

Artículo científico

Comportamiento de la estratificación térmica en una laguna de estabilización facultativa

Juan Francisco Gattorno Fúnez

Ingeniero civil, M.Sc. en ingeniería sanitaria, ERIS-USAC, Guatemala
Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: gattorno.juan@gmail.com

Adán Ernesto Pocasangre Collazos

M.Sc. ingeniero civil, profesor titular en ERIS-USAC, Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: adan.pocasangre@crs.org
Recibido 11.09.2018 Aceptado 07.09.2018

Resumen

La estratificación térmica en una laguna de estabilización facultativa a escala piloto bajo condiciones tropicales fue investigada en un estudio que se presenta en este artículo. Sensores de temperatura fueron ubicados a diferentes profundidades en el interior, así como al exterior de la laguna, para medir las variaciones de temperatura agua-aire continuamente a intervalos de 30 minutos por un periodo de cuatro meses, mientras los valores de radiación solar, velocidad del viento y temperatura del aire fueron registradas en una estación meteorológica en el mismo intervalo de tiempo. Los resultados mostraron que la laguna permaneció estratificada durante la mayor parte del tiempo entre el 74.58 % - 88.37 % de las horas de cada mes calculados a partir de mediciones horarias de temperatura, y que la estratificación presentó patrones cíclicos diarios con una termoclina estable que se ubicó en los primeros 0.75 m de profundidad. Las condiciones de viento y caudal no fueron suficientes para realizar la homogenización de las temperaturas de la masa de agua y los eventos de destratificación en la laguna estuvieron asociados a los cambios en la temperatura del aire. Los resultados sugieren que bajo climas tropicales lagunas de pequeña área superficial con bajas condiciones de viento y profundidades mayores a 1.50 m pueden permanecer estratificadas por largos periodos de tiempo independientemente de la temporada, fría o cálida y que un dispositivo de salida a una profundidad entre 0.60-0.75 m podría ser suficiente para romper la estratificación y mejorar la calidad del efluente.

Palabras Clave: Destratificación, epilimnio, gradiente térmico, hipolimnio, mezcla, termoclina, temperatura del aire, radiación solar.

Abstract

The thermal stratification in a pilot-scale facultative waste stabilization pond under tropical conditions was investigated in a study presented in this article. Temperature sensors were located at different depths inside, as well as outside of the pond, to measure the water-air temperature variations continuously at 30 minutes intervals for a period of four months, while the values of solar radiation, wind velocity and air temperature were recorded in a weather station in the same time interval. The results showed that the pond remained stratified for most of the time between 74.58% - 88.37% of the hours of each month calculated from hourly temperature measurements, and thermal stratification showed daily cyclic patterns with a stable thermocline located in the first 0.75 m depth. The wind and inflow rate conditions were not sufficient to homogenize the water mass temperatures and the destratification events in the pond were related to changes in air temperature. The results suggest that under tropical climates pond of small surface area with low wind conditions and depths greater than 1.50 m can remain stratified for long periods of time regardless of the season, cold or warm and that an outlet at a depth between 0.60 - 0.75 m could be enough to break the stratification and improve the quality of the effluent.

Key Words: Air temperature, destratification, epilimnion, hypolimnion, mix, thermal gradient, thermocline, solar radiation.

Introducción

El objetivo del presente artículo es evaluar el comportamiento de la estratificación térmica en una laguna facultativa bajo condiciones frías y cálidas durante un período de cuatro meses en Guatemala, utilizando dispositivos de monitoreo continuo de temperatura.

Inicialmente, se presenta una breve discusión de los antecedentes acerca del tema y una descripción detallada de la unidad experimental y sus condiciones de operación. Los resultados se calcularon a partir de registros de temperatura medidos a cada 30 min durante todo el período de estudio, realizados por dispositivos de medición HOBO MX2201 ubicados al interior y exterior de la laguna y las variables de radiación solar y velocidad del viento medidas por una estación meteorológica, los cuales, fueron utilizados para caracterizar la ocurrencia, patrones, y frecuencia de los eventos estratificación térmica en la laguna. La influencia de las condiciones de radiación solar, velocidad del viento y temperatura del aire y caudal de entrada sobre la formación del fenómeno también son discutidas. Así como, la posible ubicación del dispositivo de salida en función de las características de la termoclina.

Antecedentes

Las lagunas de estabilización comprenden una de las tecnologías de tratamiento de agua residual más utilizadas en Guatemala y la mayoría de países de Latinoamérica (Noyola et al., 2013), debido a su alta eficiencia de remoción de materia orgánica, organismos patógenos y sus bajos costos de implementación y operación. Dentro de estos sistemas, la temperatura desempeña uno de los papeles más importantes, donde sus variaciones con la profundidad en el volumen de agua causadas en mayor medida, por la radiación solar, la alta turbiedad, y bajas condiciones de viento, no permiten el calentamiento uniforme de la masa de agua, dando lugar a una estratificación térmica, fenómeno que se caracteriza por la formación de diferentes estratos de temperatura en la profundidad de la laguna.

