



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE CALIDAD DE AGUA EN LA
PROFUNDIDAD DE LA LAGUNA CARÉN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOAQUÍN IGNACIO RIASTE CAMPILLAY

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANA LUCÍA PRIETO SANTA
KATHERINE LIZAMA ALLENDE

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL
POR: JOAQUÍN IGNACIO RIARTE CAMPILLAY
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE CALIDAD DE AGUA EN LA PROFUNDIDAD DE LA LAGUNA CARÉN

La eutrofización es inherente a cualquier cuerpo de agua ya sea laguna o humedal. Esta depende de las concentraciones de nutrientes al interior de la laguna y permite clasificar al cuerpo de agua según la cantidad de nutrientes y clorofila en su interior. La clasificación viene dada por concentraciones de nutrientes y clorofila.

El Caso de estudio es la Laguna Carén (Pudahuel, Región Metropolitana, Chile).

El objetivo principal de este trabajo es obtener las concentraciones de nutrientes y elementos químicos para conocer el grado de eutrofización de la laguna, todos estos en función de la altura de la laguna y el tiempo. La importancia de esto radica en que la laguna es una zona donde conviven flora y fauna. Hay que considerar el tránsito de gente ya que la laguna está inserta en un parque recreativo lo que aumenta el riesgo del ecosistema. Entonces se hace de vital importancia conocer el estado de la laguna, la salud del ecosistema.

Para aquello hay que seguir una metodología: el software seleccionado para realizar este trabajo se llama GLM Model Lake. Este obtiene parámetros hidrodinámicos, de calidad del agua y medio ambiente. Todo esto en función de una dimensión (altura) y el tiempo.

Requiere como datos de entrada diversas variables meteorológicas como Radiación solar incidente, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura del aire y precipitación. Carén cuenta con una estación meteorológica de monitoreo. Los datos que no se conozcan se obtendrán correlacionando con la estación más cercana que es la de Rinconada en Maipú.

Deben incluirse los flujos de agua afluentes y efluentes junto con su concentración de nutrientes vertidos a la laguna para los casos de afluentes.

Otro aspecto a considerar es la batimetría de la laguna, para conocer el área en función de la altura. De esta manera se puede obtener el volumen del cuerpo de agua.

Luego de ingresar las variables meteorológicas y afluentes se procede a simular en GLM, obteniéndose la temperatura y densidad en toda la columna de agua. Los resultados se validan, por comparación, con los que aportan las boyas con termistores existentes en Carén.

Se agrega un módulo a GLM denominado AED2, mediante el cual se obtiene la calidad del agua de la Laguna. Se obtienen concentraciones de PO_4 , NH_4 , NO_3 , clorofila total y O_2 . También se calcula el valor del pH. Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad variando algunos parámetros en la laguna para ver cómo responde el sistema. Entre ellos se varía los flujos de nutrientes afluentes e intercambio de sedimentos al interior de la laguna.

Gracias a todos.

Saludos

Agradecimientos

Quisiera agradecer luego de realizar este trabajo de investigación, a mi papá y mamá por ayudarme en todo momento. Siempre que los necesité ellos estuvieron ahí por si necesitaba algo, algún consejo o ayuda.

A mi hermano Ítalo que siempre ha estado en todas conmigo y por todas sus ayudas.

A mis amigos (los primeros) Aileén, Dimitri, Eduardo y Dieguín. Cuantos momentos que pasamos juntos en la U.

Por otro lado a mis amigos de después, el Frodo, el Pablo y el Carlos, que nos reuníamos siempre a almorzar y conversar.

Quiero agradecer a mi profesor guía Alberto por ayudarme en este proceso, en el cual cualquier duda que tuviese quedaba resuelta. Gracias por su ayuda profesor.

Agradecer también a la profesora Katherine Lizama y Ana Lucía Prieto por formar parte de mi comisión.

Finalmente agradecer al fondo Fondecyt N°1181222 por entregar el financiamiento para llevar a cabo este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Organización del Informe	4
2. Revisión Bibliográfica	5
2.1. Antecedentes generales de cuerpos de agua dulce	5
2.2. Antecedentes lagunas someras	6
2.3. Antecedentes de calidad del agua	7
2.3.1. Ciclo de Nutrientes en la laguna	9
2.3.1.1. Ciclo del Oxígeno	9
2.3.1.2. Ciclo del Nitrógeno	10
2.3.1.3. Ciclo de fósforo	11
2.4. Ecuaciones principales	12
2.4.1. Ecuaciones software GLM	12
3. Metodología	17
3.1. Lugar de estudio	17
3.2. Mediciones en terreno	18
3.3. Mediciones batimetría	21
3.4. Mediciones estación meteorológica	23
4. Resultados	29
4.1. Hidrodinámica de la laguna	29
4.2. Calidad del agua en la laguna	36
4.2.1. Fosfato	39
4.2.2. Ión Amonio	41
4.2.3. Nitrato	42
4.2.4. Clorofila	43
4.2.5. Oxígeno Disuelto	44
4.2.6. pH	47
4.2.7. Análisis de sensibilidad	48
4.2.7.1. Respuesta Fosfato	50
4.2.7.2. Respuesta Amonio	51
4.2.7.3. Respuesta Nitrato	52
4.2.7.4. Respuesta de Clorofila	53

4.2.7.5.	Respuesta Oxígeno disuelto	54
4.2.7.6.	Respuesta pH	55
4.2.7.7.	Concentraciones totales y calidad del agua de la laguna . . .	57
5.	Comentarios y Conclusiones	59
5.1.	Recomendaciones	61
	Bibliografía	63
	Anexo A. Cálculos realizados	65
A.1.	Metodología	65
A.2.	Resultados	65

Índice de Tablas

2.1.	Parámetros principales laguna somera	7
2.2.	Parámetros de calidad del agua en lagunas someras	8
2.3.	Clasificación de la laguna según nutrientes	8
2.4.	Decreto supremo 90	9
3.1.	Coordenadas UTM boyas y estación meteorológica huso 19 Sur.	19
3.2.	Geomorfología Carén.	21
3.3.	Geomorfología Carén.	21
3.4.	Curva Hipsométrica terreno Laguna Carén.	22
3.5.	Ajuste lineal correlaciones entre estaciones.	25
4.1.	Error cuadrático medio de las mediciones.	34
4.2.	Concentraciones de nutrientes fósforo y potasio.	36
4.3.	Condiciones iniciales.	37
4.4.	ECM fosfato	39
4.5.	ECM ión amonio.	41
4.6.	ECM nitrato.	42
4.7.	ECM O_2	46
4.8.	ECM pH.	48
4.9.	Flujo de sedimentos en la laguna.	49
4.10.	Elementos químicos afluente iniciales y finales (análisis de sensibilidad).	49
4.11.	Concentraciones totales para configuración inicial.	49
4.12.	Concentraciones totales para configuración final (análisis de sensibilidad).	49
4.13.	ECM configuración inicial.	57
4.14.	ECM respuestas.	57
4.15.	Concentraciones promedio de nutrientes en la laguna para configuración inicial.	58
4.16.	Concentraciones promedio de nutrientes en la laguna para configuración final.	58
5.1.	Concentraciones totales para datos de muestreos más cercanos.	60
A.1.	Variables de calidad del agua en la laguna (Boya Sur).	65
A.2.	Variables de calidad del agua en la laguna (Boya Norte).	66
A.3.	Variables de calidad del agua en la laguna (PTAS).	66
A.4.	pH (Punto 1, 2 y 3).	67

Índice de Ilustraciones

1.1.	Vista posterior Laguna Carén, sector Este, (Mapio, 2020).	2
1.2.	Gráfica nutrientes en el tiempo (Aránguiz, 2019).	3
2.1.	Turbidez en función de nutrientes (Scheffer et al., 1993).	6
2.2.	Ciclo del Nitrógeno y Fósforo (Román, 2017).	11
2.3.	Esquema balance de volumen	13
3.1.	Mapa de la Laguna Carén (Román, 2017).	17
3.2.	Esquema termistores laguna (Román, 2017).	20
3.3.	Curva hipsométrica Laguna Carén.	22
3.4.	Correlaciones Humedad Relativa Y Radiación Solar Incidente.	24
3.5.	Correlaciones Velocidad del viento y Temperatura del aire.	25
3.6.	Humedad Relativa.	26
3.7.	Radiación Solar Incidente.	26
3.8.	Temperatura del Aire.	27
3.9.	Velocidad del Viento.	27
3.10.	Precipitación.	28
4.1.	Boya Norte. Termistor 0.10 metros de profundidad.	30
4.2.	Boya Norte. Termistor 0.70 metros de profundidad.	30
4.3.	Boya Norte. Termistor 1.30 metros de profundidad.	31
4.4.	Boya Norte. Termistor 1.90 metros de profundidad.	31
4.5.	Boya Norte. Termistor 2.50 metros de profundidad.	32
4.6.	Boya Sur. Termistor 0.10 metros de profundidad.	32
4.7.	Boya Sur. Termistor 1.10 metros de profundidad.	33
4.8.	Boya Sur. Termistor 2.10 metros de profundidad.	33
4.9.	Temperatura del agua en la laguna.	34
4.10.	Densidad del agua en la laguna.	35
4.11.	Esquema laguna	38
4.12.	Validación del fosfato.	39
4.13.	Concentración de fosfato.	40
4.14.	Validación del amonio.	41
4.15.	Validación del nitrato.	42
4.16.	Concentración de clorofila total promediada en la columna de agua.	43
4.17.	Concentración de clorofila total en la columna de agua.	44
4.18.	Concentración de O_2 a 10 cm de profundidad.	45
4.19.	Concentración de O_2 a 1.50 metros de profundidad.	45
4.20.	Concentración de O_2 a 2.50 metros de profundidad.	46
4.21.	Concentración de O_2 en la columna de agua.	47
4.22.	pH en la columnna de agua.	48
4.23.	Respuesta del fosfato frente a los cambios.	50

4.24.	Fosfato en la columna del agua.	51
4.25.	Respuesta del amonio frente a los cambios.	52
4.26.	Respuesta del nitrato frente a los cambios.	53
4.27.	Respuesta de la clorofila frente a los cambios.	54
4.28.	Respuesta del oxígeno disuelto frente a los cambios.	55
4.29.	Respuesta del pH frente a los cambios.	56
4.30.	pH en la columna de agua.	56

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los fenómenos y reacciones químicas que ocurren en un cuerpo de agua son importantes si se quiere conocer el grado de eutrofización de la laguna y los flujos máxicos en los sedimentos de los diferentes nutrientes en el lago. Es por esto que se estudiarán niveles de nutrientes tales como el nitrógeno (en toda su especiación), niveles de fósforo, entre otros. Es la manera de conocer el estado del lago.

Es importante investigar la calidad del agua de la laguna, midiendo sus parámetros físico-químicos principales, comparando la realidad con la simulación que realiza un software como lo es GLM. Se hace necesario comparar este modelo con la realidad, para asegurar la calidad de los datos. Por medio de esto se puede analizar la hidrodinámica y calidad del agua de la laguna Carén.

Este estudio tiene como objetivo obtener niveles de nutrientes, elementos químicos y parámetros de calidad del agua, además de parámetros hidrodinámicos del lago como lo son densidad y temperatura. Esto para cuidar la naturaleza y el medio ambiente. Para ocuparse de la salud del ecosistema y su grado de eutrofización. Ejemplo de parámetros o elementos químicos es el O_2 o el pH los cuales condicionan si puede o no haber vida en la laguna. Por otra parte saber de los efectos que provoca el lago en el medio ambiente y el ecosistema. Ecosistema se define como un conjunto de organismos vivos que comparten un mismo hábitat (Ingeoexpert, 2019). El fin último es el cuidado de la naturaleza a través de una serie de mediciones relevantes para la preservación de la vida en la laguna.

Como ya se ha indicado el objeto de estudio es la laguna Carén cuerpo de agua dulce ubicado en la comuna de Pudahuel, Región Metropolitana (dependencias de la Universidad de Chile).

La simulación, como ya se mencionó, se realizará mediante software GLM. GLM (General Model Lake) es un modelo en una dimensión para lagos. Este realiza balances de masa estratificando el lago, relacionando la calidad del agua y procesos del ecosistema (Universidad del Oeste de Australia, 2020).

El modelo funciona para distintos tipos de lagos dado su morfología, hidrología y condiciones climáticas. Este integra simulaciones de calidad de agua y de salud del ecosistema

(Hipsey, 2019). También obtiene propiedades hidrodinámicas como lo son la temperatura del agua, entre otras.

El modelo ha sido aplicado exitosamente a lagos de diferentes escalas de longitud (Universidad del Oeste de Australia, 2020).

Cabe señalar que el lago cuenta con dos boyas con sensores que registran diversos parámetros además de una estación de monitoreo que registra parámetros meteorológicos.

Una de la relevancia de realizar estos estudios, es conocer (por ejemplo) la importancia de las concentraciones de oxígeno o el pH para saber si es posible la vida acuática. Por último mencionar que la laguna Carén es una laguna artificial que posee caudales afluentes y efluentes. Presenta fauna de aves acuáticas y flora (EcuRed, 2017). Se realizan deportes acuáticos como canotaje, vela. Esto también se convierte en un aspecto relevante, por cuanto la actividad humana también influye en la salud del ecosistema.



Figura 1.1: Vista posterior Laguna Carén, sector Este, (Mapio, 2020).

Su afluente es el estero Carén y ocasionalmente recibe descarga de aguas fluctuantes de agricultores de la zona y de la planta de tratamiento de aguas servidas pertenecientes a la empresa de agua potable Izarra de lo Aguirre (Aránguiz, 2019), y su efluente el Estero Lampa.

Es importante recalcar que la eutrofización es un problema que afecta a los ecosistemas a nivel mundial y que se ha convertido en uno de los focos de atención de la ecología y sistemas acuáticos (Aránguiz, 2019). Motiva entonces conocer los diversos parámetros físico-químicos de la laguna en la profundidad, para conocer su dinámica y rol ecológico en la laguna.

Aránguiz (2019) estudió la concentración temporal del fosfato, amonio y nitrato en la laguna Carén, usando el software Vensim PLE y asumiendo mezcla completa:

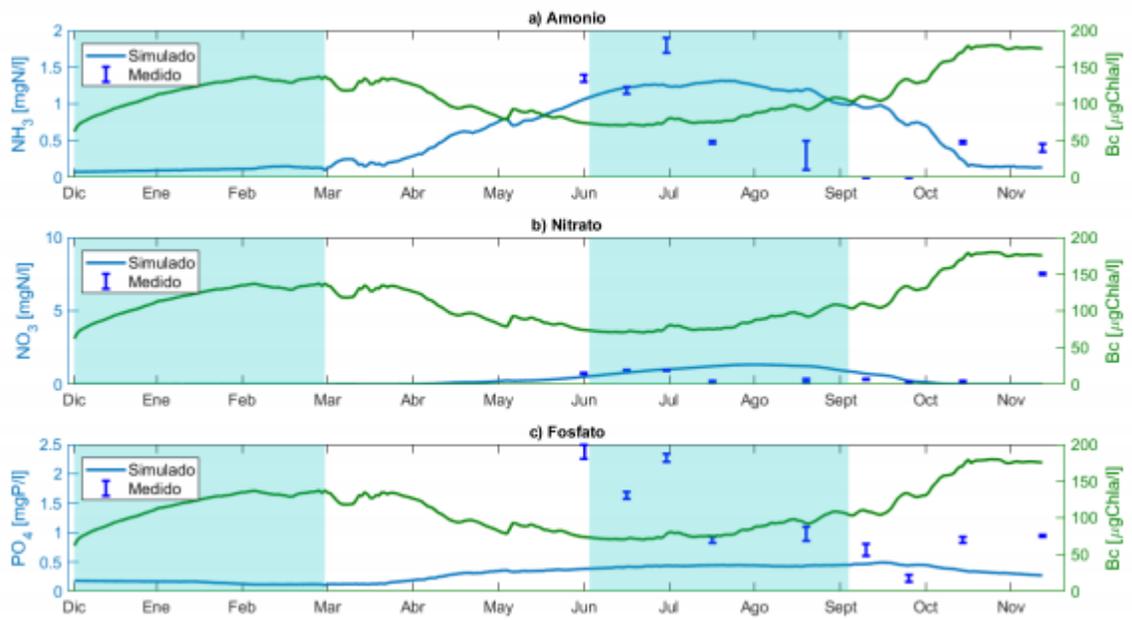


Figura 1.2: Gráfica nutrientes en el tiempo (Aránguiz, 2019).

La gráfica 1.2 muestra que los valores medidos difieren del modelo planteado por Aránguiz (2019), tanto para el amonio, nitrato y fosfato lo cual motiva el estudio de estos nutrientes en la profundidad (eje z) en la sección resultados de este documento. Todo esto, asumiendo gradientes en la vertical de concentraciones y trabajando con un modelo en una dimensión en la vertical y el tiempo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es el estudio en una dimensión en la vertical de la calidad del agua e hidrodinámica de la laguna Carén. Para aquello se recopilaron datos mediante una estación de monitoreo medioambiental (meteorológica) y dos boyas con sensores. Los inputs que entregan ambas serán utilizados para simular, la hidrodinámica y calidad del agua de la laguna mediante el software GLM Model Lake. De esta forma se puede conocer el estado de la laguna en cuanto a niveles tróficos, parámetros como el pH y concentración de oxígeno disuelto (O_2).

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar y cuantificar principales procesos y reacciones químicas involucradas en la dinámica de nutrientes en el agua, ya sea la dinámica del nitrato, ion amonio y fosfato. Esto tiene como fin conocer su grado de eutrofización.
- Utilizar los datos obtenidos por los termistores, la estación meteorológica y los datos de calidad del agua para usarlos como entradas al programa GLM.
- Simular mediante software GLM con los datos entregados por la estación meteorológica y boyas con termistores, datos de caudales afluentes y efluentes junto a sus concentraciones de nutrientes y oxígeno disuelto para obtener concentraciones de nutrientes, pH, temperatura y densidad por estratos.

1.3. Organización del Informe

Capítulo 1 “Introducción”: Presenta las primeras motivaciones del trabajo de investigación, objetivos generales y específicos de la memoria.

Capítulo 2 “Revisión Bibliográfica”: Incluye el marco teórico y la revisión de antecedentes previos a la elaboración del trabajo de título.

Capítulo 3 “Metodología”: Se explican los pasos a seguir para la obtención de datos, el análisis de las mediciones y su implementación en el modelo GLM.

Capítulo 4 “Resultados”: Se presentan los cálculos obtenidos por medio del software GLM, comparando con datos reales que sirven para validar los resultados obtenidos.

Capítulo 5 “Conclusiones”: Se presentan las principales inferencias y conclusiones acorde a los resultados obtenidos. Además se entregan las principales recomendaciones para trabajos futuros relativos al tema en estudio.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Antecedentes generales de cuerpos de agua dulce

Los ecosistemas de agua fresca cubren una pequeña porción de la superficie de la tierra. Su extensión o contribución en área ha sido probablemente subestimada (Downing et al., 2006).

En cuanto a su profundidad, esta es crucial en la función ecológica de los lagos (Padisak and Reynolds, 2003).

El agua es la esencia para la vida en la tierra y domina la composición química de todos los organismos vivos. Las características del agua regulan el metabolismo de los lagos. Su densidad en función de la temperatura, su alto calor específico y sus características en estado sólido y líquido, permite la formación de medios ambientes estratificados, que controlan extensivamente las propiedades químicas y biológicas de los lagos (Wetzel, 2001). El agua es una sustancia única. Sus propiedades y características líquidas-sólidas influyen extensamente la física, química, propiedades metabólicas y la dinámica de ecosistemas de agua dulce (Wetzel, 2001).

Los ecosistemas de agua dulce son un subconjunto de ecosistemas acuáticos en la tierra. Ellos incluyen lagos, estanques, ríos, entre otros. Estos pueden ser contrastados con sistemas de Agua salada.

Los parámetros morfológicos que definen este tipo de ecosistema (laguna somera) son la profundidad media, máxima y el área de inundación. Estos parámetros junto con el clima inciden en las concentraciones de nutrientes en el agua (Aránguiz, 2019).

Scheffer and van Nes (2007) señalan lo siguiente:

- La turbidez incrementa con los niveles de nutrientes debido al crecimiento y desarrollo de fitoplancton.
- La vegetación reduce la turbiedad.
- La vegetación desaparece cuando se excede una turbiedad crítica.

2.2. Antecedentes lagunas someras

Las lagunas son consideradas cuerpos someros de agua ya que son poco profundos, en relación a profundidad media o máxima. Almanza-Marroquín et al. (1984) señala que una laguna somera tiene profundidades medias menor $< 5m$. Padisak and Reynolds (2003) señala que las lagunas someras tienen en promedio menos de 3 metros.

En relación a lagos, humedales y lagunas someras Padisak and Reynolds (2003) establece una notable diferencia entre esta última con las otras dos en su comportamiento hidráulico, funcionamiento ecológico y la presencia relativa de comunidad biológica (biota).

La profundidad media de una laguna somera es del orden de 2.50 metros (Søndegard et al., 1999), mientras que la profundidad máxima es del orden 5.50 metros (Lv et al., 2011). Con respecto al tiempo de retención hidráulico Søndegard et al. (1999) señala que éste se encuentra en el rango de 7 a 266 días. Esto varía según la geomorfología y características propias del sistema somero.

Respecto a la turbiedad del agua en lagunas someras se cuenta con la siguiente información (Scheffer and van Nes, 2007):

Una simplificación obvia es asumir que todas las plantas sumergidas desaparecen cuando se alcanza niveles de turbiedad crítica en una laguna. La realidad es que para lagunas someras las plantas son menos afectadas por el efecto de la turbiedad.

Como resultado, el cambio de un estado con vegetación a un estado turbio ocurre de manera menos abrupta que el que predicía el modelo básico Scheffer and van Nes (2007). A continuación se presenta una imagen del modelo básico de turbidez vs nutrientes propuesto por Scheffer et al. (1993)

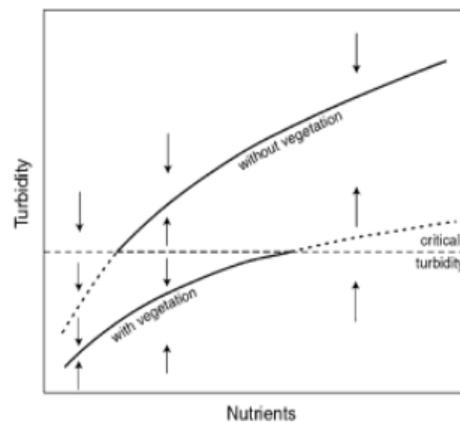


Figura 2.1: Turbidez en función de nutrientes (Scheffer et al., 1993).

La vegetación desaparecerá más gradualmente, porque la vegetación será perdida primero por las partes más profundas del lago (Scheffer and van Nes, 2007).

Algunos lagos muestran marcadas oscilaciones entre un escenario con vegetación y otro con turbidez (Scheffer and van Nes, 2007).

Los problemas de eutrofización han sido un importante incentivo para mucho del trabajo en lagunas someras. Una de las preguntas centrales ha sido siempre cuál es el nivel crítico de nutrientes que podría mantener el agua en un estado claro (Scheffer and van Nes, 2007).

Además de los nutrientes, el factor más obvio que afecta la probabilidad del lago de ser dominado por vegetación sumergida, es la profundidad. En lagunas someras las condiciones de luz en el agua en el fondo son mejores, eso que las propiedades ópticas del agua son las mismas (Scheffer and van Nes, 2007).

Los lagos someros urbanos han sido afectados por sobrecarga de nutrientes y contaminantes orgánicos, resultando de aquello el florecimiento de algas (algas blooms), muerte de peces y turbiedad en el agua (Lv et al., 2011). Para lagos someros la liberación de fósforo desde los sedimentos tendrá un importante impacto, durante muchos años y, especialmente, en el verano (Søndegard et al., 1999).

El hecho que el sedimento de fondos es cercano a la superficie del agua, en la medida que ellos son capaces de sustentar la producción primaria y el hecho de la frecuente mezcla del agua intermedia en la columna de agua tiende a restaurar una uniformidad a través de la mayoría de la columna del agua, son consecuencia absolutas de lagunas someras (Padisak and Reynolds, 2003). En lagos más profundos, la estratificación puede proporcionar un positivo ímpetu al comportamiento biótico del lago que es menos obvio en los someros, los cuales son generalmente lagos bien mezclados (Padisak and Reynolds, 2003).

