



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

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

**EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DINÁMICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL  
OXÍGENO DISUELTU EN LA LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

**Ing. Roberto Huinil Mejía**

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

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DINÁMICA DE LA  
DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO EN LA LAGUNA FACULTATIVA  
DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

ESTUDIO ESPECIAL

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

POR

**ING. ROBERTO HUINIL MEJIA**

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

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

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Inga. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR(A)	M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR(A)	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR(A)	M.Sc. Ing. Joram Matías Gil Laroj

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DINÁMICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO EN LA LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 31 de julio de 2018.

Roberto Huinil Mejía

Correo electrónico: robhuime@hotmail.com

Carné No: 201130780



Guatemala, 10 de junio de 2019

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 II titulado:

**EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DINÁMICA DE LA  
DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO DISUELTU EN LA LAGUNA FACULTATIVA  
DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

Presentado por el estudiante:

**Ing. Roberto Huinil Mejía**

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requerimientos 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"

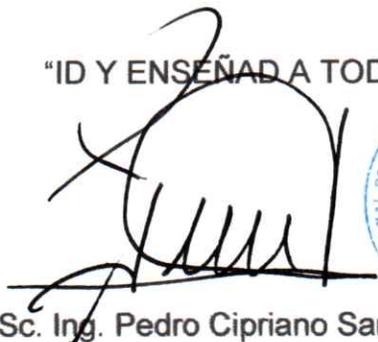
M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Guatemala, 11 de junio de 2019

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, M.Sc. Ing. Joram Matías Gil Larroj, así como el visto bueno del coordinador de la Maestría 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 del estudiante Ing. Roberto Huinil Mejía, titulado: **EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA DINÁMICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO EN LA LAGUNA FACULTATIVA DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los once días del mes de junio de 2019.

Imprimase

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis  
DIRECTOR

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Gracias por darme fuerza, sabiduría y prudencia.
- Mi familia** Porque ustedes son el motivo y apoyo en todo momento de mi vida. ¡Infinitas gracias!
- USAC** Por abrirme sus puertas hacia el aprendizaje, y por permitirme culminar otra etapa más en sus aulas.
- ERIS** Agradecimiento a todo el personal administrativo, catedráticos y compañeros con los cuales compartimos momentos memorables dentro y fuera de aulas.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Eddison Roberto**

¡Maestro!, que enseñas con tus acciones y emociones el sentido de la vida.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Laguna de estabilización.....	1
1.1.1. Laguna facultativa.....	1
1.1.1.1. Descripción del proceso.....	2
1.1.1.2. Ecología de las lagunas de estabilización.....	3
1.1.1.3. Fotosíntesis.....	5
1.1.2. Factores de influencia.....	7
1.1.2.1. Oxígeno disuelto.....	8
1.2. Radiación solar.....	11
1.2.1. Relación radiación solar y oxígeno disuelto.....	12
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Descripción del sitio de estudio.....	15

2.2.	Descripción de la unidad experimental.....	15
2.2.1.	Diseño de la laguna facultativa piloto .....	15
2.3.	Condiciones de operación .....	17
2.4.	Procedimiento experimental .....	18
2.4.1.	Parámetro analizado.....	18
2.4.2.	Medición de oxígeno disuelto .....	18
2.4.2.1.	Equipo de medición de oxígeno disuelto .....	19
2.4.2.2.	Puntos de recolección de datos.....	19
2.4.3.	Medición de radiación solar .....	20
2.4.3.1.	Equipo de medición de radiación solar .....	22
2.5.	Procesamiento de datos y análisis estadístico .....	22
2.5.1.	Método estadístico.....	23
2.5.2.	Análisis estadístico .....	23
2.5.3.	Número de muestras .....	23
2.5.4.	Correlación de datos.....	25
3.	RESULTADOS.....	27
3.1.	Resultados día 04 de septiembre de 2018.....	28
3.2.	Resultados día 11 de septiembre de 2018.....	31
3.3.	Resultados día 18 de septiembre de 2018.....	34
3.4.	Resultados día 25 de septiembre de 2018.....	37
3.5.	Resultados día 02 de octubre de 2018.....	40
3.6.	Resultados día 09 de octubre de 2018.....	43
3.7.	Resultados día 16 de octubre de 2018.....	46
3.8.	Resultados día 23 de octubre de 2018.....	49
3.9.	Resultados día 30 de octubre de 2018.....	52
3.10.	Resultados de perfiles de O.D.....	54

4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	59
4.1.	Análisis de normalidad de datos de oxígeno disuelto de superficie .....	59
4.2.	Correlación de oxígeno disuelto en la entrada, centro y salida de la laguna .....	61
4.3.	Dinámica del oxígeno disuelto en la superficie .....	67
4.4.	Perfiles de oxígeno disuelto .....	71
4.4.1.	Variación de la profundidad de la oxipausa .....	74
	CONCLUSIONES .....	79
	RECOMENDACIONES .....	81
	BIBLIOGRAFÍA .....	83
	ANEXO .....	87



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Representación esquemática de las lagunas de estabilización .....	5
2.	Concentración de oxígeno disuelto en una laguna .....	10
3.	Ubicación del lugar de estudio .....	16
4.	Esquema de la laguna de estabilización experimental .....	18
5.	Puntos de medición con frecuencia de dos horas .....	20
6.	Puntos de medición a cada 10 centímetros .....	21
7.	Ubicación de la estación meteorológica automática .....	21
8.	Concentración de O.D. en la superficie .....	29
9.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	29
10.	Concentración de O.D. en el fondo .....	30
11.	Concentración de O.D. en la superficie .....	32
12.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	32
13.	Concentración de O.D. en el fondo .....	33
14.	Concentración de O.D. en la superficie .....	35
15.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	35
16.	Concentración de O.D. en el fondo .....	36
17.	Concentración de O.D. en la superficie .....	38
18.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	38
19.	Concentración de O.D. en el fondo .....	39
20.	Concentración de O.D. en la superficie .....	41
21.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	41
22.	Concentración de O.D. en el fondo .....	42
23.	Concentración de O.D. en la superficie .....	44
24.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	44

25.	Concentración de O.D. en el fondo .....	45
26.	Concentración de O.D. en la superficie .....	47
27.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	47
28.	Concentración de O.D. en el fondo .....	48
29.	Concentración de O.D. en la superficie .....	50
30.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	50
31.	Concentración de O.D. en el fondo .....	51
32.	Concentración de O.D. en la superficie .....	53
33.	Concentración de O.D. a media profundidad .....	53
34.	Concentración de O.D. en el fondo .....	54
35.	Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 6:00 horas.....	55
36.	Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 12:00 horas.....	56
37.	Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 18:00 horas.....	57
38.	Diagrama de caja .....	60
39.	Correlación de datos de O.D. de superficie en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna .....	61
40.	Correlación de datos de O.D. a 0.75 m de profundidad en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna .....	63
41.	Correlación de datos de O.D. de fondo en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna.....	65
42.	Oxígeno disuelto promedio, mínimo y máximo; y radiación solar promedio .....	68
43.	Concentración de O.D. en horario de 14:00 horas .....	69
44.	Radiación solar promedio, datos INSIVUMEH y datos de campo	70
45.	Perfil promedio, mínimo y máximo de O.D. (6:00 horas).....	71
46.	Perfil promedio, mínimo y máximo de O.D. (12:00 horas).....	73
47.	Perfil promedio, mínimo y máximo de O.D. (18:00 horas).....	73
48.	Variación promedio de la oxipausa en el mes de septiembre .....	76
49.	Variación promedio de la oxipausa en el mes de octubre .....	77

## TABLAS

I.	Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes.....	9
II.	Características físicas y operacionales de laguna facultativa piloto .....	17
III.	Resultado de pre-muestreo de O.D. ....	24
IV.	Determinación de número de muestras .....	25
V.	Correlativo de tablas y figuras .....	27
VI.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 04-09-2018.....	28
VII.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 11-09-2018.....	31
VIII.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 18-09-2018.....	34
IX.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 25-09-2018.....	37
X.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 02-10-2018.....	40
XI.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 09-10-2018.....	43
XII.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 16-10-2018.....	46
XIII.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 23-10-2018.....	49
XIV.	Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 30-10-2018.....	52
XV.	Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 6:00 horas .....	55
XVI.	Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 12:00 horas.....	56
XVII.	Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 18:00 horas.....	57
XVIII.	Pruebas de normalidad .....	60



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>%</b>	Porcentaje
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>O.D.</b>	Oxígeno disuelto
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>N</b>	Número de muestra
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación estándar
<b>z</b>	Nivel de confianza
<b>e</b>	Error tolerante
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>m</b>	metro
<b>m/s</b>	Metro por segundo
<b>Min</b>	Minutos
<b>Mm</b>	milímetros
<b>h</b>	hora
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>L</b>	Litro
<b>L/s</b>	Litro por segundo
<b>Q</b>	Caudal
<b><math>r^2</math></b>	Coefficiente de correlación de Person
<b>T</b>	Temperatura
<b>W/m<sup>2</sup></b>	Vatios por metro cuadrado



## GLOSARIO

<b>Aguas residuales</b>	Las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
<b>Carga</b>	El resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.
<b>Caudal</b>	El volumen de agua por unidad de tiempo.
<b>Concentración</b>	Cantidad de masa por unidad de volumen.
<b>Cuerpo receptor</b>	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda bioquímica de oxígeno: la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados celsius.
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno: la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable

en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.

**Estratificación térmica** Variación de temperatura en el agua igual o mayor a 1°C/m.

**Eutrofización** El proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, a su vez, propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

**Gradiente térmico** Variación de la temperatura respecto a la profundidad de la laguna.

**Muestra** La parte representativa, a analizar, de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

**Oxígeno** Elemento químico gaseoso, de gran interés por ser el elemento esencial en los procesos de respiración de la mayor parte de las células vivas y en los procesos de combustión. Es el elemento más abundante en la tierra.

**Oxígeno disuelto** Es el oxígeno que está disuelto en el agua.

**Oxipausa** Profundidad en donde la concentración de oxígeno disuelto es cero.

<b>Radiación solar</b>	Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol.
<b>Temperatura</b>	Magnitud física que refleja la cantidad de calor de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.
<b>Tratamiento de aguas residuales</b>	Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.



## RESUMEN

La incidencia de la radiación solar sobre la dinámica y distribución del oxígeno disuelto a lo largo de la laguna facultativa y en función de la profundidad fueron investigados y analizados en este estudio. Se realizaron mediciones de oxígeno disuelto en campo con frecuencia de dos horas en la entrada, centro y salida de la laguna, en tres profundidades (superficie, centro y fondo), además se realizaron mediciones en el centro de la laguna a cada 0.10 m, para obtener perfiles de oxígeno disuelto en distintos horarios del día.

Los resultados obtenidos en las correlaciones entrada-centro, salida-centro y entrada-salida son representativos para datos de superficie con coeficientes de correlación  $R^2$  mayores a 0.90, más no para profundidades a 0.75 y 1.50 m en los cuales se obtuvieron un coeficiente de correlación máximo de 0.30. Se logró demostrar la hipótesis de la investigación al lograr concentraciones mayores a 20 mg/l de O.D. en la superficie, esto influenciado por la radiación solar entre 11:00 a 14:00 horas.

Los perfiles de oxígeno disuelto demuestran una clara estratificación y poca mezcla, los cuales en el análisis respectivo, se determinó que esta estratificación es causada por la temperatura del agua en diferentes horarios del día. También se demuestra que la actividad fotosintética se desarrolla en los primeros 0.30 m de la laguna en la zona fótica del sistema lagunar facultativa.



## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La mayor parte de ríos y lagos de Guatemala son afectados directamente por la descarga de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento, ya que estos por la carga orgánica y los nutrientes que llevan ayudan a la contaminación del recurso hídrico dentro del ecosistema, producto de la contaminación se desliga una serie de problemas: incide en la calidad de vida de la población, afecta el turismo, afecta el equilibrio ecológico, entre otros.

En Guatemala, según la encuesta nacional de condiciones de vida (ENCOVI) 2011-2012, de 334 municipios registrados en el ENCOVI, solo un 4% aplican tratamiento a las aguas residuales, mientras que el resto es vertido en los cuerpos de agua principalmente ríos. Y según el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, las enfermedades diarreicas agudas se encuentran entre las primeras cinco causas de morbilidad y mortalidad en el país. Los problemas sanitarios se relacionan directamente con la red de distribución de agua y ponen de manifiesto la contaminación del recurso, debido a filtraciones que se producen en el alcantarillado.

El Acuerdo Gubernativo 236-2006 obliga a todo ente generador de aguas residuales para el mejoramiento del efluente antes del vertimiento a los cuerpos receptores. Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser diseñadas, construidas y operadas, con el objetivo de convertir el agua residuales en un efluente final aceptable. Esto obliga el control de todo el proceso para el funcionamiento adecuado de la misma, satisfacer ciertas normas o reglas capaces de garantizar la calidad requerida por la ley vigente.

Las lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento de aguas residuales que cumplen con condiciones económicas y técnicas para implementarlos a nivel municipal, tanto para su bajo costo como su fácil construcción y operación es una alternativa para ser implementado, con el fin de reducir la contaminación de los recursos naturales. Cuando en las lagunas se encuentran problemas de funcionamiento principalmente, se aprecia en la eficiencia de remoción. Los indicadores de mayor importancia sobre el funcionamiento de las lagunas de estabilización son el oxígeno disuelto y la temperatura.

Dentro de los factores químicos, el oxígeno disuelto es uno de los mejores indicadores sobre el funcionamiento y la principal fuente de oxígeno disuelto es la fotosíntesis que está relacionado con la radiación solar recibida en la laguna. Con lo cual se tiene la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es el efecto de la radiación solar en la concentración y dinámica del oxígeno disuelto en la laguna facultativa?*

## JUSTIFICACIÓN

El porcentaje de tratamiento de las aguas residuales representa para Guatemala y para el resto de países de la región una alta deficiencia en la cobertura del tratamiento. Para enfrentar la problemática es necesario implementar sistemas para el mejoramiento de las características de las aguas residuales antes del vertimiento, así cumplir con los parámetros establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, que conlleva implementar diversos tipos de tratamiento y por ende, inconvenientes para su funcionamiento.

Las lagunas de estabilización son el método más simple para el tratamiento de aguas residuales que existe, y es uno de los métodos más eficientes en cuanto a la remoción de la materia orgánica y coliformes. La eficiencia de la depuración del agua residual en lagunas de estabilización depende ampliamente de las condiciones climáticas de la zona, temperatura, radiación solar, frecuencia y fuerza de los vientos locales, y factores que afectan directamente a la biología del sistema.

El oxígeno disuelto en las lagunas de estabilización es uno de los mejores indicadores sobre su funcionamiento, ya que el oxígeno para la remoción bacteriana de la  $DBO_5$  es generado mayormente por la fotosíntesis de las algas, la cual está relacionado a la variación en la radiación solar. Como resultado de la actividad fotosintética de las algas en la laguna, hay una variación diurna de la concentración del oxígeno disuelto. Después del amanecer, el nivel de oxígeno disuelto aumenta gradualmente hasta un máximo al medio día, luego disminuye hasta un mínimo en horas de la noche.

Una sobrecarga orgánica es causada normalmente por cargas orgánicas altas en el afluente o incrementos en la concentración de materia orgánica, sin el correspondiente aumento en la capacidad de la planta de tratamiento. Esta condición hace que las concentraciones de oxígeno disuelto bajen ( $< 1$  mg/L) e inhiban el tratamiento. La medición de oxígeno disuelto y la realización de perfiles de oxígeno disuelto deberán realizarse en distintos momentos del día, para verificar si hay una baja continua (EPA, 2011).

Montoya y Gattorno (2018) señalan, los intervalos de tiempo donde suceden las temperaturas máximas de la laguna, pueden marcar una pauta de la ocurrencia de un mayor o menor desempeño para ciertos procesos, como por ejemplo, la extinción bacteriana debido al incremento del pH, así como la mayor producción de oxígeno disuelto.

La fotosíntesis y, por tanto la radiación solar son relevantes para las lagunas aerobias y facultativas, ya que la oxigenación suministrada por las algas es mayor que la aireación natural. (CONAGUA, 2016)

# OBJETIVOS

## General

Determinar la dinámica y distribución del oxígeno disuelto producto de la radiación solar en la laguna facultativa experimental de la Planta Piloto Aurora II

## Específicos

1. Determinar el efecto que tiene la radiación solar sobre la concentración de oxígeno disuelto en la laguna facultativa.
2. Determinar la correlación en tres profundidades distintas para los datos de oxígeno disuelto en entrada, centro y en la salida de la laguna facultativa.
3. Analizar el perfil del oxígeno disuelto y localizar la oxipausa en distintos horarios durante el día.



## **HIPÓTESIS**

La radiación solar modifica la concentración de oxígeno disuelto en la laguna facultativa llegando a concentraciones mayores a 15 mg/L después del mediodía.



## ANTECEDENTES

La utilización de lagunas para estabilizar aguas residuales o desechos orgánicos, ya sea en forma casual o deliberada, es tan antigua como la naturaleza misma. Sin embargo, el empleo de lagunas de estabilización como un recurso técnico o como un medio aceptado con este propósito, se ha desarrollado en la segunda mitad del siglo XX. Al parecer, la primera instalación de laguna de estabilización construida como resultado de un proyecto concreto para tratar aguas residuales domésticas, estuvo localizada en Dakota del Norte, Estados Unidos en 1948. Este proyecto fue aprobado por las autoridades de salud pública. Desde entonces una gran cantidad de instalaciones fueron construidas en varios países. (Ayala Fanola y Gonzales Marquez, 2008)

Hoy en día existen 20.000 lagunas de estabilización, de las cuales se conoce información precisa de 7000 lagunas en operación solo en los Estados Unidos, si bien se han implementado muchas en Israel y Latinoamérica, de estas no se tienen datos precisos. (Mara *et al.*, 1992)

Se han realizado muchas investigaciones sobre el uso de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo (Arceivala, *et al.*, 1970; Arthur, 1983; Cisneros, *et al.*, sin fecha; Egocheaga y Moscoso, 2004; Feachem *et al.*, 1983; León y Moscoso, 1996; Mara y Cairncross, 1989; Mara *et al.*, 1992; Rolim, S., 2000; Shuval *et al.*, 1986; Yáñez, 1992). Los resultados muestran claramente que las lagunas pueden tratar aguas residuales a un alto nivel. (Stewart M. Oakley, 2005).

El interés por predecir efectos de factores externos sobre algunos parámetros de control (temperatura, oxígeno disuelto, pH, etc.) en cuerpos lagunares dio lugar a que se iniciaran los primeros estudios, de los cuales se obtuvo conclusiones importantes como el siguiente: En ausencia de la influencia del viento sobre el mezclado, la población de alga tiende a estratificarse en capas, algunas de 20 cm de espesor durante las horas de luz del día. Las algas concentradas se mueven hacia arriba y hacia abajo en respuesta a los cambios de intensidad de luz y causa fluctuaciones en la calidad final, en términos de DBO y SS, (Mara *et al.*, 1992).

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) viendo la importancia de realizar estudios científicos e investigativos implementó estudios de lagunas de estabilización, entre los cuales se puede mencionar el realizado en el 2003, por los ingenieros Álvaro Alberto Martínez Guillen y Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz. *Estudio y evaluación de las lagunas de estabilización como tratamiento de las aguas residuales domésticas en la Base militar No. 10 de Jutiapa, Colonia militar de Jutiapa, Base aérea del sur en Retalhuleu y Escuela politécnica en San Juan Sacatepéquez.* Y el realizado en el 2018, por Juan Francisco Gattorno y Ana Saraí Montoya López, en donde estudiaron el comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa.

## ALCANCES Y LIMITACIONES

La investigación comprende el estudio del efecto que tiene la radiación solar sobre el cambio en la concentración de oxígeno disuelto en la laguna facultativa, que está ubicado en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), durante el período del 4 de septiembre al 30 de octubre de 2018, en la ciudad de Guatemala.

Con el desarrollo de la investigación se demuestra la incidencia de la radiación solar sobre la concentración de oxígeno disuelto. También se muestra el perfil del oxígeno disuelto para la ubicación de la oxipausa en distintos horarios del día.

Entre las limitaciones se tienen:

- El estudio fue realizado con un equipo de medición de oxígeno disuelto manual, sin embargo, hay medidores de oxígeno disuelto con medición automática, lo cual puede alojar más datos para el estudio.
- El estudio fue realizado en una laguna piloto de 27.13 m<sup>2</sup> de área superficial, es posible que los resultados difieran en lagunas con mayores dimensiones de área.



## INTRODUCCIÓN

La implementación de las lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas residuales en países en desarrollo como Guatemala, es atractiva en términos económicos, la generación de malos olores crea rechazo en algunos casos, por parte de la población a cercanías de estos sistemas. Se ha detectado mal funcionamiento de las mismas, ocasionado posiblemente por aspectos constructivos y/o de operación y mantenimiento, puesto que se han tenido en la concepción de ser sistemas que pueden trabajar sin ninguna supervisión.

El bajo costo de construcción y la alta eficiencia ha dado lugar a realizar estudios sobre diversos aspectos de las lagunas de estabilización. Actualmente existe la necesidad de continuar con investigaciones sobre estos sistemas de tratamiento esto con el objeto de predecir el comportamiento, mejora en la eficiencia y para fundamentar los diseños futuros.

De acuerdo al planteamiento anterior, se tiene como objetivo central de este estudio determinar la dinámica del oxígeno disuelto en una laguna de estabilización y cómo está relacionado con la radiación solar, logrando con esto la verificación continua del funcionamiento y predecir sobre la eficiencia del sistema. Este estudio se realizó en la laguna facultativa piloto instalado en la Planta Piloto Aurora II. Para ello se efectuaron mediciones puntuales de oxígeno disuelto a lo largo de la laguna y a diferentes profundidades, obteniendo un total de 1,080 datos de oxígeno disuelto; además se realizó mediciones de radiación solar con una estación meteorológica automática instalada a 90 m de la laguna con frecuencia de medición de 30 minutos.



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Laguna de estabilización**

Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe. Están constituidos por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra. Generalmente tiene forma rectangular o cuadrada.

El uso de lagunas de estabilización se usa para tratar aguas residuales de origen municipal, de la industria azucarera, de producción de papel, o de otras áreas como la petroquímica y la porcelana, entre otras (CONAGUA, 2016).

Las lagunas de estabilización se suelen clasificar en función de la naturaleza de la actividad biológica que tiene lugar: aerobia, anaerobia. Facultativa y de maduración (Metcalf y Eddy, 1995).

### **1.1.1. Laguna facultativa**

Son aquellas que poseen una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes (Rolim, 2000).

En las lagunas facultativas se encuentran cualquier tipo de microorganismos, desde anaerobios estrictos en el lodo del fondo hasta aerobios estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Sin embargo, los

seres vivos más adaptados al medio serán los microorganismos facultativos, que pueden sobrevivir en las condiciones cambiantes de oxígeno disuelto típicas de estas lagunas a lo largo del día y del año. Además de las bacterias y protozoos, en las lagunas facultativas es esencial la presencia de algas, que son las principales suministradoras de oxígeno disuelto.

#### **1.1.1.1. Descripción del proceso**

En una laguna facultativa existen tres zonas:

- Una zona superficial donde existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, como se ha descrito anteriormente.
- Una zona inferior anaerobia, donde se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias.
- Una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, donde la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de lodo anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono, que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono por las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de lodo implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y el CH<sub>4</sub>, que o bien se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera (Rolim, 2000).

### **1.1.1.2. Ecología de las lagunas de estabilización**

Las bacterias y las algas son los dos componentes biológicos principales de las lagunas facultativas y su interacción constituye el efecto ecológico más importante sobre el proceso de autopurificación. Estas constituyen un sistema de tratamiento bioquímico de crecimiento suspendido, sin recirculación de sólidos sedimentados. El crecimiento algal representa, por una parte, el suministro adecuado de oxígeno fotosintético para la actividad aerobia bacteriana y, por otra, la necesidad de removerlas del efluente para impedir que aumenten su concentración de sólidos suspendidos y de materia orgánica biodegradable. La población algal se representa usualmente por la concentración de clorofila "a". (Restrepo, 2008)

Las variaciones locales en radiación solar debidas a la latitud, elevación y nubosidad, influyen sobre el diseño de una laguna de estabilización. Además, la penetración de la luz solar y la disponibilidad de CO<sub>2</sub> determinan la porción de volumen de laguna con producción algal de oxígeno. En las lagunas facultativas, la porción inferior es anaerobia y la porción superior es aerobia. La porción aerobia recibe oxígeno de la actividad fotosintética algal y de la reaeración superficial existente, a través de la interfaz aire-líquido. Las variaciones de la cantidad de luz incidente producen cambios considerables en las condiciones de una laguna facultativa (Romero, 2005).

Cuando existe suficiente cantidad de energía solar y de nutrientes, junto con condiciones ambientales como temperatura, normalmente se desarrollan crecimientos de algas en la superficie de la laguna. Las algas utilizan los subproductos de la oxidación bacteriana tales como: gas carbónico, fosfatos y amoníaco; al hacerlo producen oxígeno. Este oxígeno producido (normalmente en la capa de agua cercana a la superficie) puede ser accesible a todas las

bacterias de la laguna si se tiene una mezcla adecuada (ver mecanismos de autopurificación en figura 1). La parte suspendida forma depósitos de lodos en el fondo que se descomponen por mecanismos anaerobios (Cuervo, en prensa).

Cuando no existe luz solar, algunas algas son capaces de ejecutar metabolismo quimiosintético como las bacterias y, por lo tanto, requieren oxígeno para el proceso de oxidación. Por otra parte, las algas pueden padecer metabolismo endógeno para obtener energía mediante la descomposición de su propio protoplasma (Romero, 2005).

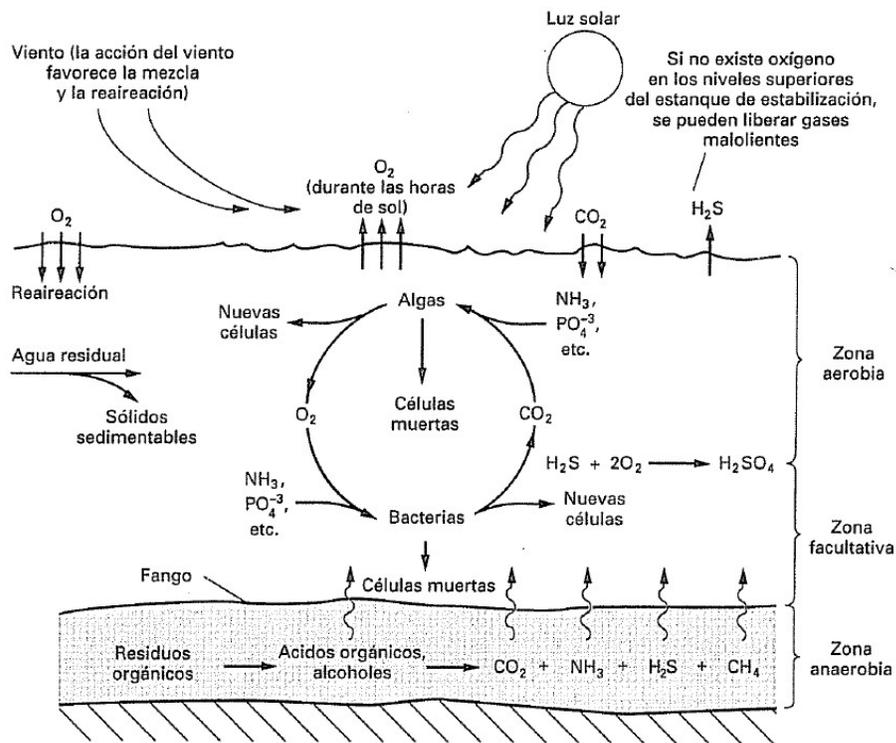
Dependiendo de la carga orgánica de una laguna, la comunidad microbial varía. En general, los microorganismos de las lagunas son los mismos de los demás sistemas de tratamiento, principalmente bacterias y protozoos, sin embargo, los seres vivos más adaptados al medio serán los microorganismos facultativos, que pueden sobrevivir en las condiciones cambiantes de oxígeno disuelto típicas de estas lagunas a lo largo del día y del año (España. MOPT, 1991).