Cuando la estratificación térmica ocurre, las capas superiores de la masa de agua absorben mayor energía

térmica en comparación con las inferiores, formando una capa superior más cálida y menos densa (epilimnio) y otra inferior, más fría y de mayor densidad (hipolimnio), las cuales no se mezclan, divididas por una región o barrera donde se produce un cambio brusco de temperatura con la profundidad llamado termoclina (Mara, 2003; Sperling, 2007). Por tanto, la formación de una termoclina define la ocurrencia de un evento de estratificación. La termoclina en cuerpos de agua, se puede ubicar en el límite donde la temperatura cae con un gradiente de más de 1 °C/m de (Welch, 1952). En lagunas de estabilización, investigaciones sugieren que este fenómeno puede ocurrir a gradientes de temperatura tan bajos como de 0.7 °C/m (Pires y Keller, 2001).

La estratificación térmica, induce la estratificación biológica y físico-química (Gu y Stefan, 1995) y también podría tener efecto en el comportamiento hidráulico de las lagunas (Torres et al., 1997; Pires y Kellner, 2001; Kellner et al., 2009), por lo que, su estudio ha sido llevado a cabo durante años por diferentes autores (Marais, 1966; Luck y Stefan, 1990; Yanez, 1993; Gu y Stefan, 1995; Abis y Mara, 2006) para comprender el estado térmico y grado de mezcla en estos sistemas de tratamiento, especialmente en lagunas facultativas, que, por lo general, son diseñadas bajo el supuesto de mezcla completa.

Investigaciones de este fenómeno han sido realizadas en climas tropicales similares al de Centro América. Yanez (1993), en Lima, Perú, reportó estratificaciones cíclicas diarias entre las 9:00-22:00 horas durante verano y temperatura homogénea o destratificación en condiciones de invierno, mientras que, Marais (1966), en Lusaka, Zambia, reportó estratificaciones cíclicas entre las 9:00-19:00 horas con ubicaciones de la termoclina a profundidades promedios de 0.30 m en verano y 0.90 m en invierno. No obstante, las mediciones de temperatura de estos estudios fueron realizadas de manera puntual y no continuas, no permitiendo tener un espectro completo del comportamiento del fenómeno. Excepción a esto, son los estudios llevados a cabo con monitoreo continuo, años más tarde por Gu y Stefan (1995) y Abis y Mara (2006), los cuales reportaron características más detalladas de la frecuencia, duración y patrones de estratificación térmica en climas más templados.

Sin embargo, el comportamiento de la estratificación térmica depende de las condiciones geográficas y climáticas de cada localidad (Yanez, 1993; Pires y Kellner, 2001) y su duración, frecuencia, y características aún no han sido investigadas y monitoreadas continuamente en climas tropicales como el de Centro América. Por consiguiente, el objetivo principal del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la estratificación térmica en una laguna facultativa piloto en Guatemala, empleando dispositivos de monitoreo continuo de temperatura.

Descripción del área de estudio

El estudio fue llevado a cabo, 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, ubicada en la ciudad de Guatemala, zona 13, colonia Aurora II (figura 1). Las coordenadas geográficas del lugar son latitud 14°34’42”N y longitud 90°32’12”O, con una altitud aproximada es de 1460 m sobre el nivel del mar. La planta de tratamiento recibe el agua residual de tipo doméstico de la población de la colonia Aurora II.

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Metodología

Laguna piloto experimental

Se diseñó y construyó una laguna facultativa piloto para un caudal de diseño máximo de 0.035 L/s (3.02 m³/día) y con un tiempo de retención hidráulico mayor

o igual a 11.80 días (figura 2a). La laguna tiene un área superficial de 27.13 m² y profundidad de 1.50 m, a la que se le suministró continuamente agua residual doméstica 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 conduce 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 estático definido en el tanque; Este reservorio permite la sedimentación de sólidos de gran tamaño que pudieran obstruir el sifón, y 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, colocadas a 1/3 del ancho de la lámina de agua, a partir de los taludes y se encuentran separadas entre ellas la misma distancia, las tuberías de salida cuentan con una "Tee" como accesorio que permite la recolección del

efluente a 30 cm bajo el nivel del agua.

Condiciones de operación de la laguna

El sistema fue operado bajo condiciones de caudal continuo, con un caudal medio que se mantuvo en un rango de 0.025 L/s a 0.035 L/s, siendo el caudal promedio igual 0.028 L/s. El caudal se aforó diariamente, dos veces al día con una probeta de 100 ml y un cronómetro, para asegurar 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 los lodos del tanque de carga constante.