Los parámetros propios de una laguna somera se muestran a continuación:

Tabla 2.1: Parámetros principales laguna somera

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
Profundidad media	[m]	1.62,2.50	(Lv et al., 2011), (Søndegard et al., 1999)
Profundidad máxima	[m]	5.50,9.9	(Lv et al., 2011), (Søndegard et al., 1999)
Área	[km ²]	0.91,7.47	(Søndegard et al., 1999), (Lv et al., 2011)
TRH	días	7- 266	(Søndegard et al., 1999)
Temperatura	[°C]	18.7	(Lv et al., 2011)

2.3. Antecedentes de calidad del agua

La salud de un sistema acuático depende de su calidad. Hay diferentes parámetros que sirven para medir la calidad del agua, como lo son: la temperatura, concentraciones de oxígeno, concentraciones de nutrientes, cantidad de algas, entre otros. Esto para conocer el estado del sistema. En este caso el sistema acuático corresponde a una laguna.

Existen normas que regulan la emisión de contaminantes a sistemas acuáticos, para su salud. Ejemplo de este es el decreto supremo 90, el cual regula descargas a aguas continentales. Más adelante se corroborará si la laguna como cuerpo de agua continental cumple con el decreto 90.

Se encuentra, también, los parámetros de calidad del agua propios de lagunas someras con características eutróficas e hipereutróficas que Almanza-Marroquín et al. (1984) estudió:

Tabla 2.2: Parámetros de calidad del agua en lagunas someras

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Temperatura	°C	18.50
pH	-	8.07
OD	[mg/L]	8.13
Nitrógeno total	[mg/L]	1.73
Nitrato	[mg/L]	1.24
Amonio	[mg/L]	0.22
Fosfato	[mg/L]	0.24
Clorofila	[μ g/L]	56.58

Todos estos parámetros son característicos de 3 lagunas estudiadas por Almanza-Marroquín. Estas son la Laguna Tres Pascualas, Lo Galindo y Lo Méndez.

Lv et al. (2011) señala un valor de 0.49 [mg/L] para el fósforo total.

Smith et al. (1999) señala los límites para la eutrofia de un lago:

Tabla 2.3: Clasificación de la laguna según nutrientes

Estado trófico	TN [mg/L]	TP [mg/L]	Clorofila [μ g/L]
Oligotrófico	<0.35	<0.01	<3.5
Mesotrófico	0.35-0.65	0.01-0.03	3.5-9
Eutrófico	0.65-1.2	0.03-0.1	9-25
Hipereutrófico	>1.2	>0.1	>25

El Ministerio del Medio Ambiente, en su sección aguas, presenta el Decreto Supremo 90. Este establece límites o norma de emisión a contaminantes asociados a descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

Este decreto es de vital importancia ya que se encuentra en el punto P3-Entrada PTAS de la figura 3.1 una planta de tratamientos de aguas servidas que vierte en Carén y debe velarse por el cumplimiento del decreto.

La laguna, objeto de este estudio, corresponde a aguas continentales superficiales.

Los límites permitidos de contaminantes a verter en P3 se presentan en esta tabla:

Tabla 2.4: Decreto supremo 90

Contaminante	Unidad de medida	Expresión	Límite Máximo Permitido
Aceites y Grasas	[mg/L]	A y G	20
DBO_5	[mg O_2 /L]	DBO_5	35
Fósforo	[mg/L]	P	10
Nitrógeno Total Kjeldahl	[mg/L]	NKT	50
pH	-	pH	6.0-8.5
Sólidos Suspendidos Totales	[mg/L]	SS	80
Temperatura	C°	T°	35

2.3.1. Ciclo de Nutrientes en la laguna

Estos se relacionan con la calidad del agua y medio ambiental de la laguna.

Se quiere medir las concentraciones de oxígeno disuelto, nitrógeno (amonio y nitrato) y fósforo por medio del software GLM. Por lo cual conocer el ciclo de estos elementos químicos contribuye para comprender e identificar lo que esta ocurriendo al interior de la laguna.

2.3.1.1. Ciclo del Oxígeno

El oxígeno se produce principalmente en los procesos de fotosíntesis que ocurren al interior de la laguna. Es llevado a cabo por las algas y plantas acuáticas. Otra entrada de oxígeno en la laguna es la reaireación. Se produce el balance de masa o equilibrio dado por la respiración celular.

Dentro del balance gaseoso en los sistemas acuáticos, el oxígeno disuelto es fundamental, ya que es generado por los productores primarios y captado por el intercambio atmosférico por un lado y consumido por los organismos aeróbicos por el otro, los cuales lo utilizan para su síntesis energética; limitando o favoreciendo con la abundancia o escasez de este parámetro: la presencia y/o ausencia de organismos acuáticos (Díaz-Vargas, 2005).

La producción de Oxígeno se genera a partir de la fotosíntesis (ecuación 2.1), o la mineralización del ortofosfato (figura 2.2) y el consumo de oxígeno mediante nitrificación por bacterias nitrificantes (ecuación 2.3 y 2.4).



La fotosíntesis se realiza en los cloroplastos. Al tomar el hidrógeno (H) del agua, se libera oxígeno (O₂) como producto de desecho. El agua ingresa del suelo a la planta a través de las raíces. En el caso de algas y cianobacterias proviene del entorno acuático. Todo el oxígeno molecular (O₂) producido durante la fotosíntesis proviene del agua empleada en el proceso. En la fotosíntesis se consume CO₂, energía solar y agua (H₂O), y se libera oxígeno (O₂) (Lifeder, 2019).

El Oxígeno es el segundo elemento más abundante en la atmósfera tras el nitrógeno, y el segundo más abundante de la hidrósfera tras el hidrógeno (Lifeder, 2019).

2.3.1.2. Ciclo del Nitrógeno

El ciclo de nitrógeno es uno de los ciclos biogeoquímicos para mantener el equilibrio en la biósfera terrestre. El nitrógeno molecular es un elemento diatómico, que comprende el 78 % de la atmósfera terrestre (Pacheco, 2002) y es uno de los elementos químicos con mayor abundancia en ésta. Hay diversos procesos que afectan el balance de masa del nitrógeno, ejemplo de ellos son: la precipitación que cae directamente en la superficie del lago; la difusión atmosférica; las entradas desde la superficie y drenaje de agua subterránea (Wetzel, 2001).

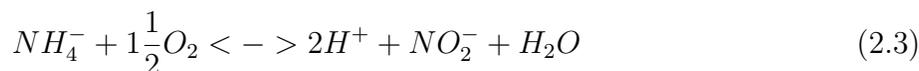
Para que los organismos puedan aprovechar el nitrógeno, éste debe ser sintetizado por algas y bacterias. En cambio cuando se encuentra en el suelo, puede ser aprovechado por animales y plantas sólo antes de que se convierta en nitrógeno molecular.

A continuación se presenta la especiación del nitrógeno:

- Nitrógeno molecular (N_2)
- Ion Amonio (NH_4^+)
- Nitrito (NO_2^-)
- Nitrato (NO_3^-)

$$C_{t,N} = 2[N_{2(aq)}] + [NH_4^+] + [NO_2^-] + [NO_3^-] \quad (2.2)$$

Uno de los procesos del nitrógeno en el agua, es la fijación biológica, en el cual el nitrógeno orgánico se transforma en nitrógeno molecular, por medio de bacterias simbióticas que viven en las plantas. El proceso de nitrificación se lleva a cabo por medio de dos reacciones de oxidación, es decir ambas consumen oxígeno: Primero el ion amonio se convierte en nitrito, luego el nitrito se convierte en nitrato:



Finalmente se produce la desnitrificación donde el nitrato se convierte en nitrógeno gaseoso y este escapa por difusión a la atmósfera. Cabe destacar que la desnitrificación es llevada a cabo por bacterias, estas son inhibidas cuando hay altas concentraciones de oxígeno disuelto, por lo cual este proceso toma mayor relevancia en sedimentos anóxicos (Aránguiz, 2019).

A continuación se presenta un esquema que muestra la cadena de reacciones de la especiación del nitrógeno y fósforo:

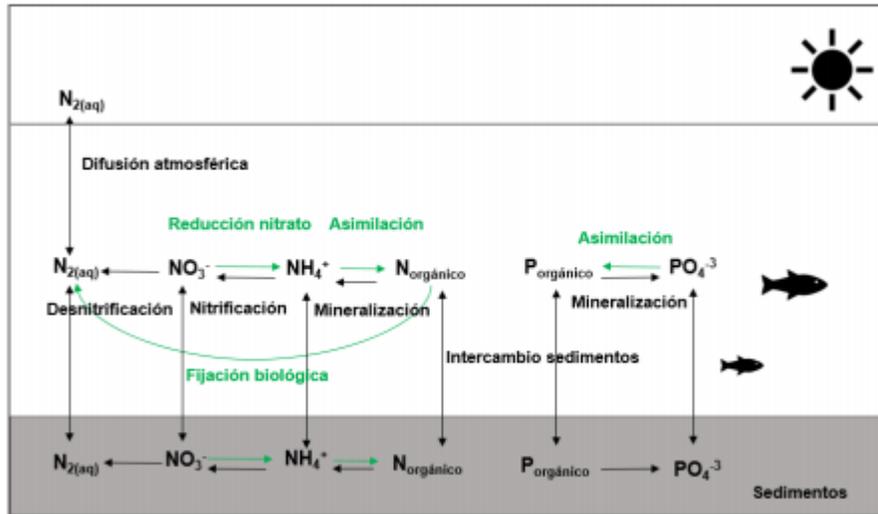


Figura 2.2: Ciclo del Nitrógeno y Fósforo (Román, 2017).

2.3.1.3. Ciclo de fósforo

La mayor parte del fósforo se encuentra como PO_4^{3-} , luego como P orgánico. A menudo el fósforo es un nutriente limitante o el nutriente más escaso en la columna de agua y que por ello restringe el crecimiento de plantas y algas en sistemas acuáticos.

La productividad de los ecosistemas terrestres y su dinámica están condicionados por la disponibilidad de nutrientes. Para las plantas la disponibilidad de nitrógeno (N) es el principal limitante en la productividad de los cultivos, que junto con el del fósforo (P) determinan el crecimiento vegetal (Cerón and Aristizábal, 2012). Un incremento tanto del fósforo como nitrógeno produce eutrofización en las lagunas. Estos elementos pueden ser acarreados desde el suelo hacia algún lago. Además, el aumento en las concentraciones de fósforo estimula el crecimiento de las algas.

Numerosos estudios han mostrado que altas cargas de fósforo producen gran cantidad de biomasa de fitoplancton, agua turbia y a menudo cambios biológicos indeseados (Søndergaard et al., 2003). Es un ciclo lento comparado con el del nitrógeno y carbono (Khan academy, 2016).

2.4. Ecuaciones principales

2.4.1. Ecuaciones software GLM

GLM es un software que estratifica el lago. Es un modelo de una dimensión, el que requiere de diferentes parámetros, ya sean hidrológicos, geomorfológicos y de condiciones climáticas. La ventaja principal de este software es que deja de lado los modelos de dimensión cero (mezcla completa) como Vensim Ple o Pc Lake y trabaja con un modelo de una dimensión en la vertical, estratificando el lago por capas. Este simula la calidad del agua obteniendo concentraciones de nutrientes y obteniendo parámetros hidrodinámicos en la vertical. Cabe destacar que es un software libre al igual que Pc Lake y cualquiera puede acceder a él.

A continuación se presentan las principales ecuaciones que rigen la dinámica de la laguna usando el software GLM Model Lake: Para obtener el volumen máximo de la laguna se utiliza la fórmula siguiente:

$$V_{m\acute{a}x} = \int_{H_0}^{H_{m\acute{a}x}} A[H]dH \quad (2.5)$$

La curva A vs H corresponde a la curva hipsométrica, obtenida con el Sistema de información geográfico Qgiss. H_0 y $H_{m\acute{a}x}$ corresponden a la cota más baja del agua en la laguna y la del pelo de agua respectivamente. Para calcular el volumen de la laguna se debe conseguir el área bajo la curva de la función A[H]. Es decir, se calcula el volumen acumulativo del lago para cualquier elevación. Esa integral se resuelve por tramos discretos, mediante la siguiente fórmula:

$$V_b = V_{b-1} + \left[\frac{1}{2}(A_b + A_{b-1})\right](H_b - H_{b-1}) \quad (2.6)$$

Esta ecuación se resuelve obteniendo el área bajo la curva de los polígonos que forma la curva hipsométrica.

Con respecto al balance de Volumen este se rige por la siguiente ecuación:

Balance de Volumen:

$$\frac{dV_s}{dt} = A_s \frac{dh_s}{dt} + \sum_I^{N_{INF}} Q_{inf_{0I}} - \sum_O^{N_{OUTF}} Q_{out_{fO}} - Q_{seepage} - Q_{ovfl} \quad (2.7)$$

Donde V_s es el volumen total de la laguna; t es el tiempo; $Q_{inf_{0I}}$ los caudales de entrada; $Q_{out_{fO}}$ los caudales de salida; $Q_{seepage}$ los caudales de filtración; Q_{ovfl} las salidas por sobre la superficie; A_s es el área del lago y h_s se define de la siguiente forma:

$$\frac{dh_s}{dt} = R_F + S_f + \frac{Q_R}{A_s} - E - \frac{d\Delta z_{ice}}{dt} \quad (2.8)$$

E es la evaporación; S_f es la cantidad de nieve y R_f es la cantidad de lluvia. Q_R es un término que simula la escorrentía al lago proveniente desde los bancos rivereños expuestos. Δ_{ice}

el cambio en el nivel del hielo.

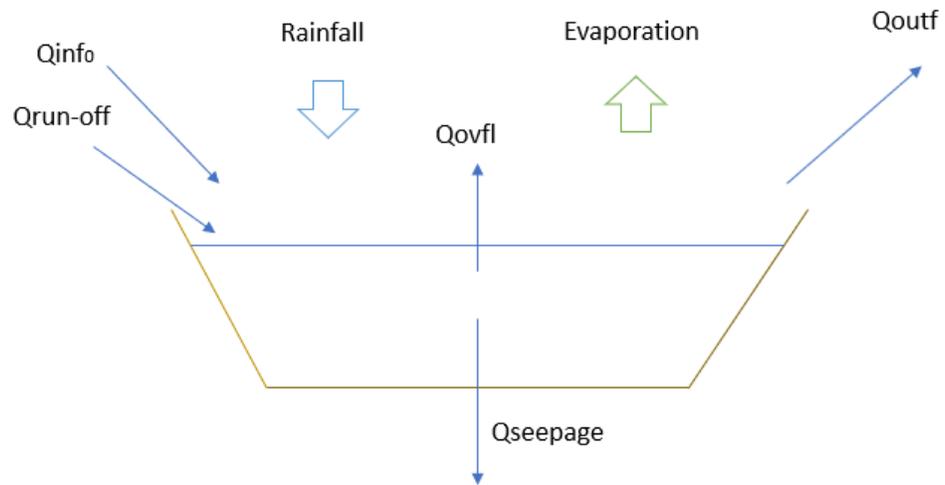


Figura 2.3: Esquema balance de volumen

$Q_{run-off}$ corresponde a Q_R .

A continuación se presenta el balance de energía en la superficie:

Balance de energía:

$$c_w \rho_s z_s \frac{dT_s}{dt} = \phi_{SW_s} - \phi_E + \phi_H + \phi_{LW_{in}} - \phi_{LW_{out}} \quad (2.9)$$

c_w es el calor específico del agua, ρ_s y z_s la densidad del agua en la superficie y la profundidad en la capa superficial. T_s es la temperatura en la superficie.

ϕ_{SW_s} corresponde a la cantidad de calentamiento por radiación de onda corta en la capa mezclada superficial.

ϕ_H corresponde al calor sensible; ϕ_E el calor latente de evaporación; $\phi_{LW_{in}}$ la radiación de onda larga y $\phi_{LW_{out}}$ la radiación de onda emitida por la superficie del agua hacia la atmósfera.

El primer término del lado derecho de la ecuación 2.9 se define de la siguiente forma:

$$\phi_{SW_s} = \phi_{SW_0} - \phi_{PAR}(Z_s) \quad (2.10)$$

$$\phi_{PAR}(z) = f_{PAR} \phi_{SW_0} \exp(-K_w z) \quad (2.11)$$

ϕ_{SW_0} corresponde a la radiación de onda corta que cruza la superficie del agua. La ecuación 2.11 se conoce como la Ley de Lambert, la cual señala la cantidad de radiación que sale al penetrar el agua del lago, a una profundidad z . Por medio de esta ecuación se puede obtener la profundidad de penetración de la luz en la laguna en función de la radiación de salida a dicha profundidad. f_{PAR} corresponde a la fracción límite de la radiación con la cual hay fotosíntesis.

ϕ_{SW_0} corresponde al flujo de radiación solar entrando a la capa de la superficie. Este es función de la Radiación Solar Incidente que se ingresa al software en su metodología.

Hay numerosos factores que afectan la atenuación de la luz en reservorios de agua. Ellos incluyen entre otros, la distribución espectral de las propiedades ópticas del agua, el ángulo de incidencia del haz directo, el espesor de la capa y la reflexión en el fondo del reservorio de agua (Cengel and Ozisik, 1984).

Por otro lado el 6.6% de la radiación solar incidente es devuelta a la atmósfera y el 47.7% de la radiación solar incidente, la cual es proveniente del fondo del reservorio es reflejada en la interfaz agua-aire hacia el agua (Cengel and Ozisik, 1984).

El calor latente es el calor necesario para el cambio de fase del agua de líquido a gaseoso, este es proporcional a la tasa de evaporación (De La Fuente, 2018).

$$\phi_E = -\rho_a C_E \lambda_v U_{10} \frac{\omega}{p} (e_s(T_s) - e_a(T_a)) \quad (2.12)$$

C_E es el coeficiente de transferencia de calor latente; ρ_a la densidad del aire; c_a la capacidad calorífica específica del aire; λ_v el calor latente de vaporización; U_{10} la velocidad del aire sobre el lago; ω es la relación entre el peso molecular del agua y el peso molecular del aire; p la presión del aire; e_s la presión de vapor de saturación y e_a presión de vapor atmosférica.

Por otro lado, está el calor sensible que es el calor que recibe o transfiere el agua a su entorno:

$$\phi_H = -\rho_a c_a C_H U_{10} (T_s - T_a) \quad (2.13)$$

Donde C_H es coeficiente de transferencia de calor sensible; T_s y T_a es la temperatura en la capa superficial del agua y en el aire, respectivamente.

Para conocer la temperatura por capa se resuelve la siguiente ecuación por estratos usando los espectros de banda:

$$c_w \rho_i \Delta z_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{l=1}^{N_{SW}} \phi_{SW_l}(z_i) - \sum_{l=1}^{N_{SW}} \phi_{SW_{i-l}}(z_{i-1}) \quad (2.14)$$

Donde $\phi_{SW_l}(z_i)$ es el flujo de radiación en la parte superior de la i ésima capa para el ancho de banda número l .

Todas las fórmulas usadas anteriormente se obtienen del modelo hidrodinámico de GLEON GMD paper (Hipsey, 2019)

La radiación de onda larga se calcula mediante la siguiente fórmula de De La Fuente (2018)

$$\phi_{LW_{in}} = \varepsilon_a^* \sigma (\theta_a)^4 \quad (2.15)$$

σ es la constante Stefan-Boltzmann, ε_a^* es la emisividad de la atmósfera y θ_a es la temperatura del aire sobre el lago en $^{\circ}K$, considerando albedo de longitud de onda larga igual a 0.

La constante de Stefan-Boltzmann equivale a $5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

Para el cálculo de la emisividad, se tomó como referencia de GMD GLEON paper (Hipsey, 2019) la fórmula de Idso y Jackson (1969). Opción 1. Considerando nubosidad nula (porque no se midió) y considerando la temperatura del aire en grados Celsius:

$$\varepsilon_a^* = (1 + 0.275 C_x) (1 - 0.261 \exp(-0.000777 T_a^2)) \quad (2.16)$$

Luego conociendo la emisividad, constante de Boltzmann y temperatura del aire se puede obtener la radiación de onda larga.

La radiación de onda emitida por la superficie hacia la atmósfera se calcula de la siguiente forma:

$$\phi_{LW_{out}} = \varepsilon_w \sigma (\theta_s)^4 \quad (2.17)$$

Donde ε_w es la emisividad de la superficie del agua y θ_s la temperatura del agua en la superficie.

Por otro lado, el error en las mediciones se calcula con la siguiente fórmula:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Valorreal_i - Valorsimulado_i)^2}{N}} \quad (2.18)$$

Se denomina error cuadrático medio.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Lugar de estudio

La laguna Carén está ubicada en la comuna de Pudahuel, Santiago, Región Metropolitana, Chile. Está ubicada $33^{\circ}25'50''\text{Sur}$, $70^{\circ}50'29''\text{O}$, a 470 m.s.n.m (Aránguiz, 2019).

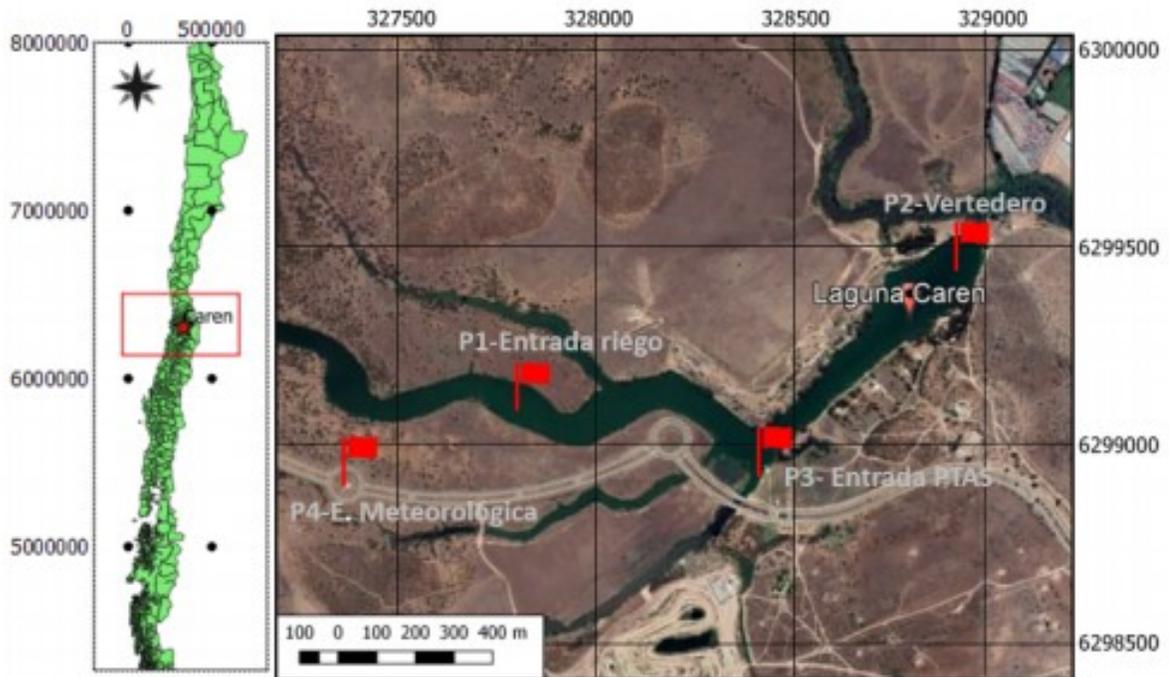


Figura 3.1: Mapa de la Laguna Carén (Román, 2017).

El parque Laguna Carén se emplaza en una superficie de 100000 [Ha].

El clima de la laguna es mediterráneo. Dentro de su flora se encuentra bosques de espinos, eucaliptos, algarrobos y maitenes. Dentro de su fauna se encuentra: Garza cuca, Hualas y Pájaros Siete colores entre otros (Visit Chile, 2020). Sus atracciones son zonas de camping y de picnics.

Se realizan actividades como: Mountainbike, Pesca Recreativa, Navegación Turística, Canotaje, Vela, fotografía y observación de Flora y Fauna.

La laguna cuenta con afluentes y efluentes. Su principal afluente es el Estero Carén, más descargas fluctuantes de agricultores del sector y de la planta de tratamientos de aguas servidas (PTAS) de Empresa de agua potable Izarra De Lo Aguirre S.A(Aránguiz, 2019).