A diferencia de lo que ocurre con las lagunas anaerobias, el objetivo perseguido en las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, donde haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido de nutrientes y bacterias coliformes (España. MOPT, 1991).

En una laguna de estabilización generalmente se lleva a cabo la remoción de microorganismos patógenos (virus, bacterias, protozoarios y helmintos), debido a la permanencia prolongada de los organismos dentro del reactor, que favorecen la muerte natural. En el caso de los helmintos, su remoción

generalmente se realiza mediante sedimentación, según Romero (2005) y Amahmid *et al* ((2002).

Figura 1. Representación esquemática de las lagunas de estabilización



Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995)

### 1.1.1.3. Fotosíntesis

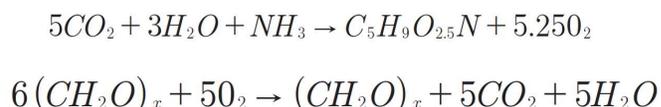
A pesar que la fotosíntesis de las algas no es un proceso de degradación, conviene analizar su función, por medio de esta, los organismos son capaces de crecer y reproducirse usando la energía radiante para la fijación del  $CO_2$  atmosférico y, consecutivamente, proporcionar la energía requerida para reducir a  $CO_2$  los compuestos orgánicos. La fotosíntesis, por lo común, se asocia con el

crecimiento de las plantas verdes; sin embargo, algunas bacterias como las algas azul-verdes llevan a cabo este proceso (Thirumurthi, 1991)

En las lagunas facultativas, la materia orgánica del agua residual doméstica es oxidada por las bacterias heterotróficas, utilizando el oxígeno producido por las algas. Las algas utilizan energía solar, con el CO<sub>2</sub> y el amoníaco producido por las bacterias, sintetizan materia orgánica y producen oxígeno. Durante el día, las algas pueden producir oxígeno en exceso del requerido para la respiración y crear condiciones de sobresaturación y pérdida de O.D. a la atmósfera. La oxidación fotosintética permite cargas de DBO de hasta 25 g DBO/m<sup>3</sup> d; pero en ausencia de oxigenación fotosintética, la oxigenación atmosférica sólo permite cargas de hasta 5 g DBO/m<sup>3</sup> d, para condiciones aeróbicas (Romero, 2005).

En muchos casos, las algas obtienen el carbón necesario para su crecimiento, a partir del ión bicarbonato, cambiando los componentes de la alcalinidad y haciendo que predominen los carbonatos y los hidróxidos. Si el agua contiene concentraciones altas de calcio, el calcio se precipitará como carbonato y ayudará a prevenir el aumento continuo de pH. En lagunas anaeróbicas, con penetración de luz solar, las bacterias rojas del azufre son capaces de efectuar fotosíntesis, usando H<sub>2</sub>S en vez de H<sub>2</sub>O como donante de hidrógeno (Romero, 2005).

La actividad de las algas, en los sistemas de lagunas y el metabolismo aerobio de las bacterias heterotróficas, pueden ser representados por las siguientes ecuaciones (Thirumurthi, 1991):



### **1.1.2. Factores de influencia**

Dado que la actividad de algas y bacterias es el fundamento de la depuración del agua residual almacenada en las lagunas facultativas, cualquier variable que afecte esta actividad repercutirá en el tratamiento. Los factores más importantes son los siguientes:

- Factores climáticos:
  - Temperatura
  - Radiación solar
  - Viento
  - Evaporación
  - Precipitación
- Factores físicos
  - Estratificación
  - Flujo a través de las lagunas
  - Profundidad
- Factores químicos y bioquímicos
  - pH
  - Oxígeno disuelto
  - Nutrientes
  - Sedimentos

Las lagunas facultativas se diseñan para producir condiciones que permitan el desarrollo de una población saludable de algas, ya que el oxígeno para la remoción bacteriana de la DBO, es generado mayormente por la fotosíntesis de las algas, de ahí la importancia de este parámetro que es uno de los mejores indicadores sobre el funcionamiento de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales.

### 1.1.2.1. Oxígeno disuelto

El contenido en oxígeno disuelto es uno de los mejores indicadores sobre el funcionamiento de las lagunas. La principal fuente de oxígeno disuelto es la fotosíntesis, seguida por la reaireación superficial. La concentración de oxígeno disuelto presenta una variación senoidal a lo largo del día. El contenido en oxígeno es mínimo al amanecer y máximo por la tarde, y puede oscilar entre un valor nulo hasta la sobresaturación. Durante el verano es posible encontrar que las capas superficiales de las lagunas están sobresaturadas de oxígeno disuelto.

Como resultado de la actividad fotosintética de las algas en la laguna, hay una variación diurna de la concentración del oxígeno disuelto. Después del amanecer, el nivel de oxígeno disuelto aumenta gradualmente hasta un máximo al medio día, luego disminuye hasta un mínimo en horas de la noche.

Una buena mezcla en la laguna asegura una distribución uniforme de la DBO, el oxígeno disuelto, bacterias y algas y como consecuencia se obtiene un mejor grado de estabilización del agua. La mezcla es importante, porque proporciona una distribución más uniforme de la temperatura, del oxígeno y de las algas en toda la laguna. En ausencia de la influencia del viento sobre el mezclado, la población de alga tiende a estratificarse en capas, algunas de 20 cm de espesor durante las horas de luz del día. Las algas concentradas se mueven hacia arriba y hacia abajo en respuesta a los cambios de intensidad de luz y causa fluctuaciones en la calidad final, en términos de DBO y SS, cuando se extrae de algunas de estas zonas. (Mara *et al.*, 1992).

Las lagunas facultativas presentan concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 6 mg/L, principalmente durante la fase de radiación solar y en la capa aerobia; durante la noche la concentración de oxígeno disminuye. Las

lagunas de maduración también presentan concentraciones mayores de 6 mg/L durante el día y contenido de oxígeno disuelto en su profundidad (CONAGUA, 2016).

**Tabla I. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes**

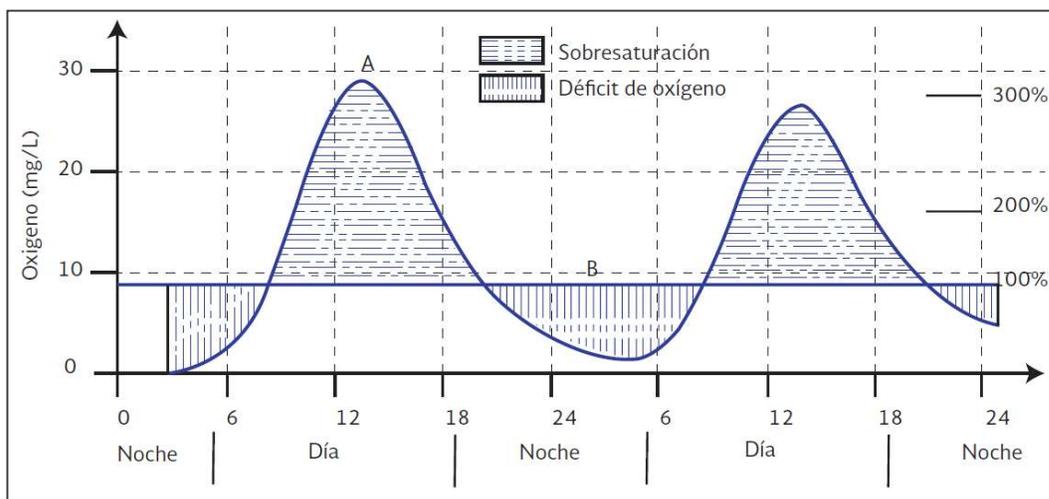
<b>O.D. mg/L</b>	<b>Condición</b>	<b>Consecuencias</b>
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0-5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5-8	Aceptable	O.D. adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.
8-12	Buena	
>12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

Fuente: Goyenola, 2007.

Las concentraciones de oxígeno disuelto la laguna, son el reflejo de la intensa actividad fotosintética. Dependiendo de cada laguna, en una laguna facultativa la capa oxigenada superficial presenta una variación diurna de O.D. y puede que el oxígeno disminuya notablemente durante la noche; también puede ocurrir que se observe concentraciones de sobresaturación de O.D. durante el día, hasta valores determinados, en algunos estudios, de 36 mg/l (Romero, 2005).

El punto en la profundidad de la laguna donde el oxígeno es igual a cero se le llama oxipausa. Por encima de la oxipausa predominan las condiciones aerobias, mientras que por debajo de ella predominan las condiciones anóxicas o anaerobias. El nivel de la oxipausa varía durante las 24 horas del día, como una función de la variabilidad de la fotosíntesis durante este período. Por la noche, el nivel de la oxipausa se eleva en la laguna, mientras que durante el día disminuye.

Figura 2. **Concentración de oxígeno disuelto en una laguna**



Fuente: CONAGUA, 2016.

Yanez Cossio (1993), indica la profundidad a la cual la tasa de cambio de la temperatura con la profundidad es máxima, define la “termoclina”. En lagunas facultativas, el estado crítico de estratificación térmica es alcanzado cuando la “oxipausa” alcanza la termoclina.

## 1.2. Radiación solar

La luz es fundamental para la actividad fotosintética. Esta depende no sólo de la luz que alcanza la superficie del agua, sino de la que penetra en profundidad. Dado que el medio es normalmente muy turbio, debido sobre todo a la presencia de las mismas algas, la luz que penetra en la laguna se atenúa rápidamente y se anula a poca distancia de la superficie. Puesto que la intensidad de la luz varía a lo largo del día y del año, la velocidad de crecimiento de las algas varía también de la misma forma.

La radiación solar puede tener un efecto directo e indirecto sobre el decaimiento bacteriano. El efecto indirecto es que las algas crecen más rápidamente mientras mayor sea la intensidad de la luz. Por sí solo, el aumento del número de algas es importante para el decaimiento bacteriano.

El efecto directo es la formación de sustancias tóxicas de oxígeno causadas por la luz. Se ha demostrado que las sustancias húmicas, comunes en el desagüe y en las lagunas de estabilización, absorben luz solar, pasan esta energía al oxígeno y originan formas tóxicas de oxígeno (radicales de oxígeno libre, peróxido de hidrógeno y probablemente superóxido y radicales hidroxilo). Estas formas de oxígeno dañan y destruyen a las bacterias en las lagunas (Leon Suematsu, 1995).

Se encontró que el daño ocasionado por la luz a los coliformes fecales, proceso conocido como fotooxidación, es completamente dependiente del oxígeno. Este mecanismo actúa sinérgicamente con un pH elevado, debido a que las formas tóxicas dañan la membrana interna de los coliformes fecales. No es sorprendente encontrar que la fotooxidación se vea afectada por la luz, pH y la concentración del oxígeno disuelto (Curtis *et al.* 1992). Curtis concluye también

que la luz destruye más coliformes fecales en lagunas turbias que en lagunas claras, si las lagunas turbias tienen un pH suficientemente alto y oxígeno disuelto.

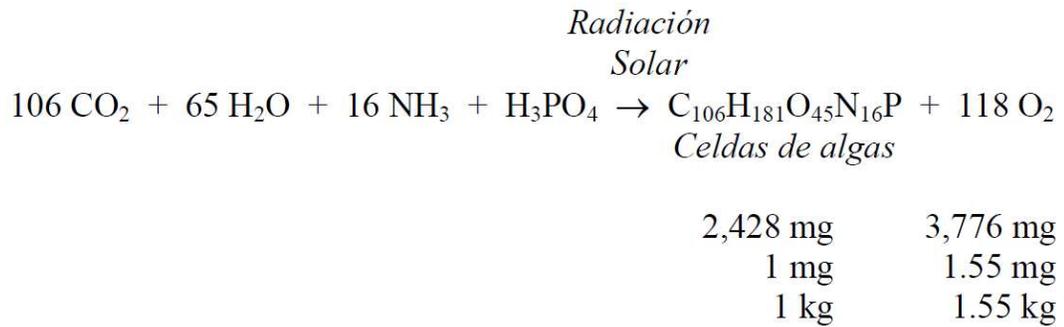
### **1.2.1. Relación radiación solar y oxígeno disuelto**

La luz es fundamental, como se ha visto, para la actividad fotosintética. Esta depende no sólo de la luz que alcanza la superficie del agua, sino de la que penetra en profundidad. Dado que el medio es normalmente muy turbio, debido sobre todo a la presencia de las mismas algas (este fenómeno se conoce como autosombreado), la luz que penetra en la laguna se atenúa rápidamente y se anula a poca distancia de la superficie (Vollenweider, 1974; Moreno, 1984).

Debido a la variación de la intensidad de la luz a lo largo del día y a lo largo del año, la velocidad de crecimiento de las algas varía también de la misma forma. Este fenómeno da lugar a dos efectos fundamentales: el oxígeno disuelto y el pH del agua presentan valores mínimos al final de la noche, y aumentan durante las horas de luz solar hasta alcanzar valores máximos a media tarde. A partir de este punto, los valores decrecen de nuevo a lo largo de la noche.

Como se ha indicado bajo la radiación solar, la existencia de formas tóxicas de oxígeno es importante para el decaimiento bacteriano. Es evidente que las altas concentraciones de oxígeno disuelto tienen un efecto positivo sobre la formación de compuestos tóxicos de oxígeno. El papel del oxígeno disuelto no se menciona frecuentemente en la literatura. Curtis *et al.* (1992)

Stewart Oakley (2005) menciona el método más apropiado para el diseño de lagunas facultativas es el de la carga orgánica superficial, lo que depende sobre la cantidad de oxígeno producido por las algas en la laguna, por la siguiente ecuación balanceada de fotosíntesis (Rittmann y McCarty, 2001):



Esta ecuación muestra que 1 kilogramo de algas produce 1.55 kilogramos de oxígeno.

La energía del sol requerida para producir un kilogramo de celdas de algas es de 24,000 kilo Joules (kJ) (Rittmann y McCarty, 2001). De la energía solar que radia la superficie de una laguna facultativa, solamente un porcentaje es utilizado por las algas como resultado de su eficiencia de conversión; la eficiencia de conversión varía entre las especies de algas y el rango ha sido reportado de 2 a 7% (Arceivala, S. J., et al., 1970).



## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Descripción del sitio de estudio**

El área de estudio está ubicada en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), colonia Militar Aurora II, en la zona 13. Limitada al Norte con el Observatorio Nacional, al Este con el Aeropuerto Internacional “La Aurora” y al Sur y Oeste con barrancos. Sus coordenadas son 14° 35” de latitud Norte y 90° 32” de longitud Oeste. Su altitud varía desde 1455 m.s.n.m. en la parte más baja hasta 1502 m.s.n.m. en la parte más alta.

La planta de tratamiento recibe el agua residual de tipo doméstico 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.

### **2.2. Descripción de la unidad experimental**

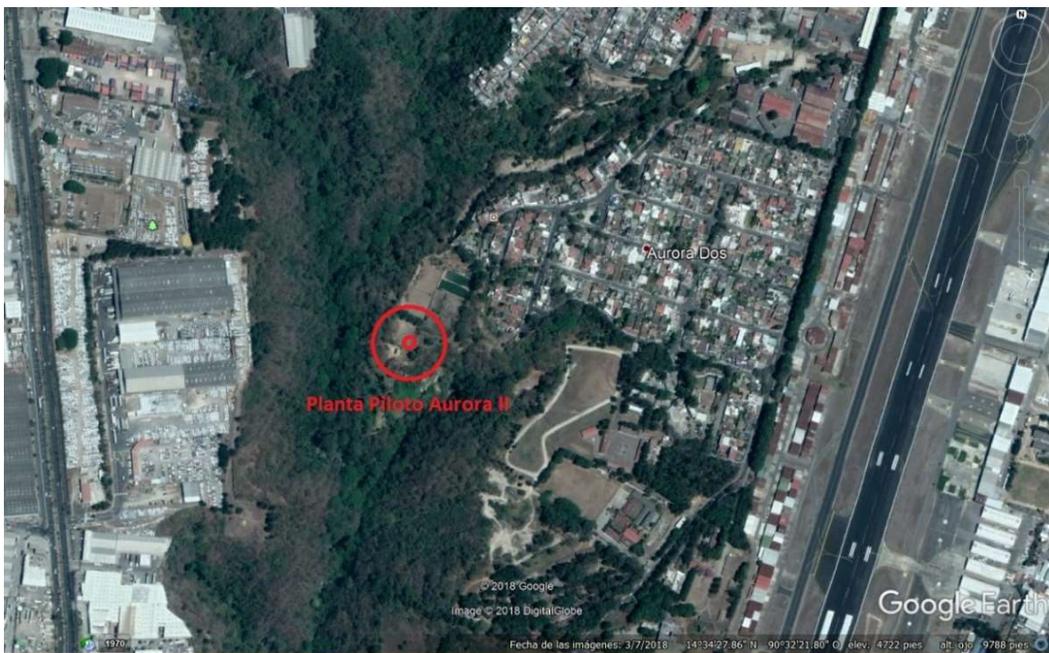
En las secciones siguientes, se da una descripción de la laguna facultativa en estudio.

#### **2.2.1. Diseño de la laguna facultativa piloto**

La laguna facultativa a escala piloto fue diseñada y construida por Montoya y Gattorno (2018) para el estudio *“comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación Térmica de una laguna facultativa”* para un caudal

de diseño de 0.035 L/s (3.02 m<sup>3</sup>/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. 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.

Figura 3. **Ubicación del lugar de estudio**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

A continuación, se presentan las características físicas y operacionales de la unidad:

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

Caudal de diseño	$Q_{\text{diseño}} =$	3.02	m <sup>3</sup> /día
Caudal de operación promedio	$Q_{\text{op}} =$	2.42	m <sup>3</sup> /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 <sub>1</sub> =	8.75	m
Ancho a nivel del agua	a <sub>1</sub> =	3.10	m
Largo en la base	L <sub>2</sub> =	7.60	m
Ancho en la base	a <sub>2</sub> =	2.00	m
Largo en la corona	L <sub>3</sub> =	9.40	m
Ancho en la corona	a <sub>3</sub> =	3.70	m
Área superficial	A=	27.13	m <sup>2</sup>
Volumen útil de laguna	V <sub>u</sub> =	35.68	m <sup>3</sup>

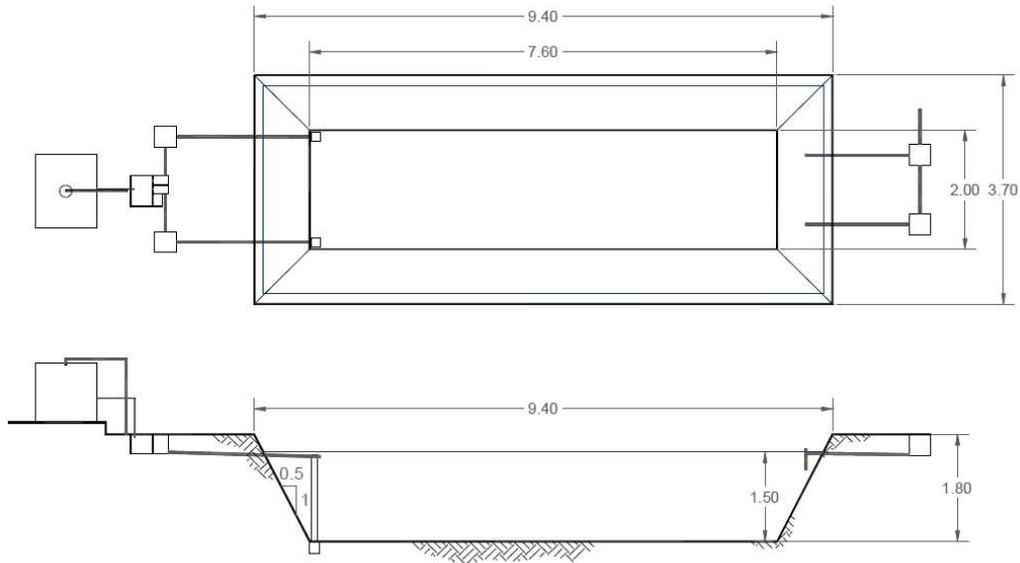
Fuente: Montoya López y Gattorno Fúnez, 2018.

También se consideraron otros parámetros para el diseño: DBO<sub>5</sub> promedio 254 mg/L y sólidos suspendidos promedio de 283 mg/L, dichos datos se obtuvieron a través de investigaciones previas realizadas en la planta piloto.

### 2.3. Condiciones de operación

El trabajo de campo en la laguna facultativa empezó el 04 de septiembre al el 30 de octubre, la cual la laguna piloto operó bajo condiciones de caudal continuo, con un caudal promedio igual a 0.031 L/s. Se realizó una limpieza semanal en la laguna y se verificó constantemente la tubería de entrada del agua residual.

Figura 4. **Esquema de la laguna de estabilización experimental**



Fuente: Montoya López & Gattorno Fúnez, 2018.

## 2.4. Procedimiento experimental

### 2.4.1. Parámetro analizado

El parámetro de control para la investigación es el oxígeno disuelto del agua de la laguna facultativa experimental, para realizar la medición se utilizó el método electrométrico que utiliza electrodo de membrana, método 2810B del APHA.

### 2.4.2. Medición de oxígeno disuelto

Las mediciones de oxígeno disuelto en la laguna facultativa experimental fueron realizadas *in situ* mediante un aparato *YSI PRO20*. La medición del

oxígeno disuelto se hizo con una frecuencia de dos horas durante el día y mediciones de 6:00, 12:00 y 18:00 horas en el centro de la laguna en los puntos especificados en la sección 2.4.2.1.

#### **2.4.2.1. Equipo de medición de oxígeno disuelto**

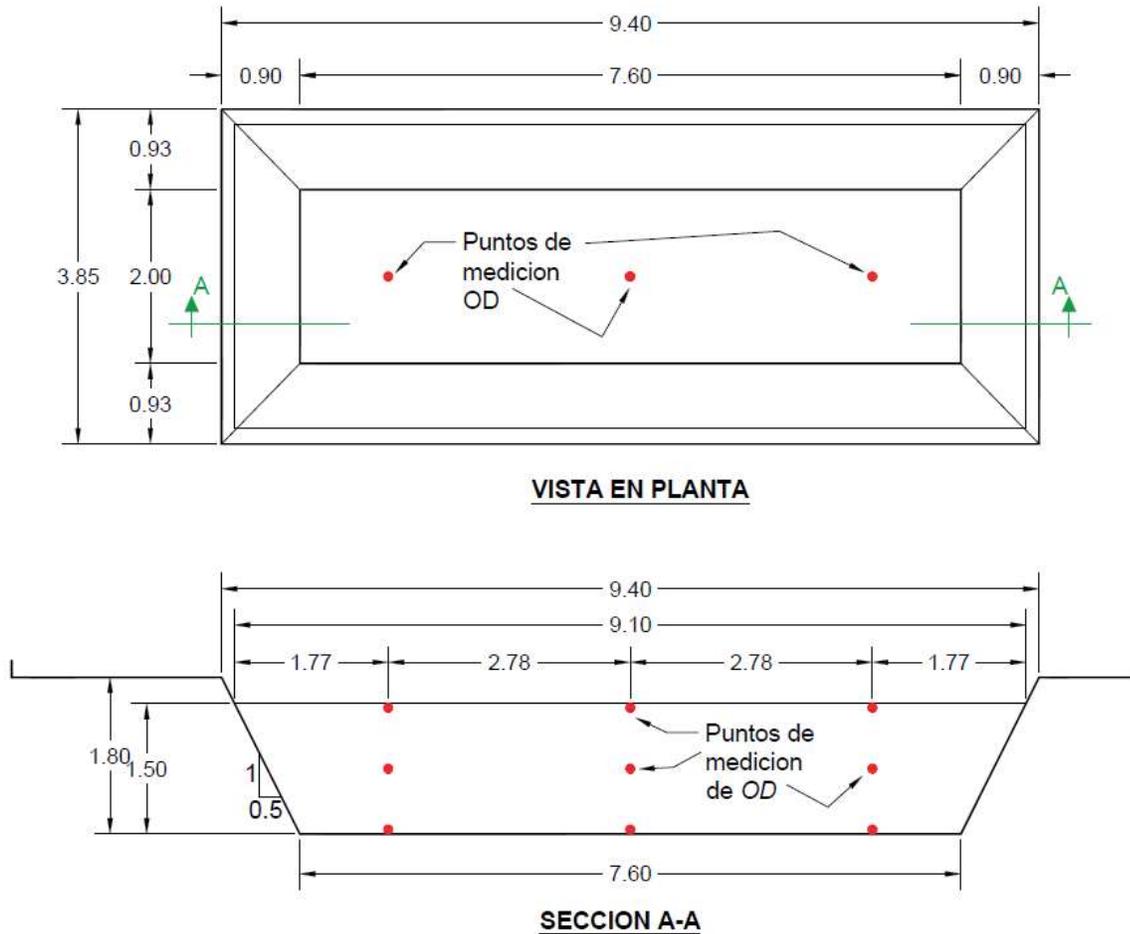
El medidor de oxígeno disuelto YSI Pro20 es un instrumento robusto y fácil de usar para medir el oxígeno disuelto. El YSI Pro20 se puede usar en el laboratorio o en el campo y puede ir de uno a otro en segundos. Con un rango de medición de 0 a 500% o 0 a 50 mg/L y además del oxígeno disuelto mide la temperatura, y tiene barómetro incorporado con las siguientes unidades de medición: saturación del aire, mg / L, Barametro mmHg, ° F, Oxígeno disuelto-%, Temperatura- ° C. (Ver Anexo I)

#### **2.4.2.2. Puntos de recolección de datos**

Para la frecuencia de dos horas de medición se consideraron nueve puntos de medición distribuidos estratégicamente para ser representativos a lo largo de la laguna como se observa en la figura 5.

También se realizaron mediciones en tres horarios distintos: 6:00, 12:00 y 18:00 horas; donde la radiación empieza a incrementarse, se logra la máxima radiación y donde de nuevo toma valores cercanos a cero respectivamente. Estas mediciones se tomaron en el centro de la laguna a cada 0.10 m de profundidad, empezando desde la superficie hasta llegar al fondo de la laguna experimental como se observa en la figura 6.

Figura 5. Puntos de medición con frecuencia de dos horas

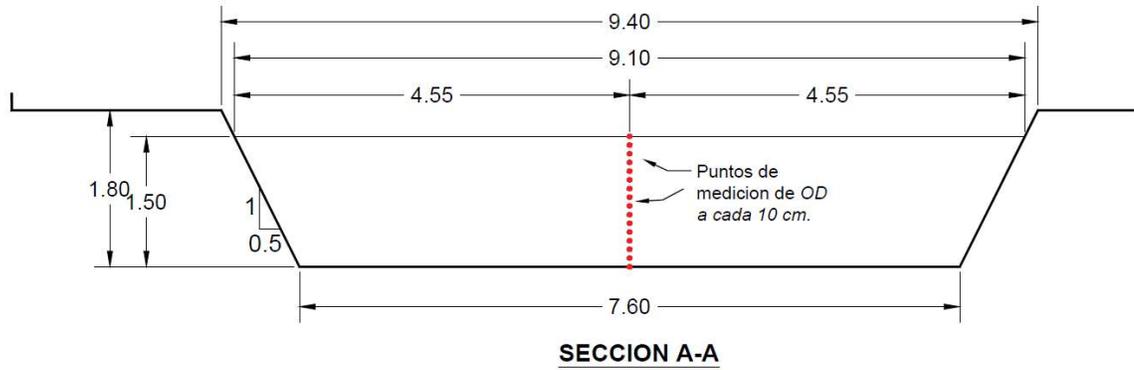


Fuente: elaboración propia.