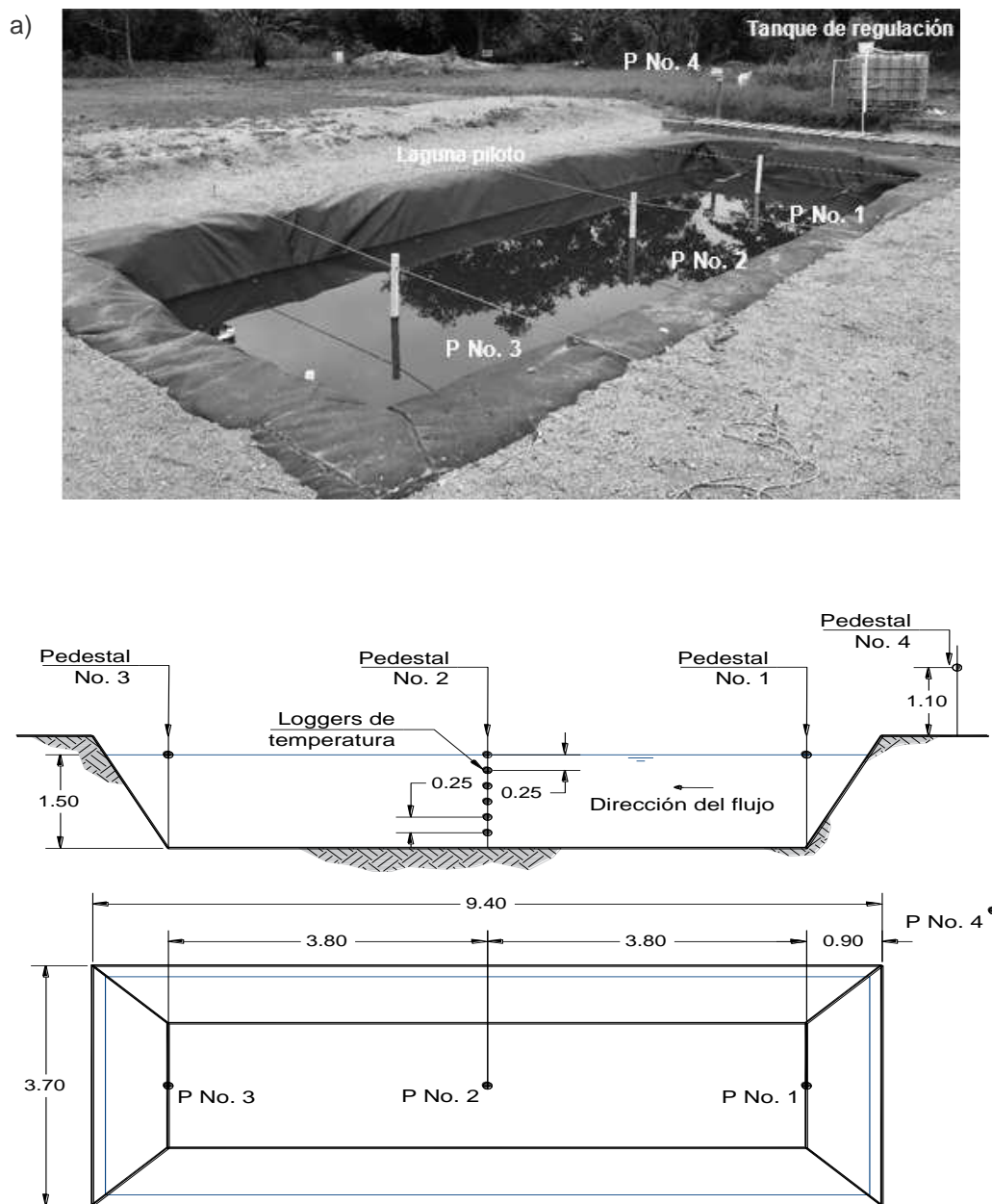
Medición de temperatura, radiación solar y velocidad del viento

Las mediciones de la temperatura en la laguna facultativa fueron realizadas, mediante aparatos de registro de datos HOBO MX2201. Estos dispositivos son a prueba de agua con una resistencia de hasta 30.5 m de profundidad y utilizan Bluetooth Low Energy (BLE) para proporcionar mediciones de temperatura directamente a un dispositivo móvil iOS o Android. Tienen un diámetro de 3.35 cm y cuentan con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -20°C a 70°C , con 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.

Los dispositivos fueron colocados en tres puntos estratégicos dentro de la laguna donde realizaron lecturas de temperatura a diferentes profundidades: 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 del aire en un sitio fuera de la misma (figura 2b). 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 poder validar la uniformidad del comportamiento de la temperatura en la masa de agua a la misma profundidad, todos los pedestales fueron situados en el eje central de la laguna.

Figura 2. a). Laguna facultativa piloto para la evaluación de estratificación térmica. b). Esquema de ubicación de equipo de temperatura



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

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.

De igual manera, la temperatura del aire, la radiación solar y velocidad el viento, fueron medidas mediante una estación meteorológica automática modelo Davis

Instruments Vantage pro2, con precisión de 0.1 °C, 1 watt/m² y 1 km/hr, para cada una de las variables respectivamente, la cual se instaló en el mismo predio de la unidad experimental a 90 m de separación de la laguna piloto. Los equipos de temperatura 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 1 de febrero al 31 de mayo de 2018. La misma configuración de toma de datos fue utilizada para la estación meteorológica. 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 periodo 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.

