.02	26.32	23.14	22.29	21.99	21.93	30.89	24.04	22.19	21.90	21.71	21.62
16:00	29.38	26.38	23.14	22.28	21.99	21.91	30.25	24.13	22.21	21.91	21.71	21.62
16:30	28.64	26.41	23.16	22.31	21.99	21.91	29.54	24.22	22.21	21.92	21.71	21.62

Apéndice IV. (continuación de tabla)

Hora	Abril						Mayo					
	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25	S	1.25	1.0	0.75	0.5	0.25
17:00	27.92	26.41	23.17	22.31	22.01	21.96	28.75	24.31	22.22	21.92	21.72	21.64
17:30	27.16	26.35	23.19	22.31	22.00	21.94	27.93	24.40	22.23	21.93	21.73	21.64
18:00	26.57	26.21	23.19	22.31	22.02	21.94	27.28	24.49	22.22	21.94	21.74	21.65
18:30	26.07	26.00	23.19	22.32	22.02	21.95	26.68	24.59	22.23	21.93	21.74	21.65
19:00	25.67	25.74	23.20	22.31	22.02	21.96	26.19	24.66	22.24	21.94	21.75	21.67
19:30	25.30	25.49	23.21	22.33	22.03	21.97	25.77	24.68	22.25	21.94	21.75	21.66
20:00	24.99	25.21	23.22	22.35	22.04	21.97	25.35	24.67	22.25	21.94	21.74	21.66
20:30	24.70	24.95	23.26	22.34	22.04	21.97	25.01	24.58	22.27	21.96	21.75	21.66
21:00	24.42	24.69	23.24	22.35	22.04	21.95	24.68	24.48	22.27	21.96	21.77	21.67
21:30	24.16	24.47	23.23	22.36	22.04	21.99	24.37	24.31	22.28	21.97	21.76	21.68
22:00	23.96	24.27	23.22	22.35	22.06	21.98	24.12	24.17	22.29	21.97	21.76	21.68
22:30	23.74	24.05	23.20	22.35	22.06	22.00	23.89	24.02	22.29	21.97	21.77	21.67
23:00	23.56	23.89	23.17	22.35	22.06	21.99	23.67	23.83	22.31	21.97	21.76	21.68
23:30	23.38	23.69	23.14	22.35	22.06	21.99	23.47	23.69	22.31	21.97	21.77	21.68
T.promedio	24.96	23.97	22.72	22.13	21.91	21.85	25.70	23.31	22.17	21.91	21.71	21.63
Desviación	2.93	1.57	0.50	0.23	0.14	0.14	3.46	0.91	0.13	0.06	0.05	0.04
Tmax	30.46	26.41	23.26	22.36	22.06	22.00	31.82	24.68	22.34	22.00	21.78	21.70
Tmin	21.64	21.86	21.81	21.65	21.62	21.58	21.83	21.98	21.89	21.80	21.63	21.55

Nota: S: temperatura superficial; 1.25,1,0.75,0.5,0.25: temperaturas medidas desde la superficie

Fuente: elaboración propia.

Apéndice V. Reporte fotográfico

Construcción de la laguna facultativa



Columnas de soporte



Instalación de cajas de distribución y entrada, instalación de tubería de interconexión.



Construcción de zanja perimetral



Instalación de geomembrana



Pasarela de madera



Llenado de laguna

Puesta en marcha de la laguna facultativa



Laguna en funcionamiento



Vertederos en caja distribuidora de caudales

Instalación de dispositivos de medición



Sensor de temperatura instalado fuera de la laguna



Pedestal donde se colocaron los dispositivos



Sensor de temperatura en funcionamiento



Pedestales dentro de la laguna



Estación automática instalada

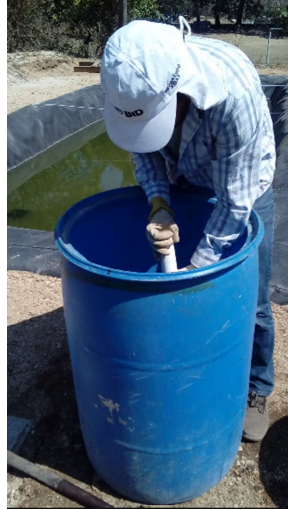


Consola y exportación de datos

Prueba de trazadores



Presentación de la sal utilizada



Preparación de la solución del trazador



Inyección instantánea del trazador

Fuente: planta piloto de tratamiento de aguas residuales Arturo Pazos Sosa.