Es importante recalcar que la laguna es de carácter artificial.

3.2. Mediciones en terreno

Las mediciones realizadas fueron hechas por la estación meteorológica además de las mediciones de temperatura obtenidas por las dos boyas ubicadas en la laguna, a diferentes profundidades. Las Boyas están ubicadas en P1-Entrada Riego y P2-Vertedero (ver figura 3.1).

También fueron recopilados los datos de calidad del agua de la laguna. Entre ellos las concentraciones de O_2 , amoníaco, nitrato, fosfato y pH. Las fechas de estas mediciones se muestran en las tablas A.1, A.2 y A.3.

Como ya se mencionó hay una planta de tratamientos en P3. Ésta vierte contaminantes a la laguna. Se obtuvieron datos de concentraciones en los 3 puntos de la laguna. Estas mediciones se obtienen en el laboratorio. Con ello se puede encontrar la concentración del afluente, que es la concentración que hay en P3.

Los variables entregadas por la estación meteorológica corresponden a:

1. Humedad Relativa [%]
2. Radiación Solar Incidente [W/m^2]
3. Temperatura del Aire [$^{\circ}C$]
4. Velocidad del Viento [m/s]

La estación meteorológica Carén no entrega precipitaciones, por lo cual para obtener éstas se usa directamente los datos de la estación Rinconada.

Estación meteorológica:

La estación meteorológica está ubicada en el punto P4-E de la figura 3.1. Los datos de las variables meteorológicas entregadas corresponden a fechas entre el 9 de Noviembre de 2016 hasta el 21 de Enero de 2020.

La información entre estas fechas se completaron mediante ajustes lineales entre la estación Carén y la estación Rinconada, existe una correlación entre ellas. Los otros datos (anteriores al 09 de Noviembre y posteriores al 21 de Enero de 2020) se consideraron como válidos los de la estación Rinconada, ya que esta es cercana a Carén. He ahí el porqué de la correlación.

Las fechas anteriores corresponden desde el 01 de Abril de 2016 y las posteriores hasta el 31 de Julio de 2020. Esto se aplicó para todas las variables meteorológicas.

La importancia de obtener las variables meteorológicas es que sirven como datos de entrada al programa GLM.

El software utilizado en este trabajo de investigación es GLM model lake. Éste modela y simula, obteniendo las las propiedades del lago como lo son la densidad del agua y su temperatura en función de la profundidad y el tiempo transcurrido. También simula obteniendo parámetros de calidad del agua, como niveles de nitrato, amonio, fosfato, oxígeno disuelto y pH. Cabe destacar que para simular y obtener los parámetros de calidad del agua, se necesita de forma adicional las concentraciones de los afluentes, condiciones iniciales y flujo de sedimentos.

Columna de Agua:

Las boyas están ubicadas en P1-Entrada de riego y P2-Vertedero (figura 3.1). Los datos obtenidos por las boyas (Sur y Norte respectivamente), corresponden a la temperatura del agua a diferentes profundidades y se obtienen mediante termistores (sensores) en la columna de agua (en la boya). Se calcula la temperatura por hora y se obtiene una serie de tiempo para cada profundidad. Así es como se puede comparar la temperatura entregada por GLM con la que registran los sensores de la boya.

GLM simula y obtiene la temperatura del agua. Se demuestra que los resultados obtenidos (temperatura) quedan validados si la temperatura de la boya a cualquier profundidad se acerca a la entregada por GLM a la misma profundidad. Esto debe ocurrir para cada set de datos de profundidades entregadas por los termistores.

Recordar que GLM entrega cualquiera de sus parámetros en función de la profundidad.

Luego si la temperatura simulada, concuerda con la temperatura entregada por la boya a esa profundidad, el modelo quedará validado.

A continuación se presentan las coordenadas Este y Norte de la estación meteorológica y de ambas boyas:

Tabla 3.1: Coordenadas UTM boyas y estación meteorológica huso 19 Sur.

	Coordenada (Este)[m]	Coordenada (Norte) [m]
Boya Norte	328970	6299588
Boya Sur	328046	6299168
Estación meteorológica	327295	6298968

Este es el esquema de los sensores de temperatura en la laguna (termistores) a diferentes profundidades:

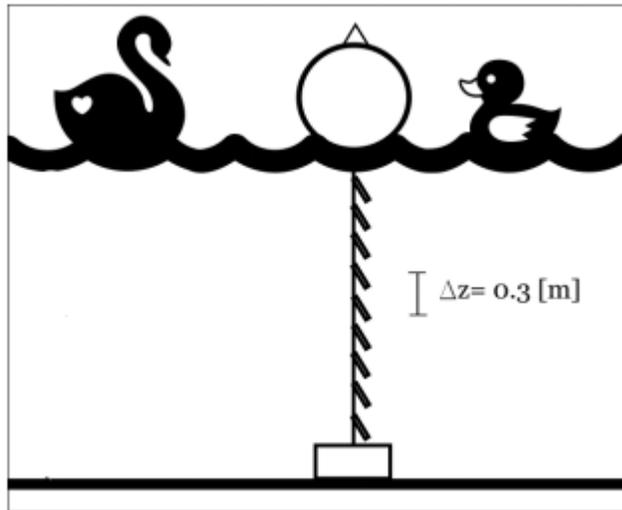


Figura 3.2: Esquema termistores laguna (Román, 2017).

Se utilizan los datos recopilados y los de la estaciones Rinconada de las diferentes variables meteorológicas; primero para rellenar datos faltantes, y luego para completar y construir la serie de tiempo de cada variable meteorológica.

3.3. Mediciones batimetría

Se conocen las coordenadas Este, Norte y de profundidad de la laguna y de su perímetro. Se consideró que la laguna se encuentra a una altura de 470 m.s.n.m.(Pelo de Agua). Esta se encuentra ubicada en el huso 19S.

Para obtener la batimetría de la laguna se uso un sistema de información geográfico, QGIS.

Tabla 3.2: Geomorfología Carén.

Geomorfología	
Profundidad máxima [m]	3.4
Profundidad mínima [m]	0
Profundidad promedio [m]	1.2

Tabla 3.3: Geomorfología Carén.

Geomorfología	
Cota máxima [m.s.n.m]	470
Cota mínima [m.s.n.m]	466.6
Cota promedio [m.s.n.m]	468.8
Área [m ²]	306695.9
Volumen [m ³]	370156.5

El software GLM requiere la batimetría de la laguna, es decir, el área bajo la cota del terreno (Curva hipsométrica), entonces se hace necesario conocerla para después ingresarla al programa.

A continuación se presentan los datos de la hipsometría del terreno en la Laguna Carén:

Tabla 3.4: Curva Hipsométrica terreno Laguna Carén.

Área [m ²]	Cota [m.s.n.m]
0	466.6
1328.4	466.9
4284.5	467.1
13227.8	467.4
23181.3	467.6
37419.4	467.9
66014.1	468.1
98444.3	468.4
130288.2	468.6
158315.4	468.9
182494.6	469.1
214806.2	469.4
242371.9	469.6
272438.4	469.9
306695.9	470.1

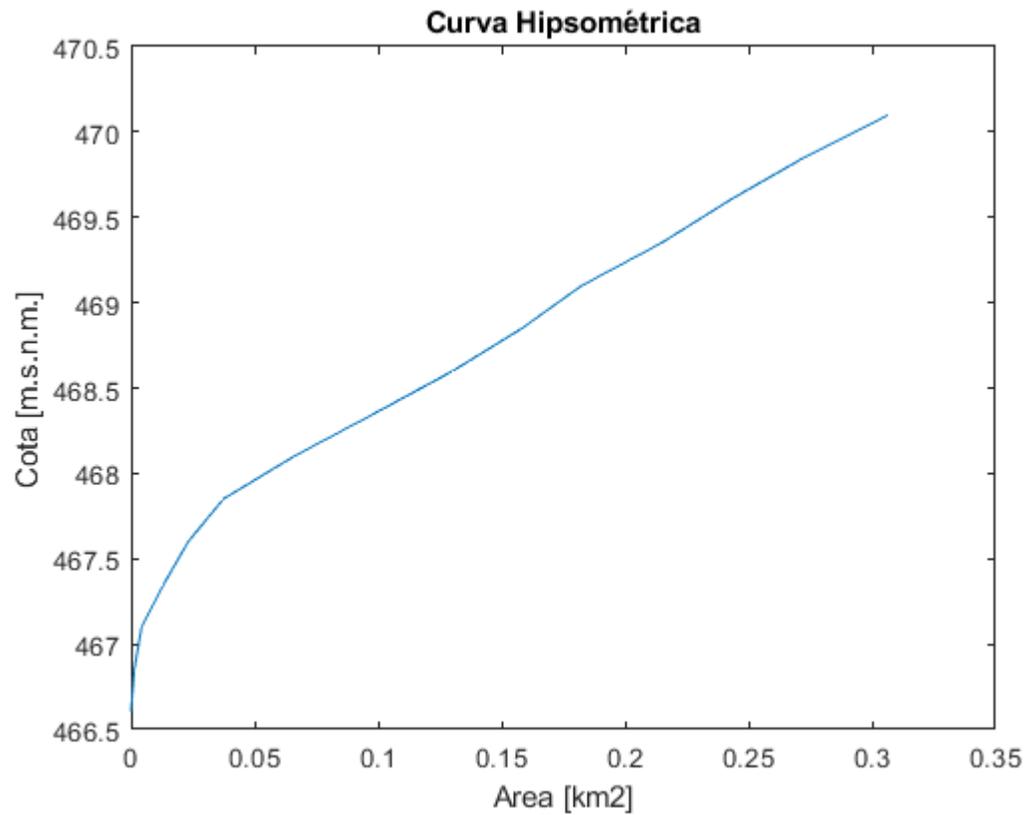


Figura 3.3: Curva hipsométrica Laguna Carén.

3.4. Mediciones estación meteorológica

Las mediciones de variables meteorológicas en la Laguna Carén como lo son la humedad relativa, velocidad del viento, temperatura del aire y la radiación solar incidente fueron obtenidos a nivel horario por la estación meteorológica.

Los datos de las variables meteorológicas que no se conocieran a nivel horario en la estación meteorológica Carén se obtuvieron mediante el ajuste lineal de la correlación de la estación Carén con la estación Rinconada, que se encuentra cercana a la laguna.

El resto de los datos, anteriores al 09 de Noviembre de 2016 y posteriores al 21 de Enero de 2020, se completaron usando directamente los datos de la Estación Rinconada. Cabe mencionar que finalmente se obtiene un set de datos continuos en el intervalo de tiempo del 1 de Abril de 2016 hasta el 31 de Julio de 2020.

Se encontró una correlación entre la estación Rinconada y la estación Carén. Se puede obtener un ajuste lineal en las mediciones entre ambas estaciones a nivel diario. Para aquello se encuentra este ajuste entre el promedio diario de la variable meteorológica en cuestión de la laguna Carén con el valor diario de la variable meteorológica en Rinconada. Se obtienen los coeficientes n y m del ajuste lineal. Luego para rellenar los datos de las horas faltantes de Carén, se completaron aquellos datos con el ajuste obtenido, pero usando esta vez los datos a nivel horario de Rinconada y así obtener los de Carén.

En definitiva se obtiene un ajuste del tipo $Y = mX + n$ a nivel diario, donde Y es la estación Carén y X la estación Rinconada. Luego se encuentran m y n por medio de este ajuste lineal. Finalmente para completar las horas incompletas de la variable meteorológica en Carén (Y) se usa ese ajuste pero usando datos horarios de la estación Rinconada(X).

A continuación se presenta las correlaciones para la distintas variables meteorológicas entre la estación Carén con la estación Rinconada.

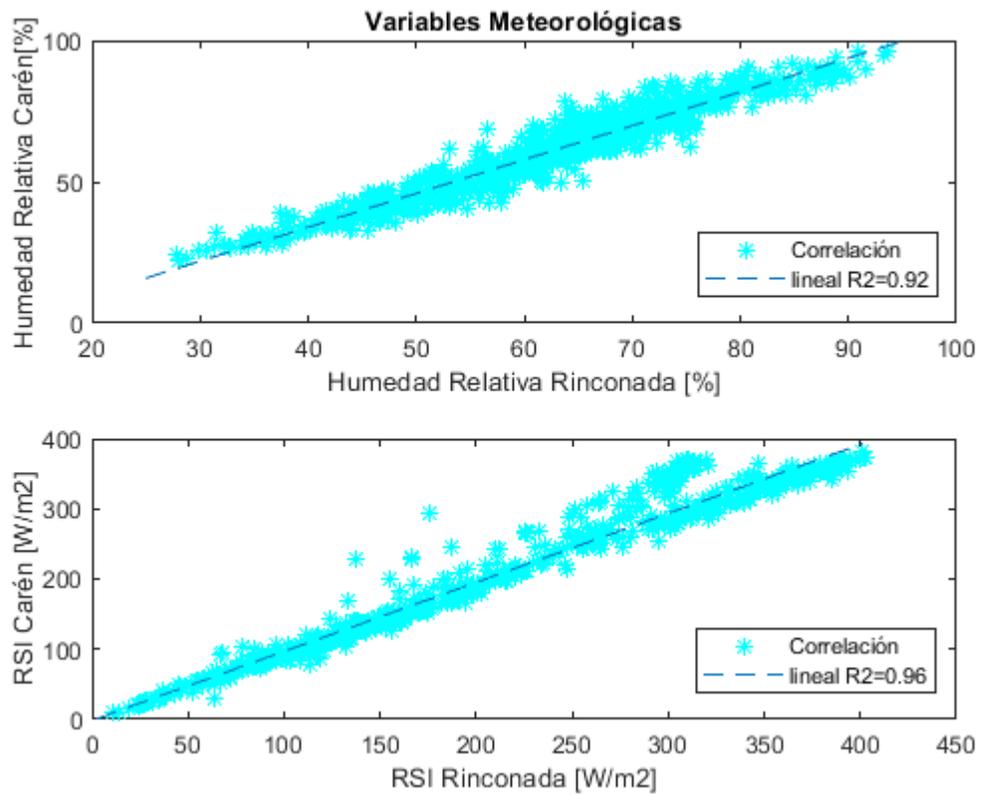


Figura 3.4: Correlaciones Humedad Relativa Y Radiación Solar Incidente.

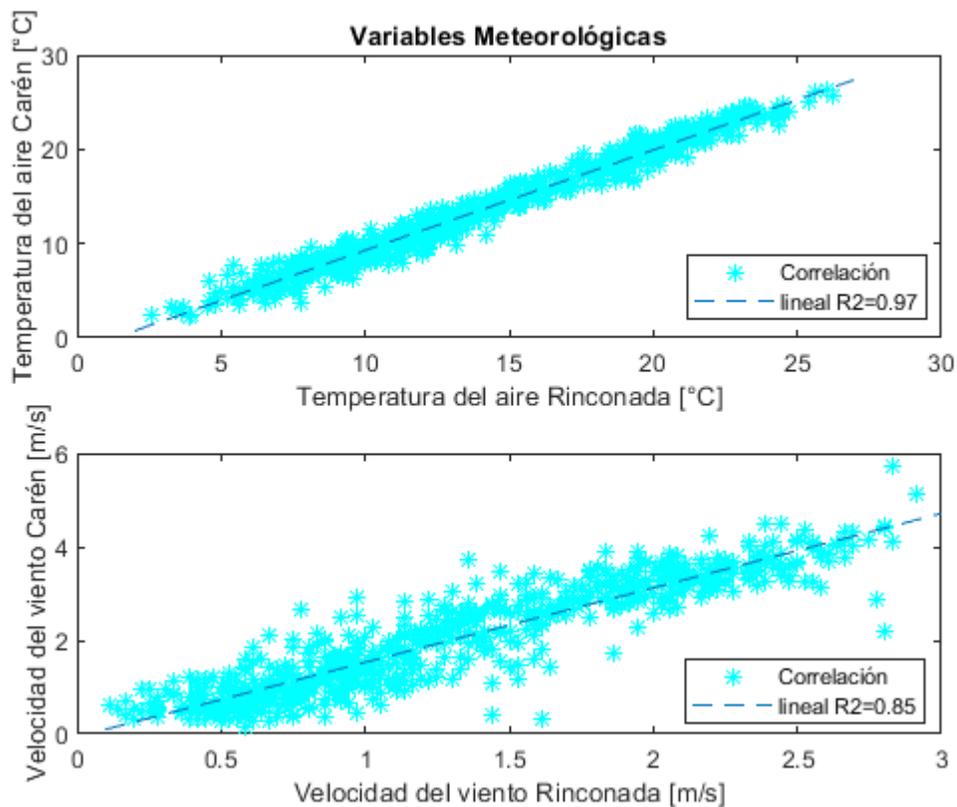


Figura 3.5: Correlaciones Velocidad del viento y Temperatura del aire.

Cada correlación posee un ajuste lineal; un coeficiente de posición y una pendiente:

Tabla 3.5: Ajuste lineal correlaciones entre estaciones.

Ajuste Lineal		
Variable meteorológica	Coficiente de posición	Pendiente
Humedad Relativa	-13.92	1.196
Radiación Solar Incidente	-1.46	0.983
Temperatura del Aire	-1.38	1.066
Velocidad del Viento	-0.06	1.591

A continuación se presentan las series de tiempo, confeccionadas con la metodología de 3.4, y completas de las distintas variables meteorológicas, en el período desde el 1 de Abril de 2016 al 31 de Julio de 2020:

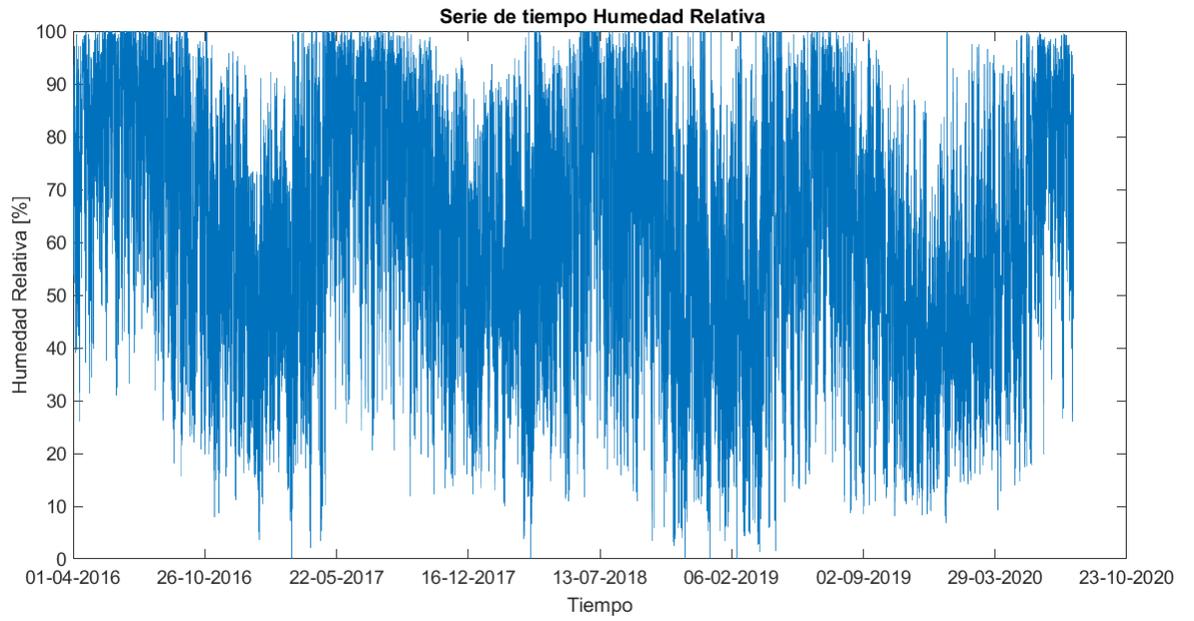


Figura 3.6: Humedad Relativa.

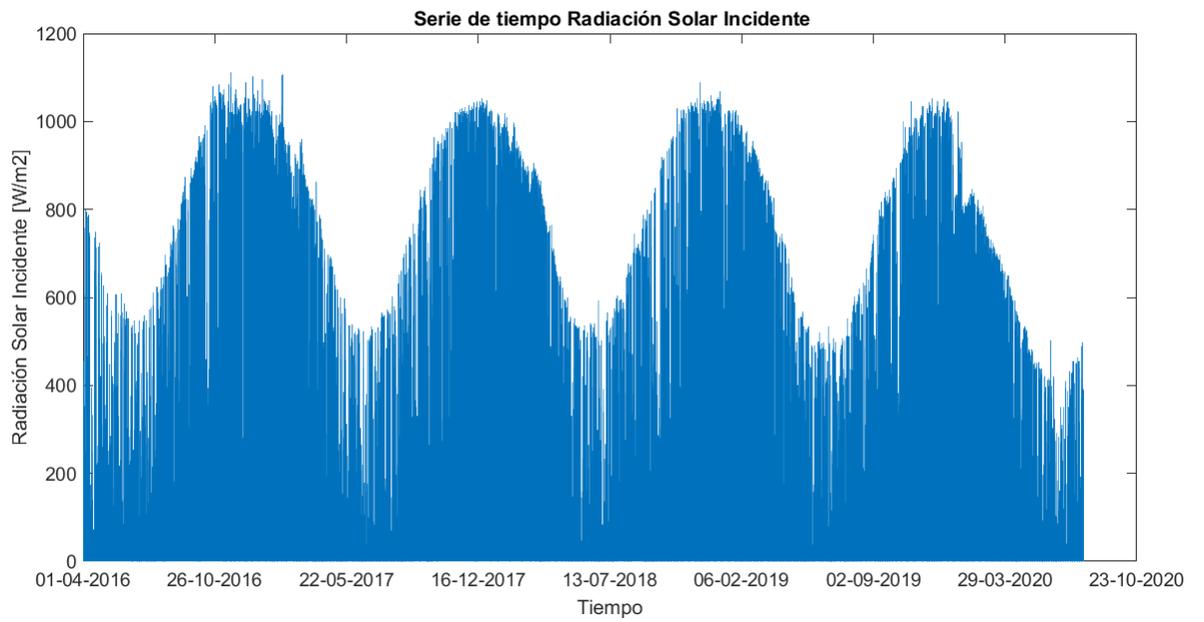


Figura 3.7: Radiación Solar Incidente.

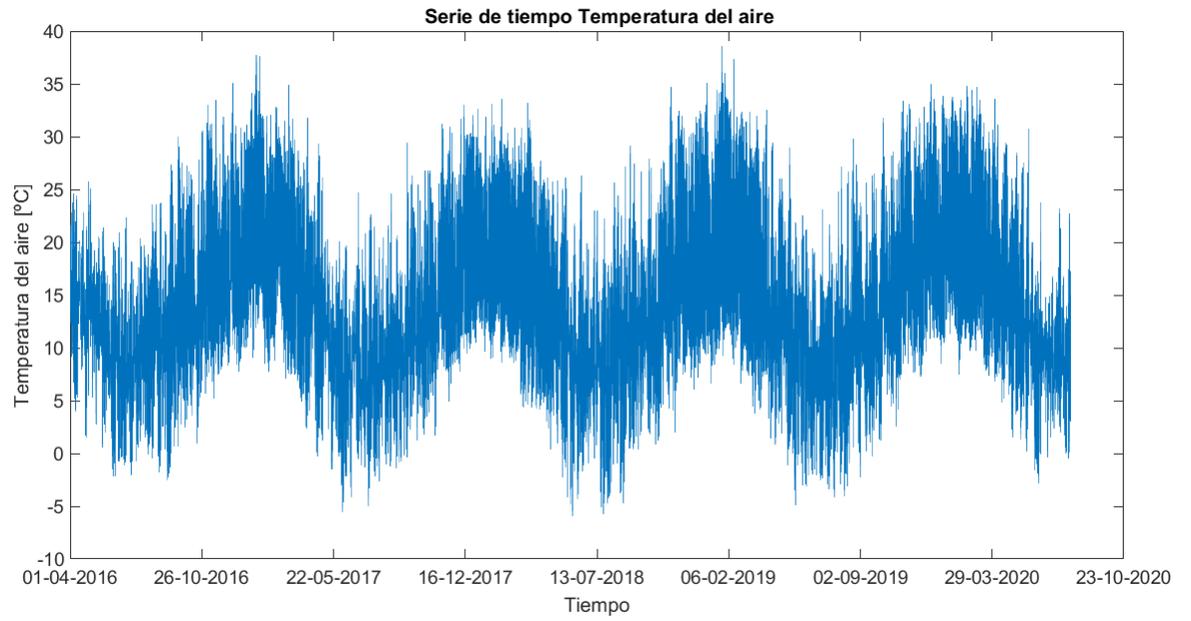


Figura 3.8: Temperatura del Aire.