Análisis estadístico

Un análisis de correlación por medio del coeficiente de Pearson (r_p) y coeficiente de determinación (r²_p) fue empleado para evaluar la relación entre las temperaturas a la misma profundidad a lo largo de la laguna. Se consideraron las correlaciones significativas arriba de 0.80. De igual manera, las temperaturas del aire medidas por los dispositivos HOBO y las temperaturas del aire medidas por la estación fueron analizadas por un análisis de correlación y un contraste de hipótesis entre las medias de los datos con una prueba *t-student*. El contraste de hipótesis fue realizado a un 95% de confianza.

Estadística descriptiva fue aplicada a las temperaturas medidas en el interior y exterior de la laguna y los datos de radiación solar y velocidad del viento. Para la evaluación de la estratificación térmica 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:

$$G_T = \frac{T_x - T_{(x+0.25)}}{h} \tag{1}$$

Donde G_T es el gradiente térmico, °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 (0.25 m).

Para cada registro de 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 consideró, que para que ocurriera la estratificación debía producirse un gradiente > 1 °C/m y el mayor valor de gradiente indicaba la ubicación de la termoclina. El tiempo que la laguna estuvo estratificada cada día, se calculó contabilizando el número de horas que esta permaneció estratificada por día de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_i = \frac{\text{número de horas donde } G_T \geq 1 \text{ °C/m}}{24 \text{ horas/día}} \tag{2}$$

Donde E_i es el número de días expresado como fracción en el cual la laguna permanece estratificada, de esta manera el tiempo de estratificación mensual y el porcentaje de estratificación se expresa a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E_m = \sum_1^i E_i \tag{3}$$

$$\% E_m = \frac{\sum_1^i E_i}{\text{número de días del mes}} \tag{4}$$

Donde E_m es el número de días del mes donde la laguna estuvo estratificada y $\% E_m$, es el porcentaje del tiempo de estratificación de cada mes.

Resultados

Correlación entre los equipos de medición y las temperaturas a lo largo de la laguna

Las temperaturas del aire medidas con los sensores con precisión de 0.50 °C fueron comparadas con las temperaturas medidas por la estación automática con precisión de 0.1 °C, para validar la confiabilidad de la

información registrada por los sensores. Los valores de temperatura medidos entre ambos dispositivos mostraron una correlación de $r_{2p} = 0.985$.

Por otro lado, la correlación entre las temperaturas medidas de los pedestales P No. 2-P No. 1, P No. 2-P No. 3 y P No. 1-P No. 3, a las mismas profundidades, mostraron coeficientes de determinación (r_{2p}) de 0.9943, 0.9886 y 0.9932 en la superficie; 0.9907, 0.9902 y 0.9941 a 0.75 m y 0.9981, 0.9977 y 0.9979 a 1.25 m, en el mismo orden de comparación.

Estratificación térmica en la laguna

La figura 3 muestra el porcentaje del tiempo diario donde la laguna estuvo estratificada para el período del 1 de febrero al 31 de mayo del 2018, con gradientes de temperatura ≥ 1 °C/m calculado con las ecuaciones (2) y (3) a partir de 34,560 registros de temperatura a las seis diferentes profundidades. Los resultados muestran que la laguna estuvo estratificada durante el 79.62 %. La temporada más fría de medición se extendió del 1 de febrero al 10 de marzo y la más cálida del 10 de marzo al 8 de mayo. La temperatura media de la laguna fue más estable en la temporada fría (19.95 ± 1.05 °C) en comparación con la temporada cálida (22.28 ± 1.53 °C) donde presentaron cambios más bruscos con caídas e incrementos de 3-5 °C en cortos períodos de tiempo. Del 8 de mayo al 31 de mayo la temperatura media de la laguna se mantuvo estable en 22.85 ± 0.95 . Un estudio más detallado del comportamiento de temperatura durante el período de estudio se presenta en Montoya y Gattorno (2018).

Condiciones de radiación solar, velocidad del viento y temperatura de la laguna y del aire

Los registros continuos promedio diarios de radiación solar y velocidad del viento a los que estuvo expuesta la laguna se muestran en la figura 4. Los valores promedios mensuales de estos parámetros, así como la temperatura del aire y el porcentaje del tiempo que la laguna permaneció estratificada cada mes se detallan en la tabla 1. Los valores de radiación solar y

velocidad del viento más bajos y más altos se presentaron en el mes de mayo y febrero respectivamente, mientras que, el porcentaje de tiempo que la laguna estuvo estratificada fue superior al 70% siendo mayor en el mes de marzo con un valor de 88.37%. Por otro lado, las figuras 5 y 6 muestran las variaciones de temperatura a intervalos de 30 min a las profundidades de 1.25 m, 0.75 m, 0.25 m y superficial y la temperatura del aire para los períodos del 16-19 de febrero y del 15-19 de marzo respectivamente. Estos gráficos fueron utilizados para explicar el comportamiento general de los eventos de estratificación y destratificación que ocurrieron en la laguna.