### 2.4.3. Medición de radiación solar

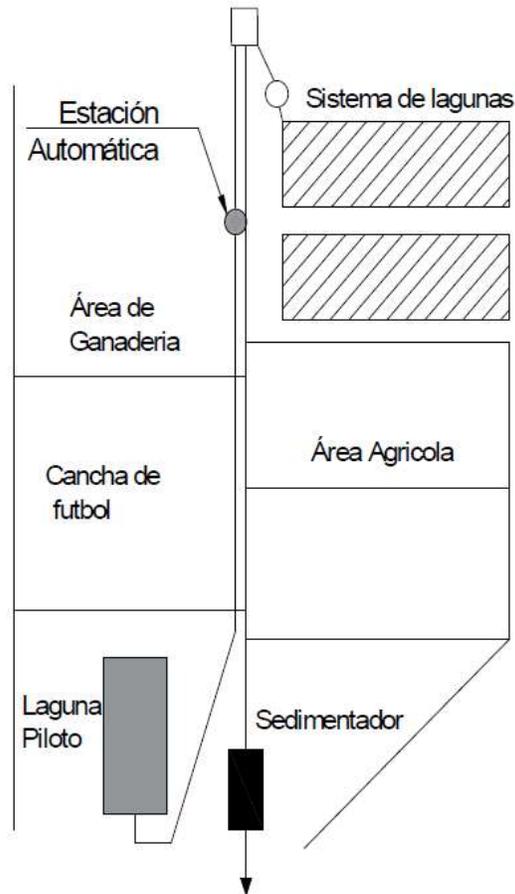
La medición de la radiación solar, se realizó con una frecuencia de 30 minutos a través de la estación automática instalada en la Planta Piloto Aurora II, la cual se instaló a 90 metros de la laguna facultativa experimental.

Figura 6. **Puntos de medición a cada 10 centímetros**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Ubicación de la estación meteorológica automática**



Fuente: Fuente: Montoya López y Gattorno Fúnez, 2018.

#### **2.4.3.1. Equipo de medición de radiación solar**

La 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. (Ver Anexo II)

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

En función a la programación de la consola, se puede programar un registro de datos de 2.5 segundos, para esta investigación se programó para registro de datos a cada 30 minutos.

#### **2.5. Procesamiento de datos y análisis estadístico**

Consiste en el manejo de datos recolectados durante la investigación, aplicando el método estadístico para el análisis respectivo requerido de la investigación.

### **2.5.1. Método estadístico**

El método estadístico que se utilizó tiene como objetivo, comprobar la hipótesis general de la investigación. Consiste en el procesamiento para el manejo de datos cuantitativos de la investigación.

### **2.5.2. Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS, el cual es un programa que permite codificar variables y registros de acuerdo a las necesidades del usuario, para el procesamiento automático de los datos y construcción de gráficos.

### **2.5.3. Número de muestras**

Para determinar el número de muestras, se empleó una estimación estadística en donde se utilizó el análisis de un pre-muestreo en el cual se determinó el valor de la desviación estándar de los parámetros, con los cuales se realizó un análisis de correlación de la desviación estándar, la cual brindó el número de muestras necesarias para realizar el estudio de investigación.

El pre-muestreo se realizó en la entrada, centro y salida de la laguna, el cual se realizó en el mismo horario para dos días consecutivos, para tener las mismas condiciones de medición.

Para la determinación del número de muestras que representen un análisis confiable, se utilizó la ecuación de estimación de poblaciones infinitas normalizadas para el análisis de aguas potables y residuales, de acuerdo con

Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater (2002), utilizando la siguiente expresión matemática para su determinación:

$$n = \left[ \frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{e} \right]^2$$

$n$ : es el número sugerido de muestras

$\sigma$ : es la desviación estándar

$Z_{\alpha/2}$ : es el nivel de confianza, prueba t de student para un nivel de confianza dado

$e$ : error máximo tolerante

Según el pre-muestreo realizado en horario de 10:00 horas se presentan a continuación los resultados.

Tabla III. **Resultado de pre-muestreo de O.D.**

No.	Fecha	O.D. (mg/L)
1	28/08/2018	6.12
2	28/08/2018	4.49
3	28/08/2018	6.92
4	29/08/2018	5.21
5	29/08/2018	4.28
6	29/08/2018	4.49

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación de número de muestras**

<b>Datos</b>	<b>Resultados</b>
Promedio	5.252
Desviación Estándar	1.062
Grados de libertad	5
"Z" 90%	1.476
ERROR (10%)	0.525
No. De datos	6
<b>Número de muestras</b>	<b>9</b>

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que se necesita un mínimo de nueve muestras en el mismo horario con lo cual se traduce en nueve días de muestreo para cada punto de medición.

#### **2.5.4. Correlación de datos**

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.



### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados se muestran a continuación, Se presentan resultados de oxígeno disuelto, porcentaje de saturación y temperatura del agua a diferentes profundidades en intervalos de tiempo definidos en la metodología.

Se presenta a continuación (tabla V) resumen de las tablas y figuras de resultados obtenidos por días de medición. En donde se obtuvieron resultados de los parámetros de control a lo largo de la laguna, y en tres profundidades: superficie, intermedio y fondo del sistema de tratamiento.

Tabla V. **Correlativo de tablas y figuras**

Día	Tabla No.	Figura No.		
		Superficie	Media Profundidad	Fondo
04-09-2018	6	8	9	10
11-09-2018	7	11	12	13
18-09-2018	8	14	15	16
25-09-2018	9	17	18	19
02-10-2018	10	20	21	22
09-10-2018	11	23	24	25
16-10-2018	12	26	27	28
23-10-2018	13	29	30	31
30-10-2018	14	32	33	34

Fuente: elaboración propia.

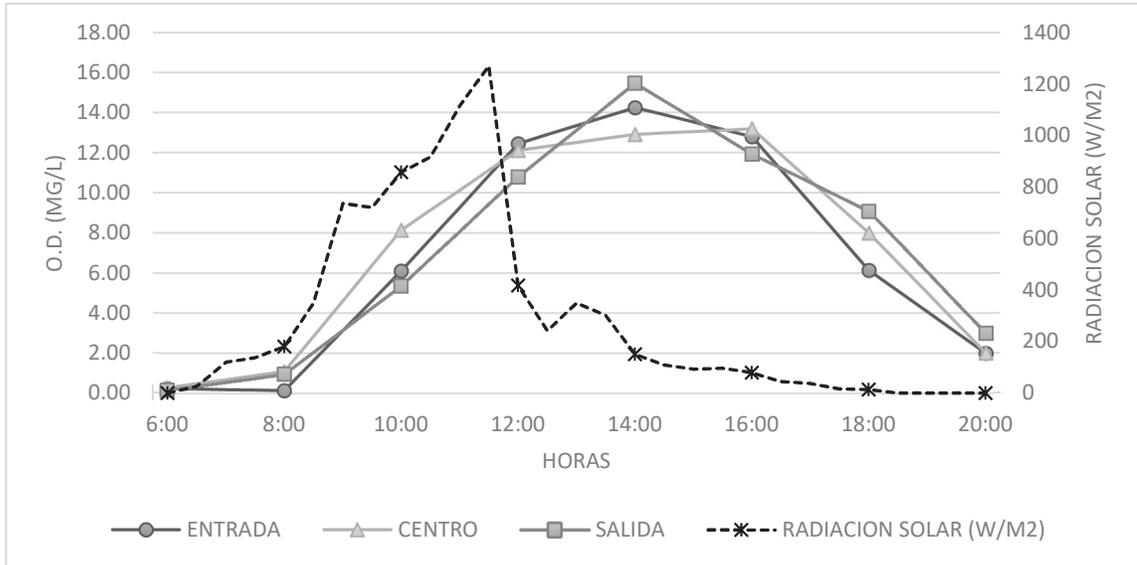
### 3.1. Resultados día 04 de septiembre de 2018

Tabla VI. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 04-09-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.24	0.15	6.10	12.45	14.25	12.80	6.14	2.00
		%	3.1	2.0	87.4	164.1	204.2	183.4	87.0	43.5
		°C	20.6	21.9	21.2	22.1	25.3	25.3	27.7	25.2
	0.75	mg/L	0.18	0.21	0.05	0.10	0.29	0.29	0.03	0.05
		%	2.4	2.8	0.7	1.4	3.8	3.8	0.4	1.2
		°C	20.6	21.8	20.8	20.9	20.4	20.4	21.9	21.1
	1.5	mg/L	0.08	0.25	0.00	0.00	0.02	0.01	0.17	0.07
		%	1.1	3.3	0.0	0.1	0.3	0.1	2.4	1.1
		°C	21.0	21.5	21.1	21.2	21.1	21.1	22.0	20.5
CENTRO (B)	0	mg/L	0.29	1.09	8.14	12.12	12.91	13.19	8.00	2.02
		%	3.8	14.8	116.6	173.7	203.2	189.0	114.6	43.5
		°C	20.4	22.3	21.6	25.2	25.3	25.3	28.0	25.2
	0.75	mg/L	0.04	0.06	0.07	0.09	0.08	0.08	0.01	0.11
		%	2.0	0.8	0.9	1.2	1.1	1.1	0.1	1.2
		°C	20.5	21.6	20.8	21.1	20.9	20.9	21.9	21.1
	1.5	mg/L	0.16	0.09	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.07
		%	2.2	0.9	0.0	0.0	0.9	0.3	0.0	1.1
		°C	21.0	21.5	21.1	21.2	21.1	21.1	21.9	20.5
SALIDA (C)	0	mg/L	0.16	0.95	5.36	10.80	15.46	11.93	9.08	3.00
		%	2.1	12.9	76.8	154.6	221.4	170.8	130.0	43.5
		°C	20.4	22.4	21.2	25.3	25.5	25.5	28.3	25.2
	0.75	mg/L	0.11	0.01	0.12	0.15	0.06	0.06	0.01	0.09
		%	1.5	0.1	1.6	2.0	0.7	0.7	0.2	1.2
		°C	20.5	21.8	21.0	21.1	20.8	20.8	22.0	21.1
	1.5	mg/L	0.06	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.07
		%	0.7	0.3	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	1.1
		°C	21.0	21.9	21.3	21.2	21.1	21.1	21.7	20.5
<b>RADIACIÓN SOLAR</b>		<b>W/M2</b>	0	181	858	418	151	79	14	0

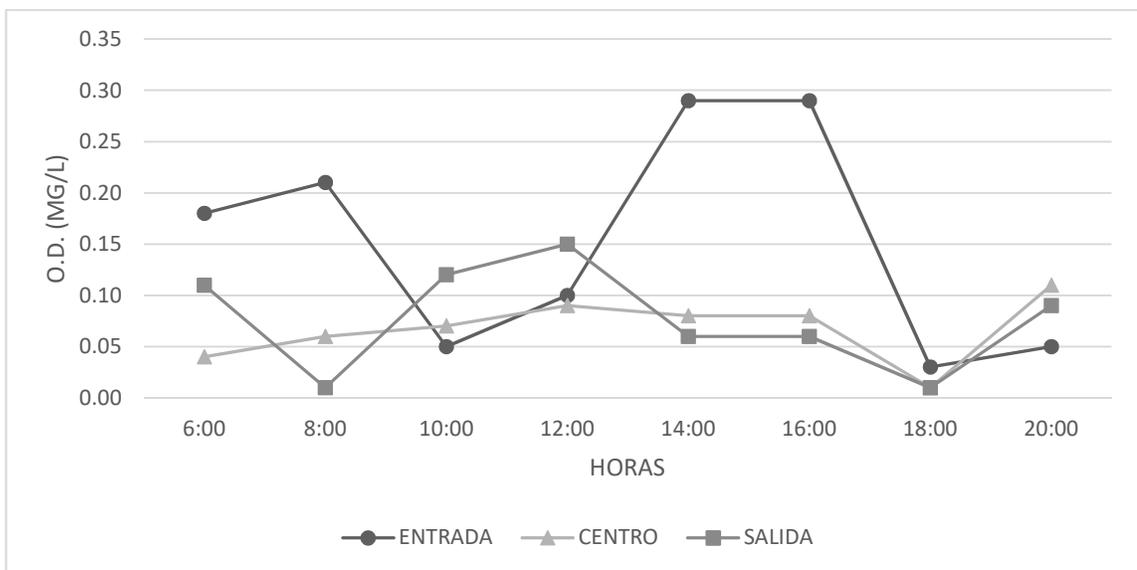
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Concentración de O.D. en la superficie



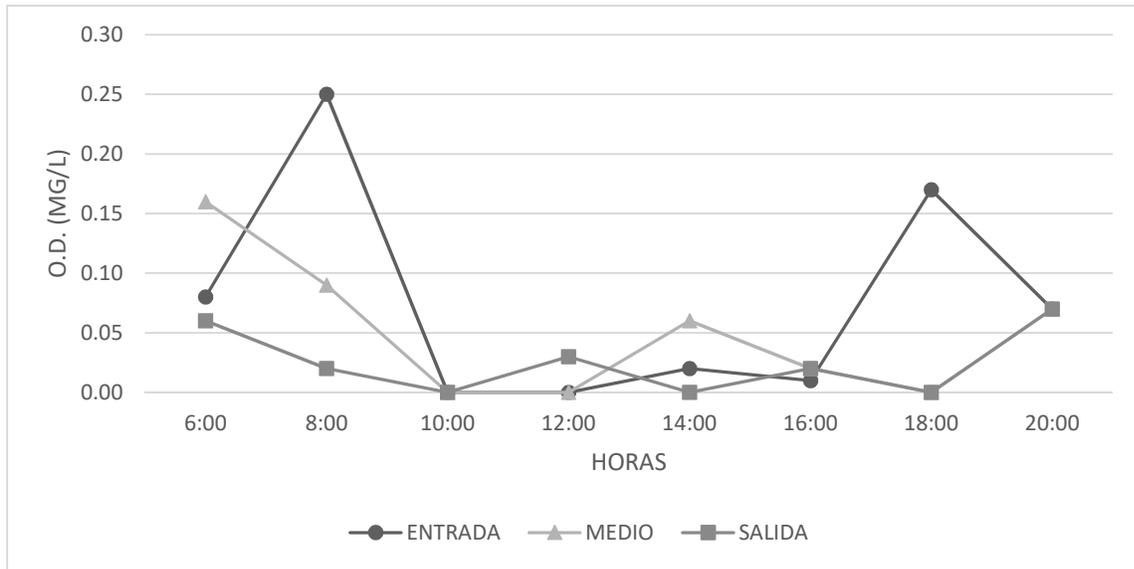
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Concentración de O.D. a media profundidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Concentración de O.D. en el fondo**



Fuente: elaboración propia.

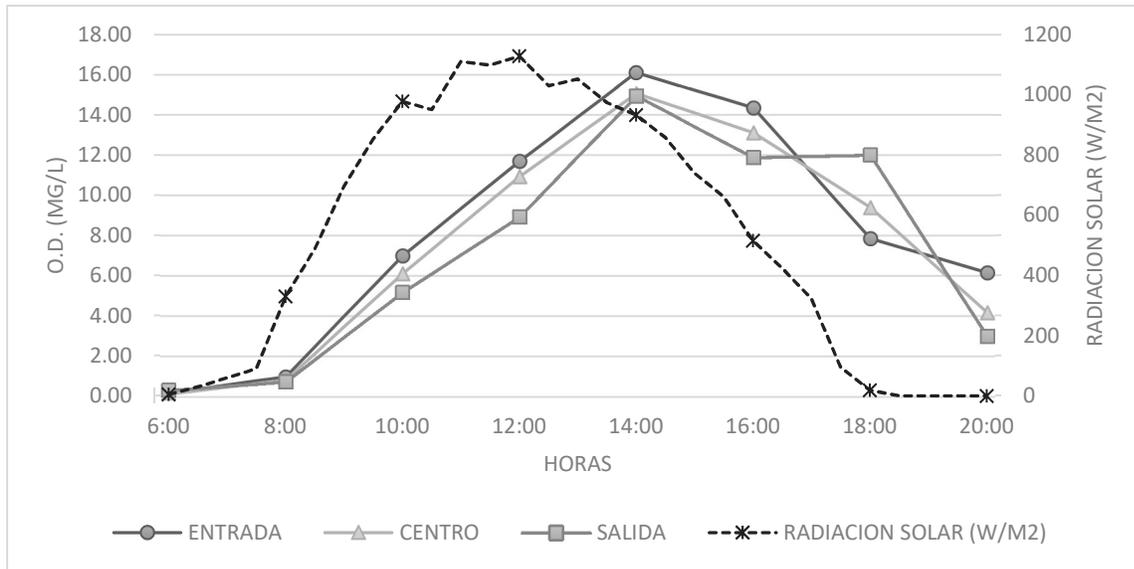
### 3.2. Resultados día 11 de septiembre de 2018

Tabla VII. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 11-09-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.18	1.00	7.00	11.70	16.10	14.35	7.86	6.17
		%	2.5	14.0	98.3	164.4	226.2	201.6	110.4	86.7
		°C	20.6	21.9	21.2	22.1	25.3	25.3	27.7	25.2
	0.75	mg/L	0.16	0.21	0.12	0.10	0.11	0.18	0.06	0.05
		%	2.2	2.9	1.7	1.4	1.5	2.5	0.8	0.7
		°C	20.9	21.8	21.5	21.6	20.4	20.6	21.8	21.5
	1.5	mg/L	0.08	0.16	0.06	0.05	0.05	0.11	0.14	0.08
		%	1.1	2.2	0.8	0.8	0.7	1.5	2.0	1.1
		°C	21.1	20.9	21.1	21.2	21.0	21.1	21.6	20.5
CENTRO (B)	0	mg/L	0.14	0.83	6.12	10.93	15.06	13.11	9.40	4.18
		%	1.9	11.7	85.8	153.5	211.6	184.2	132.1	58.7
		°C	20.4	22.3	21.6	25.2	25.3	25.3	28.0	25.2
	0.75	mg/L	0.02	0.06	0.07	0.11	0.08	0.06	0.01	0.08
		%	0.3	0.8	0.9	1.5	1.1	0.8	1.4	1.2
		°C	20.5	21.6	21.0	21.1	20.9	20.6	21.9	21.1
	1.5	mg/L	0.06	0.09	0.01	0.04	0.06	0.03	0.05	0.07
		%	0.8	1.2	0.1	0.5	0.8	0.4	0.7	0.9
		°C	21.1	21.5	21.3	21.3	21.1	21.1	21.4	20.5
SALIDA (C)	0	mg/L	0.32	0.74	5.18	8.93	14.93	11.87	12.00	3.00
		%	4.5	10.4	72.8	125.5	209.8	166.8	168.6	42.1
		°C	20.4	22.4	21.2	25.3	25.5	25.5	28.3	25.2
	0.75	mg/L	0.11	0.06	0.11	0.15	0.06	0.08	0.02	0.09
		%	1.5	0.8	1.5	2.0	0.7	1.1	0.3	1.3
		°C	20.5	21.8	21.1	21.1	20.8	21.0	21.3	20.9
	1.5	mg/L	0.06	0.05	0.03	0.10	0.03	0.02	0.06	0.07
		%	0.7	0.7	0.4	1.4	0.0	0.3	0.8	0.8
		°C	21.3	21.9	21.3	21.2	21.1	21.1	21.7	20.5
<b>RADIACIÓN SOLAR</b>		<b>W/M2</b>	5	330	979	1129	933	515	19	0

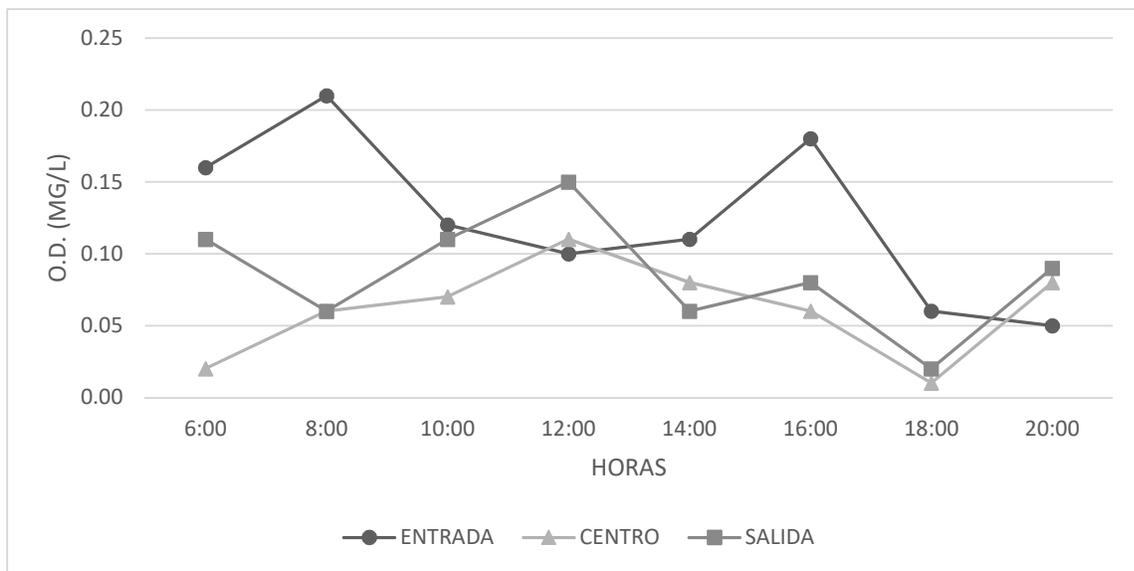
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Concentración de O.D. en la superficie



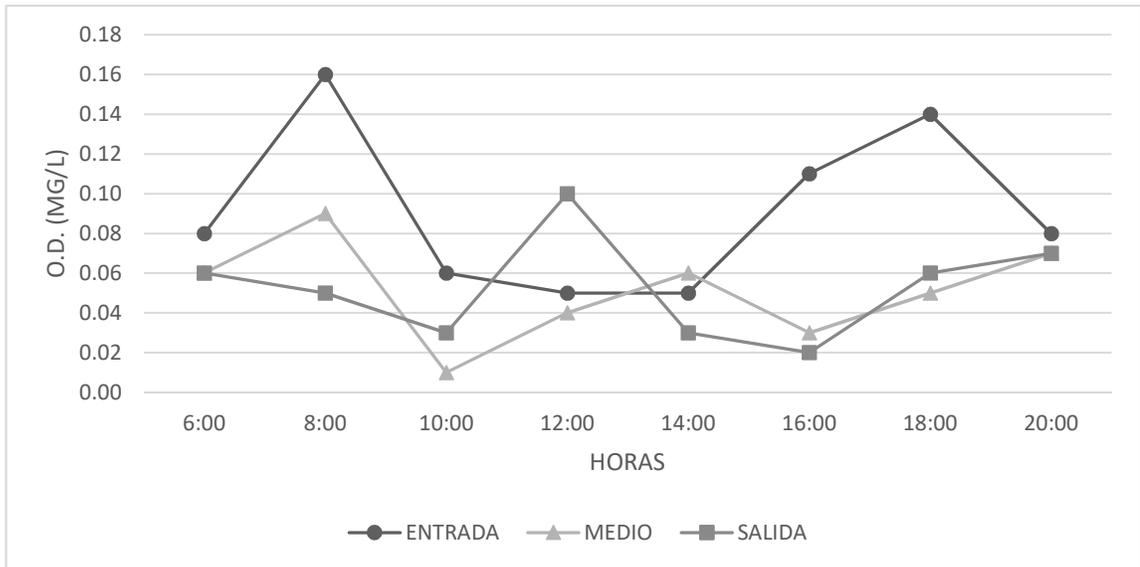
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Concentración de O.D. a media profundidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

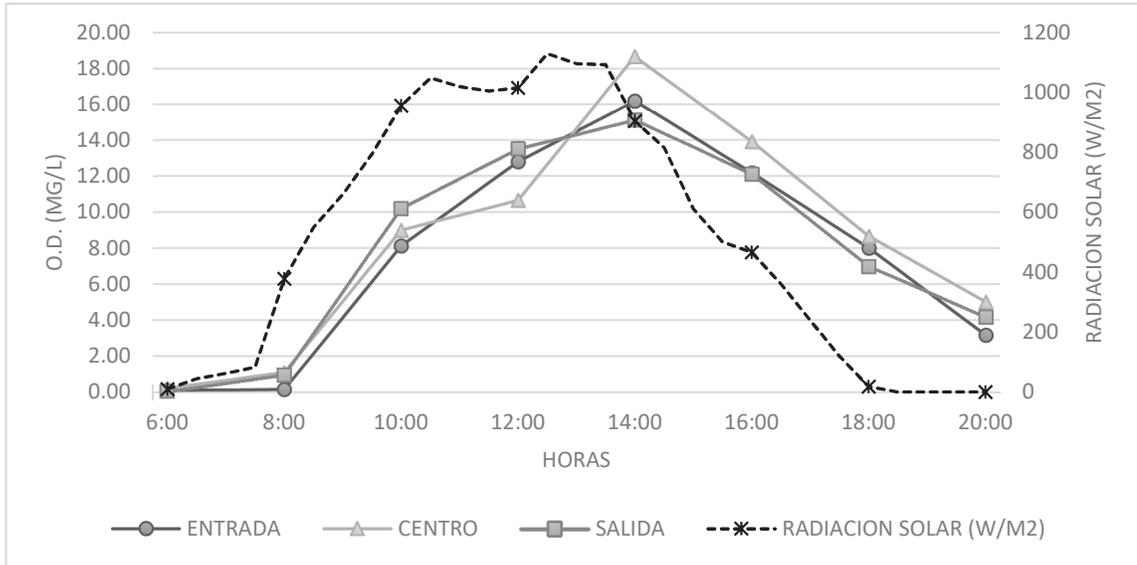
### 3.3. Resultados día 18 de septiembre de 2018

Tabla VIII. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 18-09-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.10	0.15	8.12	12.80	16.19	12.18	8.00	3.16
		%	1.3	2.0	119.2	188.0	254.4	178.9	117.5	46.4
		°C	21.9	21.9	26.9	30.3	31.6	30.3	27.7	25.2
	0.75	mg/L	0.05	0.21	0.01	0.12	-0.01	0.23	0.03	0.08
		%	0.6	2.8	0.2	1.6	-0.1	3.2	0.4	1.2
		°C	21.7	21.8	21.9	21.8	22.0	21.9	21.9	21.6
	1.5	mg/L	0.03	0.25	0.00	0.13	0.00	0.36	0.17	0.06
		%	0.4	3.3	-0.3	1.7	0.0	4.9	2.4	0.9
		°C	21.4	21.5	21.8	21.9	22.6	21.9	22.0	21.6
CENTRO (B)	0	mg/L	0.22	1.09	9.00	10.65	18.66	13.91	8.66	5.01
		%	3.0	14.8	132.2	155.3	274.1	204.3	127.2	73.6
		°C	21.6	22.3	26.2	30.7	31.8	29.6	28.0	26.7
	0.75	mg/L	0.01	0.06	0.03	0.01	0.13	0.00	0.01	0.10
		%	0.0	0.8	0.5	0.1	1.8	0.0	0.1	1.4
		°C	21.7	21.6	21.9	22.0	21.9	21.8	21.9	21.6
	1.5	mg/L	0.01	0.09	0.00	0.00	0.24	0.02	0.00	0.07
		%	0.1	0.9	0.0	0.0	3.2	0.2	0.0	0.9
		°C	21.3	21.5	21.9	22.1	21.9	21.8	21.9	21.6
SALIDA (C)	0	mg/L	0.04	0.95	10.20	13.51	15.12	12.10	6.98	4.16
		%	0.6	12.9	149.8	198.4	222.1	177.7	102.5	58.6
		°C	22.0	22.4	26.6	30.7	31.9	29.8	28.3	26.3
	0.75	mg/L	-0.01	0.01	0.14	0.00	-0.02	0.00	0.01	0.08
		%	-0.2	0.1	1.9	0.0	-0.2	0.0	0.2	1.2
		°C	21.8	21.8	21.7	22.0	21.8	21.8	22.0	21.6
	1.5	mg/L	-0.01	0.02	0.15	0.06	0.13	0.09	0.00	0.08
		%	-0.1	0.3	2.0	0.8	1.8	1.3	0.0	0.9
		°C	21.4	21.9	21.5	22.3	22.3	22.0	21.7	21.6
RADIACIÓN SOLAR		W/M2	9	378	956	1016	905	466	18	0