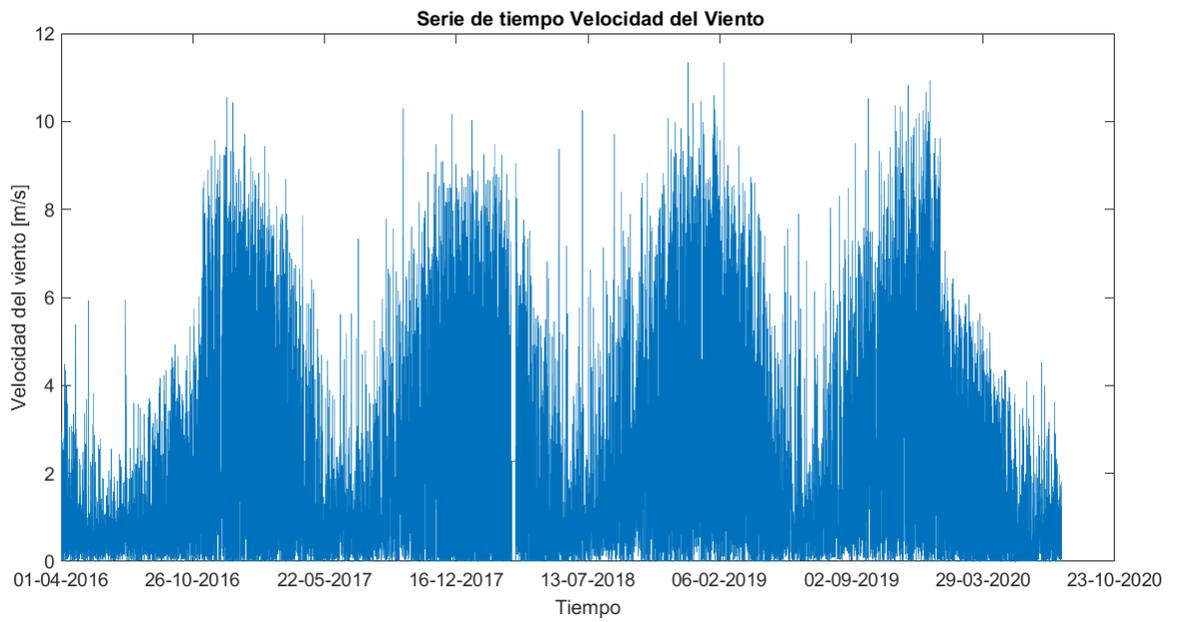


Figura 3.9: Velocidad del Viento.

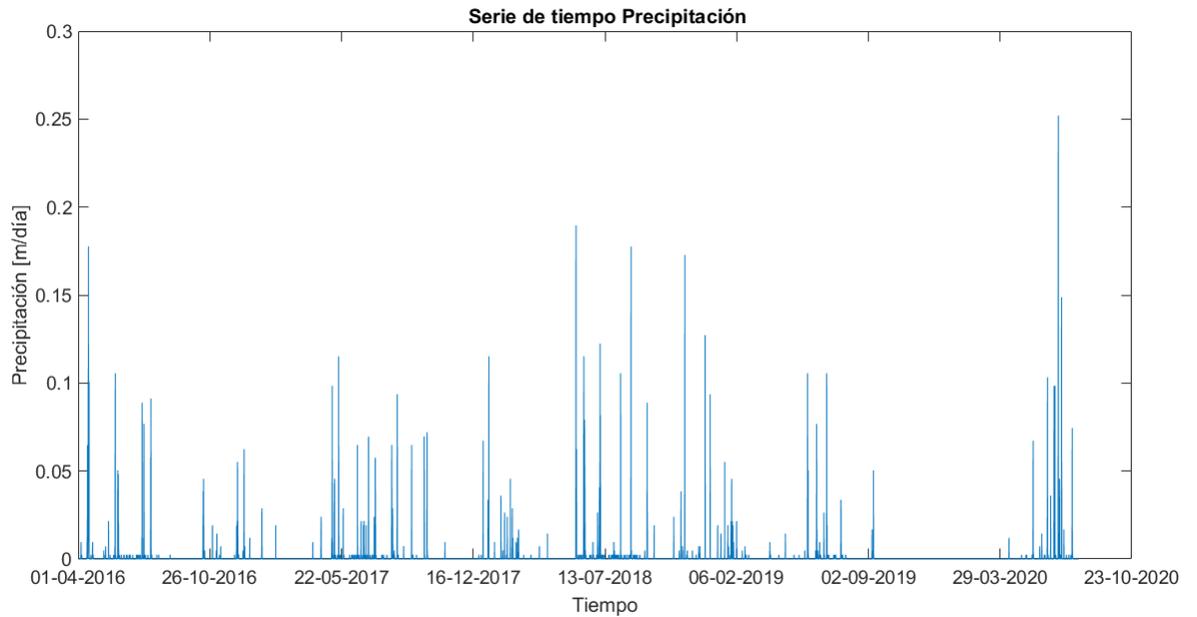


Figura 3.10: Precipitación.

Estas series se construyeron y luego se ingresan como datos de entrada al programa GLM, el cual solicita las variables meteorológicas en un spreadsheet llamado met-hourly.

En los gráficos de series de tiempo de las variables meteorológicas, se puede apreciar que estas presentan un patrón cíclico en el tiempo (excepto para la precipitación), donde los valores se repiten anualmente y de acuerdo a las estaciones del año.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Hidrodinámica de la laguna

Para validar el modelo GLM de temperaturas del agua, se comparan los valores simulados con las mediciones obtenidas mediante los termistores de las boyas de la laguna Norte (P2-Vertedero) y Sur (P1-Entrada de riego) (ver figura 3.1).

En la configuración del software GLM, se escogió cloud mode=1. Esto significa que para el cálculo de la emisividad de la atmósfera se usó la fórmula de Idso y Jackson 2.16.

Romero et al. (1988) señala que el valor del coeficiente de atenuación de la luz aumenta según el grado de polución en la laguna. Esto quiere decir que entre mayor sea el grado de enriquecimiento de nutrientes, mayor será el coeficiente de extinción del sistema en cuestión. Ella calcula para el lago Biwa (lago eutrófico), un coeficiente de extinción de la luz de 0.62 m. Por lo cual un lago hipereutrófico tendría mayor valor aún. Finalmente se calibró este coeficiente en 0.9 [1/m].

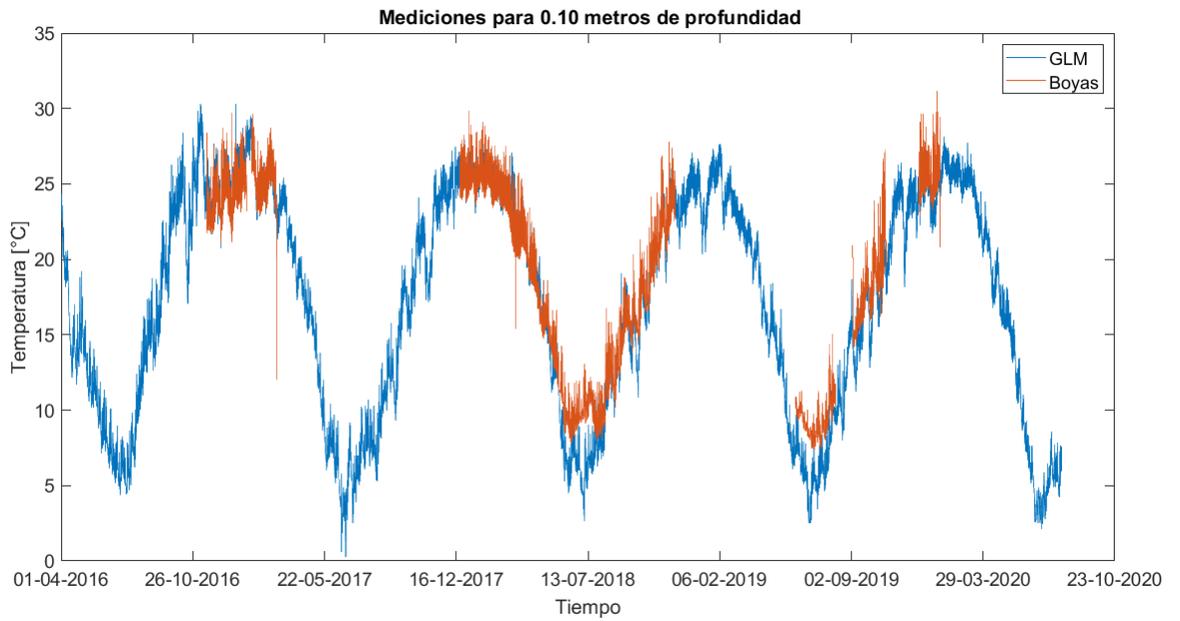


Figura 4.1: Boya Norte. Termistor 0.10 metros de profundidad.

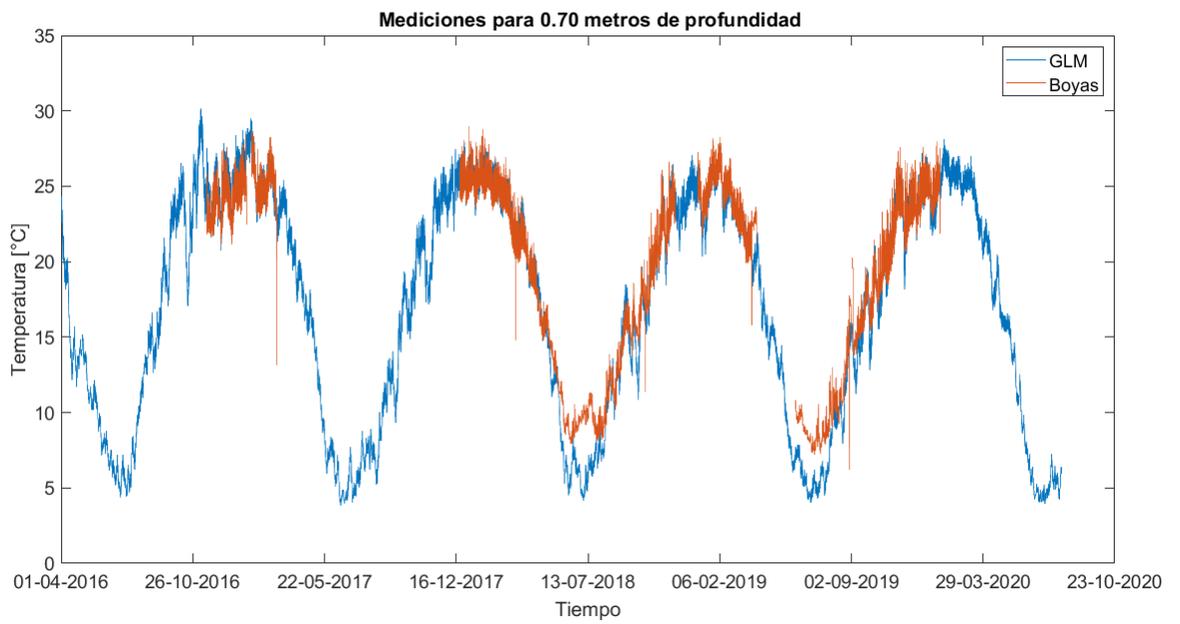


Figura 4.2: Boya Norte. Termistor 0.70 metros de profundidad.

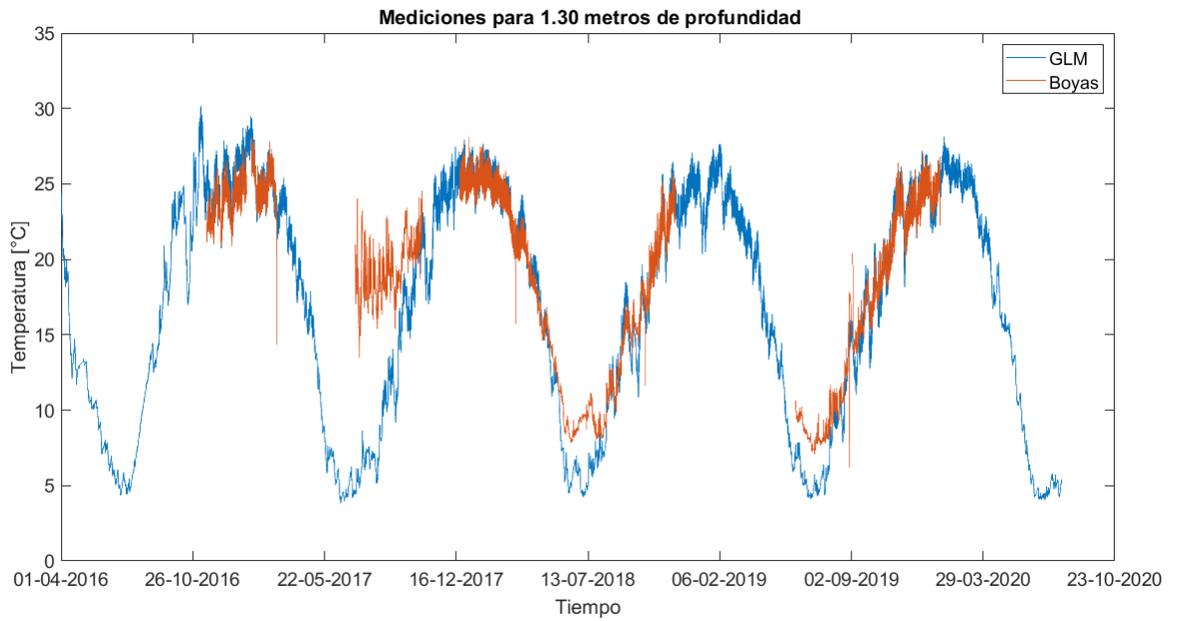


Figura 4.3: Boya Norte. Termistor 1.30 metros de profundidad.

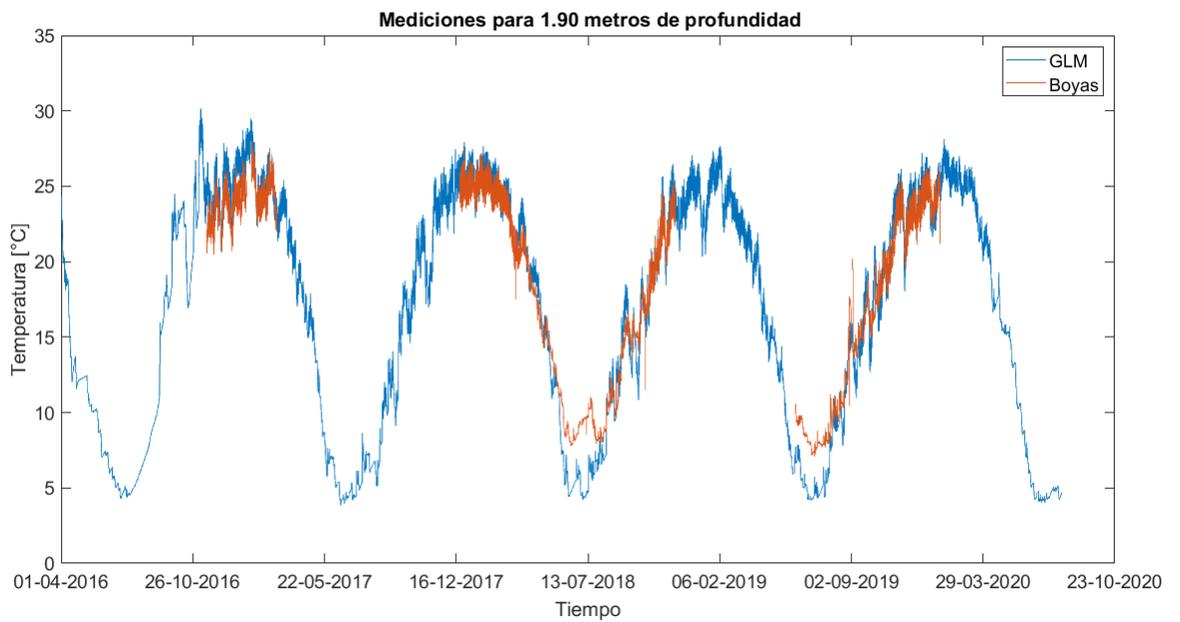


Figura 4.4: Boya Norte. Termistor 1.90 metros de profundidad.

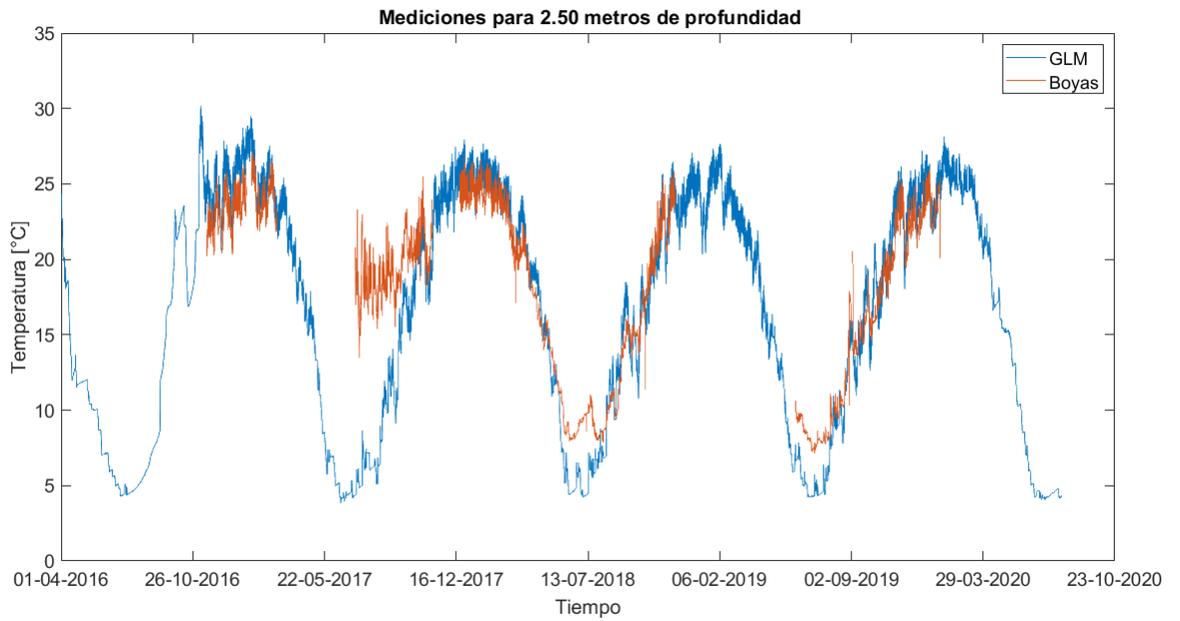


Figura 4.5: Boya Norte. Termistor 2.50 metros de profundidad.

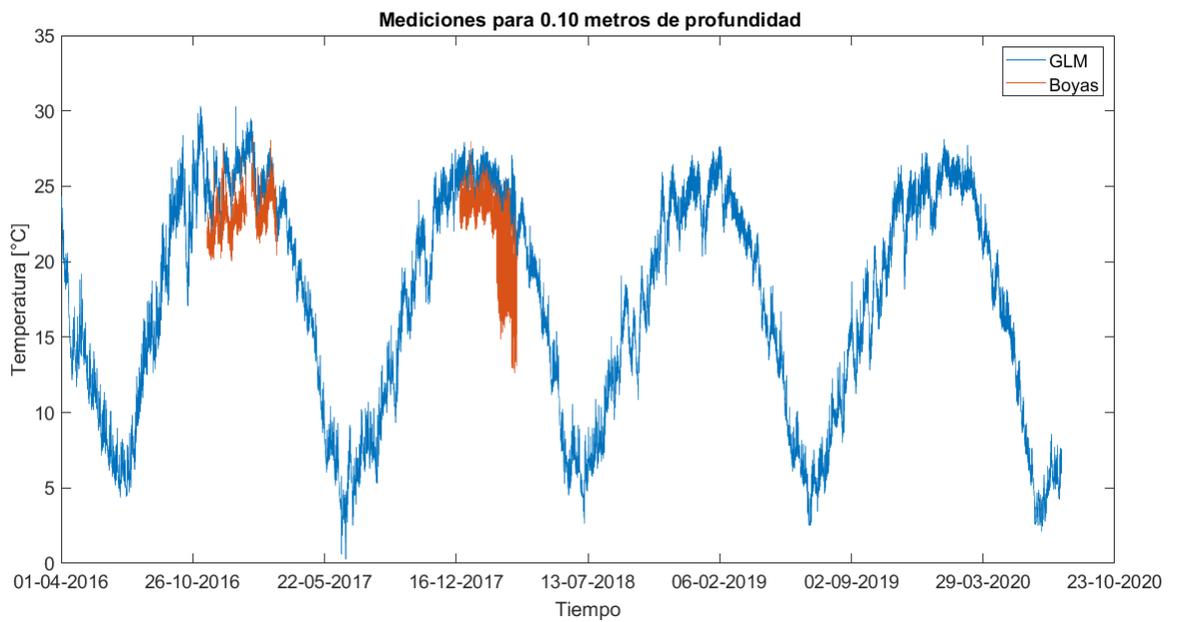


Figura 4.6: Boya Sur. Termistor 0.10 metros de profundidad.

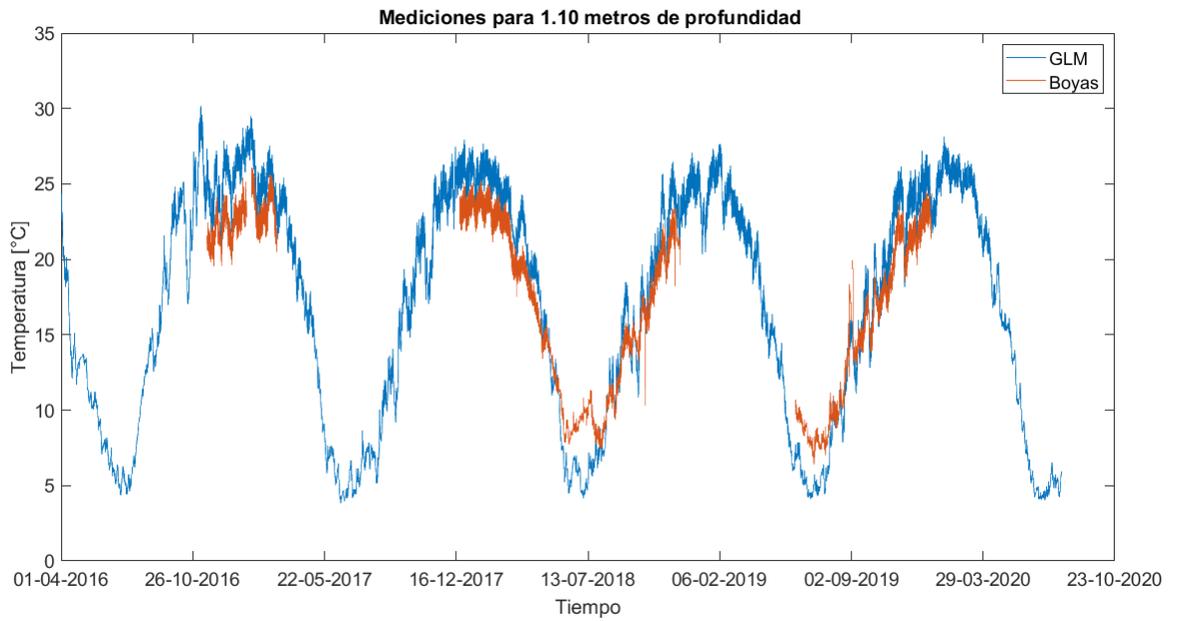


Figura 4.7: Boya Sur. Termistor 1.10 metros de profundidad.