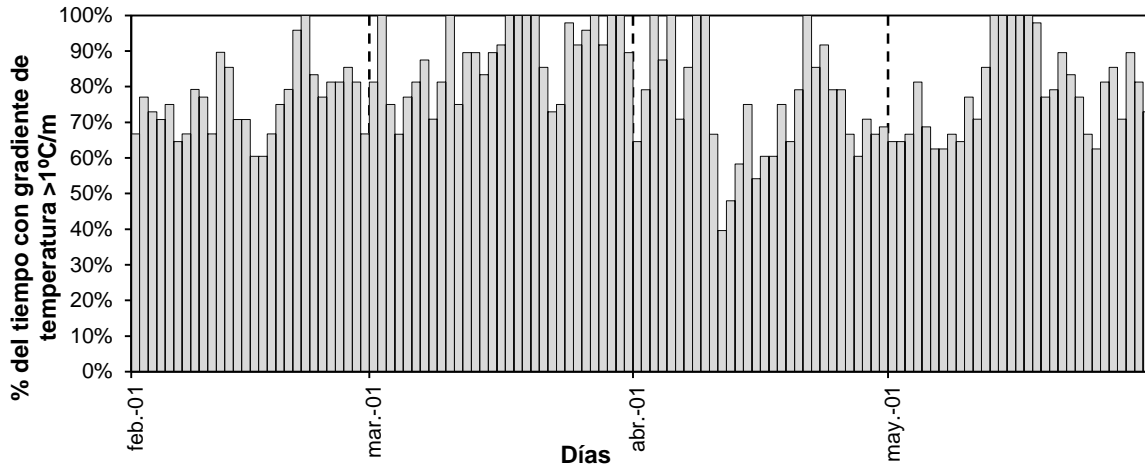
Registros de temperatura del caudal de entrada y temperatura de la laguna

Las mediciones de temperatura del caudal de entrada y de la laguna a profundidades de 0.50 m, 0.25 m y en la superficie a intervalos de tiempo de 10 min, fueron utilizadas para evaluar el efecto del caudal de entrada en la estratificación térmica formada y son mostradas en la figura 7.

Patrones de estratificación térmica

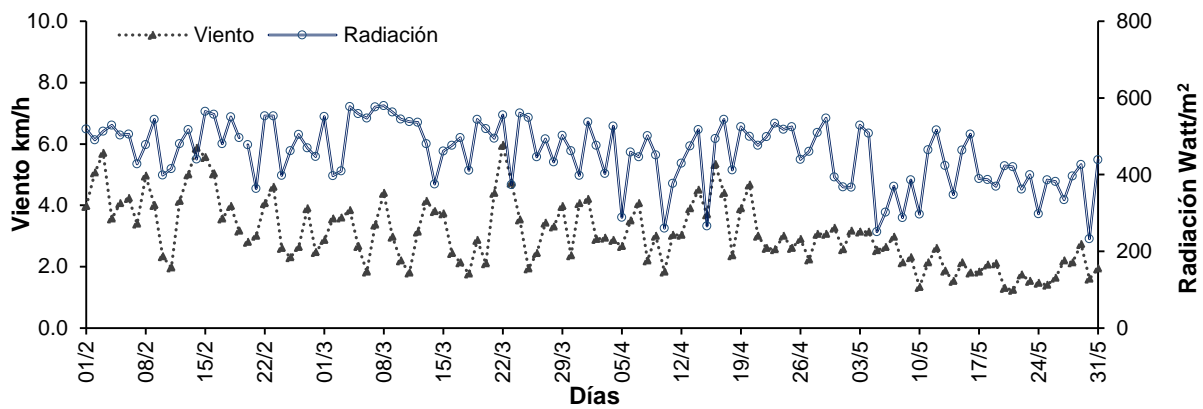
Los patrones de estratificación térmica diarios encontrados en la laguna piloto se muestran en la tabla 2. La clasificación se realizó de acuerdo a los criterios definidos por Gu y Stefan (1995) como Tipo I: completamente mezclado durante un día consecutivo; Tipo II: estratificado durante el día y mezclado durante la noche y Tipo III: continuamente estratificado durante un día y Abis & Mara (2006) como 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 Tipo II y III 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.