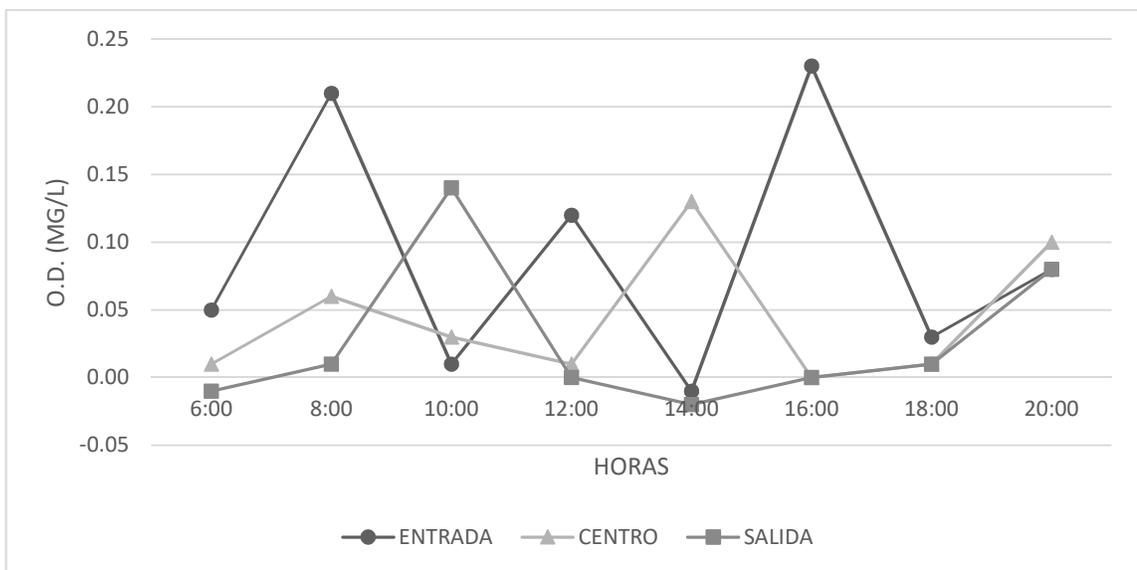
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Concentración de O.D. en la superficie**



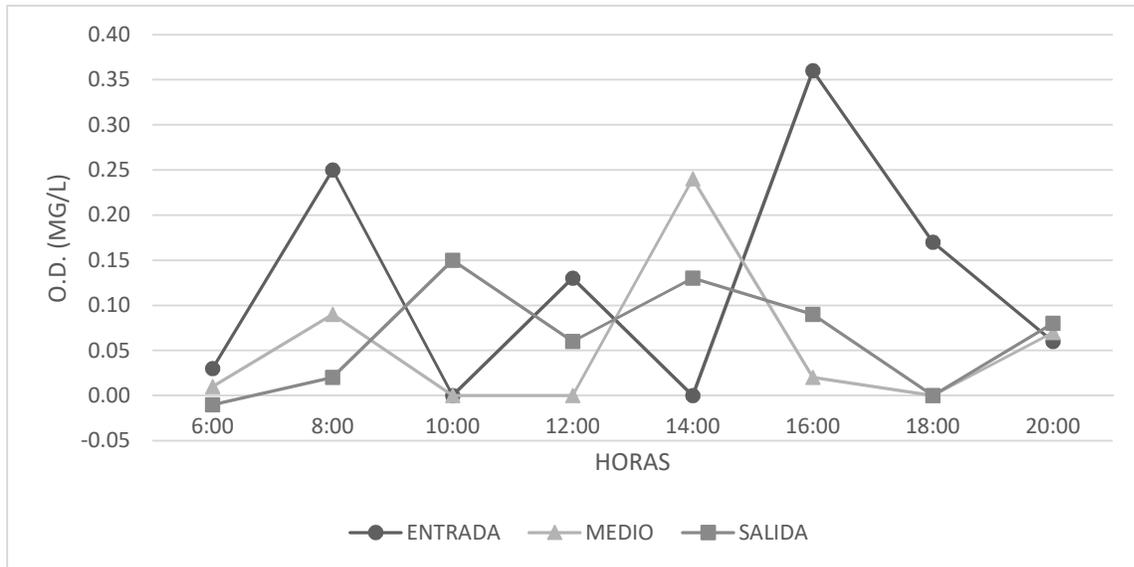
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

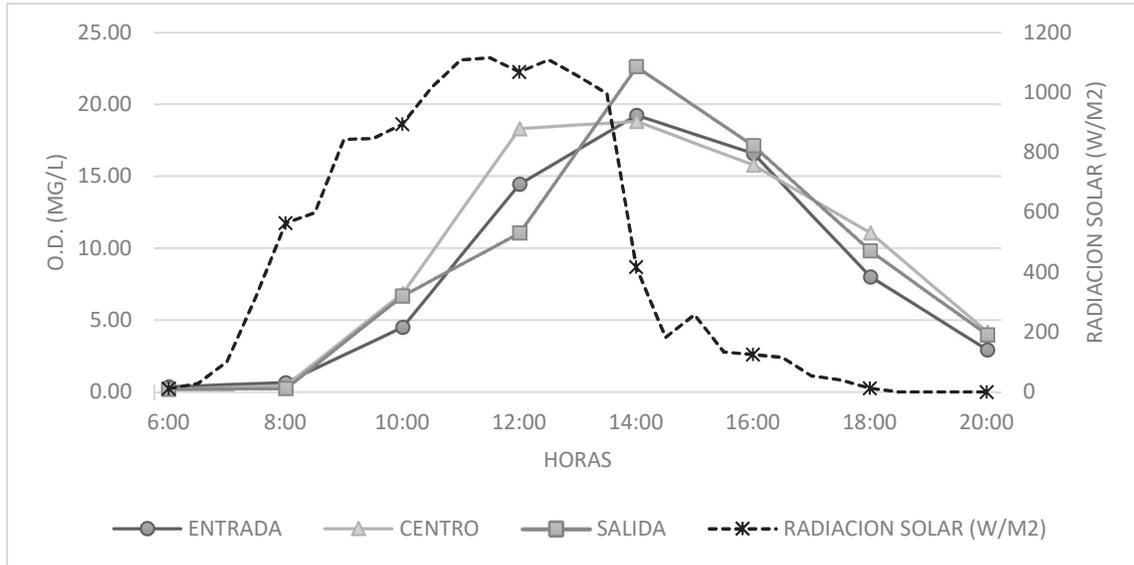
### 3.4. Resultados día 25 de septiembre de 2018

Tabla IX. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 25-09-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.37	0.66	4.51	14.46	19.24	16.57	8.01	2.94
		%	5.0	9.0	66.7	228.0	305.4	245.8	119.9	44.0
		°C	21.2	22.2	27.0	30.7	30.9	26.9	26.0	25.2
	0.75	mg/L	0.34	0.10	0.24	0.05	0.15	0.07	0.08	0.02
		%	4.5	1.3	3.1	0.7	2.0	0.9	1.2	2.0
		°C	21.2	21.3	21.3	21.4	21.4	21.4	21.4	21.6
	1.5	mg/L	0.30	0.16	0.29	0.07	0.20	0.03	0.14	0.07
		%	4.1	2.1	3.8	0.9	2.7	0.3	1.8	0.9
		°C	21.5	21.4	21.9	22.1	21.7	21.8	21.4	20.8
CENTRO (B)	0	mg/L	0.19	0.45	6.86	18.31	18.82	15.77	11.06	4.18
		%	2.6	6.1	102.7	290.7	295.9	235.9	161.2	62.6
		°C	21.2	22.4	27.7	31.3	30.3	27.4	26.0	26.7
	0.75	mg/L	0.18	0.12	0.06	0.04	0.09	0.06	0.13	0.06
		%	2.4	1.6	0.7	0.5	1.2	0.8	1.7	0.7
		°C	21.3	21.3	21.4	21.3	21.5	21.5	21.3	21.6
	1.5	mg/L	0.18	0.18	0.05	0.00	0.14	0.04	0.14	0.05
		%	2.4	2.4	0.6	0.0	1.8	0.5	1.8	0.6
		°C	21.6	21.6	22.0	22.2	22.1	21.9	21.4	21.6
SALIDA (C)	0	mg/L	0.20	0.24	6.69	11.06	22.59	17.10	9.81	3.97
		%	2.7	3.3	100.1	161.2	356.9	255.4	146.8	59.4
		°C	21.2	21.6	27.7	31.3	30.6	27.3	26.2	26.3
	0.75	mg/L	0.20	0.23	0.04	0.07	0.06	0.09	0.12	0.07
		%	2.6	3.0	0.5	0.9	0.8	1.2	1.7	0.9
		°C	21.2	21.2	21.4	21.4	21.5	21.3	21.3	21.6
	1.5	mg/L	0.30	0.18	0.02	BAJO	0.01	0.08	0.12	0.08
		%	4.1	2.5	0.3	BAJO	0.1	1.1	1.6	0.9
		°C	21.5	21.6	22.0	22.0	22.0	21.7	21.2	21.5
RADIACIÓN SOLAR		W/M2	11	564	895	1069	417	125	12	0

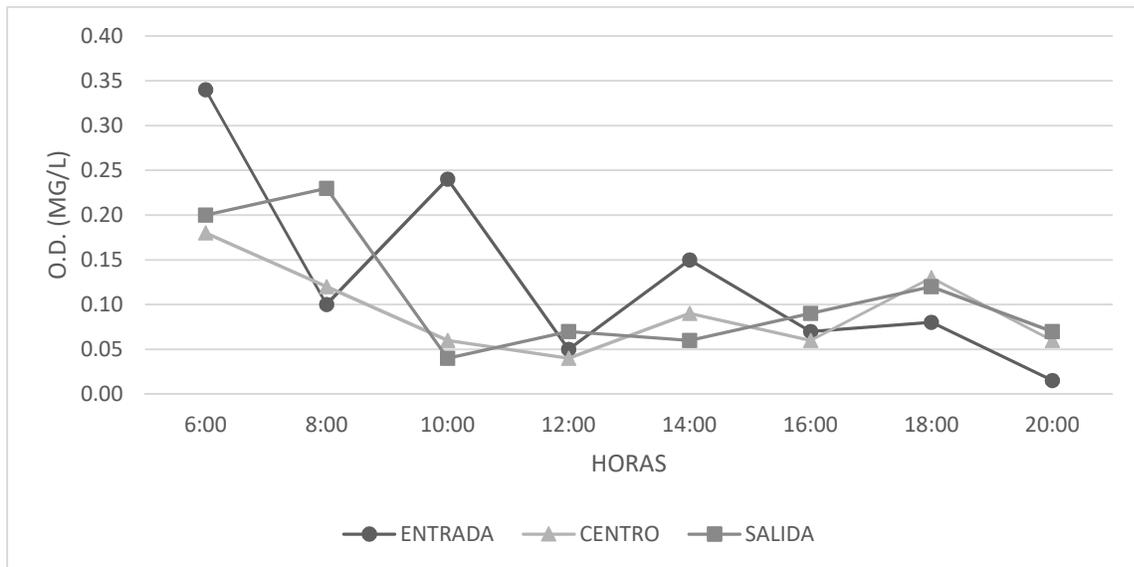
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Concentración de O.D. en la superficie**



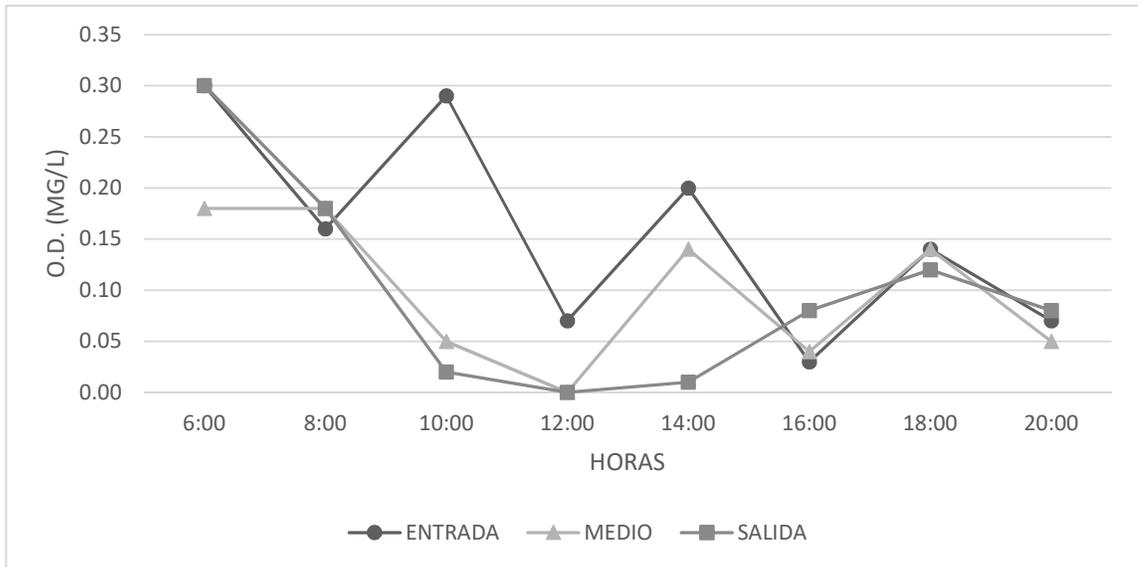
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

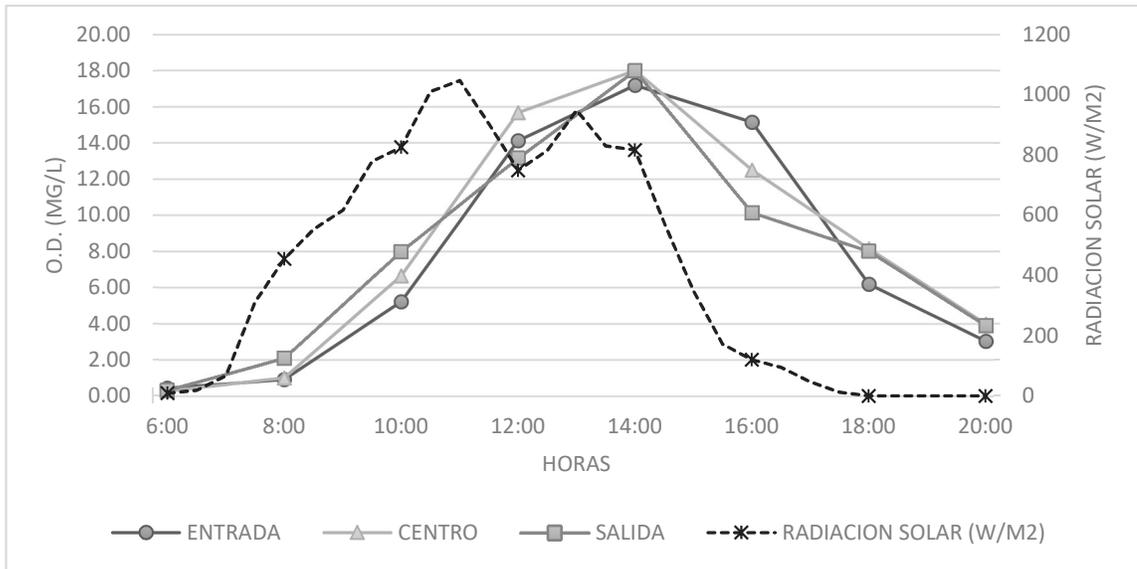
### 3.5. Resultados día 02 de octubre de 2018

Tabla X. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 02-10-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.45	0.92	5.23	14.12	17.19	15.14	6.19	3.04
		%	6.1	12.4	70.7	190.8	232.2	204.5	83.6	41.1
		°C	21.0	22.1	26.8	30.5	30.8	26.9	26.0	25.0
	0.75	mg/L	0.12	0.16	0.10	0.09	0.16	0.10	0.08	0.07
		%	1.6	2.1	1.3	1.2	2.1	1.3	1.1	0.9
		°C	21.2	21.3	21.2	21.2	21.4	21.4	21.4	21.0
	1.5	mg/L	0.19	0.16	0.14	0.10	0.18	0.08	0.14	0.08
		%	2.5	2.1	1.8	1.3	2.4	1.0	1.8	1.0
		°C	21.5	21.4	21.8	21.9	21.7	21.6	21.4	20.9
CENTRO (B)	0	mg/L	0.28	1.02	6.66	15.68	18.01	12.50	8.15	4.00
		%	4.1	14.8	96.6	227.5	261.3	181.4	118.3	58.0
		°C	21.2	22.4	26.5	30.6	30.6	26.9	21.1	25.0
	0.75	mg/L	0.09	0.09	0.06	0.06	0.06	0.07	0.16	0.06
		%	1.3	1.3	0.8	0.8	0.8	1.0	2.2	0.8
		°C	21.3	21.3	21.3	21.3	21.4	21.4	21.3	21.2
	1.5	mg/L	0.14	0.14	0.06	0.08	0.12	0.08	0.14	0.08
		%	1.9	1.9	0.8	1.1	1.7	1.1	1.9	1.1
		°C	21.6	21.4	21.9	22.0	21.7	21.9	21.4	21.0
SALIDA (C)	0	mg/L	0.33	2.10	8.00	13.15	17.99	10.14	8.01	3.90
		%	4.6	29.3	111.6	183.4	251.0	141.5	111.7	54.4
		°C	21.2	22.2	26.6	30.4	30.6	27.0	21.0	25.1
	0.75	mg/L	0.15	0.13	0.06	0.10	0.08	0.09	0.10	0.07
		%	2.1	1.8	0.8	1.4	1.1	1.3	1.4	1.0
		°C	21.3	21.2	21.4	21.4	21.4	21.3	21.3	21.2
	1.5	mg/L	0.14	0.15	0.08	0.10	0.08	0.08	0.16	0.04
		%	2.0	2.1	1.1	1.4	1.1	1.1	2.3	0.6
		°C	21.5	21.6	22.0	21.9	21.7	22.0	21.2	21.1
RADIACIÓN SOLAR		W/M2	9	455	826	749	817	120	0	0

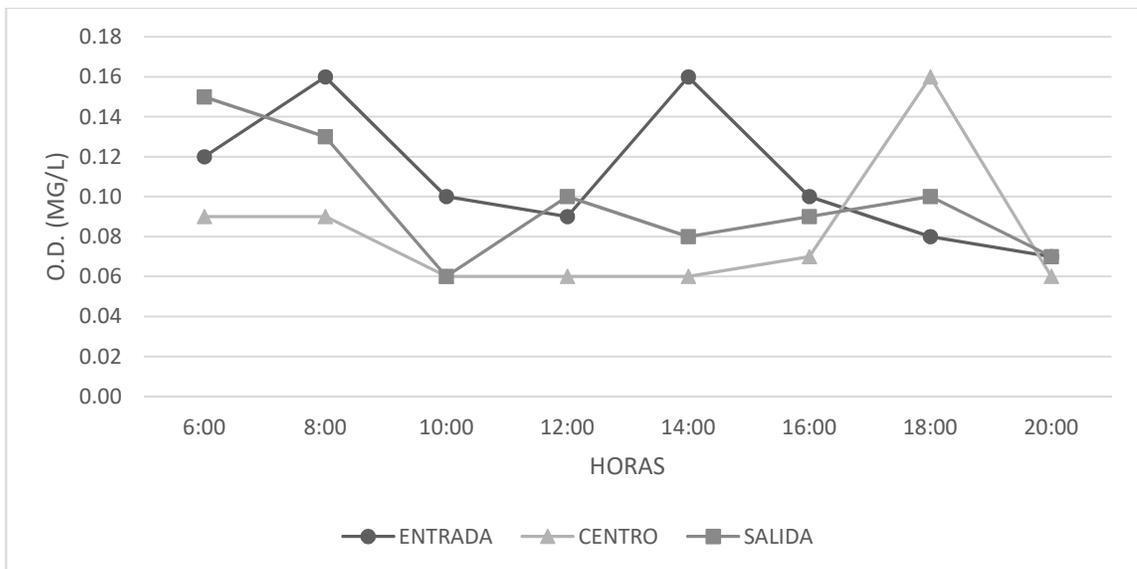
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Concentración de O.D. en la superficie**



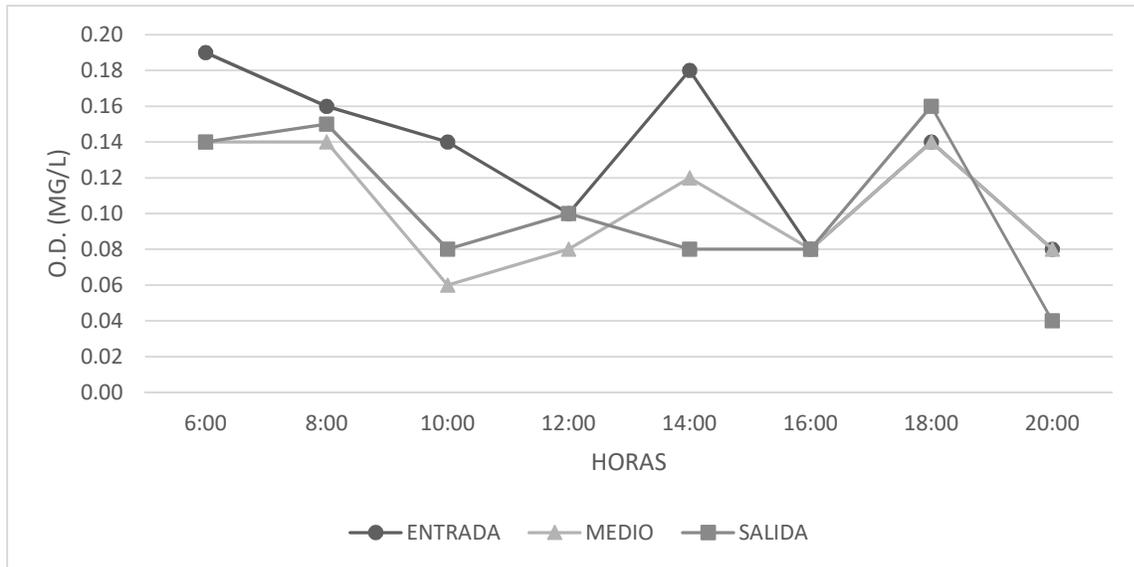
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

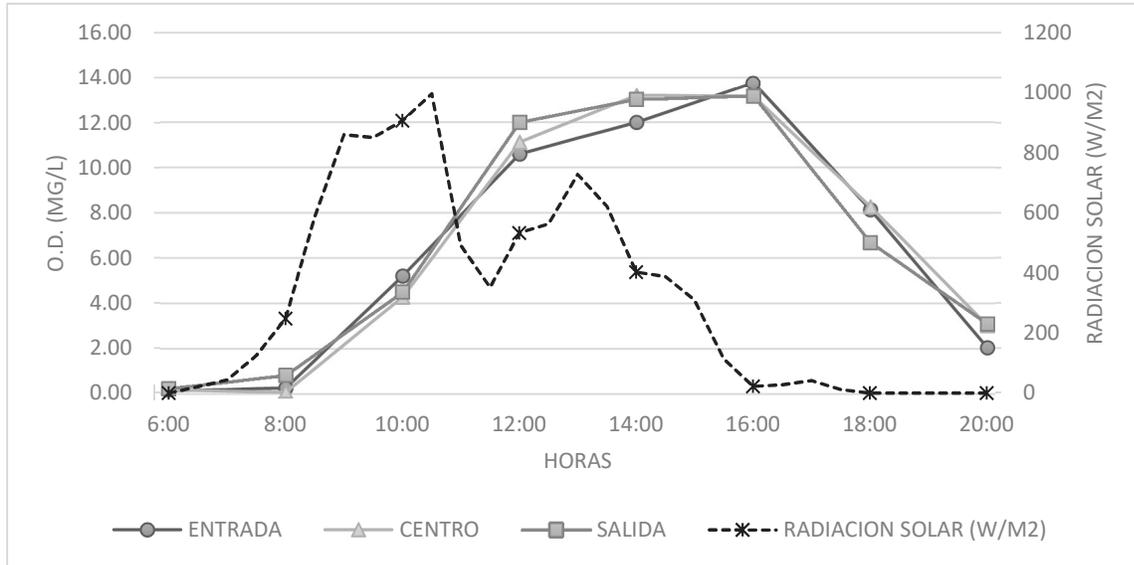
### 3.6. Resultados día 09 de octubre de 2018

Tabla XI. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 09-10-2018

Punto de analisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.14	0.27	5.21	10.60	12.00	13.75	8.14	2.05
		%	2.0	3.6	75.6	153.7	174.2	197.0	112.2	43.5
		°C	20.4	20.5	23.7	25.7	25.6	25.0	23.1	25.2
	0.75	mg/L	0.13	0.16	0.09	0.10	0.09	0.14	0.10	0.12
		%	1.9	2.1	1.3	1.2	1.1	1.8	1.3	1.2
		°C	20.3	20.4	20.8	20.4	20.4	20.5	20.4	21.1
	1.5	mg/L	0.07	0.15	0.09	0.12	0.10	0.16	0.15	0.10
		%	0.9	2.0	1.2	1.5	1.3	2.1	2.0	1.1
		°C	20.3	20.4	20.5	20.6	20.5	20.5	20.4	20.5
CENTRO (B)	0	mg/L	0.18	0.08	4.28	11.12	13.19	13.15	8.27	3.03
		%	2.4	1.1	62.0	161.3	191.3	184.8	114.2	43.5
		°C	20.4	20.7	23.8	25.7	25.7	24.8	23.0	25.2
	0.75	mg/L	0.14	0.08	0.10	0.07	0.09	0.07	0.10	0.09
		%	1.9	1.0	1.3	0.9	1.2	0.9	1.3	1.2
		°C	20.4	20.4	20.8	20.4	20.5	20.5	20.4	21.1
	1.5	mg/L	0.10	0.07	0.09	0.15	0.12	0.07	0.15	0.07
		%	1.3	0.9	1.2	2.0	1.5	1.0	2.0	1.1
		°C	20.3	20.4	20.5	20.7	20.6	20.6	20.4	20.5
SALIDA (C)	0	mg/L	0.24	0.82	4.50	12.00	13.01	13.16	6.69	3.10
		%	3.0	10.8	62.8	174.0	176.2	185.0	100.2	43.5
		°C	20.4	20.8	23.8	25.6	25.7	25.0	23.0	25.2
	0.75	mg/L	0.15	0.06	0.09	0.09	0.07	0.12	0.10	0.09
		%	2.0	0.8	1.2	1.1	0.9	1.6	1.3	1.2
		°C	20.4	20.4	20.7	20.5	20.4	20.4	20.4	21.1
	1.5	mg/L	0.08	0.05	0.07	0.12	0.10	0.05	0.12	0.12
		%	1.1	0.6	1.0	1.6	1.2	0.6	1.6	1.1
		°C	20.3	20.4	20.6	20.5	20.6	20.4	20.5	20.5
<b>RADIACIÓN SOLAR</b>		<b>W/M2</b>	0	248	907	533	403	22	0	0

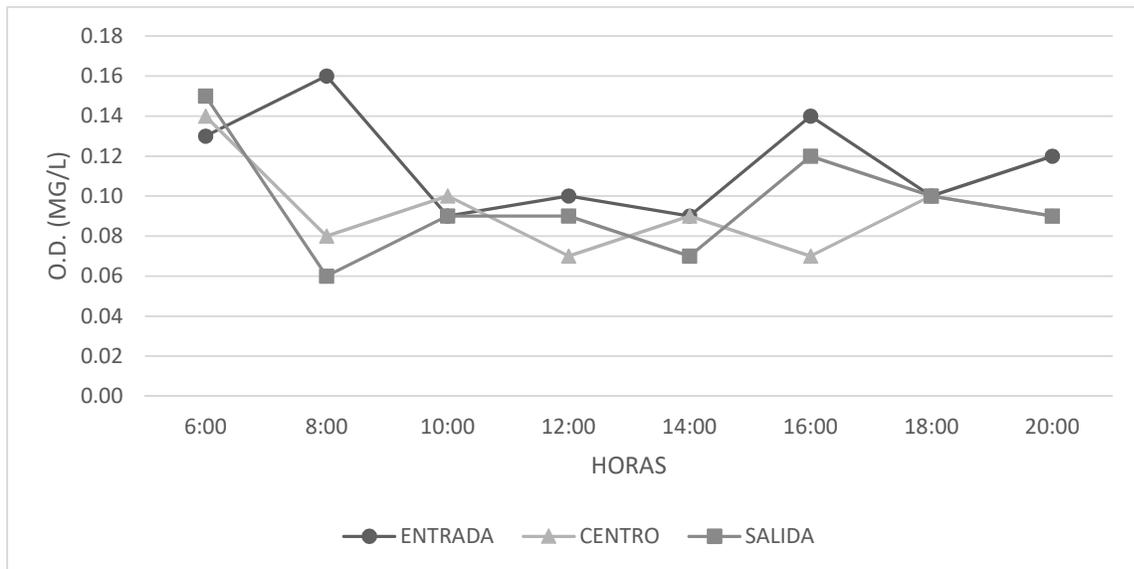
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Concentración de O.D. en la superficie



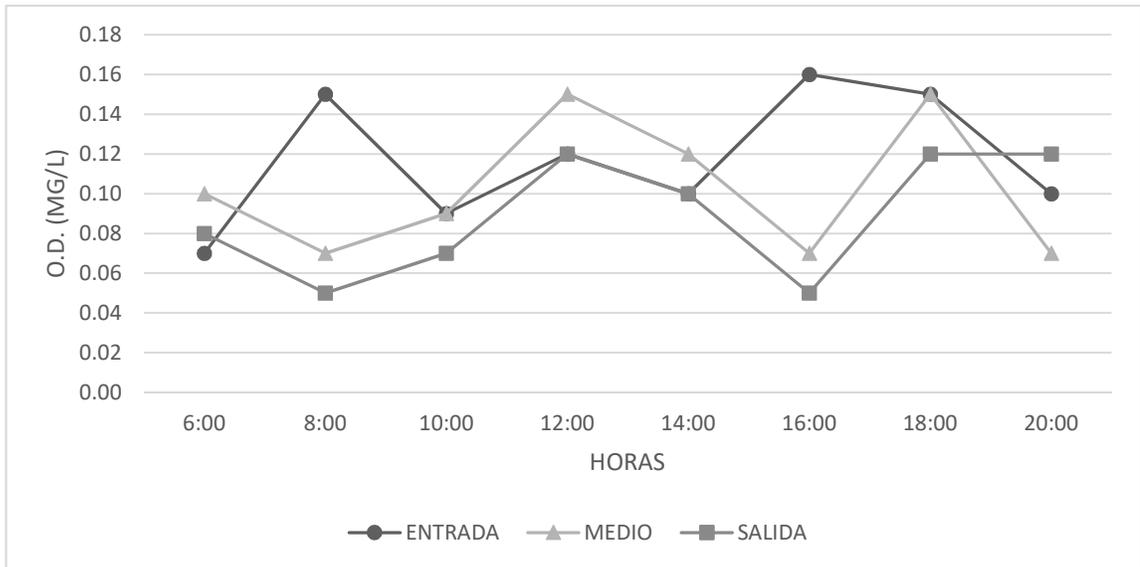
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Concentración de O.D. a media profundidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Concentración de O.D. en el fondo**



Fuente: elaboración propia.