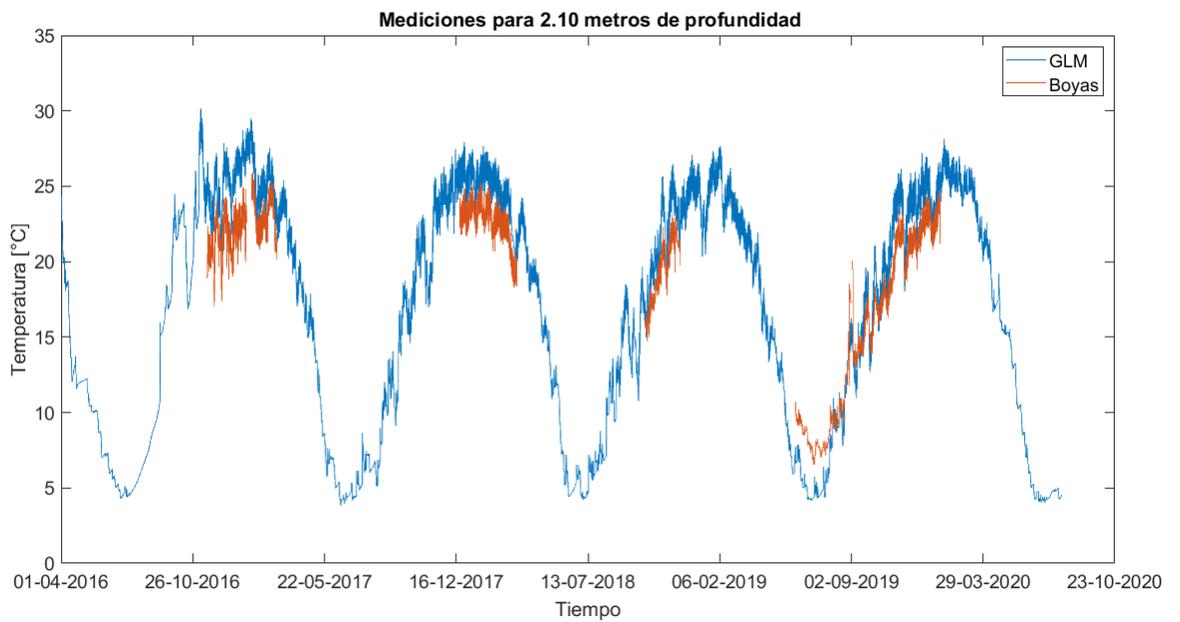


Figura 4.8: Boya Sur. Termistor 2.10 metros de profundidad.

A continuación se presenta el error en las mediciones de temperatura en cada boya:

Tabla 4.1: Error cuadrático medio de las mediciones.

Boya	Profundidad [m]	ECM [°C]
Norte	0.10	1.93
Norte	0.70	1.66
Norte	1.30	3.60
Norte	1.90	1.82
Norte	2.50	3.76
Sur	0.10	2.74
Sur	1.10	2.27
Sur	2.10	2.46

Como se puede ver en las figuras anteriores la temperatura del agua guarda buena relación con la obtenida por los termistores de la boya Norte y Sur. Excepto en la figura 4.3 y 4.5 donde entre la fecha 22-05-2017 y 16-12-2017 las temperaturas no concuerdan. De hecho éstas tienen un error mayor del orden de 3°C.

Para las temperaturas mínimas de GLM en el tiempo, éste subestima la temperatura real alcanzada por los termistores. Esto ocurre para todos los termistores de la boya Norte y para los termistores de las figuras 4.7 y 4.8.

Luego de validar la temperatura por medio de las boyas, se puede mostrar la temperatura de la laguna en función de la profundidad y el tiempo.

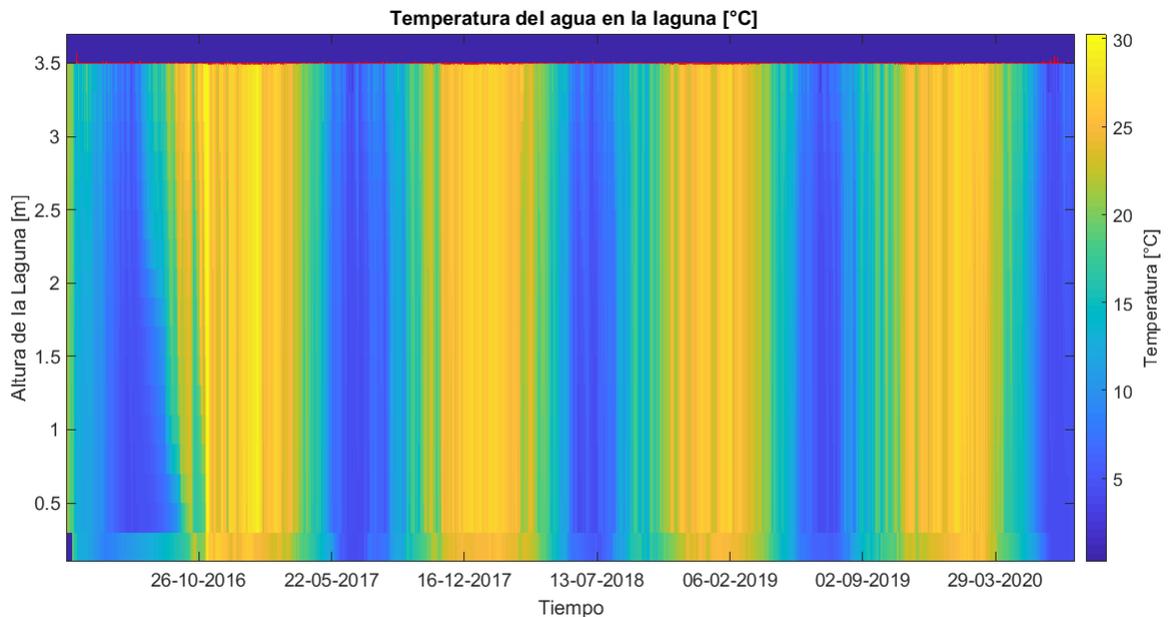


Figura 4.9: Temperatura del agua en la laguna.

También se obtiene la densidad de la laguna en función de los mismos parámetros:

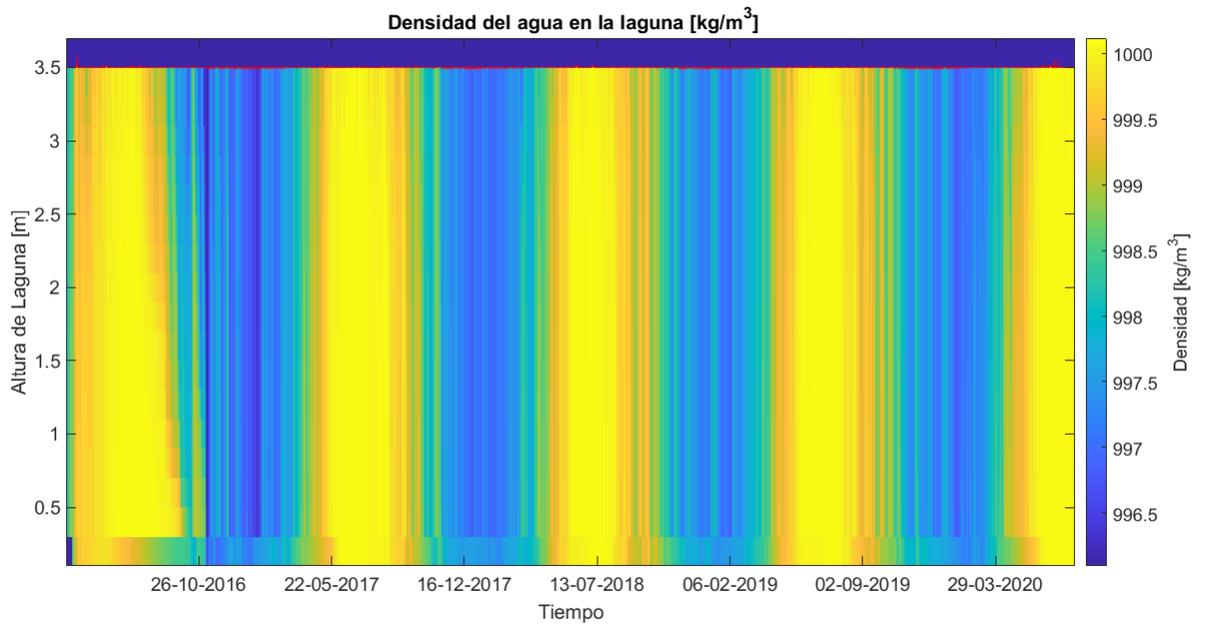


Figura 4.10: Densidad del agua en la laguna.

4.2. Calidad del agua en la laguna

Caudales afluentes:

Los caudales afluentes corresponden al caudal que iguala la evaporación de la laguna y el caudal vertido por la planta de tratamientos (PTAS punto 3). El efluente ingresado al software corresponde al mismo caudal que es vertido por la planta de tal forma que hay un equilibrio en las entradas y salidas de agua. Por otro lado en el punto 3 (PTAS), se vierten nutrientes a la laguna. Su magnitud se obtiene analizando en laboratorio las concentraciones en ese punto en la laguna, de manera que la concentración del nutriente o variable en dicho punto en el agua es igual a los nutrientes o variables vertidos por la planta de tratamiento. Los resultados de las mediciones obtenidas se presentan en los anexos A.3. Es decir la concentración de nutrientes en el punto 3 es igual a las variables afluentes vertidas en la laguna. Las concentraciones de las variables afluentes a la laguna se presentan a continuación (punto 3):

- $Q_{planta}=71.4 \frac{m^3}{d}$
- $NH_4^+=4.16 \frac{mg}{L}$
- $NO_3^-=3.24 \frac{mg}{L}$
- $PO_4^{-3}=3.45 \frac{mg}{L}$

Cabe mencionar que la concentración afluente a la laguna de O_2 se calibra como la configuración inicial (concentración inicial) que traía el programa por defecto:

- $O_2=7.20 \frac{mg}{L}$

Tanto NH_4^+ , NO_3^- y PO_4^{-3} son promedios de la tabla A.3, la cual corresponde al punto 3 de la laguna, donde se vierten los contaminantes de la PTAS, por lo cual corresponden a las concentraciones del afluente vertido a la laguna. En ese punto al igual que en los otros dos se midieron las concentraciones en Carén.

A continuación se presenta la desviación estándar de las mediciones en el punto 3:

- $\sigma_{NH_4^+}=3.66 \frac{mg}{L}$
- $\sigma_{NO_3^-}=4.74 \frac{mg}{L}$
- $\sigma_{PO_4^{-3}}=3.25 \frac{mg}{L}$

Viendo la tabla 2.4 los niveles de las variables químicas, cumplen con el decreto supremo 90:

Tabla 4.2: Concentraciones de nutrientes fósforo y potasio.

Unidad de medida	Variables		
	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{-3}
[mmol/m3]	230.95	52.26	36.32
[mol/L]	0.0002	0.00005	0.00004
Concentracion total	N		P
[mol/L]	0.0003		0.00004
[mg/L]	3.96		1.13

El modelo simulado necesita las condiciones iniciales de cada parámetro o elemento químico que influye en la calidad del agua.

Para el oxígeno se usa como condición inicial la cantidad de oxígeno disuelto durante el primer día donde hay registro de mediciones. Lo mismo para el amonio, nitrato y fosfato. A continuación se presenta la tabla resumen de las condiciones iniciales:

Tabla 4.3: Condiciones iniciales.

Variable	C_0 [mg/L]	C_0 [mmol/m ³]	Fecha mediciones	Punto
OD	8.98	280.63	2017-01-27	2
Amonio [NH_4^+]	0.71	39.22	2018-06-20	1
Nitrato [NO_3^-]	0.77	12.37	2018-06-20	2
Fosfato [PO_4^{-3}]	2.02	21.28	2018-06-20	1

Con respecto a la temperatura del afluente, esta fue calibrada como la temperatura del agua al interior de la laguna.

Usando el software GLM, en su sección de calidad del agua, se obtienen los gráficos que servirán de validación para las distintas variables. GLM modela en función de la altura de la laguna y en función del tiempo el valor de la variable en estudio. Entonces, se promedia para todos los tiempos, los valores de la variable en toda la columna del agua. Luego se obtienen curvas donde la variable promediada en la columna del agua depende del tiempo, para finalmente comparar la curvas obtenidas con los muestreos puntuales (set de datos de calidad de agua en anexo A.1 A.2 y A.3). De esa forma se observa cual de los 3 muestreos se acerca más a la curva.

Si las curvas con alguno de los muestreos puntuales se parecen o guardan buena relación, el modelo de cada variable quedará validado. Es aquí donde el error cuadrático medio torna relevancia, si este es bajo el modelo es validable.

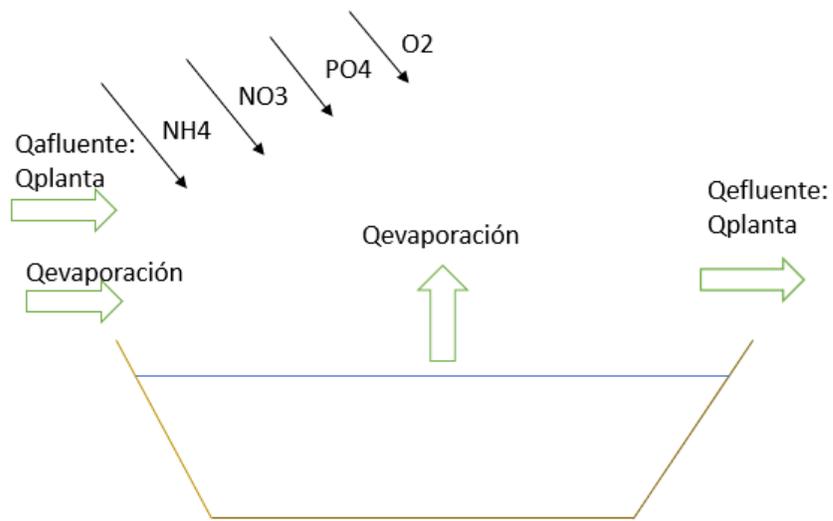


Figura 4.11: Esquema laguna

4.2.1. Fosfato

Para la validación del modelo se usaron las concentraciones de afluente de la tabla 4.2 y se configuró el flujo de sedimentos siguiendo esta forma:

- Flujo de sedimentos de $PO_4 = 4 \frac{mmol}{m^2d}$
- Flujo de sedimentos de $NO_3 = 0 \frac{mmol}{m^2d}$
- Flujo de sedimentos de $NH_4 = 9 \frac{mmol}{m^2d}$
- Flujo de sedimentos de $O_2 = -20 \frac{mmol}{m^2d}$

El flujo se configuró de forma de llegar a las concentraciones de fosfato adecuados, los cuales se encuentran si la curva del fosfato se asemeja a cualquiera de los 3 muestreos puntuales. Flujo de sedimentos positivo indica que este va en la dirección de la columna de agua y flujo negativo indica que va en la dirección de los sedimentos.

En la figura 4.12 se presenta la curva de validación para el fosfato. Esta se puede realizar si la curva de GLM se asemeja a cualquiera de los 3 muestreos puntuales.

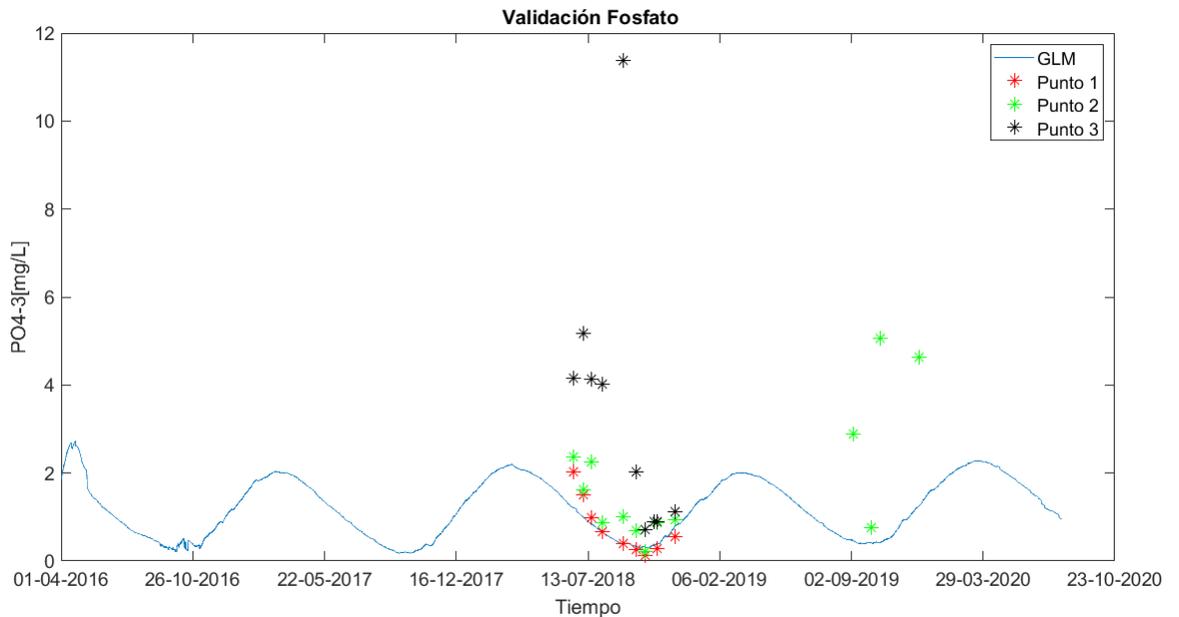


Figura 4.12: Validación del fosfato.

Existen 3 puntos de muestreo (A.1, A.2 y A.3). El muestreo no es continuo, sino que puntual. Los datos que más se ajustan a la curva corresponden a los del punto 1. Así que se calculará sólo su error en las mediciones para esa zona de muestreo (Punto 1).

Tabla 4.4: ECM fosfato

Punto	ECM [mg/L]
1	0.34

Los puntos de la figura 4.12 se ajustan a la curva del fosfato, por lo cual se valida el modelo y se puede mostrar las concentraciones de fosfato en función de la altura de la laguna y el tiempo:

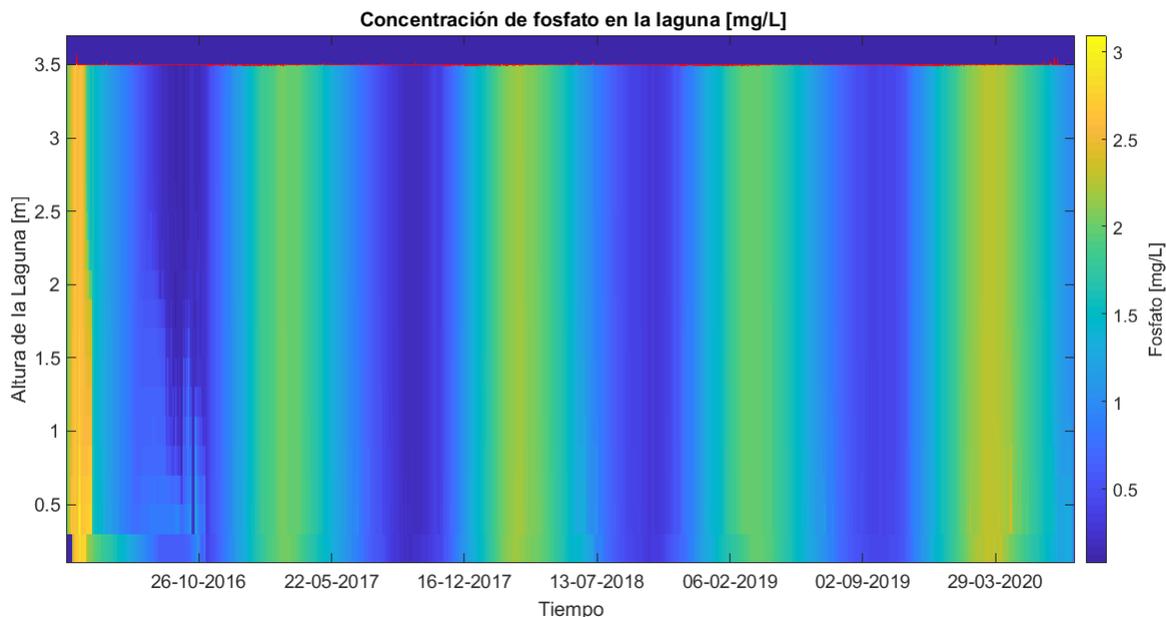


Figura 4.13: Concentración de fosfato.

El modelo se asemeja más al punto 1. Este sigue una forma similar a la del muestreo en Punto 1, en el corto período que se midió.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala un valor de 0.24 [mg/L] de PO_4^{-3} , mientras que el software entrega un valor promedio de 1.21 [mg/L] (tabla 4.15).

Según la imagen anterior (4.13) los niveles máximos de PO_4 se alcanzan en la época de marzo y los mínimos en septiembre. Esto ocurre cíclicamente durante cada año.

Se calculará la desviación porcentual que tiene el elemento o parámetro químico con respecto a la referencia de la tabla 2.2:

$$Desviación\ porcentual[\%] = 100 \frac{Valor\ de\ referencia - Valor\ real}{Valor\ de\ referencia} \quad (4.1)$$

– Desviación porcentual de $PO_4 = -97.1\%$

Los valores que entrega el software son mayores que los que entrega la referencia de la tabla 2.2, la diferencia es tal que la desviación porcentual o error es cercano al -100 %

4.2.2. Ión Amonio

Para el ión amonio los datos son los siguiente:

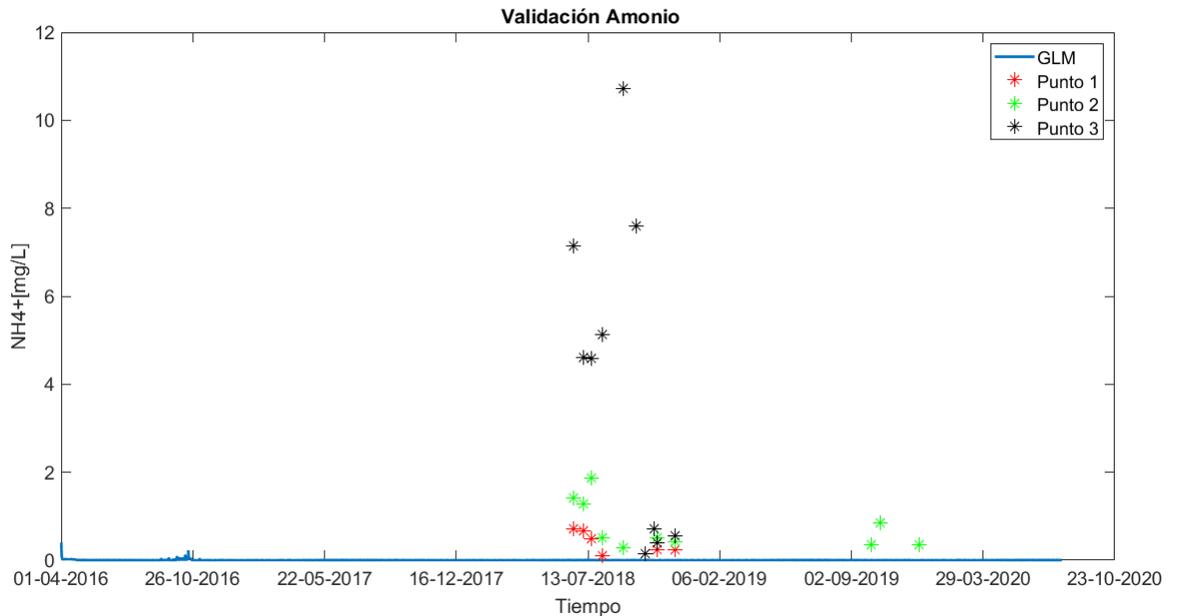


Figura 4.14: Validación del amonio.

Los muestreos que más se acercan a la curva del amonio son los del punto 1, por lo cual se calcula el error cuadrático medio asociado a ese punto.

Tabla 4.5: ECM ión amonio.

Punto	ECM [mg/L]
1	0.46

Viendo el gráfico 4.14 los puntos no se ajustan bien al muestreo con menos error (punto 1). Aun así el error no es alto, pero los valores de la curva del amonio son muy bajos, respecto a lo que debieron haber sido. No se presentará su gráfica de las concentraciones en función de la altura y el tiempo.

Ninguno de los tres muestreos puntuales se asemejan a la curva del amonio, aunque el más cercano, y no se aprecia, es el punto 1. Los valores máximos de concentraciones de ión amonio están en la fecha de octubre de 2016, luego disminuye hasta cero para el resto del tiempo.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala una concentración de NH_4^+ de 0.22 [mg/L], mientras que el modelo arroja un valor promedio de 0.005 [mg/L](tabla 4.15).