Figura 3. Porcentaje del tiempo donde la laguna estuvo estratificada con gradiente >1°C/m



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Figura 4. Registros de radiación solar y velocidad del viento entre el 1 de febrero al 31 de mayo del 2018



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

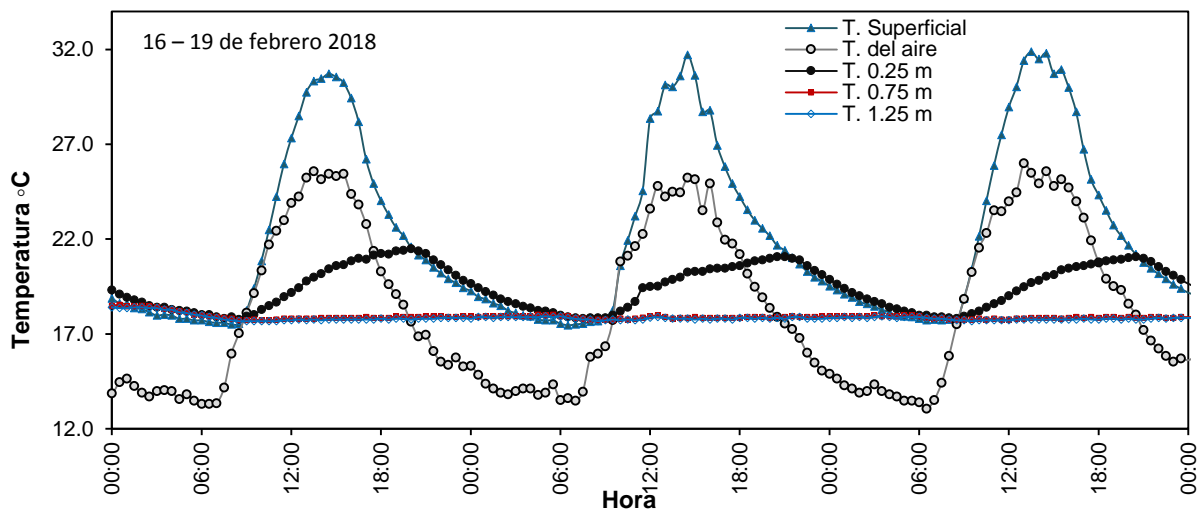
Tabla 1. Condiciones climáticas y períodos de estratificación entre febrero y mayo

Valores promedios mensuales				
Mes	% del tiempo Estratificada	Viento (km/hr)	Radiación (watt/m2)	Temperatura del aire (°C)
febrero	75.98	3.86 ± 1.10	487 ± 53	18.87 ± 0.59

Valores promedios mensuales				
Mes	% del tiempo Estratificada	Viento (km/hr)	Radiación (watt/m2)	Temperatura del aire (°C)
marzo	88.37	3.20 ± 1.00	497 ± 64	20.21 ± 1.11
abril	74.58	3.24 ± 0.82	459 ± 78	20.35 ± 1.09
mayo	79.03	2.09 ± 0.57	388 ± 74	20.68 ± 0.59

Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Figura 5. Registros de temperatura a diferentes profundidades para periodos de estratificación térmica diarios



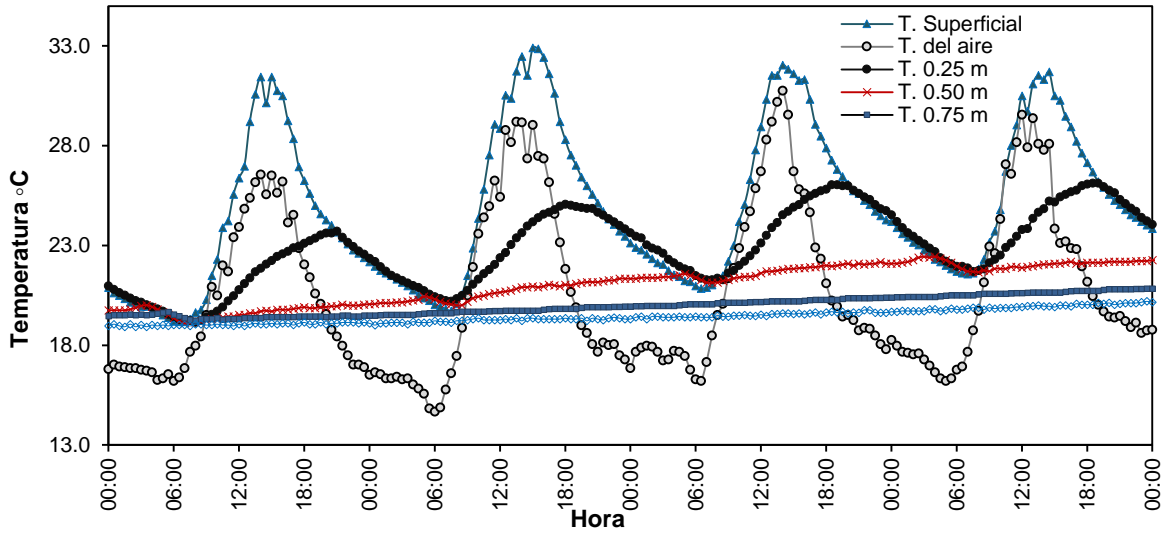
Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Variación de la profundidad de la termoclina

La tabla 3 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 en el período de febrero a mayo.