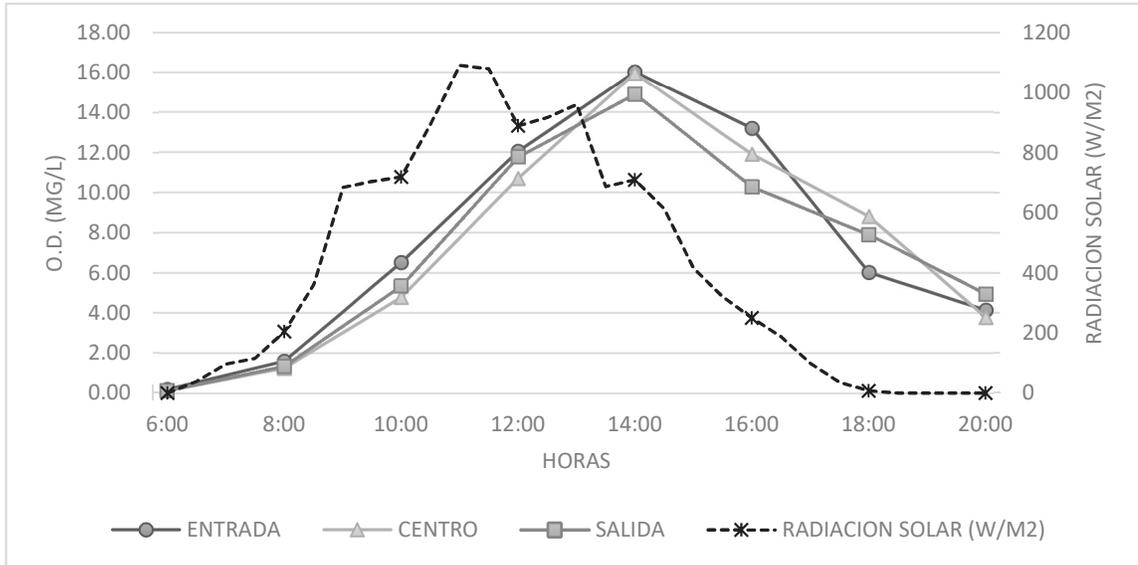
### 3.7. Resultados día 16 de octubre de 2018

Tabla XII. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 16-10-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.20	1.60	6.52	12.05	16.02	13.20	6.02	4.15
		%	2.8	22.2	78.8	167.4	222.5	172.9	83.6	57.6
		°C	20.4	22.1	25.9	29.0	30.0	25.9	24.1	23.9
	0.75	mg/L	0.12	0.06	0.10	0.10	0.14	0.14	0.08	0.06
		%	1.7	0.9	1.4	1.4	2.0	2.0	1.1	0.9
		°C	20.9	21.8	21.6	21.6	20.4	20.5	21.8	21.3
	1.5	mg/L	0.06	0.10	0.06	0.06	0.05	0.08	0.10	0.08
		%	0.8	1.4	0.8	0.8	0.7	1.1	1.4	1.1
		°C	21.1	20.9	20.9	21.2	21.0	21.1	21.3	20.5
CENTRO (B)	0	mg/L	0.14	1.26	4.78	10.70	15.96	11.90	8.81	3.78
		%	2.0	17.5	68.2	152.7	226.0	169.8	125.7	53.9
		°C	20.3	22.0	25.9	29.0	29.8	25.7	24.3	24.2
	0.75	mg/L	0.08	0.06	0.08	0.10	0.08	0.08	0.04	0.06
		%	1.1	0.8	1.1	1.4	1.1	1.1	0.5	0.8
		°C	20.5	21.6	21.0	21.1	20.9	20.6	21.9	21.1
	1.5	mg/L	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.04	0.05	0.08
		%	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9	0.6	0.7	1.1
		°C	21.3	20.9	21.0	21.3	21.1	21.1	21.4	20.9
SALIDA (C)	0	mg/L	0.14	1.36	5.34	11.76	14.90	10.27	7.90	4.95
		%	1.9	18.6	72.9	160.6	203.5	140.3	107.9	67.6
		°C	20.4	22.4	21.2	25.3	25.5	25.5	28.3	25.2
	0.75	mg/L	0.10	0.06	0.06	0.08	0.00	0.07	0.09	0.08
		%	1.4	0.8	0.8	1.1	0.0	1.0	1.3	1.1
		°C	20.5	21.8	21.1	21.0	20.9	21.0	21.8	21.0
	1.5	mg/L	0.06	0.06	0.03	0.02	0.03	0.06	0.06	0.07
		%	0.8	0.8	0.4	0.3	0.4	0.8	0.8	1.0
		°C	21.2	21.0	21.3	21.2	21.1	21.2	21.2	20.5
RADIACIÓN SOLAR		W/M2	0	205	720	890	710	250	8	0

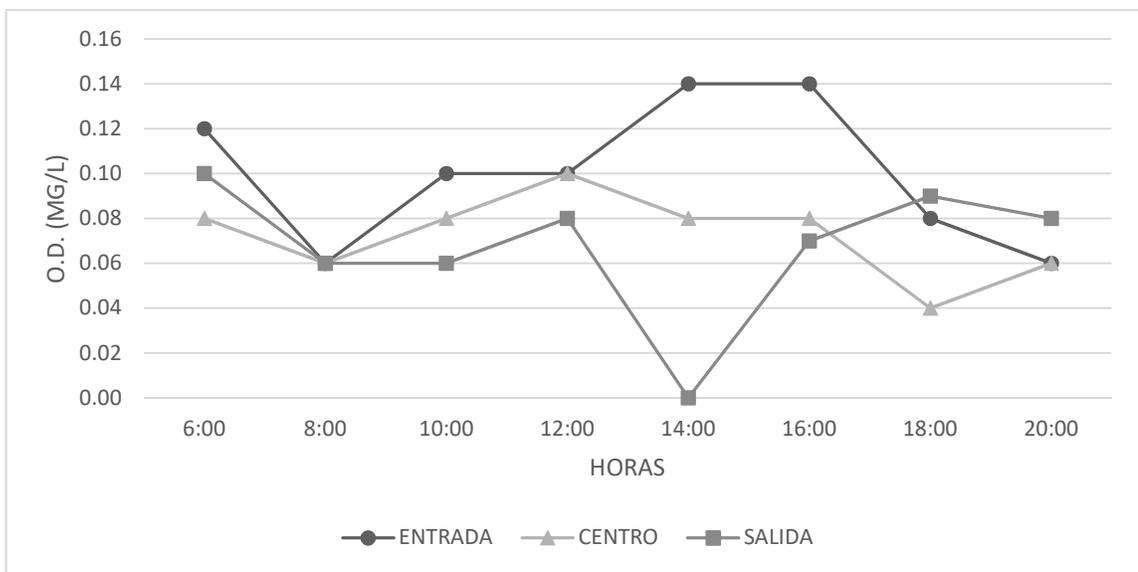
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Concentración de O.D. en la superficie**



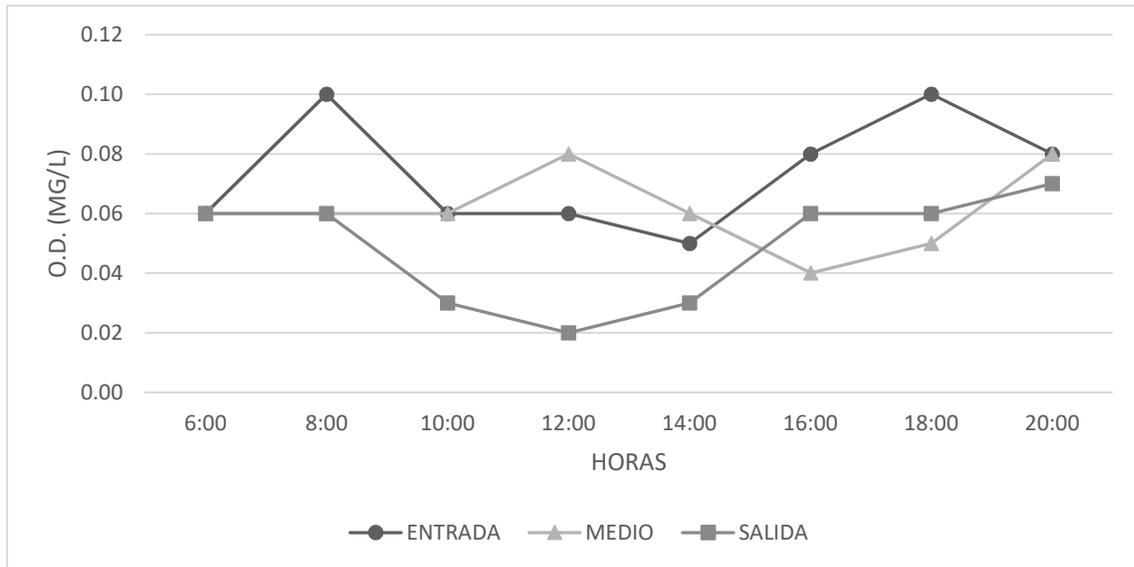
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

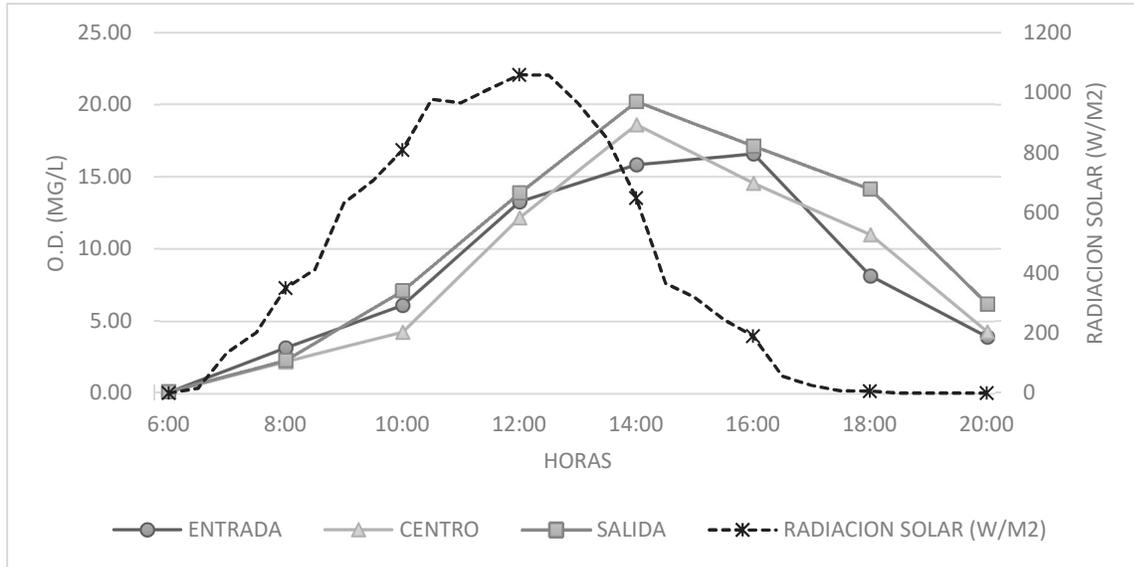
### 3.8. Resultados día 23 de octubre de 2018

Tabla XIII. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 23-10-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.12	3.17	6.12	13.28	15.83	16.58	8.14	3.94
		%	1.5	40.7	78.8	178.5	224.8	213.4	104.8	50.7
		°C	19.1	19.5	26.0	30.8	30.7	26.9	26.1	25.0
	0.75	mg/L	0.15	0.10	0.12	0.11	0.11	0.07	0.09	0.06
		%	1.9	1.3	1.5	1.4	1.4	0.9	1.2	0.8
		°C	19.1	19.5	19.9	21.4	21.4	21.4	21.4	21.6
	1.5	mg/L	0.07	0.07	0.06	0.07	0.09	0.08	0.12	0.10
		%	0.9	0.9	0.8	0.9	1.2	1.1	1.6	1.3
		°C	19.3	19.6	21.0	22.1	21.7	21.8	21.4	20.8
CENTRO (B)	0	mg/L	0.11	2.22	4.27	12.16	18.60	14.54	11.00	4.28
		%	1.4	28.6	57.1	156.5	239.4	187.1	141.6	55.1
		°C	19.1	19.6	21.7	30.9	30.6	27.0	26.0	25.6
	0.75	mg/L	0.03	0.07	0.18	0.12	0.09	0.06	0.09	0.08
		%	0.4	0.9	8.1	1.5	1.2	0.8	1.2	1.0
		°C	19.2	19.6	19.7	21.3	21.5	21.5	21.3	21.6
	1.5	mg/L	0.08	0.06	0.14	0.11	0.14	0.04	0.14	0.05
		%	1.1	0.8	1.9	1.5	1.9	0.5	1.9	0.7
		°C	19.1	19.6	19.6	22.2	22.1	21.9	21.4	21.6
SALIDA (C)	0	mg/L	0.16	2.31	7.12	13.87	20.19	17.10	14.12	6.21
		%	2.1	29.8	91.6	178.5	259.8	220.1	181.7	79.9
		°C	19.1	19.7	19.8	30.8	30.6	27.1	26.2	25.4
	0.75	mg/L	0.06	0.26	0.20	0.07	0.23	0.09	0.12	0.07
		%	0.8	3.4	2.6	0.9	3.0	1.2	1.5	0.9
		°C	19.2	19.9	20.0	21.4	21.5	21.3	21.3	21.6
	1.5	mg/L	0.08	0.06	0.08	0.00	0.01	0.08	0.12	0.08
		%	1.1	0.8	1.1	0.0	0.1	1.1	1.6	1.1
		°C	19.1	19.6	20.0	22.0	22.0	21.7	21.2	21.5
<b>RADIACIÓN SOLAR</b>		<b>W/M2</b>	0	350	810	1060	650	190	6	0

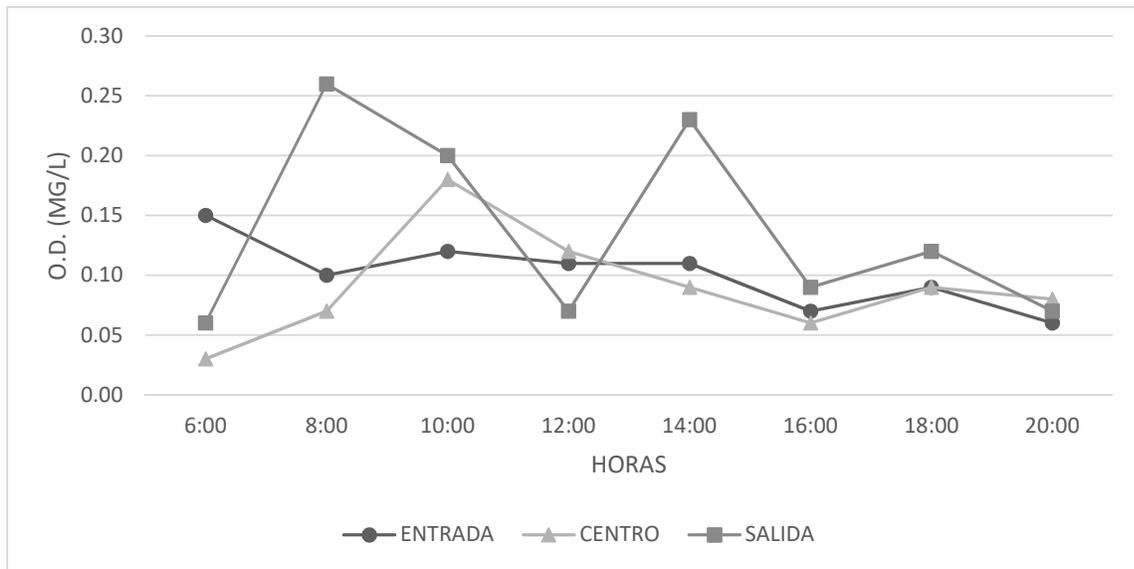
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Concentración de O.D. en la superficie**



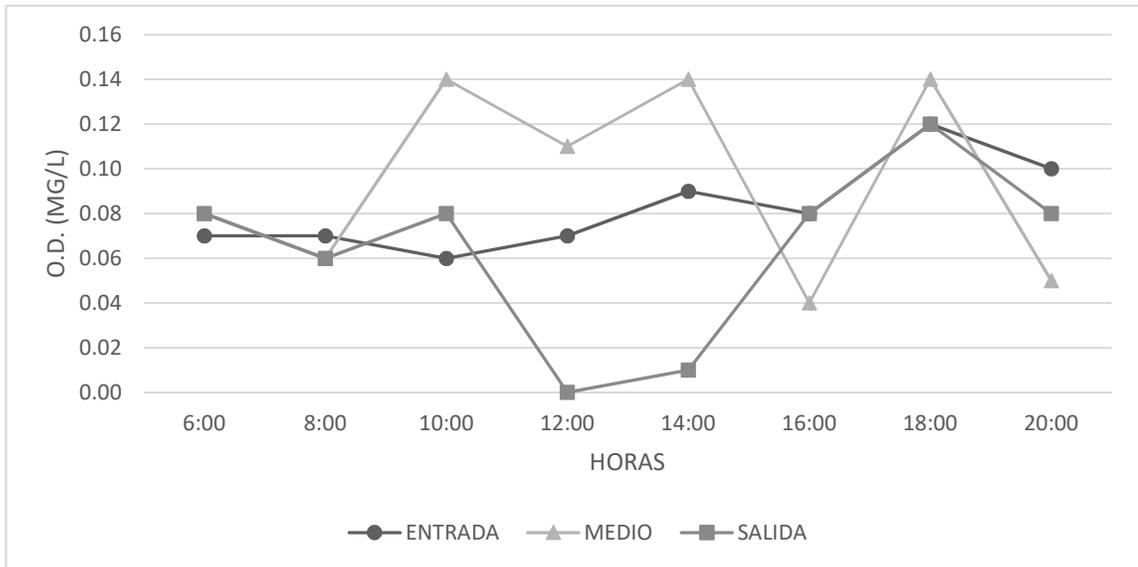
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

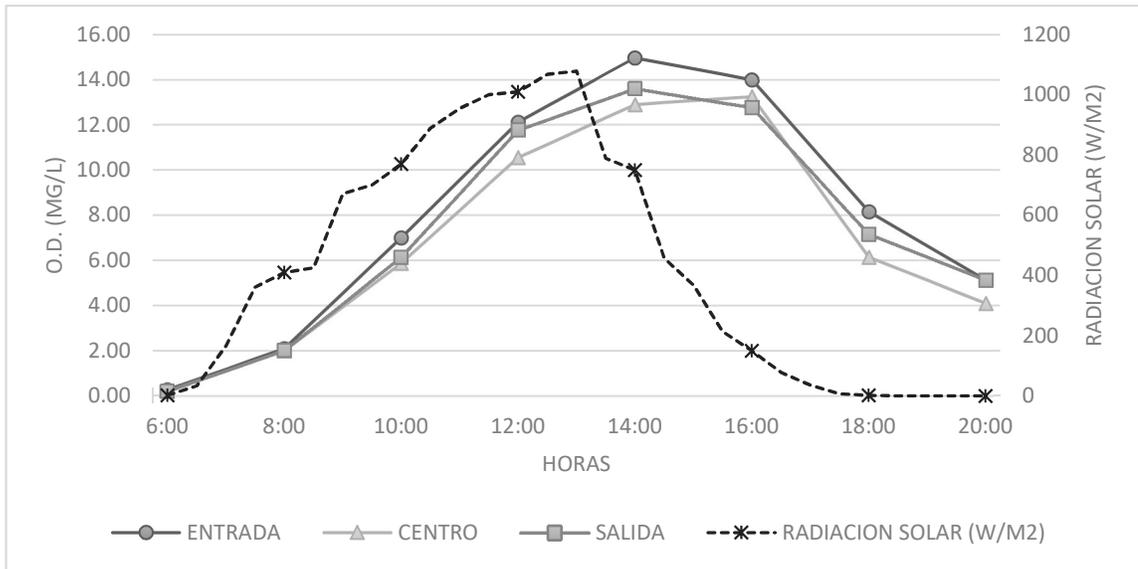
### 3.9. Resultados día 30 de octubre de 2018

Tabla XIV. Oxígeno disuelto y radiación solar de fecha 30-10-2018

Punto de análisis	Profundidad (m)	Unidad	HORA							
			6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
ENTRADA (A)	0	mg/L	0.27	2.10	7.00	12.12	14.97	14.00	8.16	5.12
		%	3.8	29.8	99.4	171.0	212.6	198.8	113.5	72.7
		°C	20.4	22.1	25.7	29.0	30.1	25.9	24.0	24.0
	0.75	mg/L	0.10	0.11	0.10	0.06	0.11	0.08	0.08	0.04
		%	1.4	1.6	1.4	0.8	1.5	1.1	1.1	0.5
		°C	20.7	21.7	21.6	21.6	20.3	20.5	21.6	21.3
	1.5	mg/L	0.02	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08	0.06	0.08
		%	0.3	0.7	0.8	1.1	0.7	1.1	0.8	1.1
		°C	21.1	20.9	20.7	21.2	21.0	21.1	21.1	20.5
CENTRO (B)	0	mg/L	0.20	2.00	5.87	10.55	12.90	13.25	6.14	4.10
		%	2.9	27.8	81.4	150.5	182.7	189.1	87.6	53.9
		°C	20.3	22.1	25.7	29.0	30.1	26.0	24.3	24.1
	0.75	mg/L	0.08	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.04	0.08
		%	1.1	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8	0.5	1.1
		°C	20.6	21.6	21.6	21.5	20.4	20.6	21.6	21.3
	1.5	mg/L	0.06	0.04	0.02	0.09	0.06	0.05	0.05	0.06
		%	0.9	0.6	0.3	1.3	0.9	0.7	0.7	0.9
		°C	21.1	20.9	20.5	21.3	21.1	21.1	21.1	20.7
SALIDA (C)	0	mg/L	0.20	2.01	6.14	11.76	13.60	12.76	7.15	5.12
		%	2.7	27.5	87.5	160.6	189.0	174.3	96.2	69.9
		°C	20.4	22.2	25.5	28.8	29.4	25.9	24.2	24.0
	0.75	mg/L	0.08	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	0.09	0.10
		%	1.1	0.8	1.0	0.8	0.9	1.1	1.3	1.4
		°C	20.5	21.6	21.6	21.5	20.4	20.5	21.8	21.0
	1.5	mg/L	0.04	0.06	0.07	0.02	0.02	0.06	0.06	0.05
		%	0.6	0.8	1.0	0.3	0.3	0.8	0.8	0.7
		°C	21.2	20.9	20.5	21.2	21.2	21.2	21.0	20.8
RADIACIÓN SOLAR		W/M2	2	410	770	1010	750	150	2	0

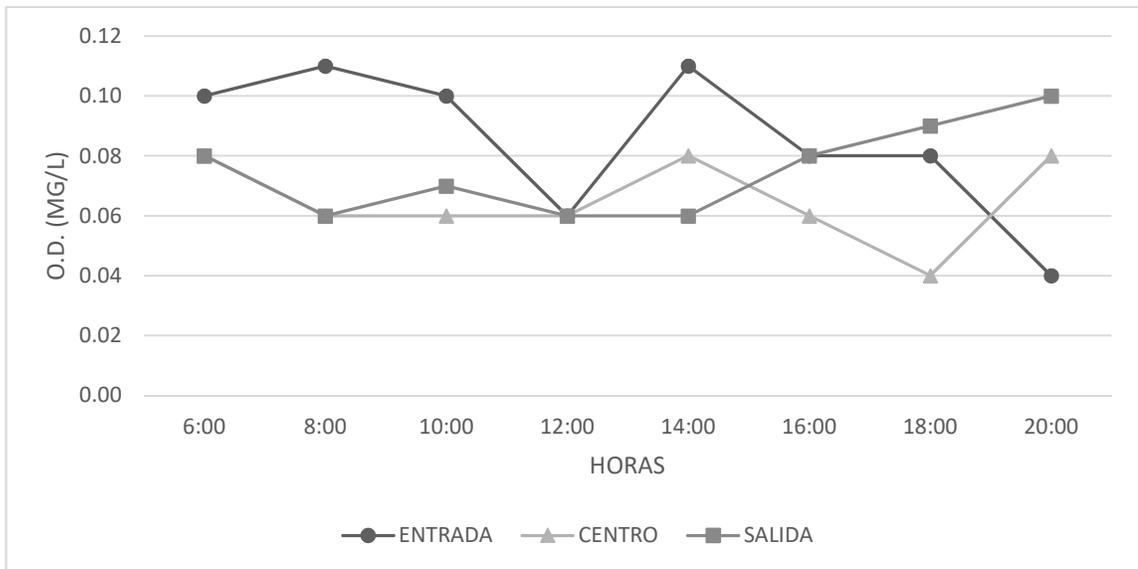
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Concentración de O.D. en la superficie**



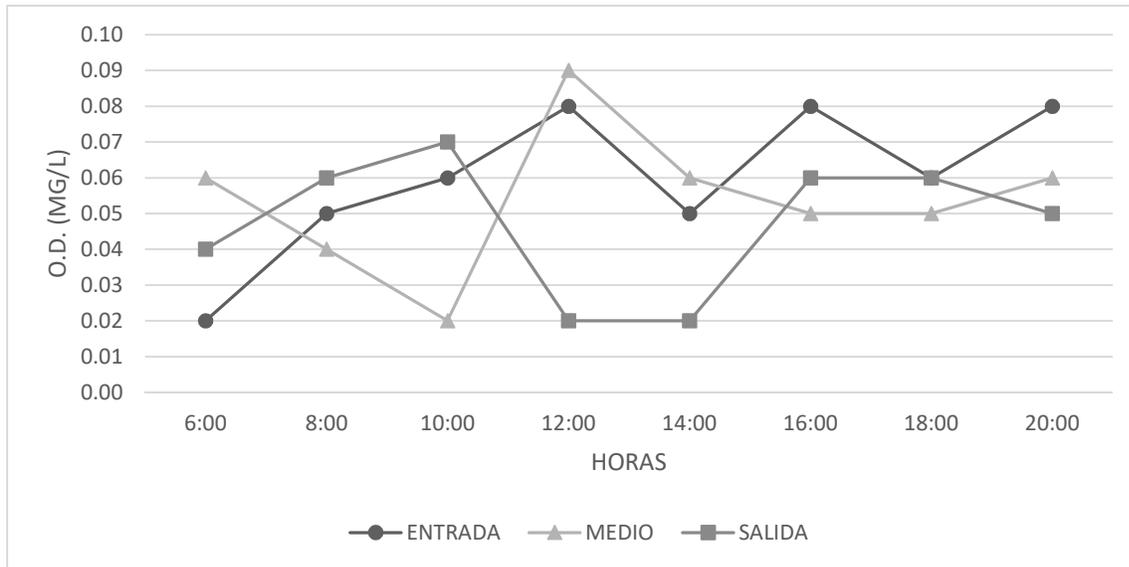
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Concentración de O.D. a media profundidad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Concentración de O.D. en el fondo



Fuente: elaboración propia.

### 3.10. Resultados de perfiles de O.D.

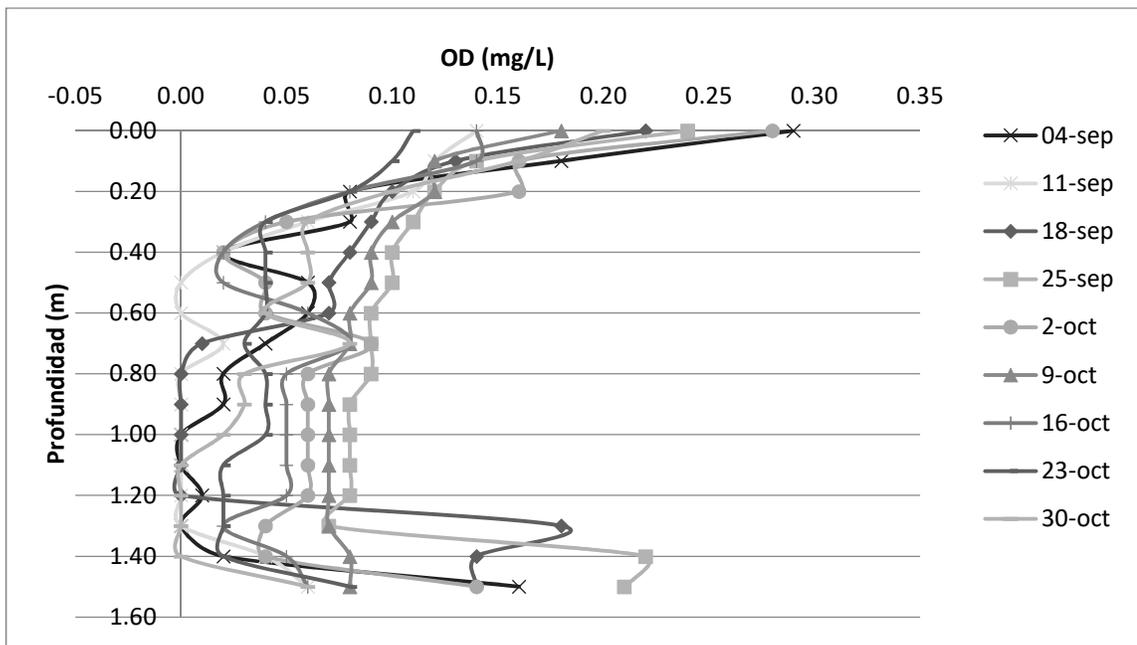
Los datos que se presentan a continuación son resultado de mediciones realizadas en el centro de la laguna a cada 10 cm de profundidad en tres horarios diferentes (6:00, 12:00 y 18:00 horas) durante nueve días de medición con frecuencia semanal para obtener perfiles estratigráficos en tres horarios críticos de la laguna.

Tabla XV. Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 6:00 horas

No.	PROFUNDIDAD	04-09-18	11-09-18	18-09-18	25-09-18	02-10-18	09-10-18	16-10-18	23-10-18	30-10-18
		6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00	6:00
		OD (mg/L)								
1	0.00	0.29	0.14	0.22	0.24	0.28	0.18	0.14	0.11	0.20
2	0.10	0.18	0.12	0.13	0.14	0.16	0.12	0.14	0.1	0.16
3	0.20	0.08	0.11	0.1	0.12	0.16	0.12	0.08	0.08	0.1
4	0.30	0.08	0.06	0.09	0.11	0.05	0.1	0.04	0.04	0.06
5	0.40	0.02	0.02	0.08	0.1	0.02	0.09	0.02	0.04	0.06
6	0.50	0.06	0.00	0.07	0.1	0.04	0.09	0.02	0.04	0.06
7	0.60	0.06	0.00	0.07	0.09	0.04	0.08	0.06	0.04	0.04
8	0.70	0.04	0.02	0.01	0.09	0.09	0.08	0.08	0.03	0.08
9	0.80	0.02	0.00	0	0.09	0.06	0.07	0.05	0.04	0.03
10	0.90	0.02	0.00	0	0.08	0.06	0.07	0.05	0.04	0.03
11	1.00	0.00	0.00	0	0.08	0.06	0.07	0.05	0.04	0.02
12	1.10	0.00	0.00	0	0.08	0.06	0.07	0.05	0.02	0
13	1.20	0.01	0.00	0	0.08	0.06	0.07	0.05	0.02	0
14	1.30	0.00	0.00	0.18	0.07	0.04	0.07	0.02	0.02	0
15	1.40	0.02	0.04	0.14	0.22	0.04	0.08	0.05	0.02	0
16	1.50	0.16	0.06	0.14	0.21	0.14	0.08	0.06	0.08	0.06

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 6:00 horas



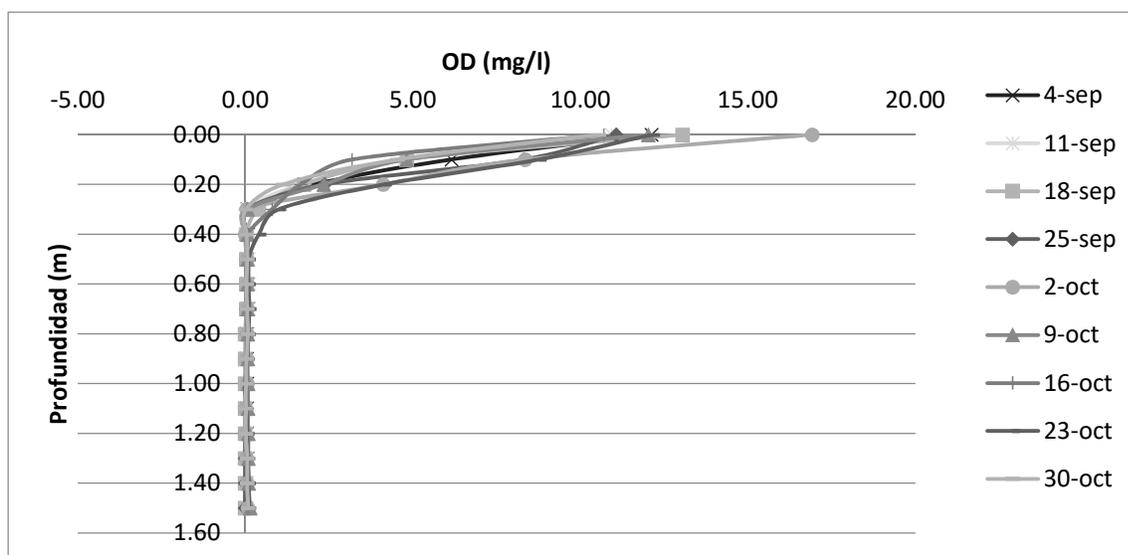
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 12:00 horas

No.	PROFUNDIDAD	04-09-18	11-09-18	18-09-18	25-09-18	02-10-18	09-10-18	16-10-18	23-10-18	30-10-18
		12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
		OD (mg/L)								
1	0.00	12.12	10.93	13.05	11.06	16.92	12.02	10.70	12.16	10.55
2	0.10	6.15	4.79	4.82	8.31	8.36	4.82	3.19	8.77	4.55
3	0.20	2.10	1.66	1.75	2.36	4.12	2.34	1.66	4.16	1.14
4	0.30	0.06	0.05	0.4	0.04	0.04	0.06	0.8	1	0.02
5	0.40	0.08	0.00	0.04	0.04	0.00	0.06	0.08	0.41	0.04
6	0.50	0.04	0.10	0.03	0.04	0.04	0.06	0.1	0.1	0.06
7	0.60	0.06	0.12	0.03	0.04	0.06	0.06	0.08	0.1	0.04
8	0.70	0.09	0.11	0.03	0.04	0.06	0.06	0.10	0.12	0.06
9	0.80	0.04	0.08	0	0.04	0.06	0.07	0.06	0.1	0.08
10	0.90	0.04	0.00	0	0.04	0.04	0.07	0.04	0.06	0.04
11	1.00	0.05	0.00	0	0.04	0.06	0.08	0.04	0	0.02
12	1.10	0.04	0.00	0	0.02	0.00	0.08	0.06	0.02	0.02
13	1.20	0.04	0.02	0	0	0.00	0.09	0.04	0.06	0.02
14	1.30	0.06	0.04	0	0	0.04	0.09	0.04	0.08	0.06
15	1.40	0.02	0.02	0	0.00	0.06	0.1	0.06	0.1	0.06
16	1.50	0.00	0.04	0	0.00	0.08	0.15	0.08	0.11	0.09

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 12:00 horas



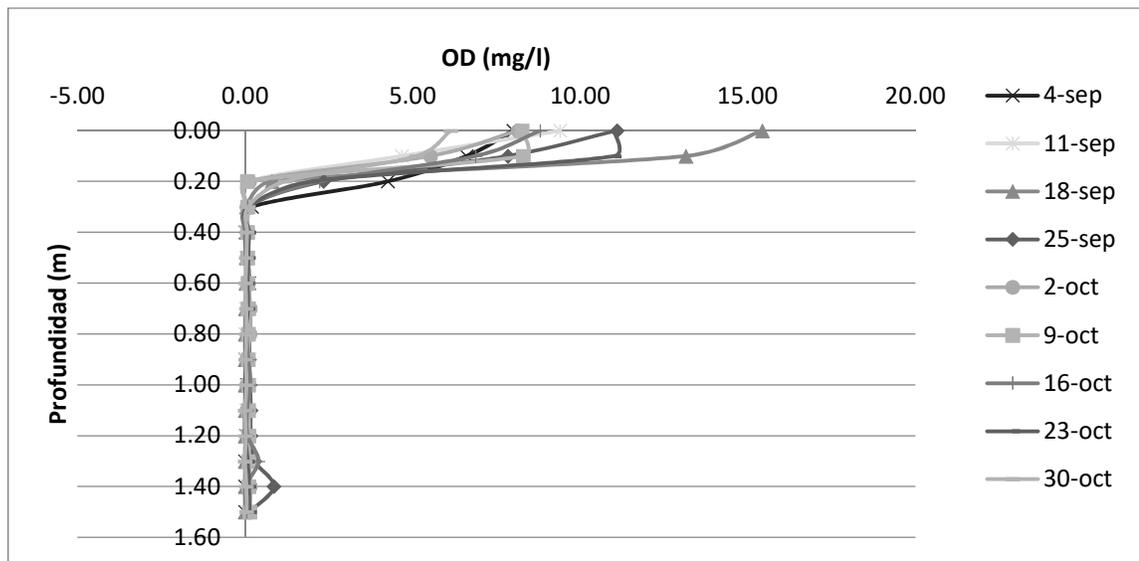
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Oxígeno disuelto a cada 10 cm de profundidad 18:00 horas

No.	PROFUNDIDAD	04-09-18	11-09-18	18-09-18	25-09-18	02-10-18	09-10-18	16-10-18	23-10-18	30-10-18
		12:00	12:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00
		OD (mg/L)								
1	0.00	8.00	9.40	15.43	11.10	8.15	8.27	8.81	11.00	6.14
2	0.10	6.61	4.68	13.15	7.84	5.53	8.31	6.88	11.02	5.12
3	0.20	4.26	0.10	0.80	2.34	0.14	0.07	2.23	2.00	1.20
4	0.30	0.20	0.12	0.04	0.09	0.05	0.08	0.08	0.10	0.10
5	0.40	0.01	0.02	0.04	0.10	0.06	0.08	0.00	0.12	0.06
6	0.50	0.08	0.02	0.03	0.10	0.05	0.08	0.02	0.10	0.04
7	0.60	0.12		0.02	0.11	0.10	0.09	0.04	0.08	0.02
8	0.70	0.11	0.01	0.01	0.11	0.16	0.09	0.04	0.09	0.04
9	0.80	0.10	0.00	0.00	0.13	0.15	0.10	0.04	0.02	0.04
10	0.90	0.00	0.00	0.00	0.13	0.05	0.10	0.10	0.02	0.02
11	1.00	0.06	0.02	0.00	0.15	0.05	0.11	0.16	0.00	0.04
12	1.10	0.08	0.03	0.00	0.17	0.05	0.11	0.06	0.00	0.00
13	1.20	0.02	0.00	0.00	0.17	0.10	0.12	0.08	0.00	0.02
14	1.30	0.00	0.04	0.00	0.29	0.12	0.12	0.40	0.08	0.00
15	1.40	0.00	0.05	0.00	0.86	0.16	0.12	0.02	0.12	0.04
16	1.50	0.00	0.05	0.00	0.14	0.14	0.15	0.05	0.14	0.05

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Perfiles de oxígeno disuelto en horario de 18:00 horas



Fuente: elaboración propia.



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Análisis de normalidad de datos de oxígeno disuelto de superficie

Cuando una medida o determinación se repite muchas veces, en las mismas condiciones, el resultado de cada medida,  $X$ , se distribuye aleatoriamente alrededor de un valor promedio, promedio aritmético, debido a errores incontrolables o errores experimentales. La frecuencia de ocurrencia representa el número de veces que un valor específico ocurre un arreglo de observaciones. (Rojas, 1999).

En los resultados obtenidos de las mediciones de O.D., se realizó el análisis de normalidad para datos de superficie que cumplen las mismas condiciones de medición (punto de medición y horario de medición). En la tabla XVIII se presenta los resultados de la prueba de normalidad. Esta prueba indica si existe una distribución normal con los datos de cada variable, en este caso se tenían 27 datos, por lo cual se utilizó el método de Shapiro-Wilk, debido a que la cantidad de datos que se tenía es menor a 50.

Con base a la siguiente tabla, el nivel de significancia varía para cada horario de medición obteniendo el nivel más alto a las 14:00 horas (0.349), lo cual indica una clara distribución normal de datos, lo mismo sucede con los horarios de 6:00, 8:00, 10:00, 16:00 y 20:00 horas. Mientras que en los horarios de 12:00 y 18:00 horas obtuvieron un nivel de significancia de 0.024 y 0.006 respectivamente, lo cual para los horarios en mención no se cumple la condición

de una distribución normal. Esto debido a que hay valores atípicos como se observa en el diagrama caja, figura 38.

Tabla XVIII. Pruebas de normalidad

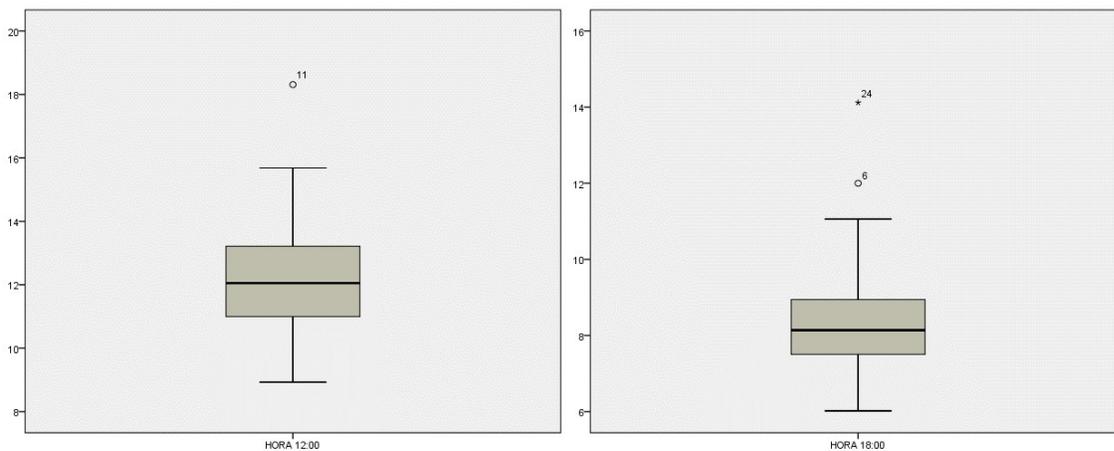
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
HORA 6:00	,164	27	,061	,957	27	,323
HORA 8:00	,169	27	,046	,935	27	,094
HORA 10:00	,109	27	,200*	,947	27	,182
HORA 12:00	,163	27	,062	,911	27	,024
HORA 14:00	,147	27	,141	,959	27	,349
HORA 16:00	,160	27	,074	,945	27	,166
HORA 18:00	,203	27	,006	,884	27	,006
HORA 20:00	,135	27	,200*	,949	27	,208

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

Figura 38. Diagrama de caja

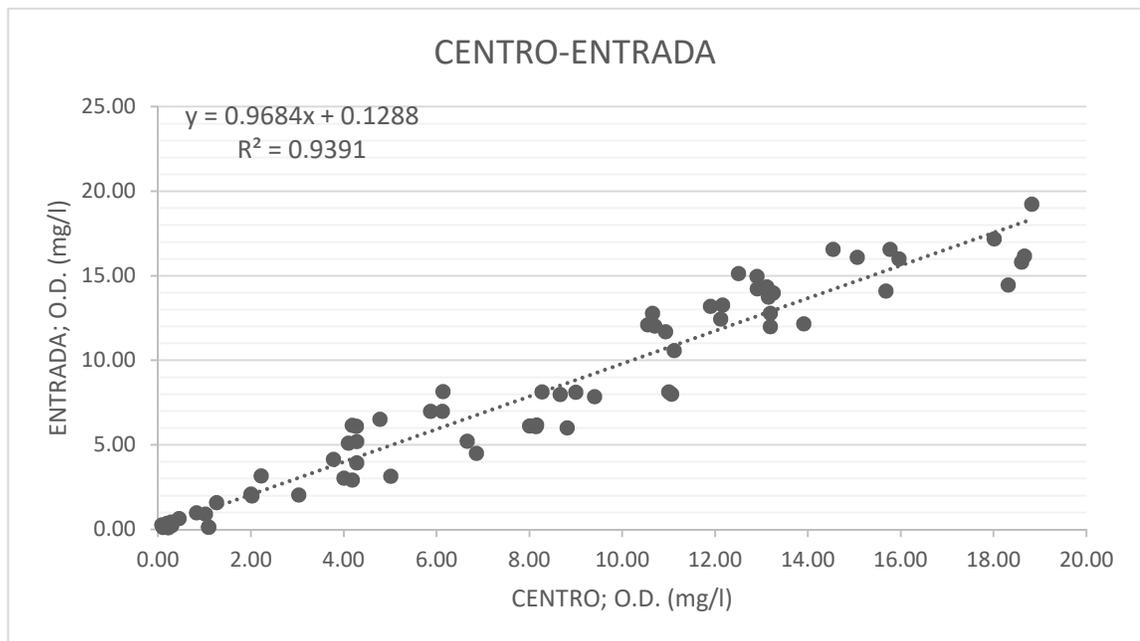


Fuente: elaboración propia, programa SPSS.

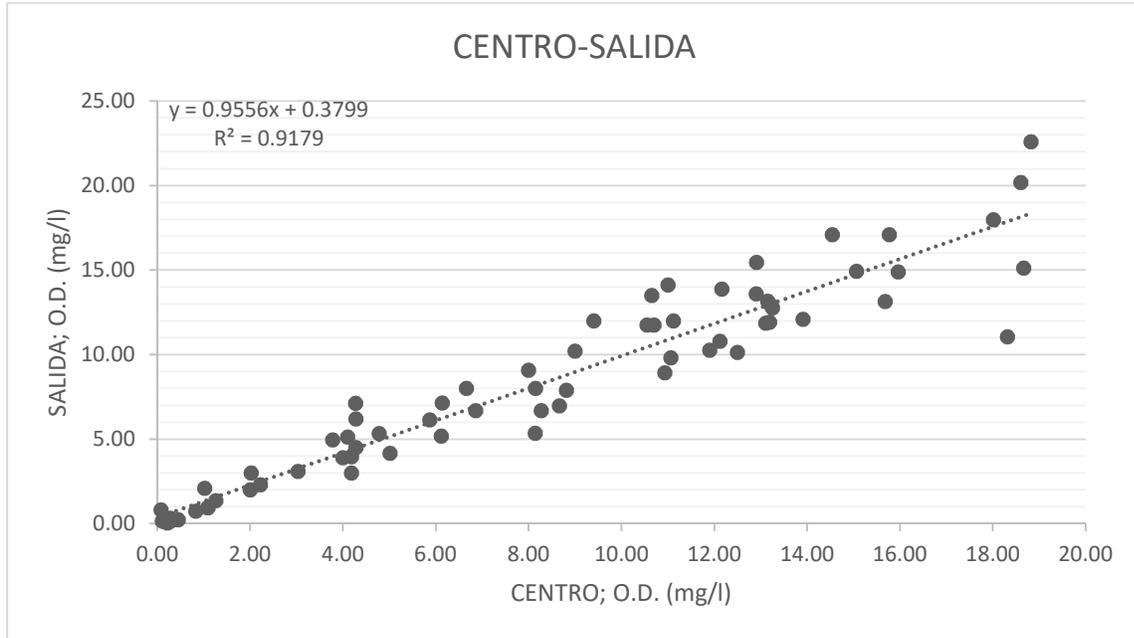
#### 4.2. Correlación de oxígeno disuelto en la entrada, centro y salida de la laguna.

La medición de O.D. fueron realizados en tres profundidades (superficie, intermedio y fondo), en entrada, centro y salida de la laguna. Esto para conocer si existe alguna representatividad del centro de la laguna a lo largo de toda la laguna en la misma profundidad.

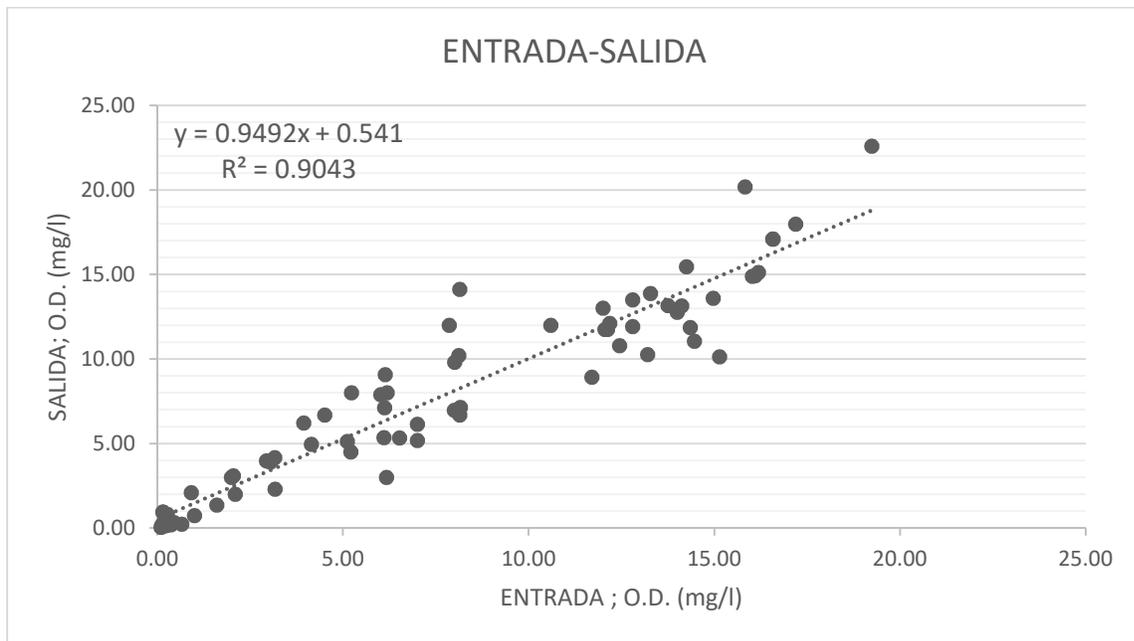
Figura 39. Correlación de datos de O.D. de superficie en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna



(a)



(b)



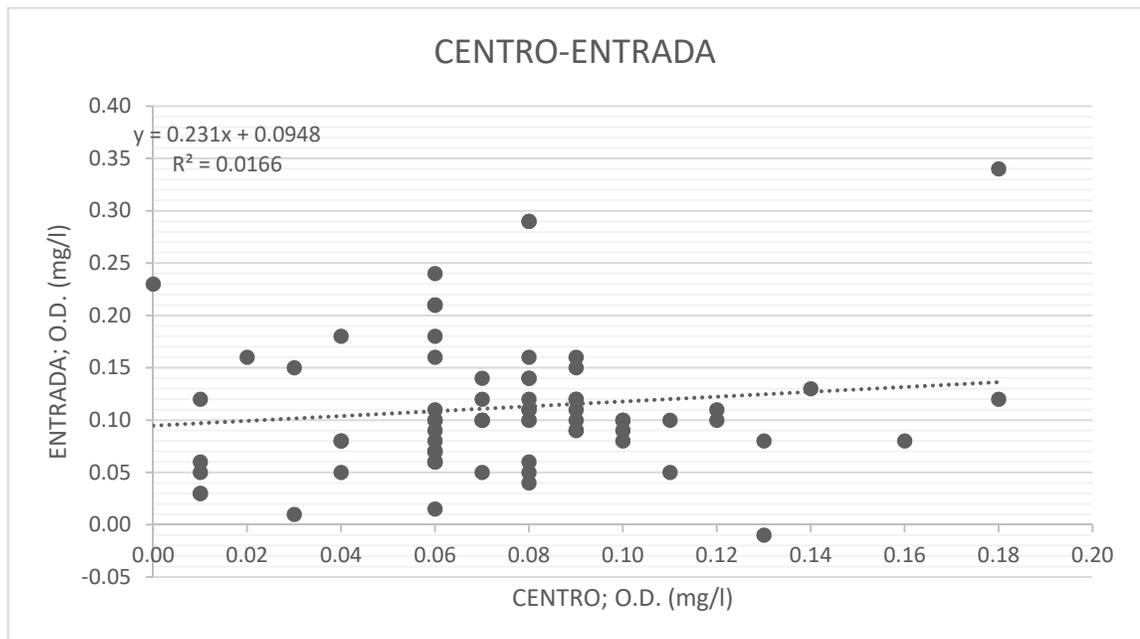
(c)

Fuente: elaboración propia.

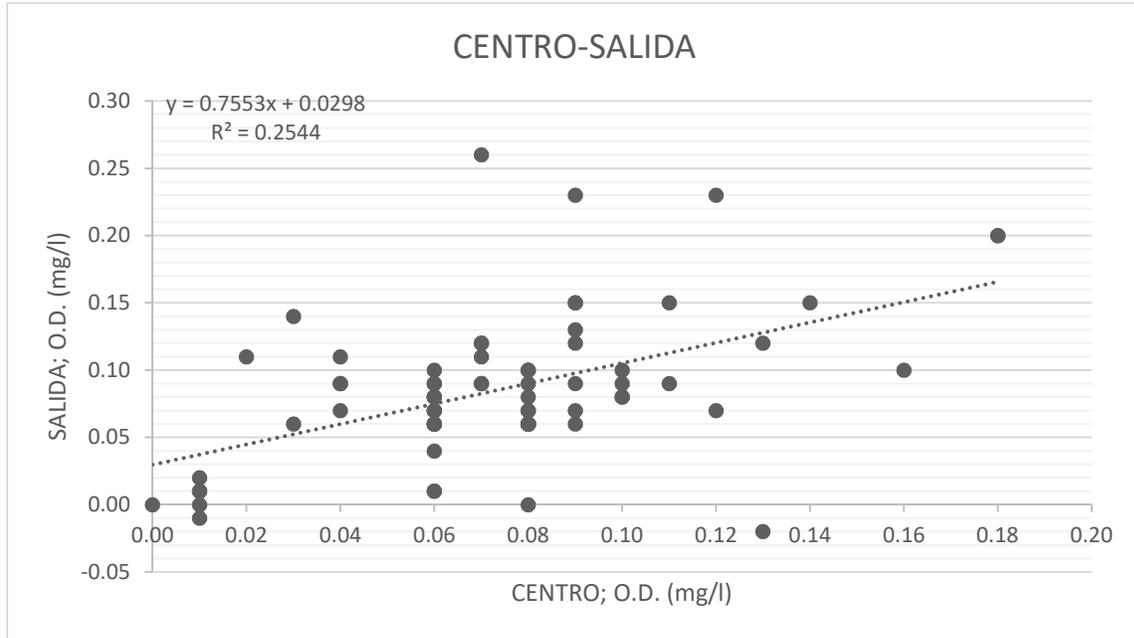
En la superficie de la laguna los datos de oxígeno disuelto obtuvieron un coeficiente de correlación  $R^2$  entre 0.9043 y 0.9391, presentado el mayor coeficiente de correlación  $R^2$  entre entrada-centro y la menor en la entrada-salida. En la figura 39, se observan las tres correlaciones que se hicieron para mediciones de superficie y se observa una mayor dispersión de datos a medida que aumenta la concentración del oxígeno disuelto.