– Desviación porcentual de $NH_4 = 97.7\%$

La desviación porcentual con respecto a la referencia es muy alta, debido a las bajas concentraciones de amonio en la columna de agua y el tiempo. Dadas estas diferencias entre mediciones y modelo, éste no se valida.

4.2.3. Nitrato

La curva del nitrato en función del tiempo se muestra a continuación:

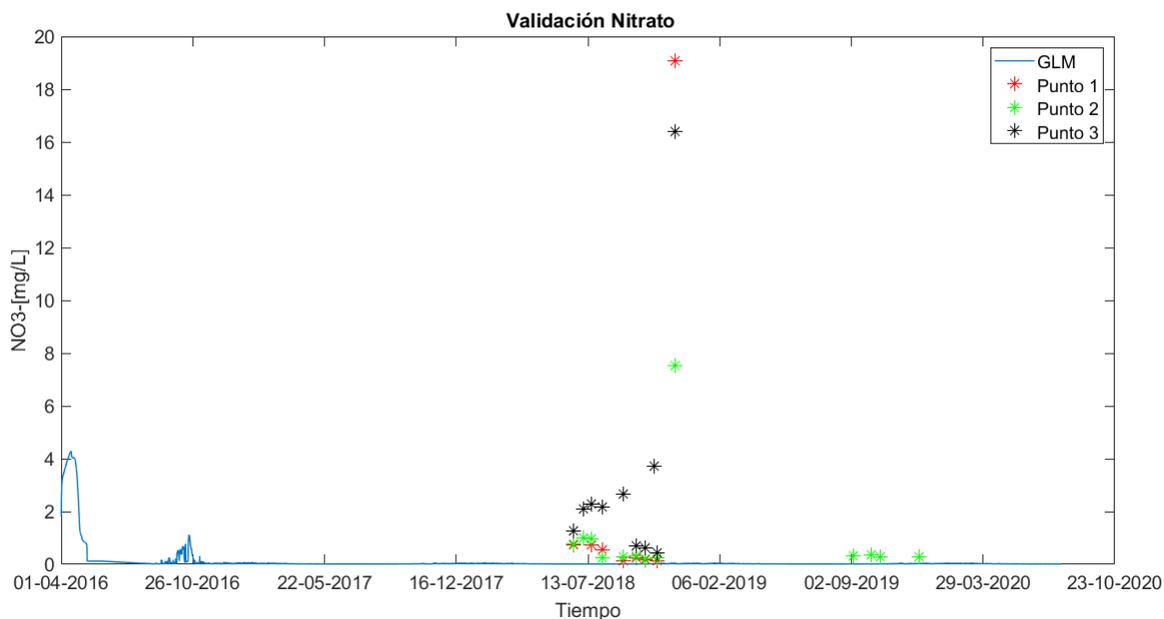


Figura 4.15: Validación del nitrato.

Ningún muestreo se ajusta a la curva. De todas formas se calculó el error cuadrático medio asociado al punto 2, el cual es el más cercano:

Tabla 4.6: ECM nitrato.

Punto	ECM [mg/L]
2	2.14

El error es alto dado los bajos niveles de nitrato, por lo cual no se valida el modelo. Para validar esos datos las concentraciones de nitrato debieron haber sido más altas. No se mostrará la gráfica con las concentraciones en función de la altura y el tiempo.

Ninguno de los tres muestreos puntuales se asemejan a la curva del nitrato, aunque el más cercano, y no se aprecia, es el punto 2. Se aprecian dos máximos en la curva GLM. Uno por mayo del 2016 aproximadamente y el otro en octubre de 2016 (máximo local). Sólo en estas fechas los valores obtenidos son considerables y distintos a cero.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala una concentración de NO_3^- de 1.24 [mg/L] mientras que el software arroja un promedio de 0.11 [mg/L](tabla 4.15).

– Desviación porcentual de $NO_3 = 91.4\%$

La concentración promedio de NO_3 en la columna de agua y el tiempo es muy bajo, por eso el alto error con respecto a la referencia.

4.2.4. Clorofila

GLM permite obtener los niveles de clorofila en la laguna, los cuales cumplen una función principal en la fotosíntesis y creación de O_2 al interior de la laguna:

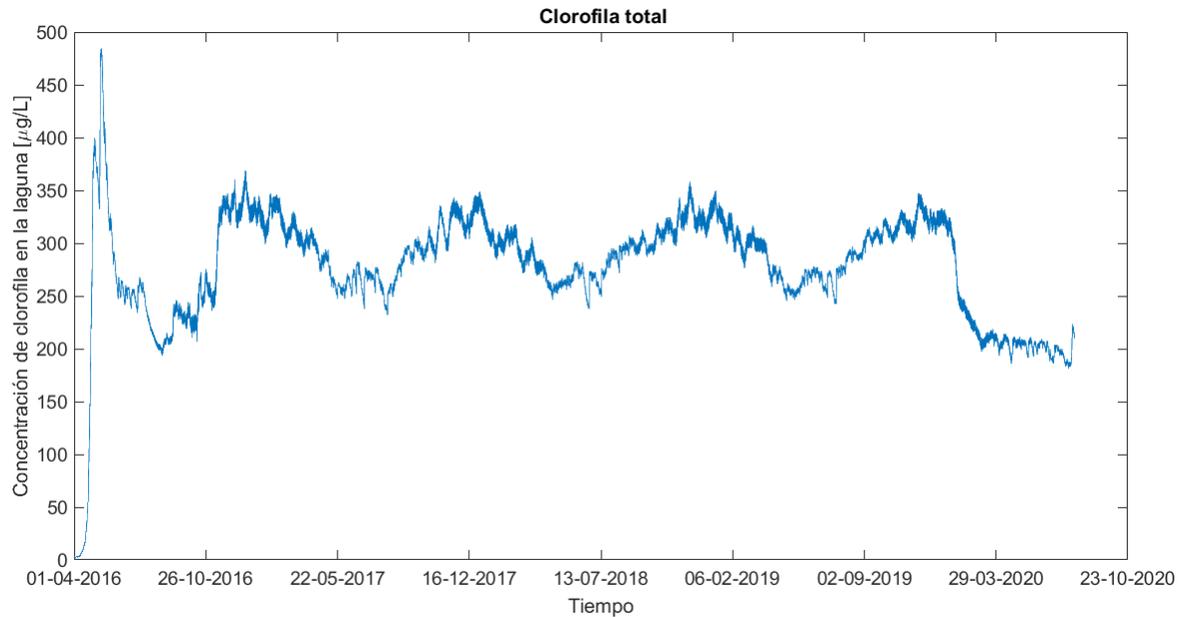


Figura 4.16: Concentración de clorofila total promediada en la columna de agua.

También se puede obtener el valor de la clorofila en función del tiempo y la altura de la laguna:

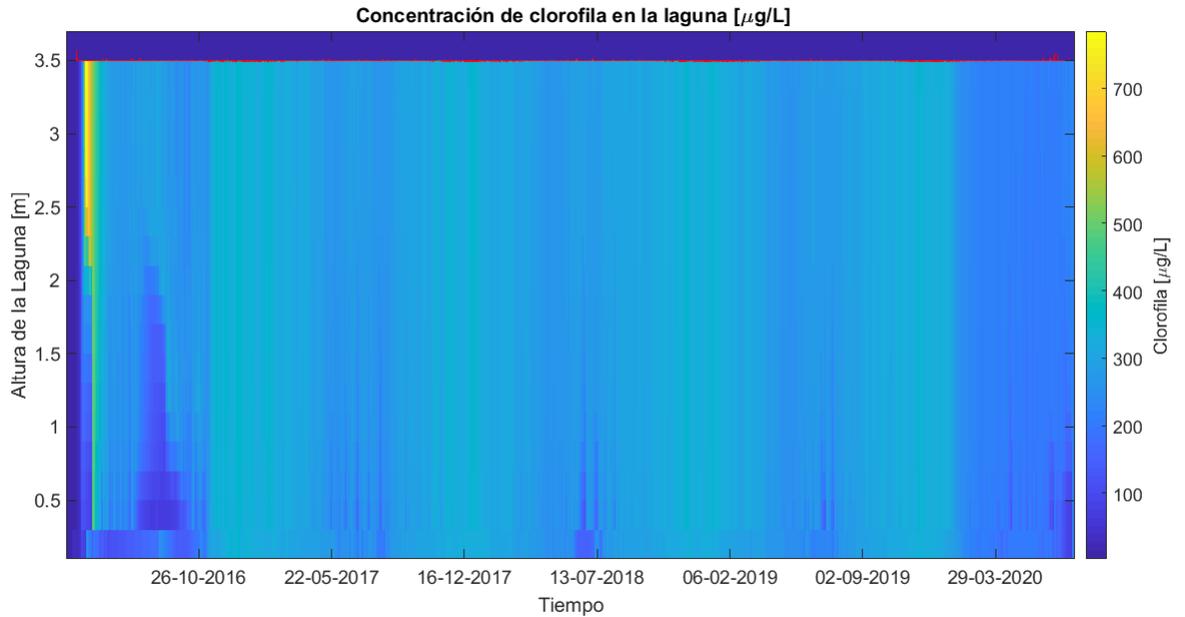


Figura 4.17: Concentración de clorofila total en la columna de agua.

Almanza-Marroquín et al. (1984) señala valores máximos para la clorofila en lagunas someras e hipereutróficas de $340 \text{ } [\mu\text{g}/\text{L}]$ aproximadamente. Esto para dos de sus lagunas en estudio lo cual no difiere mucho en Laguna Carén. Donde el máximo global es de $500 \text{ } [\mu\text{g}/\text{L}]$ y otros máximos locales que oscilan en torno a $340 \text{ } [\mu\text{g}/\text{L}]$. Lo que varía es el promedio.

El software arroja un valor promedio de concentración de clorofila total de $277.4 \text{ } [\mu\text{g}/\text{L}]$. Mientras que Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2 señala una concentración de $56 \text{ } [\mu\text{g}/\text{L}]$.

– Desviación porcentual de *Clorofila* = -390.2%

La desviación es alta dado los grandes concentraciones de Clorofila promedios arrojados por el software.

4.2.5. Oxígeno Disuelto

Las curvas del oxígeno disuelto en el tiempo son las siguientes, estas se midieron en la boya norte (punto 2):

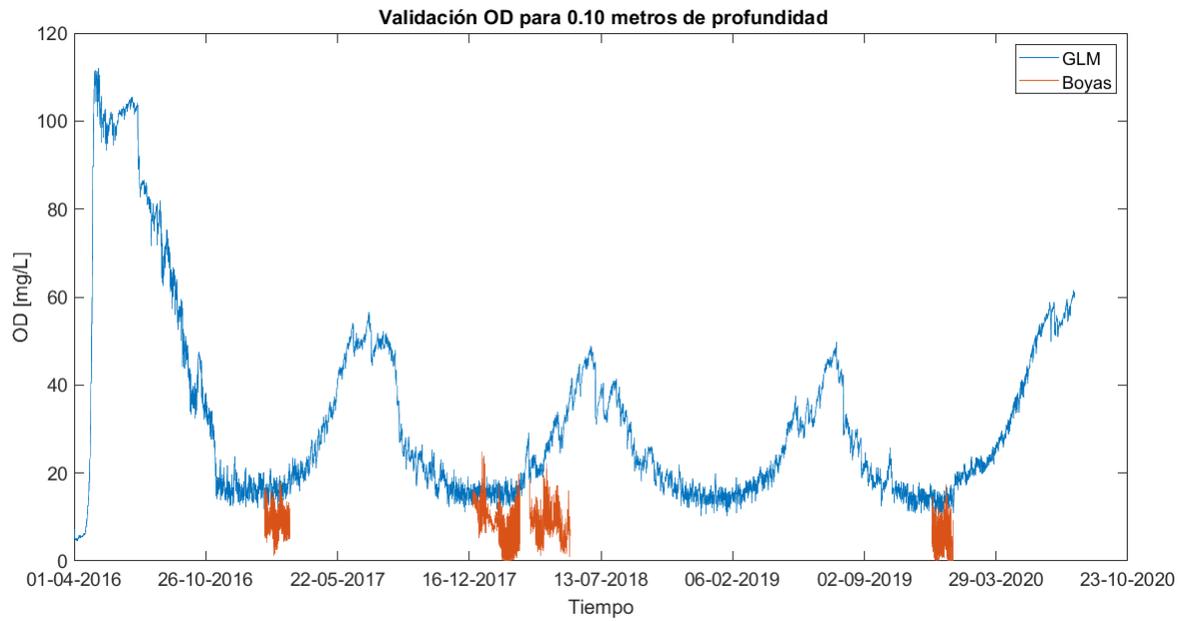


Figura 4.18: Concentración de O_2 a 10 cm de profundidad.

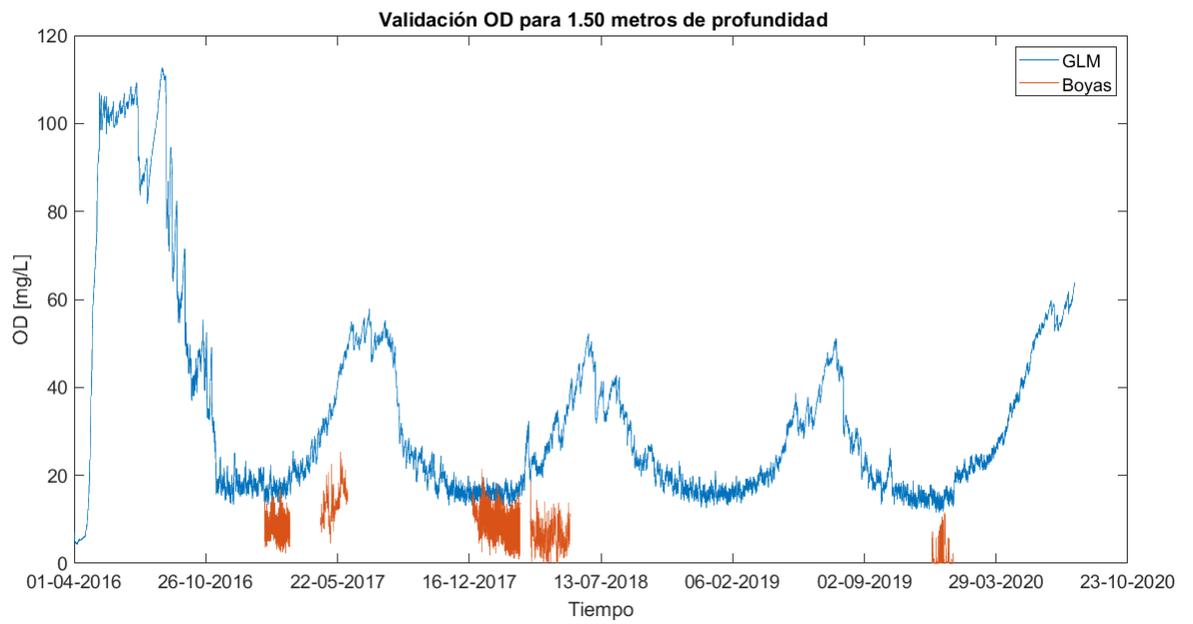


Figura 4.19: Concentración de O_2 a 1.50 metros de profundidad.

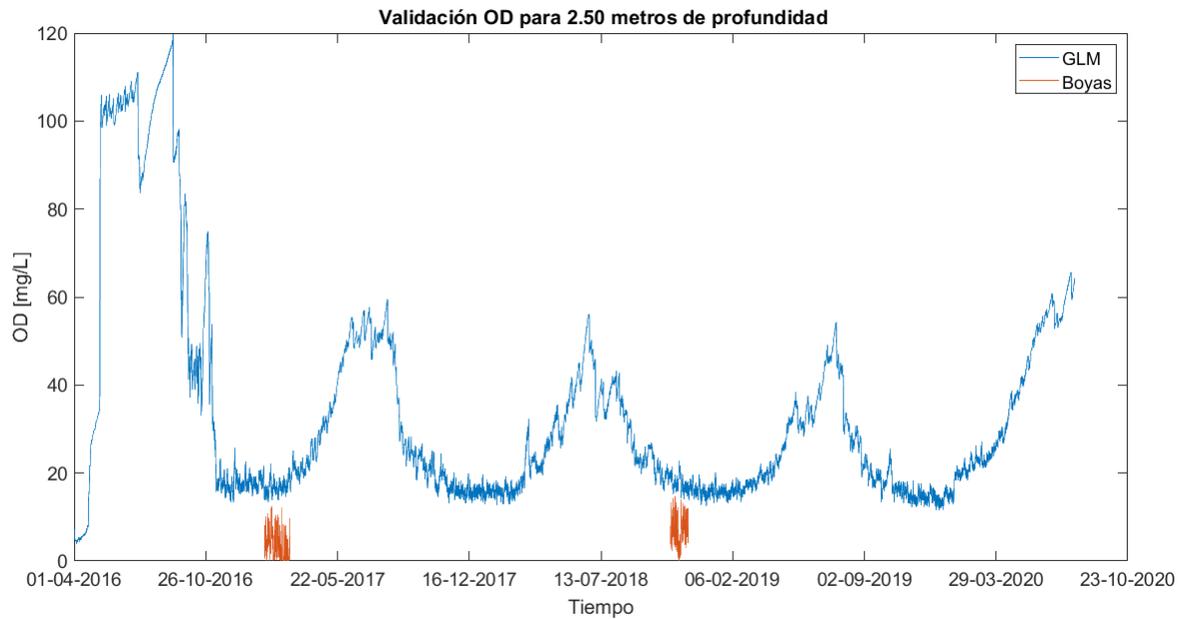


Figura 4.20: Concentración de O_2 a 2.50 metros de profundidad.

A continuación se presenta el error cuadrático medio de las mediciones:

Tabla 4.7: ECM O_2 .

Punto	Profundidad [m]	ECM [mg/L]
2	0.10	13.15
2	1.50	16.93
2	2.50	12.44

El modelo de Oxígeno disuelto no se valida, dado su alto error. Los niveles de OD simulados debiesen ser más bajos que los obtenidos. De todos modos se presenta su concentración en la columna del agua y el tiempo:

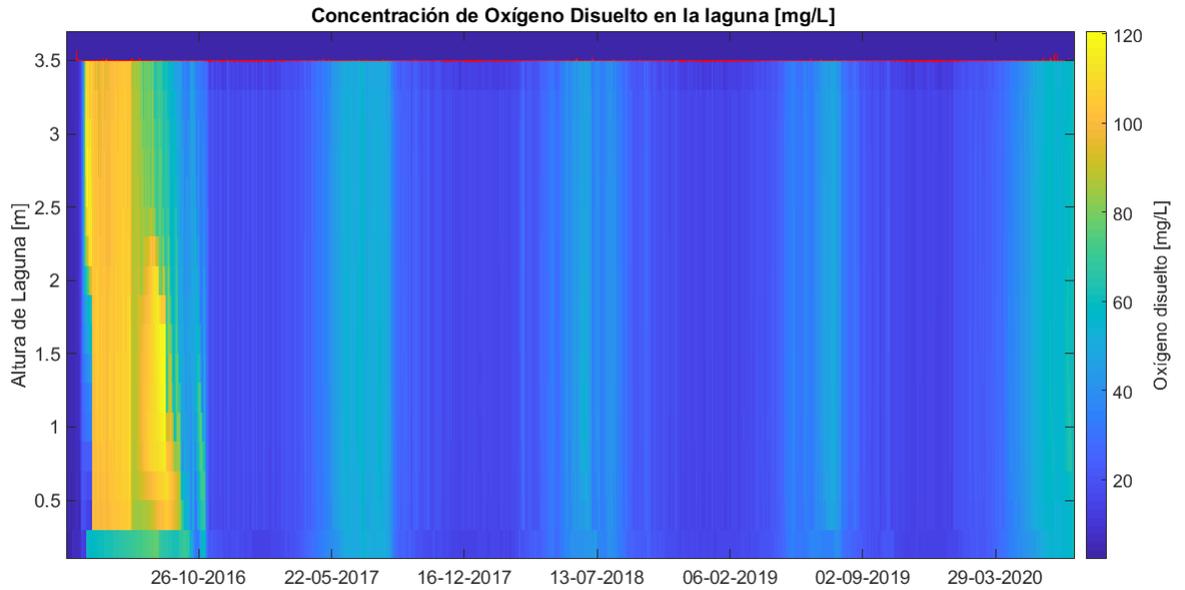


Figura 4.21: Concentración de O_2 en la columna de agua.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala una concentración de O_2 de 8.13 [mg/L], mientras que la simulación con menos error (profundidad de 2.50 metros) arroja una concentración promedio de 33.85 [mg/L].

– Desviación porcentual de $O_2 = -316.4\%$

La desviación es grande ya que el software en promedio entrega una concentración muy alta, superior a la referencia entregada por Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2.

Esta desviación justifica los grandes errores cuadráticos medios calculados en la tabla 4.7

4.2.6. pH

A continuación se presenta el pH en el tiempo. Primero se procedió a promediarlo para cada instante en la columna de agua. Luego se pudo construir su serie de tiempo:

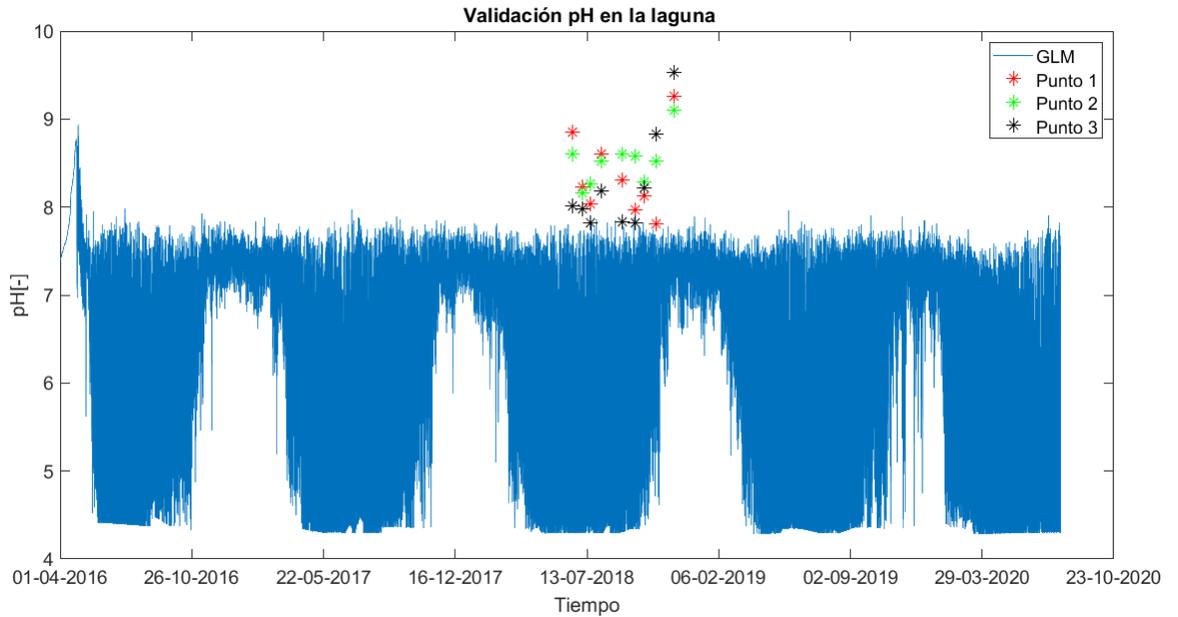


Figura 4.22: pH en la columna de agua.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala para lagunas hipereutróficas o eutróficas y someras un valor de pH de 8.07 mientras que en promedio el pH registra un valor de 6.36. Si bien el promedio se encuentra cercano al valor óptimo, el pH oscila en torno a 4.5 y 7.5, valores por lo cual no se valida el modelo y no se calculará su gráfica en función de la altura y el tiempo.

El valor de pH promedio es de 6.36.

– Desviación porcentual de $pH = 21.1\%$

Con esos valores de pH no podría haber vida animal en la laguna.

Tabla 4.8: ECM pH.

Punto	ECM [-]
1	0.87

A pesar del bajo error cuadrático medio de la tabla 4.8, y la baja desviación porcentual, el pH oscila en un alto rango y por ende no es validable.

4.2.7. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad, para lo cual se mantuvieron todos los flujos de sedimentos constantes y se aumentó sólo el flujo de fosfato para lograr que la curva GLM del mismo se pareciera al muestreo puntual en P1. De esta forma se podía saber si las demás curvas se ajustan tal como lo hace el fosfato.

Tabla 4.9: Flujo de sedimentos en la laguna.

Flujo	Flujo inicial	Flujo final
Flujo de sedimentos de Amonio [$\frac{mmol}{m^2d}$]	9	9
Flujo de sedimentos de Nitrato [$\frac{mmol}{m^2d}$]	0	0
Flujo de sedimentos de Fosfato [$\frac{mmol}{m^2d}$]	4	12
Flujos de sedimentos de Oxígeno [$\frac{mmol}{m^2d}$]	-20	-20

Se amplificaron las concentraciones de amonio, nitrato y fosfato en 5 de tal forma de tener una mayor cantidad de éstos al interior de la laguna. Se amplificó en cinco aleatoriamente para a ver si las concentraciones de amonio y nitrato se ajustan bien a los muestreos puntuales por medio de este análisis de sensibilidad tal como lo hace el fosfato. No se amplificó por más ya que las concentraciones de clorofila y oxígeno aumentaron significativamente:

Tabla 4.10: Elementos químicos afluente iniciales y finales (análisis de sensibilidad).

Variable	C_0 afluente [mmol/m ³]	C_0 afluente[mg/L]
NH ₄ ⁺	230.95	4.16
NO ₃ ⁻	52.26	3.24
PO ₄ ⁻³	36.32	3.45
Variable	C_f afluente[mmol/L]	C_f afluente[mg/L]
NH ₄ ⁺	1154.74	20.79
NO ₃ ⁻	261.29	16.20
PO ₄ ⁻³	181.60	17.25

Se puede encontrar las concentraciones totales para la configuración inicial:

Tabla 4.11: Concentraciones totales para configuración inicial.

NH ₄ ⁺ [mmol/m ³]	NO ₃ ⁻ [mmol/m ³]	PO ₄ ⁻³ [mmol/m ³]
230.95	52.26	36.32
N [mmol/m ³]		P [mmol/m ³]
283.21		36.32
N [mg/L]		P [mg/L]
3.96		1.13

Luego se puede encontrar su concentración total (de C_f) también:

Tabla 4.12: Concentraciones totales para configuración final (análisis de sensibilidad).

NH ₄ ⁺ [mmol/m ³]	NO ₃ ⁻ [mmol/m ³]	PO ₄ ⁻³ [mmol/m ³]
1154.74	261.29	181.60
N [mmol/m ³]		P [mmol/m ³]
1416.03		181.60
N [mg/L]		P [mg/L]
19.82		5.63

Como se puede ver en la tabla 4.12 tanto el nitrógeno como el fósforo están en norma del DS 90. $N < 50[\frac{mg}{L}]$ y $P < 10[\frac{mg}{L}]$.

Si la configuración amplificada de nutrientes afluentes (análisis de sensibilidad) cumple con la norma, la configuración inicial (al tener valores más bajos) cumple también.

Si bien obtener que los afluentes cumplan con la norma no es el objetivo principal de este trabajo, si es un objetivo secundario.

Desde ahora en adelante se mostrará, la respuesta que tiene al cambio de afluente y flujo de sedimentos, en las concentraciones de NH_4 , NO_3 , PO_4 , clorofila, O_2 y niveles de pH.

4.2.7.1. Respuesta Fosfato

En la sección anterior se mostró que variaron los flujos de sedimentos y concentraciones de nutrientes. A continuación se muestra la respuesta del fosfato a estos cambios. En naranja se presenta la respuesta del sistema:

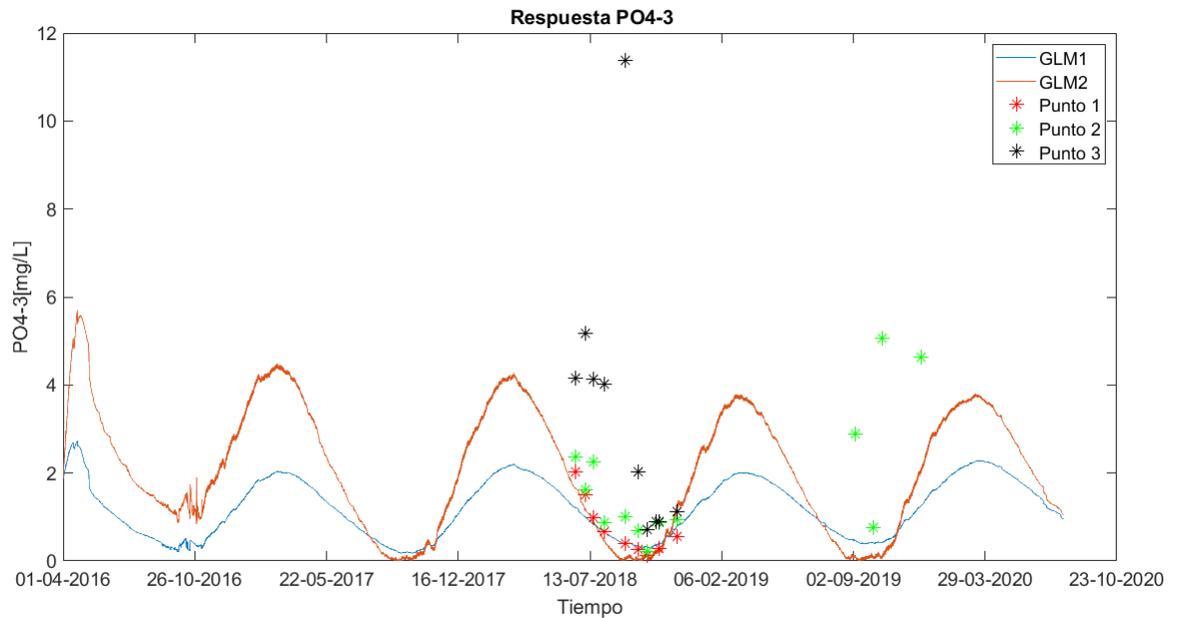


Figura 4.23: Respuesta del fosfato frente a los cambios.

GLM1 corresponde a la curva con configuración inicial y GLM2 es la curva con configuración final.

Como se puede apreciar los resultados obtenidos mejoran. La curva se acerca más al muestreo del punto 1.

– ECM de $PO_4 = 0.33 \frac{mg}{L}$

Esta configuración ofrece un menor error que la curva con configuración inicial (ver tabla 4.4), por lo cual la respuesta del fosfato queda validada y se puede calcular la gráfica de la columna del agua para concentraciones de PO_4 :

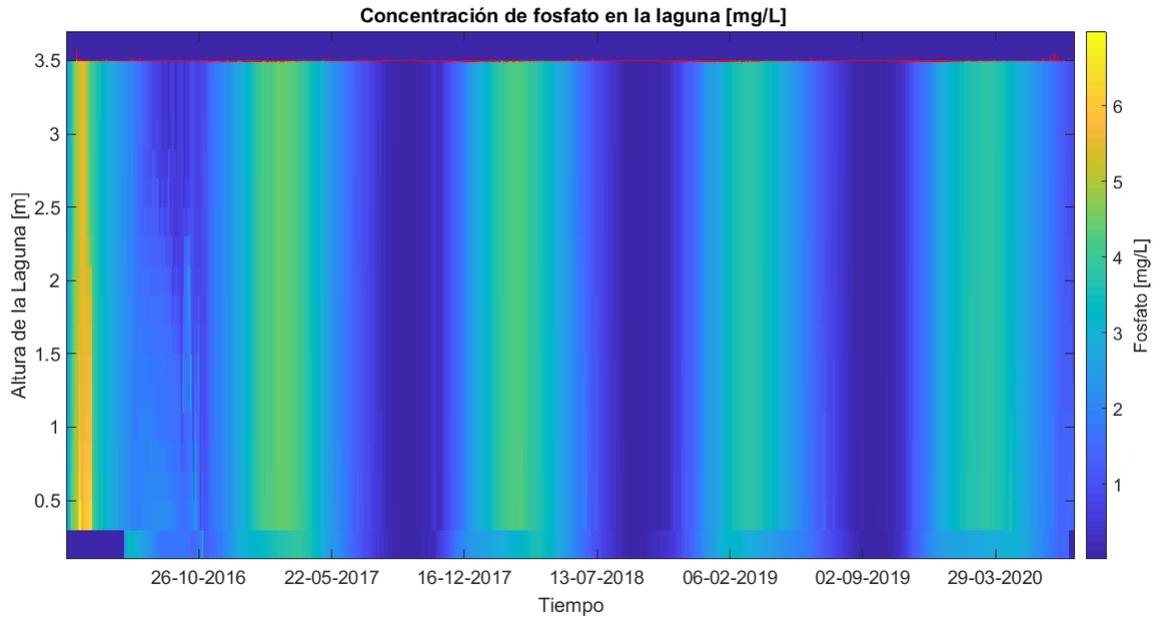


Figura 4.24: Fosfato en la columna del agua.

Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala concentraciones de PO_4 de 0.24 [mg/L], mientras que el modelo GLM arroja un valor promedio de fosfato de 2.08 [mg/L] (tabla 4.16).

– Desviación porcentual de $PO_4 = -184.4\%$

La desviación porcentual supera el 100 % de error, esto dado que se amplifica la cantidad de nutrientes por cinco y además se aumenta el flujo de sedimentos de PO_4 en la columna de agua, por lo cual la concentración de fosfato en el agua crece.

Se aprecia que las concentraciones mínimas de fosfato se dan en el mes de septiembre de manera periódica, en tanto que los máximos se dan en marzo, aproximadamente.

4.2.7.2. Respuesta Amonio

La respuesta del ión amonio se muestra por medio de la siguiente figura:

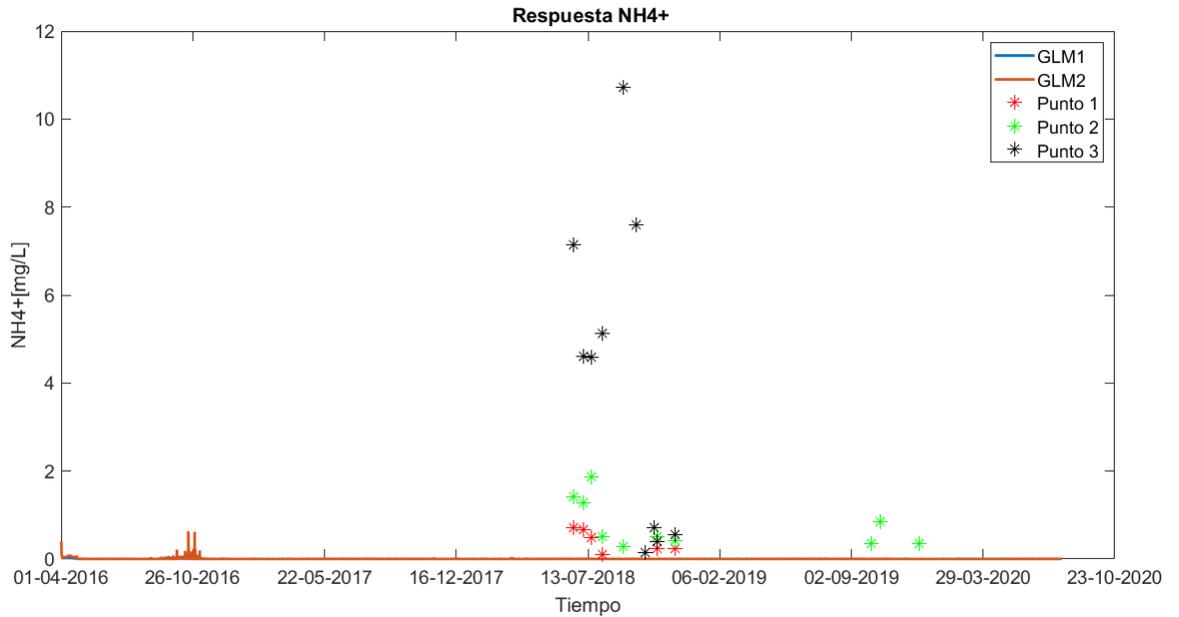


Figura 4.25: Respuesta del amonio frente a los cambios.

Los niveles de amonio aumentan en octubre de 2016, mas en los otros tramos muestra comportamiento similar a la configuración inicial. De hecho la curva de la configuración final se superpone a la de la configuración inicial.

– ECM de $NH_4 = 0.47 \frac{mg}{L}$

Las concentraciones de amonio son muy bajas, por lo cual no se calculara su gráfica en función de la altura y el tiempo. Almanza-Marroquín et al. (1984), en la tabla 2.2 señala concentraciones 0.22 [mg/L] mientras que el modelo GLM arroja concentraciones 0.005 [mg/L](tabla 4.16).

– Desviación porcentual de $NH_4 = 97.6 \%$

Esta desviación se justifica por los bajos valores de concentraciones de amonio en el tiempo.

Como ya se mencionó en el gráfico de la figura 4.25, las concentraciones de amonio son muy bajas. No se valida esta simulación.

4.2.7.3. Respuesta Nitrato

La respuesta del nitrato frente a los cambios se muestra en la figura 4.26:

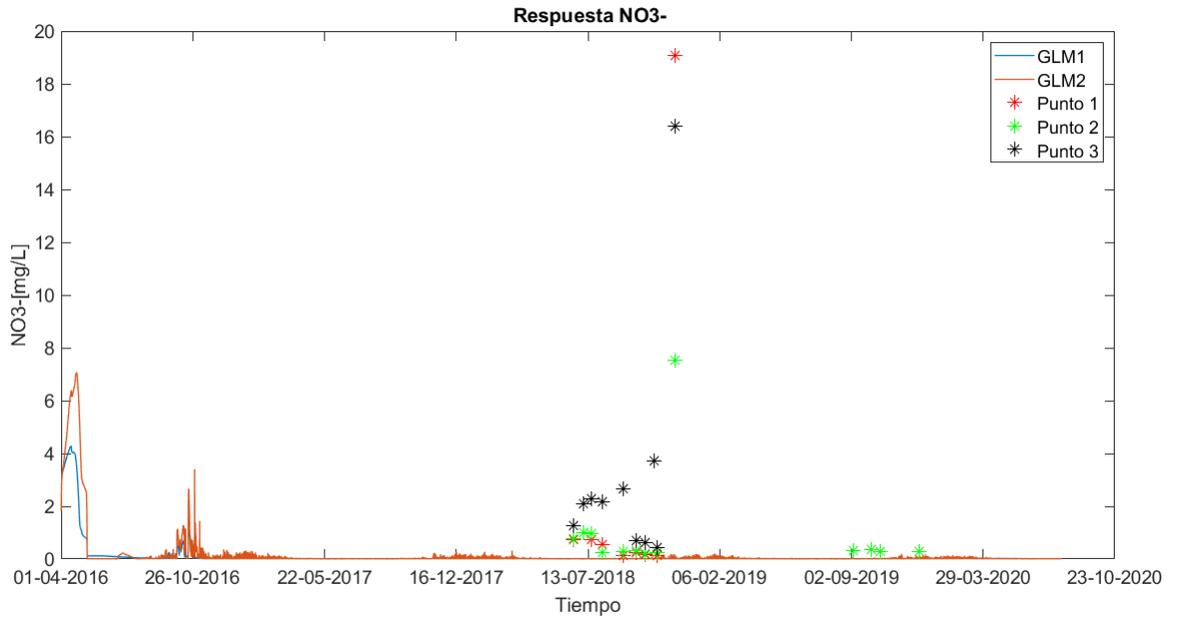


Figura 4.26: Respuesta del nitrato frente a los cambios.

La cantidad de nutrientes en la laguna, hace que se incrementen los niveles de nitrato. El comportamiento es similar al del amonio, alcanzando un peak en octubre de 2016. Esto podría interpretarse como que la existencia de NH_4 produce nitrato (Ecuación 2.3 y 2.4). En muchos tramos del gráfico la nueva curva del nitrato sobrepasa a la inicial, por lo cual ésta no puede apreciarse correctamente en el gráfico.

– ECM de $\text{NO}_3 = 2.14 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$

Las concentraciones de NO_3 en promedio alcanzan el valor de 0.16 [mg/L] (tabla 4.16). Este sube un poco en la respuesta, ya que la concentración inicial promedio era de 0.11 [mg/L] (tabla 4.15). De todas maneras los niveles son bajos comparado con los valores de Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2 (1.24 [mg/L]).

– Desviación porcentual de $\text{NO}_3 = 87.1 \%$

La desviación porcentual es alta. El módulo de la concentración entregada por el software es mucho menor (tabla 4.16), que la concentración entregada como por referencia de Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2. De todas formas la desviación es menor al 100 %.

No se calculará la gráfica de la concentración en función de la altura y el tiempo para el nitrato, ya que este no se valida.

4.2.7.4. Respuesta de Clorofila

La respuesta de la clorofila frente al análisis de sensibilidad es el siguiente:

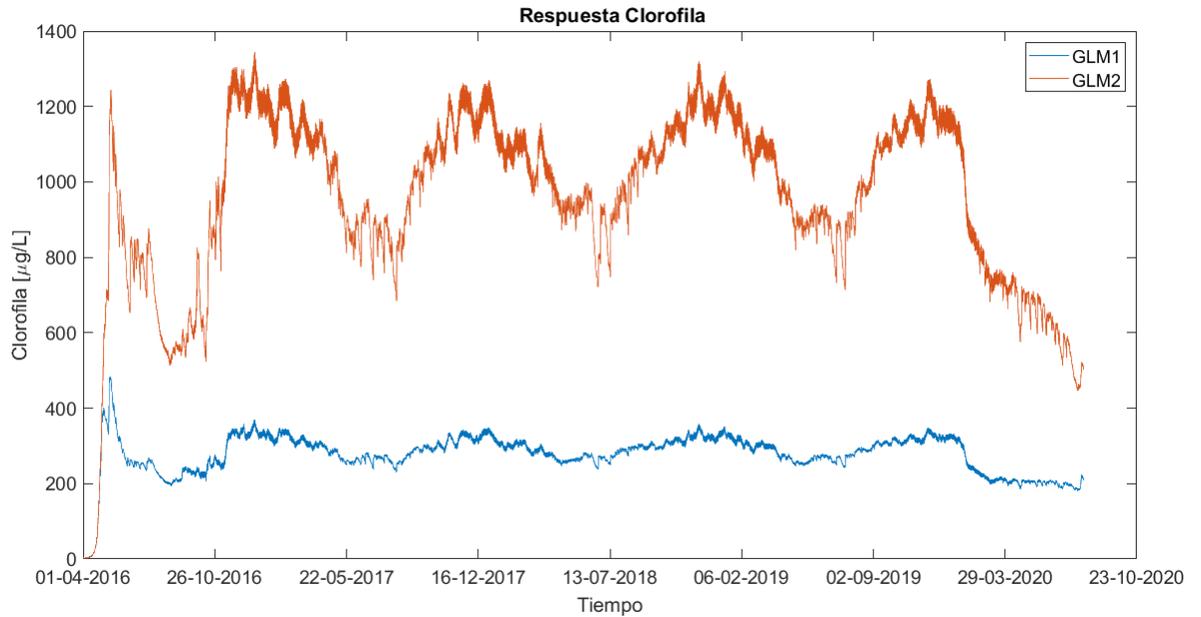


Figura 4.27: Respuesta de la clorofila frente a los cambios.

La clorofila es inherente a las algas y vegetación acuática. A más nutrientes más algas y vegetación, por lo cual la cantidad total de Clorofila también aumenta. Esto es lo que ocurre al amplificar la cantidad de nutrientes por 5. De todas maneras la curva que mejor refleja a la clorofila total es la inicial. No debe haber concentraciones tan altas de clorofila como 1000 $[\mu\text{g}/L]$ en un lago, aunque el sistema sea eutrófico o hipereutrófico (ver tabla 2.3).

La concentración promedio es 954.6 $[\mu\text{g}/L]$

– Desviación porcentual de *Clorofila* = -1587.1%

4.2.7.5. Respuesta Oxígeno disuelto

La respuesta de O_2 dado el análisis de sensibilidad es el siguiente:

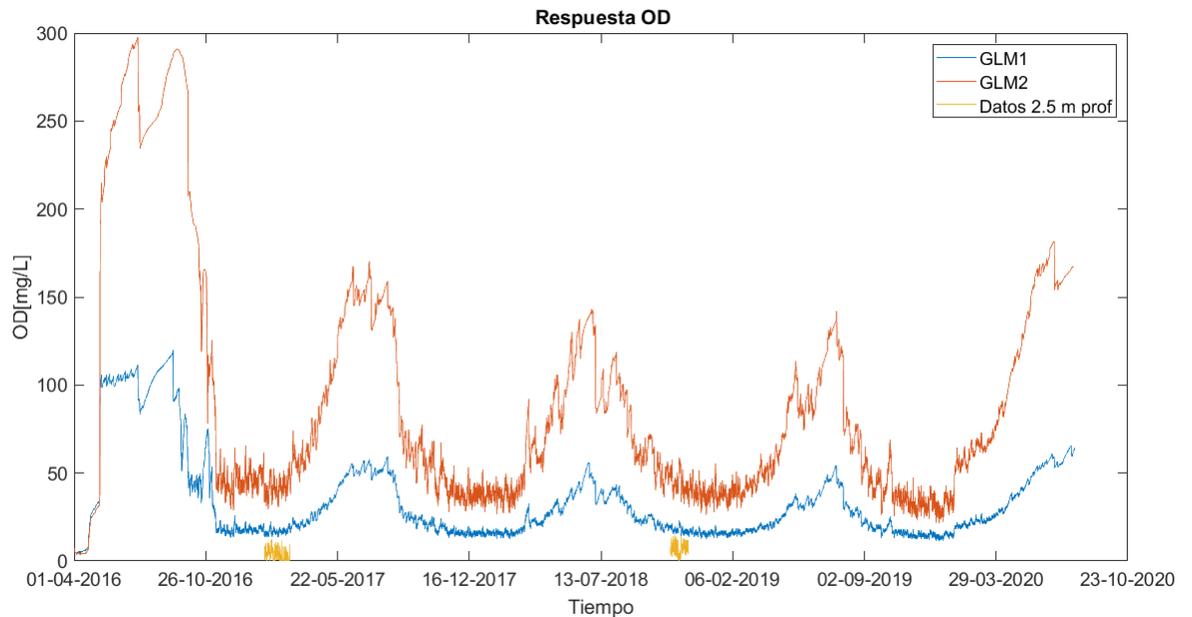


Figura 4.28: Respuesta del oxígeno disuelto frente a los cambios.

Las concentraciones de O_2 suben en demasía. El aumento de algas y plantas acuáticas produce síntesis de O_2 . Lo cual explica el alza en la concentración de oxígeno.

– ECM de $O_2 = 37.61 \frac{mg}{L}$

El error es demasiado alto. No corresponde encontrar concentraciones tan altas de O_2 , en una laguna somera eutrófica o hipereutrófica.

Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2 señala concentraciones de O_2 de 8.13 [mg/L]. El software de modelación arroja una concentración promedio de 91.09 [mg/L].

– Desviación porcentual de $O_2 = -1020.9\%$

No se valida la respuesta del oxígeno disuelto, dada el alto error cuadrático medio en las mediciones y la desviación porcentual con respecto a la referencia de la tabla 2.2.

4.2.7.6. Respuesta pH

La respuesta del pH frente al análisis de sensibilidad es el siguiente:

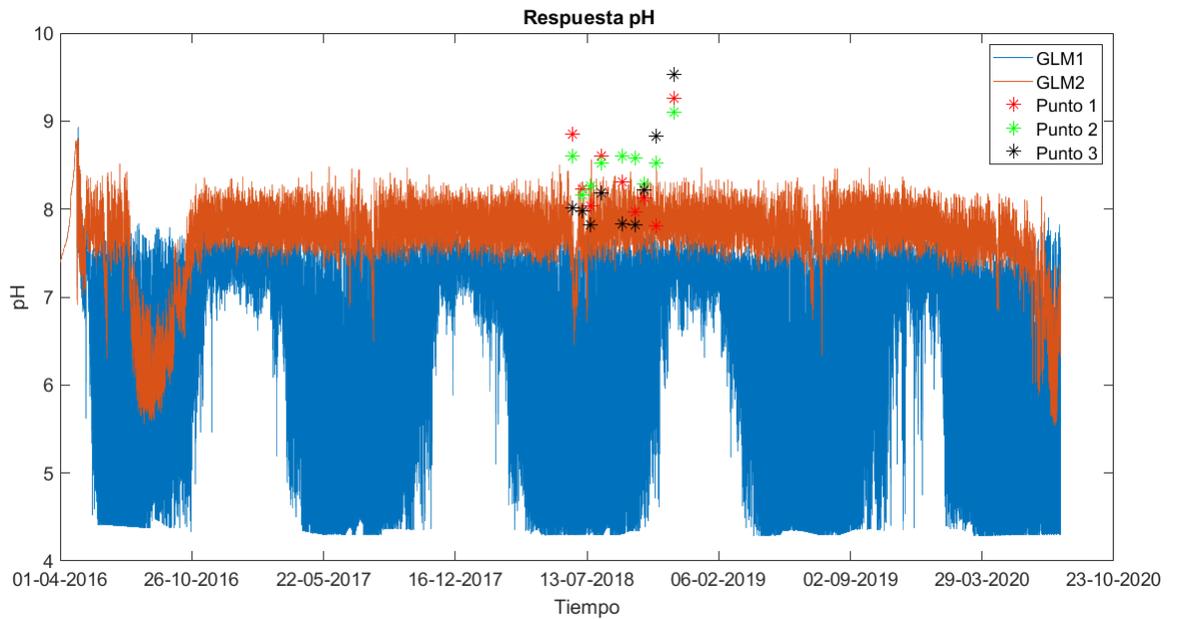


Figura 4.29: Respuesta del pH frente a los cambios.

La respuesta del pH frente a los cambios mejora, salvo por algunos tramos donde éste disminuye más de lo adecuado (bajo 6) para que haya vida animal en la laguna. Se presenta el pH en función de la altura y el tiempo:

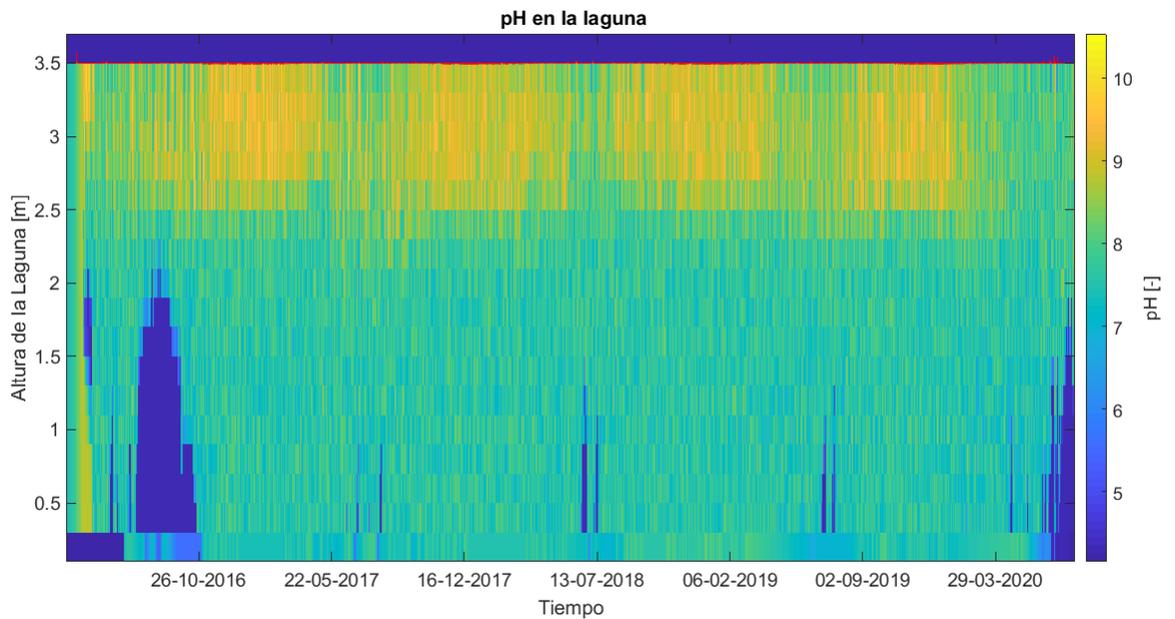


Figura 4.30: pH en la columna de agua.

El pH se valida para gran cantidad del tiempo, pero sigue teniendo inconsistencias en algunos tramos (Septiembre y Octubre de 2016 por ejemplo).

– ECM de $pH = 0.64$

Viendo el error cuadrático medio y la gráfica 4.29, la respuesta mejora.

Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2 señala que el pH tiene un valor 8.07, mientras que la respuesta arrojada por el software tiene un promedio de 7.67. La respuesta mejora.

– Desviación porcentual de $pH = 4.9\%$

Se muestra una tabla resumen con los errores cuadráticos medios de todos los parámetros:

Tabla 4.13: ECM configuración inicial.

Variable	Unidad de medida	Valor
PO_4	[mg/L]	0.34
NH_4	[mg/L]	0.46
NO_3	[mg/L]	2.14
Clorofila	[μ g/L]	-
O_2	[mg/L]	12.44
pH	[-]	0.87

A continuación se muestra una tabla resumen con los errores asociados a la respuesta. Dentro de esta no se incluye a la clorofila ya que no existen datos para su validación. Se comparó la respuesta de O_2 en la máxima profundidad (2.50 m), ya que es la simulación con menos error según la tabla 4.7.

Tabla 4.14: ECM respuestas.

Variable	Unidad de medida	Valor
PO_4	[mg/L]	0.33
NH_4	[mg/L]	0.47
NO_3	[mg/L]	2.14
Clorofila	[μ g/L]	-
O_2	[mg/L]	37.61
pH	[-]	0.64

Al analizar las tablas 4.13 y 4.14 los únicos errores que disminuyen, dado el análisis de sensibilidad realizado, son la curva del fosfato y el pH. Ambas respuestas mejoran.

Los otros parámetros, en cambio; NH_4 ; NO_3 , clorofila y O_2 no se validan, debido a que los valores obtenidos no se asemejan a las mediciones (excepto para la clorofila que no se contaba con muestreos). Las concentraciones de clorofila y O_2 aumentan excesivamente en su respuesta. Escapan así de la situación real de la laguna.

4.2.7.7. Concentraciones totales y calidad del agua de la laguna

A continuación se presentan los niveles promedio de fósforo total y nitrógeno total en la laguna. Primero se promedia en la columna de agua y luego para todos los tiempos (PO_4 , NH_4 y NO_3):

Tabla 4.15: Concentraciones promedio de nutrientes en la laguna para configuración inicial.

Elemento químico		
PO4 promedio [mg/L]	NH4 promedio [mg/L]	NO3 promedio [mg/L]
1.21	0.005	0.11
PO4 promedio [mol/L]	NH4 promedio [mol/L]	NO3 promedio [mol/L]
0.000013	0.0000003	0.0000017
P promedio [mol/L]	N promedio [mol/L]	
0.000013	0.000002	
P promedio [mg/L]	N promedio [mg/L]	
0.39	0.03	

Para la respuesta del análisis de sensibilidad se tiene lo siguiente:

Tabla 4.16: Concentraciones promedio de nutrientes en la laguna para configuración final.

Elemento químico		
PO4 promedio [mg/L]	NH4 promedio [mg/L]	NO3 promedio [mg/L]
2.08	0.005	0.16
PO4 promedio [mol/L]	NH4 promedio [mol/L]	NO3 promedio [mol/L]
0.0000219	0.0000003	0.0000026
P promedio [mol/L]	N promedio [mol/L]	
0.000022	0.000003	
P promedio [mg/L]	N promedio [mg/L]	
0.68	0.04	

Lv et al. (2011) señala un valor para el fósforo total de concentración de 0.47 [mg/L]. La configuración inicial señala una concentración de 0.39 [mg/L](tabla 4.15). Ambos valores se parecen bastante. Para la configuración del análisis de sensibilidad entrega una concentración total de 0.68 [mg/L](tabla 4.16). Este valor no se aleja demasiado de la referencia.

- Desviación porcentual configuración inicial de *Fósforo total* = 16.1 %
- Desviación porcentual configuración final de *Fósforo total* = -44.4 %

En relación al nitrógeno total Almanza-Marroquín et al. (1984) en la tabla 2.2 señala una concentración de 1.73 [mg/L]. Ésta se aleja bastante de los resultados obtenidos por la simulación.

- Desviación porcentual configuración inicial de *Nitrógeno total* = 98.4 %
- Desviación porcentual configuración final de *Nitrógeno total* = 97.7 %

Capítulo 5

Comentarios y Conclusiones

Con respecto a la geomorfología de la laguna se calibra el volumen de ésta usando el software Qguiss. Este volumen lo entrega de todas formas GLM, por lo tanto queda validado que el volumen calculado en esta investigación es el correcto, el cual difiere del calculado por Román (2017).

En las correlaciones de las ilustraciones (3.4 y 3.5) se tiene que la Humedad Relativa, Radiación solar incidente, Temperatura del aire y Velocidad del viento estas presentan un buen ajuste lineal, donde la menor concordancia en los datos alcanza coeficiente R^2 de 0.85. Por lo tanto el relleno de datos faltantes en el intervalo de tiempo del 09 de Noviembre de 2016 al 21 de Enero de 2020 es apropiado. Cabe recalcar que los datos anteriores y posteriores a ambas fechas respectivamente se obtienen rellenando los datos con la estación Rinconada.

Como se puede ver en las ilustraciones (4.1 por ejemplo) los datos de temperatura del agua recopilados se ajustan de excelente forma a la curva simulada por GLM para temperatura del agua, por lo cual se puede concluir que el modelo de temperaturas se valida dada las mediciones.

El error cuadrático medio en las mediciones de temperatura es pequeño para ambas boyas y diferentes profundidades (tabla 4.1), por lo cual se puede concluir que el modelo hidrodinámico es apropiado tanto como para la temperatura como la densidad del agua en función del tiempo y la altura de la laguna. La temperatura del agua presenta variaciones temporales y espaciales, al igual que la densidad.

Almanza-Marroquín et al. (1984) señala que el máximo para la clorofila en lagunas someras es 340 [$\mu\text{g}/\text{L}$] aproximadamente. En la figura 4.16 puede notarse que tiene un máximo de 500 [$\mu\text{g}/\text{L}$] y en promedio alcanza los 350 [$\mu\text{g}/\text{L}$]. Para Almanza-Marroquín el promedio es de 80 [$\mu\text{g}/\text{L}$] por lo cual se puede concluir que la clorofila total en promedio en la columna de agua está sobreestimada por GLM. Esto se debe a la gran cantidad de nutrientes vertidos al agua, los cuales favorecen el crecimiento de algas y vegetación.

Para la configuración inicial del modelo y para su configuración final en el análisis de sensibilidad se cumple la norma del decreto supremo 90 respecto de la cantidad de nutrientes vertidos en la laguna (Ver tabla 4.2 y 4.12).

Como se puede apreciar en la tabla 4.15 viendo la tabla 2.3 las concentraciones del fosfato son de tal forma que la laguna se encuentra en estado hipereutrífico. También para las concentraciones de clorofila, pero para las concentraciones de Nitrato se encuentra en estado oligotrófico.

Para la respuesta del análisis de sensibilidad ocurre lo mismo (ver tabla 4.16), las concentraciones de nitrógeno reflejan que la laguna es oligotrófica. Se puede concluir que las concentraciones de nutrientes aumentan en respuesta al análisis de sensibilidad. Pero no se validará ya que aumenta significativamente la clorofila y, por consiguiente, la cantidad de oxígeno. Por otro lado el pH mejora ante la respuesta, pero siguen habiendo puntos con pH menor a 6.0.

Usando los muestreos más cercanos para cada variable (menos error, más representativo del modelo GLM), se evaluará si con los datos recopilados de calidad del agua (tabla A.1, A.2 y A.3) se alcanza la hipereutrofia de la laguna. Para el nitrato el punto más cercano es el 2, para el amonio y fosfato el punto 1:

Tabla 5.1: Concentraciones totales para datos de muestreos más cercanos.

Elemento químico		
PO4 promedio [mg/L]	NH4 promedio [mg/L]	NO3 promedio [mg/L]
0.75	0.41	0.99
PO4 promedio [mol/L]	NH4 promedio [mol/L]	NO3 promedio [mol/L]
0.000008	0.000023	0.000016
P promedio [mol/L]	N promedio [mol/L]	
0.000008	0.000038	
P promedio [mg/L]	N promedio [mg/L]	
0.25	0.54	

Como muestra esta tabla, no se alcanza la hipereutrofia usando las concentraciones más bajas de nutrientes. Como no se pudo calibrar ni el nitrato ni el amonio (las concentraciones eran cercanas a 0) los puntos más cercanos del muestreo a su vez eran pequeños también (más bajos) y por eso el resultado es el de una laguna no hipereutrífica. Sin embargo eso cambia en los otros muestreos (otros puntos), donde los valores de amonio, nitrato son lo suficientemente grandes para considerar la laguna como una hipereutrífica.

Se consideraron dos configuraciones. Una inicial y una donde se amplificaron los nutrientes afluentes a la laguna por cinco, realizándose un análisis de sensibilidad. Finalmente se acoge el sistema original, ya que si bien con el análisis de sensibilidad mejora el ajuste de la curva del fosfato, el nitrato y amonio permanecen insensibles, las concentraciones de clorofila y O_2 aumentan significativamente y se alejan de la situación real en la laguna.

Las concentraciones de fosfato simulados están, en promedio más bajos de lo esperado, al igual que la cantidad de nutrientes como amonio y nitrato, dado que se encuentran sus curvas de simulación bajo los muestreos con menos error. Sin embargo, la carga de nutrientes afluentes es lo suficientemente grande como para estimular el crecimiento excesivo de la clorofila, algas y vegetación acuática y por ello, la cantidad de O_2 . Vale destacar que las algas

son la mayor fuente de oxígeno para el planeta (IDEAL, 2020). En el escenario ya descrito lo único que se podía variar era las concentraciones de amonio, nitrato y fosfato en el afluente (PTAS) o aumentar el flujo de sedimentos, pero si el incremento era excesivo, otra vez subían las concentraciones de clorofila y O_2 . Por lo anterior no se pudo calibrar ni el amonio ni el nitrato sin provocar cambios importantes en las demás variables. Lo único que se podía variar eran los nutrientes afluentes y el flujo de sedimentos, ya que estos son condiciones de borde del sistema. Por lo cual se propone para futuros trabajos de investigación calibrar estos parámetros y que estos sean representativos de la laguna.

Analizando las concentraciones de nutrientes en el punto 3 (PTAS) se puede ver que las concentraciones, son más altas entre 6 a 10 veces los valores de las concentraciones de los otros dos puntos (ver A.1, A.2 y A.3). Esto está relacionado directamente con que es allí donde se produce la descarga de la planta de tratamiento de aguas, la cual trae nutrientes que de todas formas cumplen con la norma del decreto supremo 90 (ver tabla 4.2).

La calibración se enfocó en reproducir la estacionalidad de la laguna, los resultados arrojan que estos se repiten periódicamente en el tiempo, en torno a esto se obtuvo una evolución del oxígeno disuelto y de los nutrientes acorde a lo esperado (Aránguiz, 2019) en su forma (las curvas de validación), aunque demasiado grande en error. Esta evolución estacional se basa principalmente en la actividad fotosintética y su dependencia con la radiación solar, la temperatura y condiciones climáticas.

Se puede concluir que GLM model lake es una herramienta valiosa en análisis medio-ambiental, de calidad de aguas y de hidrodinámica. Es muy versátil y tiene la capacidad para mostrar todo lo que sucede en la laguna y su entorno. Esto se debe a que obtiene parámetros, y de manera correcta, como lo son la temperatura y densidad del agua y, al mismo tiempo, logra calibrar las concentraciones de fosfato en la laguna. Además entrega resultados en función de la altura de la laguna y el tiempo.

También, integra numerosas variables y secciones, como condiciones iniciales, flujo de sedimentos, meteorología, afluentes, batimetría, concentraciones de afluentes, óptica, entre otros inputs.

5.1. Recomendaciones

Se propone para futuras investigaciones:

- Calibrar las concentraciones de ión amonio, nitrato, clorofila, oxígeno disuelto y pH en la columna de agua. El pH también es una variable a investigar para futuros estudios ya que no se pudo calibrar en todos los tiempos de manera adecuada.

Lo anterior con el objetivo de conocer la calidad del agua en la laguna y por ende el grado de enriquecimiento de ésta con nutrientes.

- Corroborar la densidad del agua obtenida en este trabajo, para poder validarla de manera definitiva. Si bien el modelo hidrodinámico arroja densidades apropiadas podría validarse con mediciones. Para aquello se debe medir por medio de muestras la densidad del agua de la laguna a diferentes profundidades. Luego comparar los resultados de la simulación con las

mediciones. Si los resultados de ambos concuerdan (simulación y mediciones), el modelo de densidades propuesto quedará validado.

La temperatura no es necesario validarla ya que eso se realizó por medio de este trabajo.

- Estudiar y conocer qué ocurre al interior de los sedimentos, caracterizar el tipo de sedimentos y cómo funciona la dinámica de estos en la temperatura del agua. Hay secciones de GLM que requieren por ejemplo coeficientes de conductividad de calor en sedimentos, los cuales no se conocen por lo que se adoptó la configuración por defecto.

- Calcular concentraciones de CO_2 al interior de la laguna, para saber el impacto ambiental que tiene en el lago dada su biodiversidad y ecosistema (Calentamiento global).

- Estimar flujos netos de los diversos nutrientes, O_2 y CO_2 con la atmósfera. Conocer los flujos de CO_2 para saber si la laguna se comporta como sumidero o fuente de CO_2 a la atmósfera.

- Obtener información de concentraciones de afluentes en la planta de tratamiento, puesto que para el punto 3 (PTAS) se asumió que la concentración del nutriente en el agua era igual a la concentración del afluente (lo cual no necesariamente es así ya que la concentración del afluente debiese ser mayor a la de la laguna o viceversa). De todas formas no deja de ser una buena aproximación.

- Un análisis asumiendo mezcla completa y compararlo con uno de una dimensión (en la vertical), sería apropiado para contrastarlo y saber cuál es más real en definitiva, comparando la variable en estudio en el tiempo.

Bibliografía

- Almanza-Marroquín, V., Figueroa, R., Parra, O., Fernández, X., Baeza, C., Yáñez, J., and Urrutia, R. (1984). Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(2):313–326.
- Aránguiz, C. (2019). *Estudio e identificación de los procesos bioquímicos asociados a los nutrientes N y P en interacción con el ciclo del carbono. Caso de estudio: Laguna Carén*. Catalina Aránguiz Kusar, Santiago, Chile.
- Cengel, Y. A. and Ozisik, M. N. (1984). Solar radiation absorption in solar ponds. *Solar Energy*, 33(6):581–591.
- Cerón, L. and Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, 14(1):285–295.
- Díaz-Vargas, M. (2005). Caracterización de algunos parámetros físico químicos del agua y sedimento del Lago Zempoala, Morelos, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 15(2):57–65.
- De La Fuente, A. (2018). *Apuntes de procesos de transporte en sistemas acuáticos*. Alberto De La Fuente, Santiago, Chile.
- Downing, J., Prairie, Y., Cole, J., Duarte, C., and Tranvik, L. (2006). The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and oceanography*, 51(5):2388–2397.
- EcuRed (2017). Laguna Carén.
- Hipsey, M. (2019). A general lake model (glm 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the global lake ecological observatory network (gleon). *European Geosciences Union*, 12(1):473–523.
- IDEAL (2020). Las algas son la mayor fuente de oxígeno del planeta.
- Ingeoexpert (2019). Tipos de ecosistema.
- Khan academy (2016). El ciclo del fósforo.
- Lifeder (2019). Ciclo del oxígeno: características, reservorios y etapas.
- Lv, J., Wu, H., and Chen, M. (2011). Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in wuhan, china. *Limnologia*, 41(1):48–56.
- Mapio (2020). Laguna Carén.
- Pacheco, J. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Red de Revistas Científicas de América Latina*,

- el Caribe, España y Portugal*, 6(3):73–81.
- Padisak, J. and Reynolds, C. S. (2003). Shallow lakes: The absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiologia*, 506-509(1):1–11.
- Romero, C., Mariazzi, A., and Arenas, P. (1988). Condiciones de luz subacuática como factores determinantes de la eficiencia fotosintética fitoplanctónica.i. embalse de río tercero. *Oecologia aquatica*, 9:1–8.
- Román, E. (2017). *Laguna Carén: Estudio de su hidrodinámica y calidad del agua, a partir de la instalación y operación de una estación de monitoreo ambiental*. Esteban Román Castillo, Santiago, Chile.
- Scheffer, M., Hosper, S. H., Meijer, M., Moss, B., and Jeppesen, E. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in ecology y evolution*, 8(8):275–279.
- Scheffer, M. and van Nes, E. H. (2007). Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 584:455–466.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., and Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3):179–196.
- Søndegard, M., Jensen, J., and Jeppesen, E. (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 506-509:135–145.
- Søndegard, M., Jensen, J. P., and Jeppesen, E. (1999). Internal phosphorus loading in shallow danish lakes. *Hydrobiologia*, 408-409:145–152.
- Universidad del Oeste de Australia (2020). General Model Lake.
- Visit Chile (2020). Parque Laguna Carén.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology, lake and river ecosystems*. Robert Wetzel, San Diego, California.

Anexo A

Cálculos realizados

A.1. Metodología

Para realizar diluciones, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Volumen_{inicial}C_{inicial} = Volumen_{final}C_{final} \quad (A.1)$$

$$C_{inicial} = \frac{Volumen_{final}}{Volumen_{inicial}}C_{final} \quad (A.2)$$

A.2. Resultados

A continuación se presentan las concentraciones de datos de calidad de agua. Estos sirven para validar los resultados entregados por GLM:

Tabla A.1: Variables de calidad del agua en la laguna (Boya Sur).

Fecha	Punto 1		
	NH_4^+ [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	PO_4^{-3} [mg/L]
2018-06-20	0.71	0.73	2.02
2018-07-05	0.67	1.00	1.50
2018-07-19	0.49	0.73	0.99
2018-08-04	0.11	0.55	0.67
2018-09-06	-	0.13	0.39
2018-09-27	-	0.23	0.25
2018-10-12	-	0.17	0.13
2018-10-26	-	-	-
2018-10-31	0.23	0.12	0.28
2018-11-28	0.23	19.08	0.55
2019-09-06	-	-	-
2019-10-04	-	-	-
2019-10-18	-	-	-
2019-12-18	-	-	-

Tabla A.2: Variables de calidad del agua en la laguna (Boya Norte).

Fecha	Punto 2		
	NH_4^+ [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	PO_4^{3-} [mg/L]
2018-06-20	1.42	0.77	2.36
2018-07-05	1.27	1.00	1.61
2018-07-19	1.87	0.97	2.26
2018-08-04	0.51	0.23	0.87
2018-09-06	0.28	0.30	1.00
2018-09-27	-	0.33	0.68
2018-10-12	-	0.20	0.22
2018-10-26	-	-	-
2018-10-31	0.51	0.23	0.87
2018-11-28	0.42	7.53	0.94
2019-09-06	-	0.33	2.90
2019-10-04	0.35	0.37	0.77
2019-10-18	0.85	0.27	5.06
2019-12-18	0.35	0.29	4.63

Tabla A.3: Variables de calidad del agua en la laguna (PTAS).

Fecha	Punto 3		
	NH_4^+ [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	PO_4^{3-} [mg/L]
2018-06-20	7.15	1.27	4.16
2018-07-05	4.60	2.10	5.17
2018-07-19	4.59	2.30	4.13
2018-08-04	5.12	2.17	4.01
2018-09-06	10.73	2.67	11.38
2018-09-27	7.59	0.70	2.02
2018-10-12	0.14	0.63	0.71
2018-10-26	0.71	3.73	0.89
2018-10-31	0.39	0.43	0.90
2018-11-28	0.56	16.40	1.12
2019-09-06	-	-	-
2019-10-04	-	-	-
2019-10-18	-	-	-
2019-12-18	-	-	-

Tabla A.4: pH (Punto 1, 2 y 3).

	Punto1	Punto 2	Punto3
Fecha	pH	pH	pH
2018-06-20	8.85	8.60	8.02
2018-07-05	8.22	8.16	7.98
2018-07-19	8.04	8.26	7.82
2018-08-04	8.61	8.53	8.19
2018-09-06	8.31	8.60	7.83
2018-09-27	7.97	8.58	7.82
2018-10-12	8.13	8.28	8.22
2018-10-26	-	-	-
2018-10-31	7.81	8.53	8.82
2018-11-28	9.25	9.10	9.53