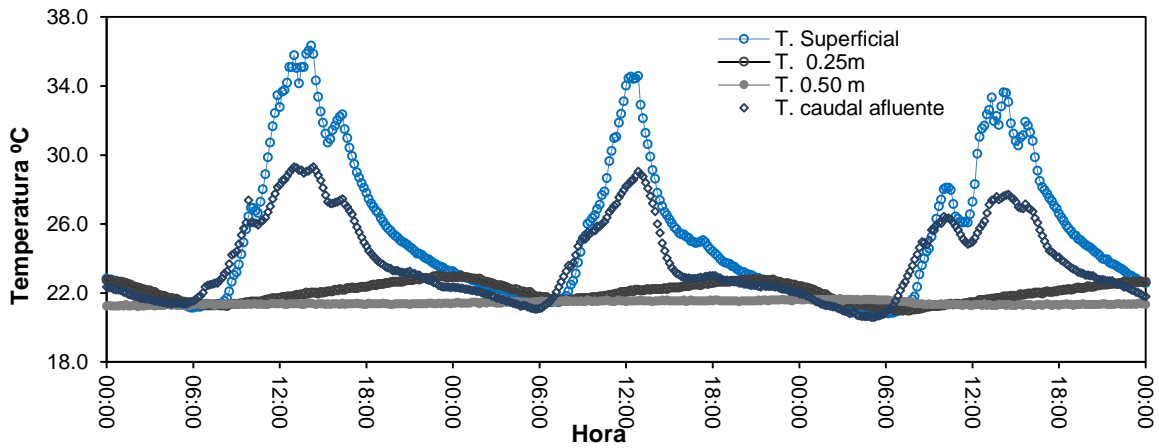
Los cálculos fueron realizados a partir de 34,560 registros continuos de temperatura en la superficie y a profundidades de 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 m. La termoclina se ubicó donde ocurría el cambio más brusco de temperatura que produjera un gradiente > 1 °C/m, cuando se presentó más de un gradiente entre profundidades se tomó el de mayor magnitud.

Figura 6. Registros de temperatura a diferentes profundidades para periodos de estratificación térmica continua



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Figura 7. Registros de temperatura del caudal de entrada y temperaturas en la profundidad de la laguna



Fuente: Montoya & Gattorno (2018)

Tabla 2. 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: Montoya & Gattorno (2018)

Tabla 3. Ubicación de la termoclina para los meses de febrero a mayo expresado como porcentaje del tiempo

Estrato donde se localizó termoclina (m)	% del tiempo								Total	
	Febrero		Marzo		Abril		Mayo			
	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: Montoya & Gattorno (2018)

Análisis de Resultados

Correlación entre los equipos de medición y las temperaturas a lo largo de la laguna

Los valores de temperatura medidos entre ambos dispositivos mostraron una correlación altamente significativa y positiva y la diferencia entre los valores medios de las lecturas fue de $0.20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$. Asimismo, la diferencia de medias no fue estadísticamente mayor de $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (prueba-t, $p < 0.0001$), lo que muestra la confiabilidad y precisión que presentaron los aparatos utilizados para registro de temperatura, en contraste con un equipo más sofisticado como una estación automática

para el monitoreo continuo realizado en este estudio. De igual manera, los valores de correlación entre las temperaturas medidas de los diferentes pedestales P No. 1, P No. 2 y P No. 3 fueron altamente significativos, lo que muestra condiciones isotérmicas a lo largo de la laguna, sin embargo, se debe tener en cuenta que esto pudo haber sido limitado por las pequeñas dimensiones longitudinales de la laguna (ver figura 2b).

Estratificación térmica en la laguna

La figura 3 muestra que la laguna permaneció estratificada durante la mayor parte del tiempo, mostrando un bajo grado de mezcla independientemente de la temporada fría

o cálida. 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 mes, 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 registró ningún día continuo donde la laguna estuviera con una temperatura homogénea o sin estratificación térmica, lo cual indica que las condiciones de viento, la temperatura o el impulso del caudal afluente, 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, ya que 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 cierta manera, a alcanzar los valores de estratificación encontrados.

Influencia de las condiciones climáticas en la formación de estratificación térmica

Las condiciones ambientales a la que estuvo expuesta la laguna se detallan en la figura 4 y tabla 1. Como era esperado, días altamente estratificados estuvieron asociados a altas radiaciones solares y bajas velocidades del viento, y días con un más bajo nivel de estratificación a bajas radiaciones solares 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 el volumen de la laguna un mayor porcentaje del día, 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 que la influencia del viento sobre la laguna es uno de los factores determinantes para romper la estratificación térmica, durante este trabajo se encontró que la temperatura del aire desempeñó un papel de mayor importancia cuando las condiciones de viento no eran favorables, 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 solar, viento y temperatura del aire. Donde dos casos de estratificación se distinguieron, estratificación diaria y estratificación continuada por más de un día. Una descripción general de ellos se da a continuación:

Cuando la **estratificación diaria** ocurría (figura 5), 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 profundidad de la laguna) se mantenía invariable. 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 17 °C en 0.25 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 hipolimnio. 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.