La correlación centro-salida (figura b) obtuvo un coeficiente  $R^2$  de 0.9171, en la figura se observa una menor dispersión de datos entre 0 a 10 mg/L de oxígeno disuelto y una mayor dispersión de datos arriba de 10 mg/L. A partir de los valores obtenidos de  $R^2$  se deduce que los datos de O.D. en la superficie de la laguna son representativos desde cualquier punto de medición.

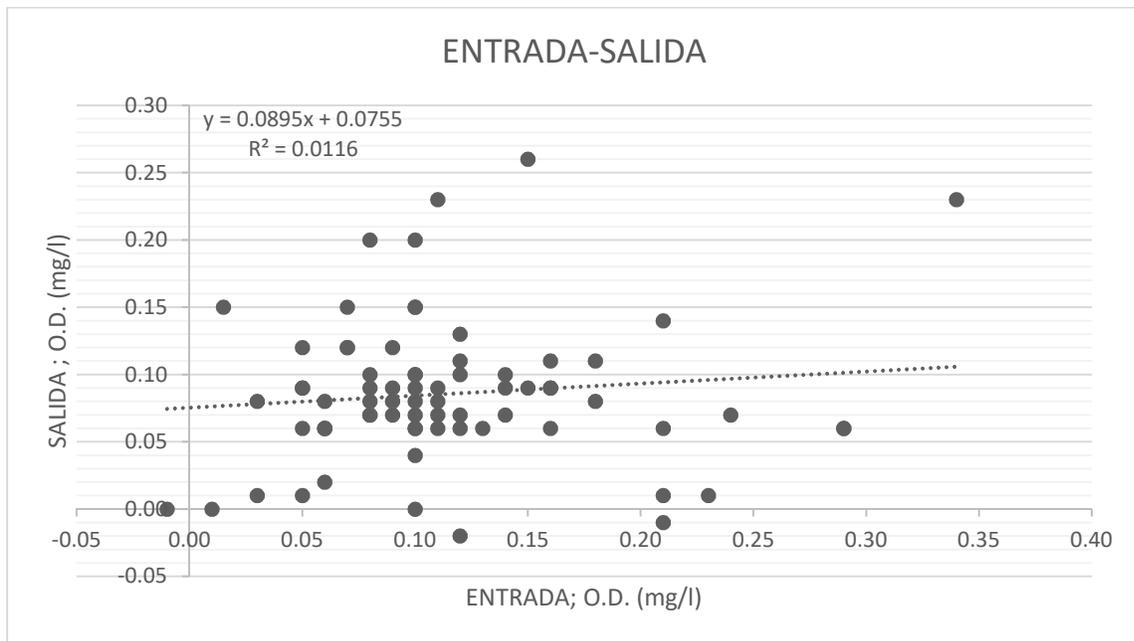
Figura 40. **Correlación de datos de O.D. a 0.75 m de profundidad en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna**



(a)



(b)

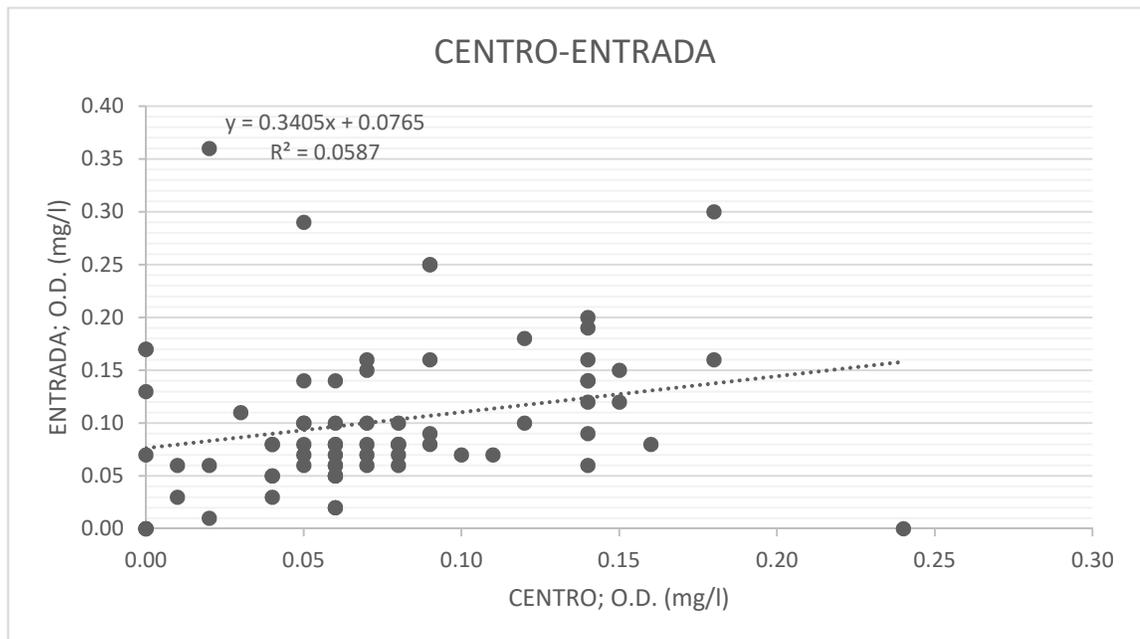


(c)

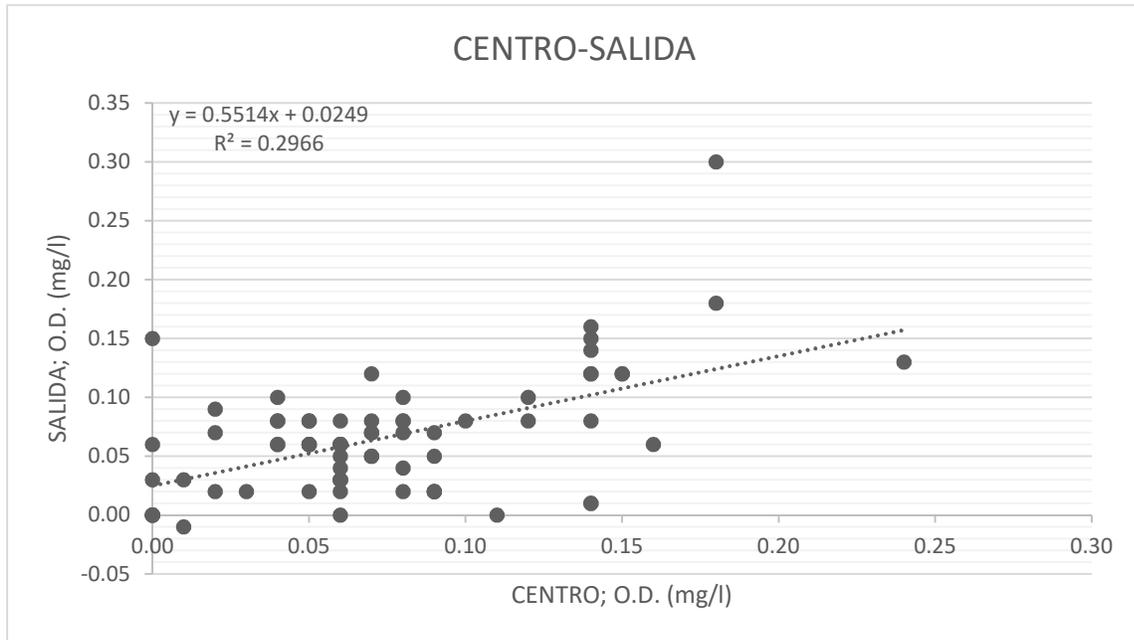
Fuente: elaboración propia.

Los datos de O.D. a media profundidad de la laguna (0.75m) no son representativos a lo largo de la laguna, debido a bajas correlaciones que se obtuvieron ( $R^2$ ) 0.0166, 0.2544 y 0.0116 para entrada-centro, salida-centro y entrada-salida respectivamente. Estas variaciones se deben a las bajas concentraciones que oxígeno disuelto presentes a la profundidad señalada, por tal motivo cuando hay pequeños cambios de O.D. siempre afecta la dinámica de un punto a otro, porque no siempre tienen la misma variación en el mismo tiempo. Y se deduce que a esa profundidad siempre existe una dinámica en la concentración de oxígeno disuelto. Estas correlaciones se pueden observar en la figura 40, en donde entrada-salida (figura c) presenta mayor variación en los datos, mientras que centro-salida (figura b) obtuvo el mayor coeficiente de correlación, debido a mayor concentración de datos con relación a la media.

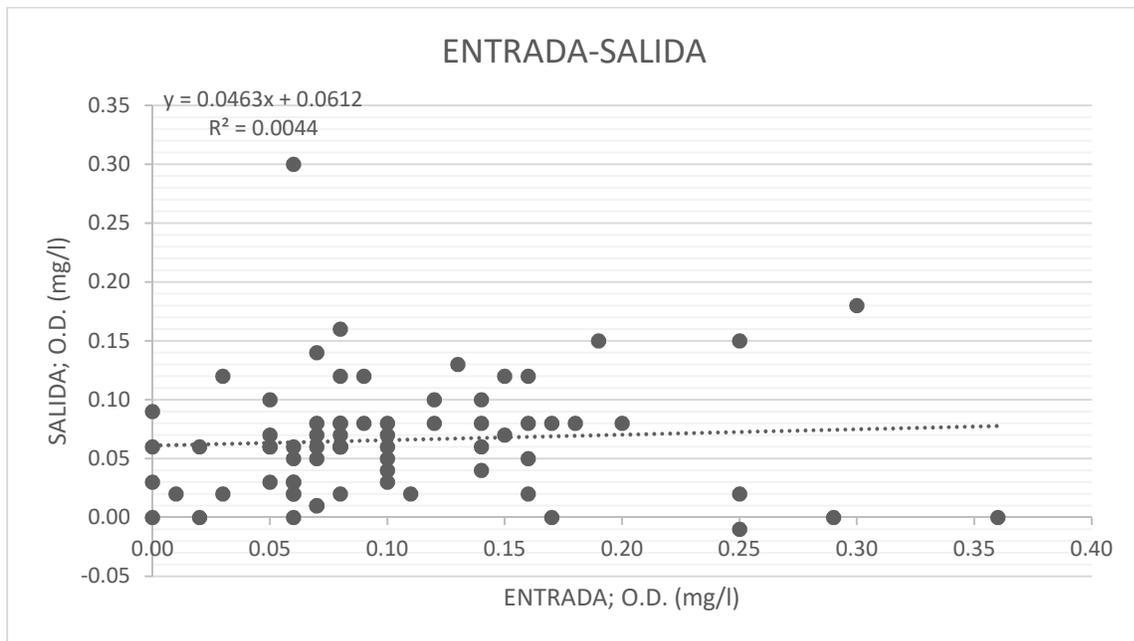
Figura 41. **Correlación de datos de O.D. de fondo en entrada-centro, salida-centro y entrada-salida de la laguna**



(a)



(b)



(c)

Fuente: elaboración propia.

Al igual que los datos de media profundidad (0.75m). Los datos de O.D. del fondo no son representativos a lo largo de la laguna, debido a bajas correlaciones que se obtuvieron ( $R^2$ ) 0.0587, 0.2966 y 0.0044 para entrada-centro, salida-centro y entrada-salida respectivamente. A esta profundidad, la que obtuvo mayor coeficiente de correlación  $R^2$  es centro-salida con 0.2966 en la figura 41 (b) se observa una concentración de datos iniciales, pero a medida que la concentración aumenta también la dispersión de datos aumenta, mientras que las otras correlaciones presentaron una mayor dispersión en todos los datos.

#### **4.3. Dinámica del oxígeno disuelto en la superficie**

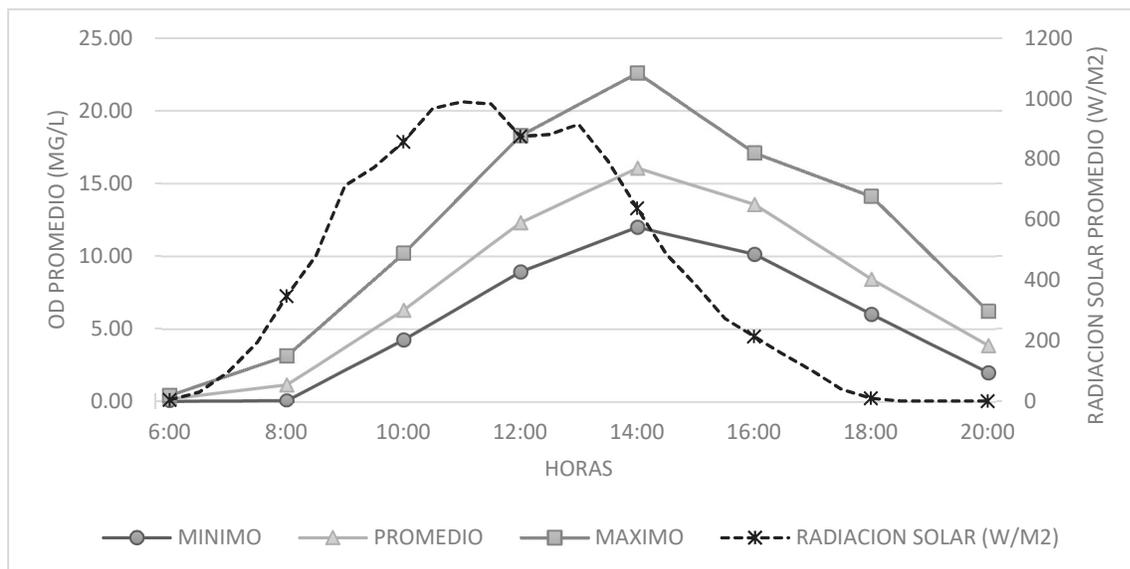
En el capítulo anterior, se muestran resultados de oxígeno disuelto de las mediciones diarias que se realizaron con frecuencia semanal para cada punto y horario específico. En la figura 42, se muestra el resumen de datos superficiales de O.D. de la laguna y promedio de radiación solar.

Con la salida del sol cerca de las 6:00 horas la radiación solar empieza a aumentar, los incrementos de gradiente de radiación estuvo entre 1.30-4.05  $W/m^2/hora$  obteniendo la mayor radiación entre 11:00 a 13:00 horas la mayor parte del tiempo. Al igual que la radiación solar, el oxígeno disuelto va en aumento desde el amanecer hasta lograr valores máximos cerca de 20 mg/l a las 14:00 horas. Después de alcanzar el máximo valor la radiación empieza a decrecer hasta llegar a valores cercanos de 0  $W/m^2$  a las 18:00 horas con gradientes de decrecimiento que varían en función del tiempo teniendo valores entre 0.90-2.75  $W/m^2/hora$  entre 14:00 a 16:00 horas y 2.00-3.95  $W/m^2/hora$  entre 18:00 a 20:00 horas.

Lo mismo sucede con el oxígeno disuelto que empieza a decrecer, a partir de las 14:00 horas llegando a valores cercanos a 4 mg/l a las 20:00 horas. Los

gradientes de crecimiento y decrecimiento del oxígeno disuelto varían entre 0.5-3.0 mg/l/hora y 1.20-2.50 mg/l/hora respectivamente.

Figura 42. **Oxígeno disuelto promedio, mínimo y máximo; y radiación solar promedio**



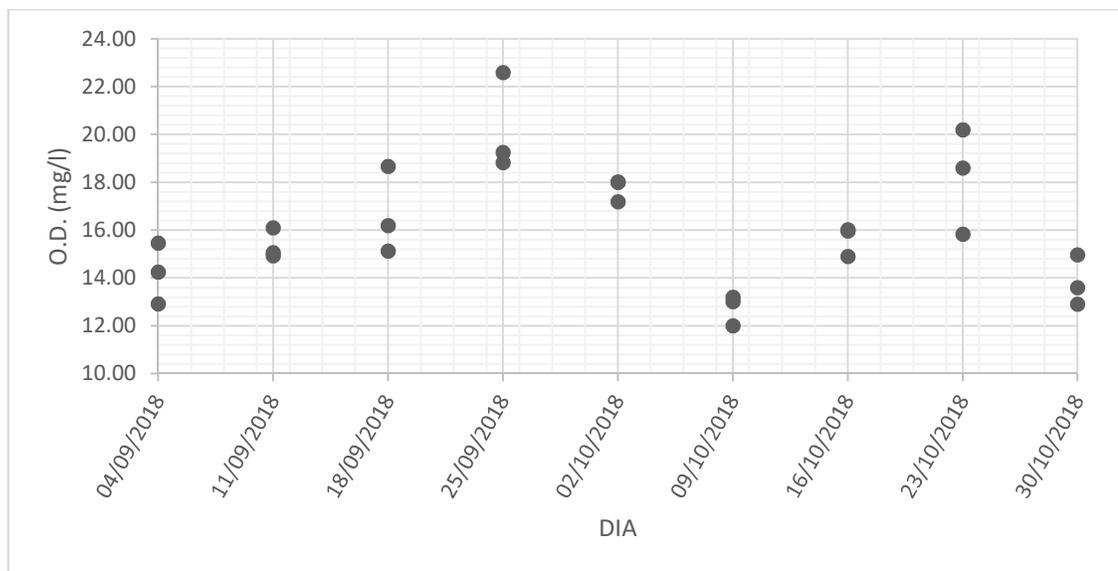
Fuente: elaboración propia.

En las primeras horas de la salida del sol la dispersión del oxígeno disuelto es mínimo y esta dispersión aumenta hasta tener valores altos cuando se alcanza la máxima concentración de O.D. la desviación estándar de O.D. a las 6:00 horas es de 0.09, mientras que a las 14:00 horas es de 2.55 mg/l. Esta dispersión se debe principalmente a la alta actividad fotosintética de las algas. También se observa que a medida que decrecen los valores de O.D. también decrece la dispersión de datos, entre ellos.

Los datos muestran una mayor concentración de O.D. a las 14:00 horas tendiendo valores mínimos y máximos de 12.00 y 22.59 mg/l respectivamente con un valor promedio de 16.06 mg/l, la menor concentración de O.D. se

obtuvieron el día 04 de septiembre y 09 de octubre de 2018, mismo día en donde la radiación solar fue menor al promedio presentado durante las mediciones, la radiación máxima alcanzada esos días fueron de 858 y 907 W/m<sup>2</sup> respectivamente, lo cual fue solo un pico durante las 10:00 horas pasando la mayor parte del día nublado, lo cual incidió en la actividad de las algas presentes en la laguna. El comportamiento de oxígeno disuelto máximo se puede observar en la siguiente figura.

Figura 43. **Concentración de O.D. en horario de 14:00 horas**



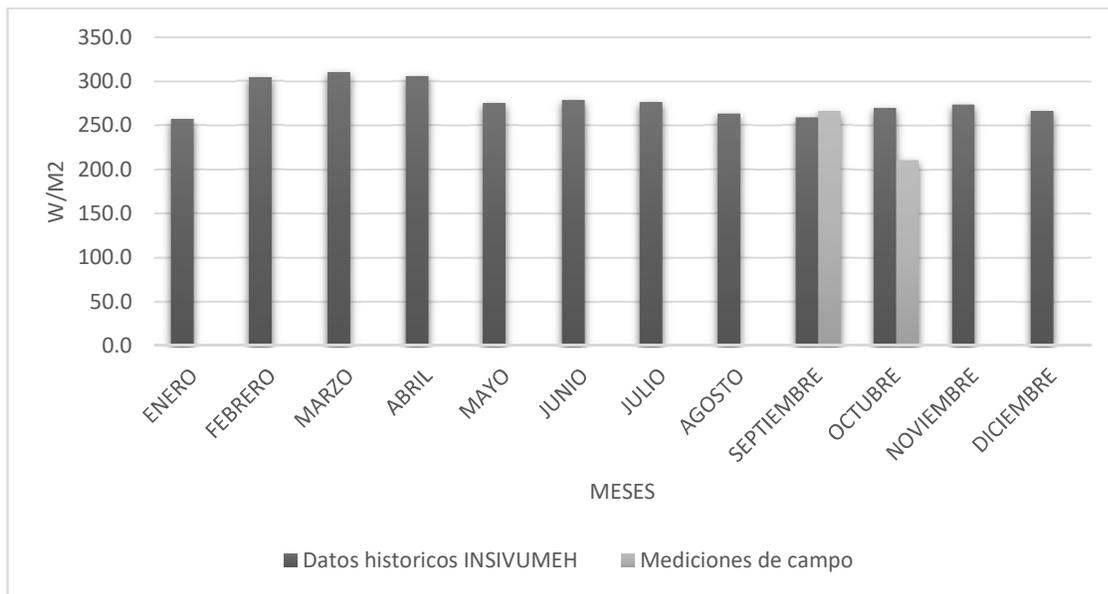
Fuente: elaboración propia.

Mientras la temperatura media de la laguna alcanzó su valor máximo entre las 12:00-14:00 horas, lo cual se asemeja con los datos de temperatura obtenidos en la investigación de Montoya y Gattorno (2018), donde indican que 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.

Las sobresaturaciones de oxígeno disuelto durante horas de la tarde en la laguna facultativa revelan la existencia de procesos fotosintéticos típicos en estas lagunas, mientras las bajas concentraciones inducen a un proceso de hipoxia o anoxia en horas de la noche, debido a la ausencia de fotosíntesis.

**Figura 44. Radiación solar promedio, datos INSIVUMEH y datos de campo**



Fuente: elaboración propia.

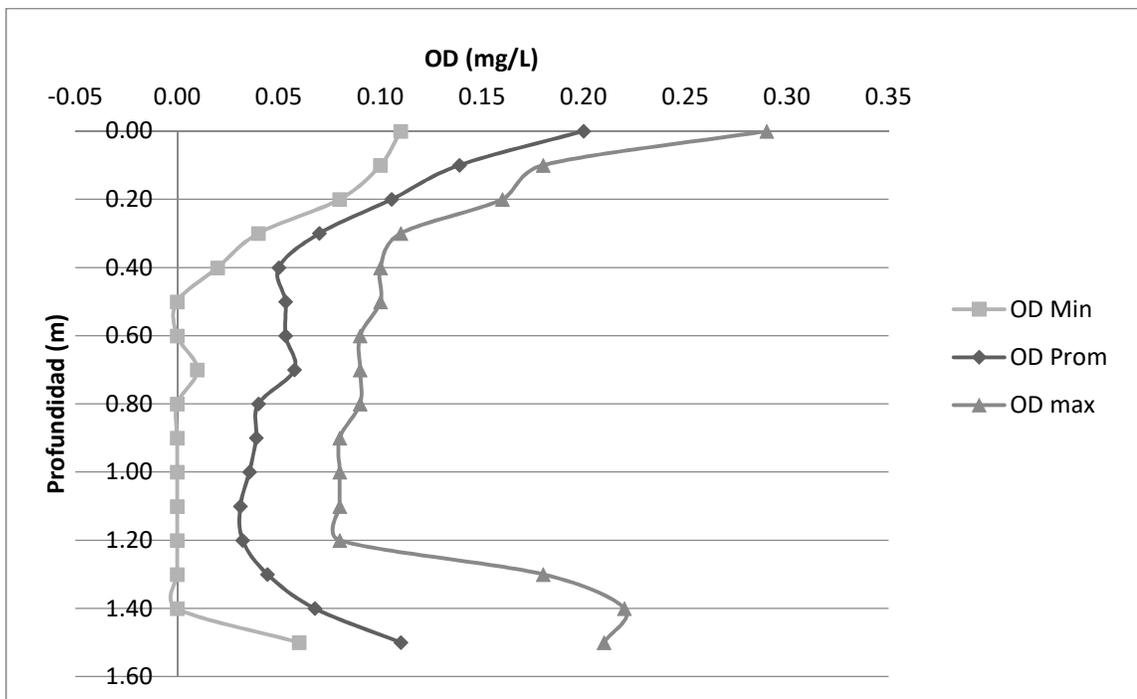
En la figura 44, se presentan los datos históricos de radiación solar promedio del INSIVUMEH, durante los meses del año se observa que en los primeros del año (febrero, marzo y abril) se obtiene la radiación promedio más altos que los otros meses. Lo cual indica que durante esa época la actividad

fotosintética de las algas es mayor, por ende, la concentración de oxígeno disuelto sería más alta en esos meses. También se observa que la radiación solar promedio durante el período de estudio varía levemente logrando una radiación promedio mayor en septiembre y menor en octubre, lo cual incide directamente en la dinámica del oxígeno disuelto.

#### 4.4. Perfiles de oxígeno disuelto

Durante las mediciones de oxígeno disuelto se consideraron tomar datos a cada 0.10 m para obtener perfiles que muestren la concentración de O.D. a lo largo de la profundidad de la laguna. En la tabla XV, XVI y XVII se muestran resultados en horario de 6:00, 12:00 y 18:00 horas respectivamente.

Figura 45. Perfil promedio, mínimo y máximo de O.D. (6:00 horas)



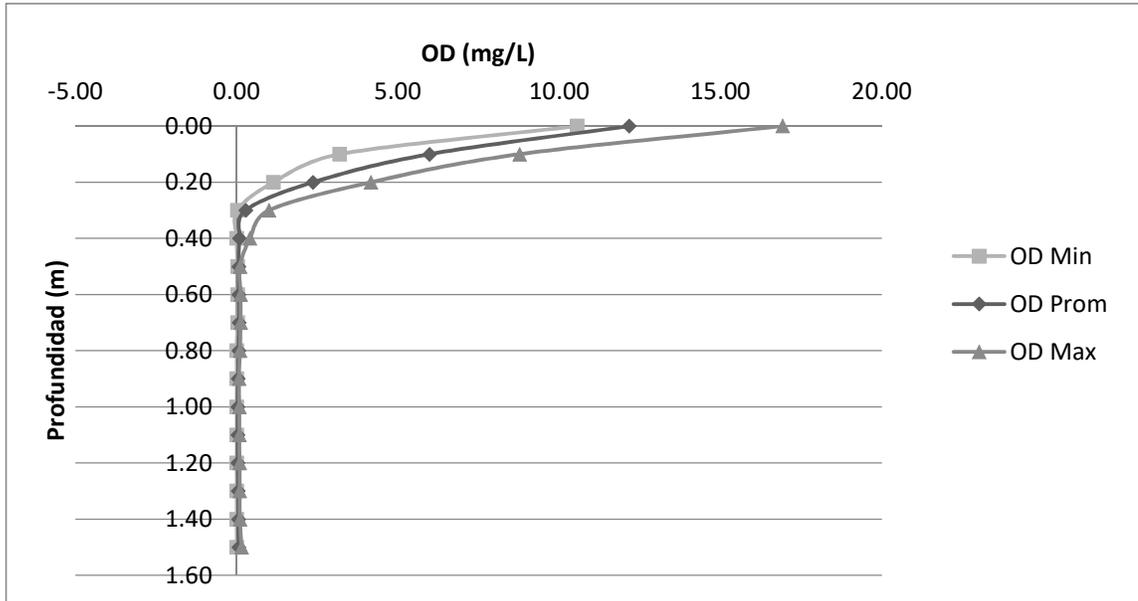
Fuente: elaboración propia.

En la figura 45, se muestra el perfil de O.D. a cada 0.10 m durante 2 meses con frecuencia semanal en horario de 6:00 horas, se observa que en la superficie presenta mayor concentración de O.D. mientras se va bajando en profundidad, el O.D. disminuye logrando valores muy cercanos a 0 mg/l tendiendo saltos cercano al fondo de la laguna, debido a la destratificación durante horas de la madrugada. 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. (Montoya López y Gattorno Fúnez, 2018)

El déficit de oxígeno disuelto observado en el estrato superior de la columna de agua durante las primeras horas de medición, se debió a su consumo por los procesos de descomposición de la materia orgánica durante el ciclo oscuro, cuando no ocurre compensación a través de producción, por la actividad fotosintética del producto fitoplancton (Kayombo *et al*, 2002).

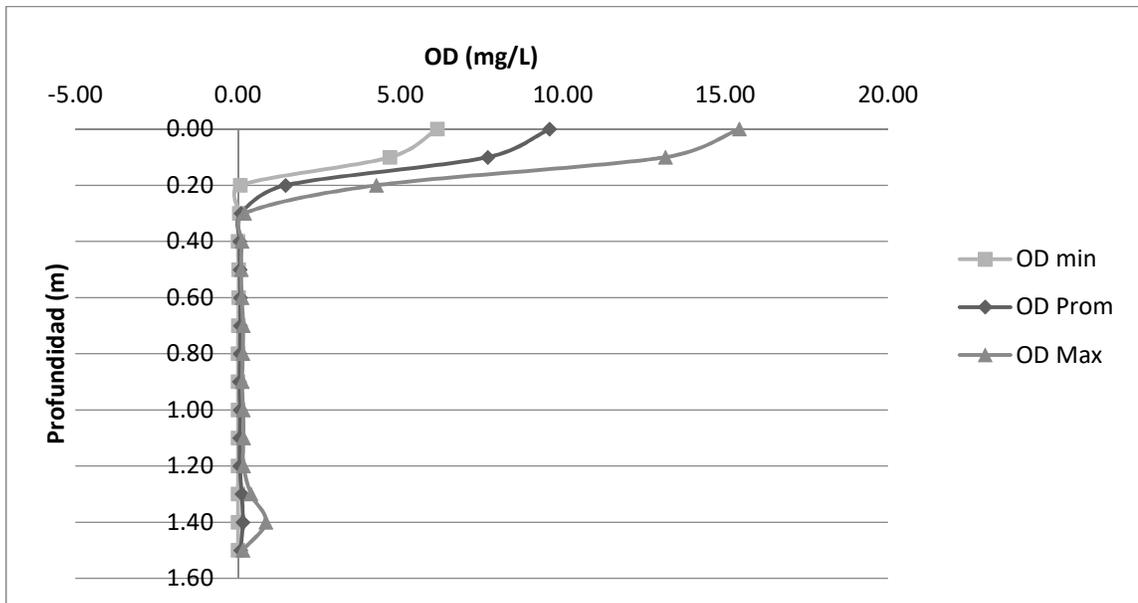
Los perfiles obtenidos a las 12:00 y 18:00 horas muestran una clara estratificación de concentración de oxígeno disuelto. En los primeros 0.30 m de la superficie se alcanzaron valores cercanos a 12 mg/l a las 12:00 horas y teniendo valores cercanos de 0 mg/l, a partir de esa profundidad hasta el fondo de la laguna. Mientras a las 18:00 horas se obtuvieron valores alrededor de 10 mg/l en los primeros 0.20 m, y desde esa esa profundidad hasta el fondo de la laguna se obtuvieron valores cercanos a 0 mg/l.

Figura 46. Peril promedio, mínimo y máximo de O.D. (12:00 horas)



Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Peril promedio, mínimo y máximo de O.D. (18:00 horas)



Fuente: elaboración propia.

Mara (2003), indica que una buena mezcla en la laguna asegura una distribución uniforme de la DBO, el oxígeno disuelto, bacterias y algas y como consecuencia, se obtiene un mejor grado de estabilización del agua. La mezcla es importante, porque proporciona una distribución más uniforme de la temperatura, del oxígeno y de las algas en toda la laguna.

En los perfiles de 6:00 horas, se observa la mezcla del oxígeno disuelto, lo cual sucede en las primeras horas de radiación solar, comparado con los resultados obtenidos por Montoya y Gattorno (2018), en donde casi todo el tiempo la mezcla sucedió durante la madrugada (0:00-6:00 horas), por lo que se puede comprobar que la mezcla del O.D. depende del comportamiento térmico de la laguna. Mientras a las 12:00 y 18:00 horas, la concentración de oxígeno disuelto se encuentra estratificada igual como sucede con la temperatura.

Esta estratificación puede deberse a la ausencia de la influencia del viento sobre el mezclado, la población de alga tiende a estratificarse en capas, las algas concentradas se mueven hacia arriba y hacia abajo en respuesta a los cambios de intensidad de luz, esta estratificación sugiere fluctuaciones en la calidad final, esto en términos de DBO y SS (Mara, 2003). Por el efecto del viento en el mezclado, se recomienda una longitud de contacto sin obstrucciones de unos 100 m para una mezcla máxima por acción del viento.

#### **4.4.1. Variación de la profundidad de la oxipausa**

De acuerdo a Yáñez (1993), la oxipausa es la profundidad a la que el oxígeno disuelto es cero. En la figura 48 (a) que corresponde al mes de septiembre en horario de 6:00 horas se observa una relativa distribución de O.D. a lo largo de la profundidad, es decir, una clara mezcla (baja estratificación), por lo que la oxipausa a esa hora es nula.

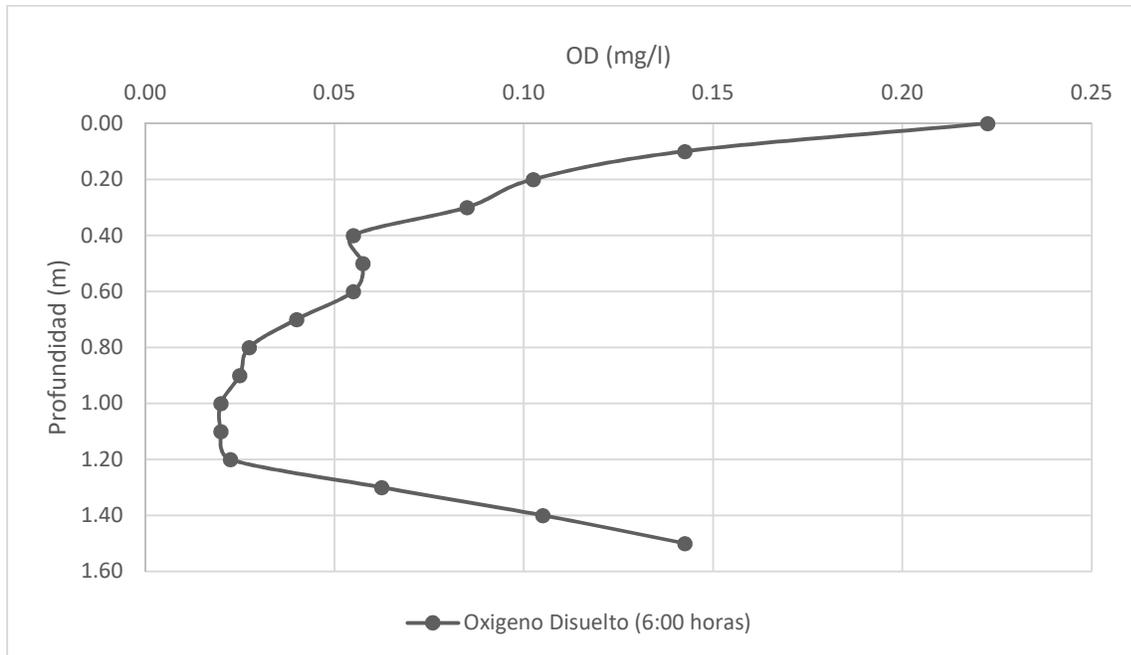
No obstante, el oxígeno disuelto de las 12:00 horas (Figura 48, b) presenta estratificación a lo largo de la profundidad ubicando de esa manera la oxipausa a una profundidad promedio de 0.30 m de la superficie. Los restantes 1.20 m se mantuvo invariable con concentraciones de O.D cercanos a 0 mg/l, las siguientes mediciones realizadas a las 18:00 horas presentan un comportamiento similar al de las 12:00 horas, ubicando la oxipausa a 0.30 m de la superficie.

Montoya y Gattorno (2018), identificaron una menor altura del epilimnio durante la temporada más fría con respecto a la temporada más caliente. Lo cual sugiere que durante la temporada más fría se podría encontrar condiciones, con una menor distribución de oxígeno disuelto (pudiendo verse limitado a los primeros 0.25 m).

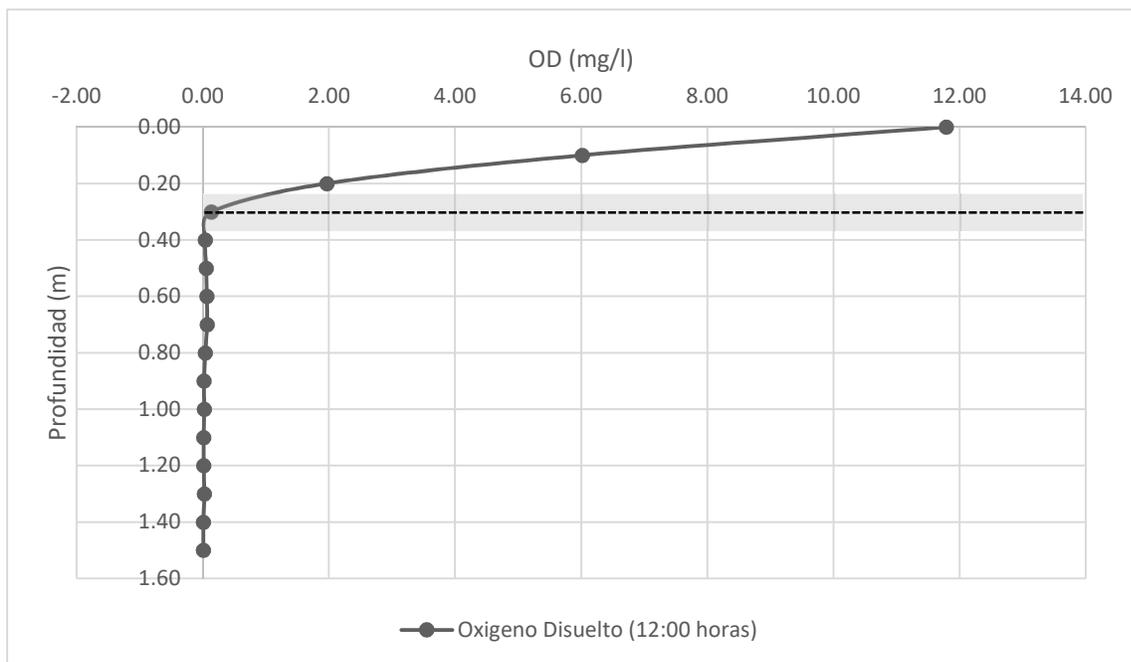
En las mediciones realizadas a las 12:00 horas, se puede observar una pequeña variación de la oxipausa, en el mes de septiembre se ubica a 0.30 m mientras en octubre a 0.40 m, esta variación se debe a factores externos, influenciados por la radiación solar, viento, temperatura del aire y principalmente por la dinámica de la temperatura de la laguna que condiciona la estratificación o destratificación.

Las figuras 48 y 49 muestran las variaciones de la oxipausa para los meses de septiembre y octubre respectivamente, calculados a partir de datos promedios de oxígeno disuelto en los horarios específicos de 6:00, 12:00 y 18 horas.

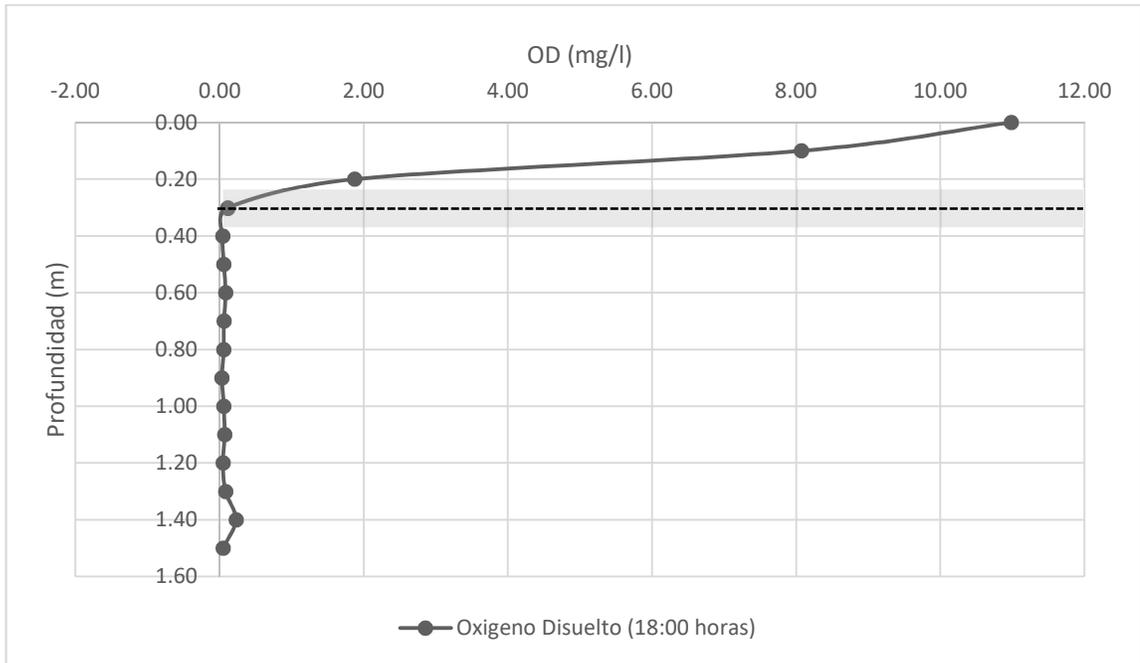
Figura 48. Variación promedio de la oxipausa en el mes de septiembre



(a)



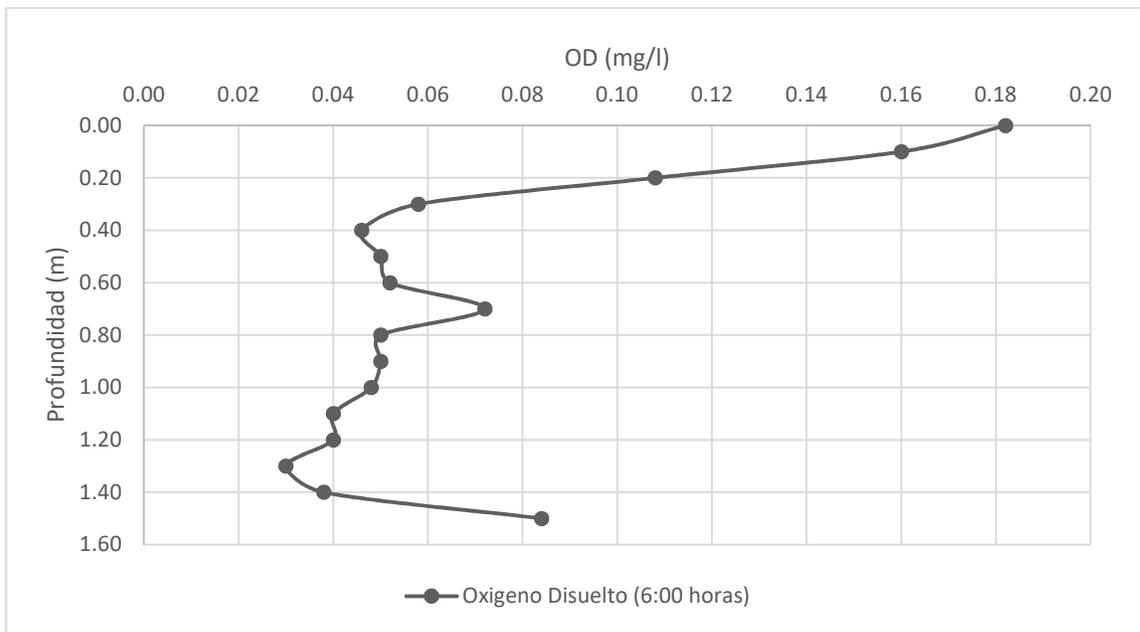
(b)



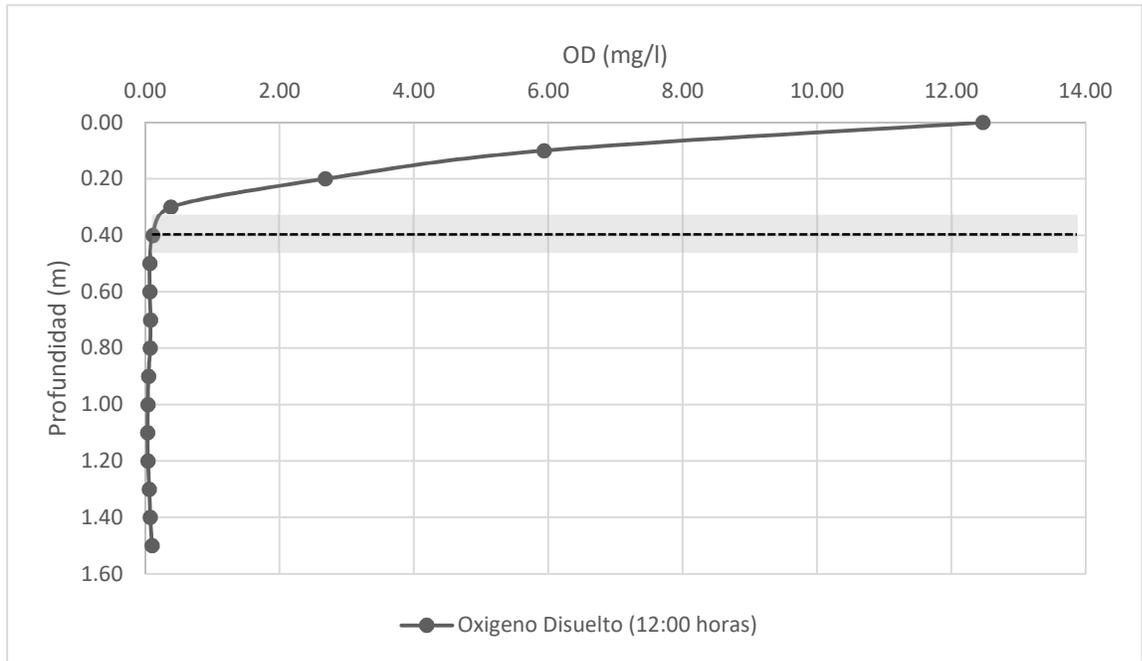
(c)

Fuente: elaboración propia.

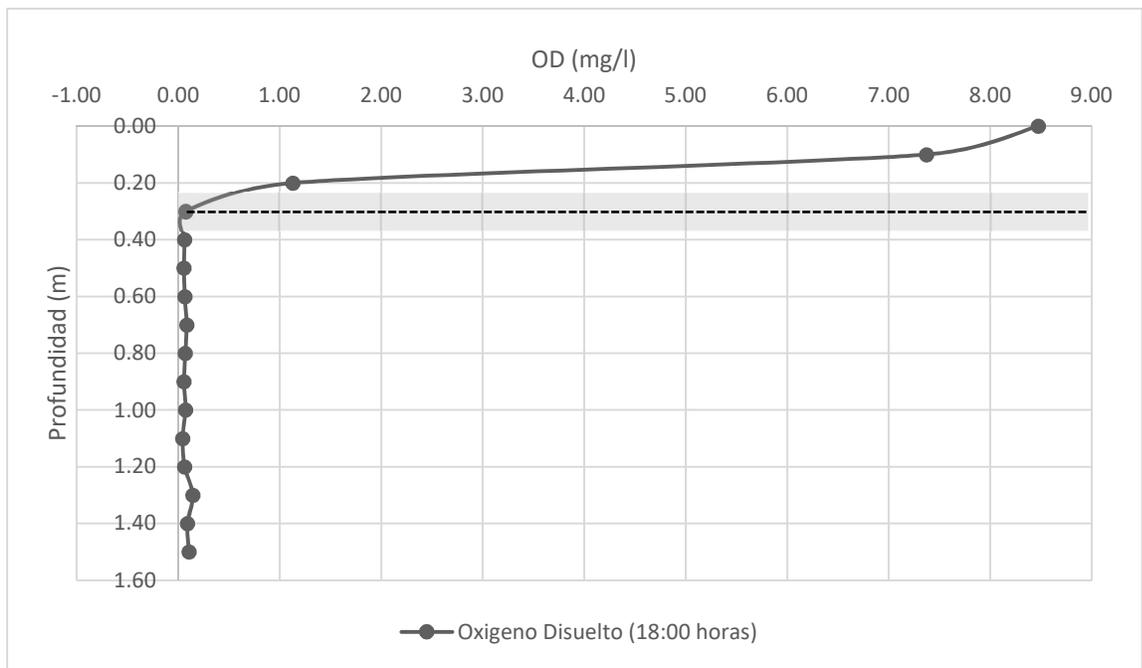
Figura 49. Variación promedio de la oxipausa en el mes de octubre



(a)



(b)



(c)

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. La concentración de oxígeno disuelto a lo largo de la laguna varía en función de la radiación solar, logrando concentraciones en la superficie mayores de 20 mg/l la mayor parte del tiempo a las 14:00, con ello se comprueba la hipótesis de investigación, mientras la radiación solar alcanza su máximo valor entre 11:00 y 13: horas.
2. A primera hora del día, el O.D. tiene valores cercanos a 0 mg/l, con la salida del sol el oxígeno disuelto va en aumento desde el amanecer hasta lograr valores máximos cerca de 20 mg/l a las 14:00 horas después empieza a decrecer llegando a valores cercanos a 4.50 mg/l a las 20:00 horas. Los gradientes de crecimiento y decrecimiento del oxígeno disuelto varían entre 0.5-3.0 mg/l/hora y 1.20-2.50 mg/l/hora respectivamente. El mismo fenómeno sucede con la radiación solar después de alcanzar su máximo entre 11:00 a 13:00 horas valor empieza a decrecer hasta llegar a valores cercanos de 0 W/m<sup>2</sup> a las 18:00 horas.
3. El contenido de oxígeno disuelto varía de acuerdo a la profundidad y la hora del día. En la superficie se obtuvieron coeficientes de correlación entre 0.90-0.94 con correlaciones entrada-centro, salida-centro y entrada-salida. A partir de los valores obtenidos de R<sup>2</sup> se deduce que son representativos desde cualquier punto de medición. Mientras a profundidades de 0.75 m y 1.50 m (fondo) las correlaciones estuvieron entre 0.01-0.30, por lo cual las mediciones no son representativas a lo largo de la laguna.

4. La baja estratificación térmica durante las primeras horas de la mañana permite cierto grado de mezcla, logrando una relativa distribución de oxígeno disuelto a lo largo de la laguna no presentando oxipausa a esa hora. Al medio día (12:00 horas) el oxígeno disuelto se concentra en los primeros 0.25 m. Mientras en la tarde (18:00 horas), el oxígeno disuelto está concentrado en los primeros 0.30 m, pero con una concentración de O.D. en descenso por falta de radiación solar a esa hora. Para los horarios de medición de 12:00 y 18:00 horas, la oxipausa se ubicó entre los 0.30-0.40 m de la superficie de la laguna.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar con la investigación de oxígeno disuelto empleando un sistema automático de medición, para mejor representatividad de datos considerando al menos un año de medición, y correlacionar con datos de temperatura.
2. Evaluar el sistema lagunar con los parámetros degradables ( $\text{DBO}_5$  y DQO) a diferentes horarios del día y correlacionar con datos de oxígeno disuelto.
3. Evaluar y analizar la relación que existe entre los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y pH, y cómo interfieren en la calidad final del efluente de una laguna de estabilización.



## BIBLIOGRAFÍA

- APHA-AWWA-WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales*. Madrid: Díaz de Santos.
- Arceivala, S. J., et al. (1970). *Waste Stabilization Ponds: Design, Construction & Operation in India*. Nagpur, India: Central Public Health Engineering Research Institute.
- Ayala Fanola, R. M., & Gonzales Marquez, G. (2008). *Apoyo didáctico en la enseñanza-aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Bolivia: Universidad Mayor de San Simon.
- Changi W.Y.B. and Hai Ouyang. (1988). *Dynamics of Dissolved Oxygen and Vertical Circulation in Fish Ponds*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Clair N. Sarwey, P. L. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. Colombia: McGRAW-HILL.
- CONAGUA. (2016). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Goyenola, G. (2007). *Cartilla Guía para la utilización de las Valijas Viajeras*. Uruguay: Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos.

- Jay L. Devore. (2010). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. D.F. Mexico: Cengage Learning.
- Kayombo, S., Mbwette, T. S., Mayo, A. W., Katima, J. H. and orgensen, S. E. (2002). Diurnal Cycles of Variation of Physical-Chemical Parameters in Waste Stabilization Ponds. *Revista Ecological Engineering*. Vol. 18., 287-291.
- Leon Suematsu, G. (1995). *Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización*. Colombia: CEPIS.
- Mara, D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: UK: MapSet.
- Metcalf y Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento vertido y reutilización*. Madrid: Mcgraw-Hill, Inc.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes: MOPT. (1991). *Depuración por lagunaje de aguas residuales : Manual de operadores*. Madrid, España.
- Mohamed Ismail , M. M., & Kasubuchi, T. (1998). *Dynamics of dissolved oxygen (DO) in ponded water of a paddy field*. [wate University, Morioka.
- Montoya López, A. S., & Gattorno Fúnez, J. F. (2018). *Comportamiento de la temperatura agua-aire y la estratificación térmica de una laguna facultativa*. Guatemala: ERIS-USAC.
- Restrepo, G. C. (2008). *Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fe de Antioquia Colombia*. Medellin: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Antioquia.
- Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Stewart M. Oakley. (2005). *LAGUNAS DE ESTABILIZACION EN HONDURAS. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*. Chico, California: Universidad Estatal de California.
- Thirumurthi, D. (1991). *Biodegradation in Waste Stabilization Ponds (Facultative Lagoons)*. Gran Bretaña: Elsevier Applied Science.231-246.
- Yanez Cossio, F. (1993). *Lagunas de Estabilización. Teoría, diseño evaluación y mantenimiento*. Ecuador: Imprenta Mansalve.



## ANEXO

### Anexo I. Especificaciones YSI PRO20

Parámetro	Rango	Resolución	Exactitud
Temperatura	-5 a 55 °C *	0,1 °C	± 0,3 °C
	23 a 113 °F	0,1 °F	± 0,6 °F
Oxígeno disuelto	0 a 200% de saturación de aire	1% o 0,1%, seleccionable por el usuario	± 2% de la lectura o 2% de saturación del aire, lo que sea mayor
	200 a 500% de saturación de aire	1% o 0,1%, seleccionable por el usuario	± 6% de la lectura
	0 a 20 mg/L	0,1 ó 0,01 mg/L, seleccionable por el usuario	± 2% de la lectura o 0,2 mg/L, lo que sea mayor
	20 a 50 mg/L	0,1 ó 0,01 mg/L, seleccionable por el usuario	± 6% de la lectura
Barómetro	400,0 a 999,9 mmHg**	0,1 mmHg	± 5 mmHg dentro de 5 °C de la temperatura de calibración***

\* El rango de compensación automática de la temperatura del oxígeno disuelto es de -5 a 45 °C

\*\*Las unidades barométricas disponibles incluyen: mmHg, inHg, mbar, PSI o KPa

\*\*\*Para temperaturas de operación por debajo de 10 °C o por encima de 40 °C, hay que recalibrar el barómetro para mantener la especificación de su exactitud.

Fuente: manual del usuario YSI PRO20.

## Anexo II. Especificaciones de Davis Vantage Pro 2

<b>Parámetro</b>	<b>Resolución</b>	<b>Rango</b>	<b>Precisión nominal</b>
Radiación solar	1 W/m <sup>2</sup>	0-1800 W/m <sup>2</sup>	5% de 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).
Velocidad del viento	1 mph; 1 kt; 0.4 m/s; 1 km/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%

Fuente: Manual de la consola Davis Vantage Pro 2.