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.

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 6, 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.

Efecto de la temperatura del caudal de entrada en la estratificación térmica

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 mayor temperatura, siendo menos denso que el volumen de agua de la laguna a 0.25 m, el cual tiene una mayor temperatura y por tanto mayor densidad, con el cual pueden llegar a alcanzar diferencias de 2-8 °C (figura 7), permitiéndole emerger 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.

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, lo cual ayudaba a favorecer el enfriamiento causado principalmente por la temperatura el aire y condiciones de viento.

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 originaran diferentes tipos de patrones. Los patrones encontrados fueron similares a los propuestos por Gu y Stefan (1995), experimentando la laguna solamente los Tipo II y III, donde se observó un patrón más, el cual se definió como Tipo V: estratificado durante el día y mezclado durante parte de la noche. Este último patrón se propone, 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 encontró estratificada.

Los días que sucedió cada uno de estos patrones dentro cada mes, se presentan en la tabla 2, 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.

Variación de la profundidad de la termoclina

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; Gloyna, 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 temporada más 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.

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 (0.75 m). 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 m 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.

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, un dispositivo de salida del efluente 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 evitando la posible concentración de algas en el efluente.

Conclusiones

Las condiciones iniciales para que se presentara la estratificación térmica fueron una radiación solar promedio de 125 watt/m² y al menos 3 horas de sol, ocurriendo normalmente entre 8:30-9:30 horas, con gradientes térmicos durante el día bastante altos de hasta 17 °C en 0.25 m de profundidad.

A partir de las horas al día de estratificación, se obtuvo que la laguna se encontró estratificada el 79.62 % independientemente de la temporada, fría o cálida. Esto sugiere que, en climas tropicales, lagunas facultativas de pequeña área superficial expuestas a bajas condiciones de viento, pueden permanecer estratificadas por largos periodos de tiempo, especialmente si son bastante profundas (> 1.5 m).

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).

Los cambios en la temperatura del aire fueron el principal mecanismo de destratificación y mezcla en la laguna la cual estuvo sujeta a bajas condiciones de viento. Cuando la temperatura del aire caía por debajo de la temperatura del fondo de la laguna por las noche-madrugada promovía la homogenización entre capas. Por otra parte, la estratificación continuada por más de un día en la laguna parece estar asociada a cambios bruscos progresivos en la temperatura del aire > 1.5 °C que no permiten el enfriamiento del volumen de agua por la noche-madrugada.

Los resultados obtenidos a partir de los registros continuos de temperatura mostraron que la termoclina se posicionó establemente en los primeros 0.25 m de profundidad 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; por lo que, una toma de salida a una profundidad entre 0.60 – 0.75 m podría ser suficiente para romper la estratificación térmica, promoviendo la circulación desde las partes superiores

hasta este punto y evitar una posible concentración de algas, las cuales causan un aumento el DBO5 y sólidos suspendidos.

Agradecimientos

Esta investigación pudo llevarse a cabo gracias a la colaboración de: la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria por prestar las instalaciones para desarrollar las construcción y experimentación de la planta piloto, el Servicio de Intercambio Alemán (DAAD) por el otorgamiento de fondos y a la Ing. Ana Saraí Montoya por su apoyo en el desarrollo del trabajo.

Referencias

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.

GLOYNA, Earnest. Waste stabilization ponds. World Health Organization Monograph Series No. 60, Geneva, 1971.

GU, R. C.; STEFAN, H. G. Stratification dynamics in wastewater stabilization ponds. *Water Res.*29(8),1995. 1909–1923 p.

MARA, Duncan. Domestic Water Treatment in developing countries. London, UK: MapSet, 2003.

MARAIS, R. New factors in the design, operation and performance of waste-stabilization ponds. *Bull. Wild Hith Org*, 34, 1966. 737-763 p.

MONTOYA, Ana; GATTORNO, Juan. Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa, 2018.

NOYOLA et al. Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales, Instituto de ingeniería, México, 2013.

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.

SPERLING, M.V. Waste stabilization Ponds. Biological Wastewater Treatment Series, Volume three. IWA Publishing, 2007.

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.

YÁNEZ COSSIO, Fabián. Lagunas de estabilización. Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento. Ecuador: Imprenta Molsalve, 1993.

WELCH, S. Paul; *Limnology*. U.S.A: Editorial McGraw-hill, 1952

Información de los autores:

Maestro en ciencias en ingeniería sanitaria e ingeniero civil, Juan Francisco Gattorno Fúnez, graduado de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la Universidad Nacional Autónoma de Honduras.

Maestro en ciencias en ingeniería sanitaria e ingeniero civil, Adán Ernesto Pocasangre Collazos, graduado de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la Universidad

de Sao Paulo de Brasil. Profesor titular de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria