



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

LAGUNA CARÉN: ESTUDIO DE SU HIDRODINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA, A
PARTIR DE LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO
AMBIENTAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ESTEBAN MARCELO ROMÁN CASTILLO

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
KATHERINE LIZAMA ALLENDE
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Fondecyt 1140821

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: ESTEBAN ROMÁN CASTILLO
FECHA: JUNIO DE 2017
PROF. GUÍA: ALBERTO DE LA FUENTE

LAGUNA CARÉN: ESTUDIO DE SU HIDRODINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA, A PARTIR DE LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO AMBIENTAL

La descripción y entendimiento de los procesos internos e interacciones físicas de sistemas ambientales acuáticos es una tarea en desarrollo para las ciencias medioambientales de hoy. Se estudia el ecosistema acuático Laguna Carén, ubicado en la Región Metropolitana de Chile, con el objetivo de realizar un análisis preliminar de su hidrodinámica y calidad del agua.

Mediante la instalación y operación de una estación de monitoreo ambiental, que registró de manera continua temperatura del agua e información meteorológica de la zona, es posible caracterizar en el tiempo los flujos de temperatura en la columna de agua, centrándose en los forzantes principales de la laguna (viento y radiación neta). Con lo que se obtienen patrones de comportamiento de su densidad, energía, radiación neta, entre otras. Se complementan estos datos con los valores fisicoquímicos de una sonda multiparámetro CTD y un muestreo de las aguas de la laguna para una caracterización de su estado trófico en base a las concentraciones de nitrógeno y fósforo, en el Laboratorio de Calidad del Agua Gabriela Castillo.

La estación se compone por boyas de medición continua en profundidad de temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica y una estación meteorológica, situada en un sector aledaño a la laguna, que midió información respecto a radiación, humedad relativa, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento. A partir de una revisión bibliográfica y de los recursos disponibles en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, se define el diseño y la periodicidad de registro del sistema de monitoreo.

Finalmente, tras tres campañas de medición realizadas entre noviembre de 2016 y marzo de 2017 en la laguna, se denota un comportamiento de variación hidrodinámica diaria de sus aguas, donde se inicia el día con una mezcla completa de las aguas en la vertical, continúa con una estratificación en situaciones de viento calmo y/o flujo energético neto positivo y termina en mezcla completa nuevamente, debido a la disminución de los parámetros mencionados. Acorde a los muestreos realizados, la Laguna Carén se encuentra en un estado hipertrófico según indicadores de nitrógeno y fósforo.

*A aquellos capaces de
emocionarse con el susurro
del viento,
con la sutil sonrisa de una
mujer o el cálido arrebol de
las tardes.*

*A quienes comprenden que
pertenecemos a una compleja
red de fenómenos e
interacciones llamada
Naturaleza.*

*Y a esos que entienden que
una mano junto a otra, todo
lo puede.*

AGRADECIMIENTOS

Espero poder reflejar mis más sinceros sentimientos de gratitud a quienes directa o indirectamente han aportado a mi desarrollo emocional, espiritual y cognitivo durante estos 24 años de vida y que, en parte, se ven reflejados en este trabajo de titulación.

Comienzo por mi familia nuclear, mi madre, mi padre y mis dos hermanos, gracias por apoyarme en cada una de las estupideces de decisiones que he tomado y seguiré tomando. Los quiero mucho y estoy profundamente orgullosos de ustedes.

A mis abuelos, tíos y primos, por ser un ejemplo de esfuerzo, trabajo y de que en la vida todo se obtiene con paciencia y sacrificio.

A mis amigos del colegio, liceo y universidad. Cada uno de ustedes me ha enseñado algo y tenemos más de alguna historia que es mejor no contar.

A Constanza por mostrarme día a día el lado bueno de las cosas y apaciguarme en los momentos difíciles. Por tu inmenso amor que siempre demuestras con el simple hecho de soportar mi carácter y tallas fomes, infinitas gracias. Te amo.

Por último, a mi profesor guía y miembros de comisión, por aportar al desarrollo de la investigación científica del agua y el medio ambiente desde la institución pública de educación más importante del país.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.	1
1.2. Objetivos.	2
1.2.1. General.	2
1.2.2. Específicos.	2
1.3. Organización del informe.	2
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Aspectos generales del estudio de ecosistemas acuáticos.	3
2.2. Antecedentes de Hidrodinámica de cuerpos de agua.	5
2.3. Antecedentes de Calidad del Agua.	6
2.4. Hipótesis de análisis.	10
2.5. Marco Teórico.	11
2.5.1 Hidrodinámica de la laguna.	11
2.5.2 Forzantes energéticos.	14
METODOLOGÍA	19
3.1. Área de estudio.	19
3.2. Diseño e instalación de estación de monitoreo ambiental.	22
3.3. Muestreo de perfiles con sonda CTD.	26
RESULTADOS	28
4.1. Resultados de campañas de medición hidrodinámica.	28
4.2. Análisis de casos por campañas de monitoreo.	37
4.3. Perfiles con sonda CTD.	48
4.4. Análisis de calidad del agua.	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	54

ANEXOS	57
Anexo A. Guía de Análisis fisicoquímico de muestras de agua.	58
A.1. Instrumento de muestreo.	58
C.2 Preparación del análisis.	59
C.3. Análisis de Nitrato: Método 10206, dimetilfenol.	59
C.4. Análisis de Fósforo Total: Método 10209, del ácido ascórbico.	60
c.5. Análisis del Fósforo Reactivo (Ortofosfato): Método 8048, del ácido ascórbico.	61
C.6. Análisis del Nitrógeno Total: Método 10071, digestión de persulfato.	61
C.7. Análisis del Nitrógeno Amoniacal: Método 10031, salicilato.	63

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación.

El aumento exponencial de la demanda de agua, producto del crecimiento de la población (Wetzel, 2001), junto con el incremento de emisiones de contaminantes al recurso hídrico debido a procesos industriales, ha inducido un mayor interés de la sociedad por una responsable obtención y eficiente manejo del agua. Esta tendencia ha propiciado la determinación y comprensión de la dinámica de cuerpos de agua dulce, por lo que el estudio de parámetros de hidrodinámica, calidad del agua, hidrogeología, entre otros, acerca a la sociedad al pleno conocimiento del medio ambiente, para alcanzar una interacción ser humano-naturaleza en sincronía.

Al momento, existen métodos que aportan a la caracterización de estos ecosistemas acuáticos. Para la Laguna Carén, Morales (2000) ejecutó un diagnóstico de la calidad de sus aguas y López (2001) estudió la influencia de la hidrodinámica de la laguna en sus principales contaminantes. Para otros sistemas acuáticos Wetzel & Likens (2004) determinaron procedimientos para medir y analizar ciertos parámetros biológicos, físicos y químicos en cuerpos de agua lénticos. De La Fuente & Niño (2010) describieron las características de la termo-hidrodinámica de lagunas salares en el norte de Chile mientras que Baladrón (2011) lo hizo para un humedal costero en la Región del Maule.

Con estos antecedentes y teniendo el ecosistema Laguna Carén en dependencias de la Universidad de Chile, nace el interés de estudiar sus procesos hidrodinámicos referidos a los de un cuerpo de agua de mediana profundidad. Con el objetivo de obtener información representativa y útil, se registra periódicamente los principales forzantes que energizan el sistema, que son el balance energético y la velocidad del viento sobre la superficie de agua (Baladrón, 2011; de la Fuente, 2014). Para lograrlo, se diseña y pone en marcha una estación de monitoreo ambiental compuesta por dos boyas de medición de la estructura térmica de la columna de agua, mediante termistores sujetos a ellas y por una estación meteorológica que registra información del lugar.

Es importante mencionar que la laguna Carén es parte de un proyecto que busca desarrollar conocimiento y tecnología a partir de innovación científica, de tal manera que, mediante este trabajo, se incorporan antecedentes de investigación a las disciplinas de estudios hídricos y medioambientales y se complementa el plan de crecimiento científico y tecnológico de la Universidad de Chile.

1.2. Objetivos.

1.2.1. General.

El objetivo principal es analizar la hidrodinámica y calidad del agua de la Laguna Carén, a partir de la información registrada por una estación de monitoreo ambiental.

1.2.2. Específicos.

Identificar y describir las variables de estado y parámetros físico-químicos que condicionan y denotan el comportamiento espacio-temporal de la laguna, tanto en la hidrodinámica como en la calidad del agua.

Diseñar, instalar y operar una estación de monitoreo continuo de las variables y parámetros definidos, acorde a los recursos disponibles en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Implementar rutinas de análisis de parámetros fisicoquímicos en el Laboratorio de Calidad del Agua Gabriela Castillo de la Universidad de Chile, para caracterizar la calidad del agua de la Laguna Carén.

1.3. Organización del informe.

- I. Capítulo 1 “Introducción”:** Aquí se presentan las motivaciones del trabajo junto con los objetivos generales y específicos que cumple.
- II. Capítulo 2 “Revisión Bibliográfica”:** En este capítulo se señalan los antecedentes teóricos y ecuaciones a utilizar para el desarrollo del análisis.
- III. Capítulo 3 “Metodología”:** Se indican las características para el diseño e instalación de la estación de monitoreo ambiental en la Laguna Carén.
- IV. Capítulo 4 “Resultados”:** Aquí se incluyen los resultados obtenidos a partir de los registros de la estación diseñada en la memoria.
- V. Capítulo 5 “Conclusiones y comentarios finales”:** Se presentan las conclusiones y se entregan recomendaciones para trabajos futuros referentes al tema de estudio.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos generales del estudio de ecosistemas acuáticos.

El océano cubre más del setenta por ciento del área del planeta, y es un ambiente continuo y perenne, que ha soportado diversos cambios desde los orígenes de la Tierra hace más de 4 mil millones de años. En cambio, las aguas continentales abarcan cerca de un dos por ciento de la superficie y su historia es mucho más acotada, sólo algunos lagos por ejemplo el Lago Baikal, Rusia, considerado uno de los más antiguos, extiende su origen más allá del Cuaternario, en la era del Cenozoico, hace aproximadamente 30 millones de años (Ruttner, 1963).

La permanente interacción que tiene un cuerpo de agua con su entorno es determinante para el desarrollo de todas las especies que existen en el ecosistema (biocenosis). Así, el océano no es fuertemente influenciado por las masas de tierra que lo circundan y su hidrodinámica es un factor importante en el clima de los continentes. En oposición a esto, las aguas interiores están dominadas por los climas locales y la composición geológica del suelo que drenan, además, lo acotado de su superficie y profundidad regulan que los cambios físicos, biológicos y químicos sean considerablemente más restringidos en el espacio y con un tiempo de variación menor respecto a lo que se aprecia en aguas marinas. Entonces, los ecosistemas acuáticos formados por las aguas continentales no tienen parangón con los oceánicos, las condiciones meteorológicas, morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas específicas del lugar, definen la riqueza en organismos que sobreviven en el ambiente, así, los biotopos formados en aguas interiores poseen características únicas que difícilmente se encuentren en el mar.

Estas distinciones motivaron el desarrollo de disciplinas de investigación divididas e independientes en el estudio de los ecosistemas ambientales acuáticos en el planeta, la oceanografía y la limnología. En un principio la característica que definía la pertinencia de trabajo por parte de la oceanografía o la limnología era la salinidad del cuerpo de agua (Ruttner, 1963), bajo el supuesto de que en su mayoría, las aguas continentales poseen baja salinidad. Sin embargo, con el paso del tiempo se entiende que las aguas interiores salinas son importantes en términos de volumen, casi comparables con las de agua dulce (Vidal-Abarca, 2005), y conforman, además, ambientes acuáticos característicos de paisajes áridos y semiáridos lo que abre un nuevo flanco de análisis (de la Fuente & Niño, 2010). Es a partir de la formación de la Asociación Americana para las Ciencias de Limnología y Oceanografía (ASLO) en 1948, en que se reconoce la estrechez que ambas áreas de estudio tienen e inician un camino de colaboración, comunicación e integración del quehacer investigativo enfocado en las ciencias acuáticas.

De acuerdo al ecosistema en que se centra esta memoria, es importante precisar los alcances de la limnología como el estudio integral físico, químico y biológico de las aguas continentales como lagos, embalses, ríos, lagunas, estuarios, humedales, salares y aguas subterráneas (Wetzel, 2001). Durante los últimos años, se ha analizado el régimen térmico, intercambio de calor, oxígeno disuelto, en lagos, salares y humedales (Baladrón, 2011; de la Fuente, 2014; de la Fuente & Niño, 2010) y se han desarrollado herramientas computacionales que complementan la información de terreno (Meruane & Niño, 2005; Rozas, 2013), por lo que suscita interés enfocar estos análisis a lagunas de profundidad media como la de este trabajo.

La Convención sobre los Humedales de Importancia, conocida como Convención Ramsar, define como humedal a las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones marinas cuya profundidad no exceda los seis metros (Brink et al., 2013). Es en este sentido que la laguna Carén se enmarca dentro de un humedal, donde la baja velocidad de sus aguas permite el desarrollo de una biocenosis específica y diversa que, en sincronía con su ambiente, entrega a la sociedad múltiples beneficios de diversos tipos como económicos o recreacionales.

Es tendencia de las últimas décadas la preocupación por parte de la sociedad en definir los valores que los ecosistemas suministran a su entorno, llamados servicios ecosistémicos o servicios de ecosistemas. De acuerdo a lo denotado por la Convención Ramsar, los humedales proveen los siguientes servicios: regulación y purificación del agua, ambiente de alta biodiversidad, regulación del clima, reposición de aguas subterráneas, control de inundaciones y erosión, fuente de captación de nutrientes, reserva de carbono, seguridad alimentaria, seguridad laboral, lugar de recreación, turismo, valor cultural y zona identitaria o espiritual. Por estas razones, mejorar el nivel de comprensión y conocimiento de estos beneficios, detener la degradación de humedales e integrar estos valores en la toma de decisiones de políticas públicas o privadas, son las iniciativas que la Convención Ramsar pretende inculcar en las personas (Brink et al., 2013).

Las variables de estado en los humedales, que representan el comportamiento global del ecosistema, responden a los cambios en los parámetros forzantes y delimitan las bases para obtener la dinámica del cuerpo de agua y su posterior monitoreo. Diferentes características que definen las interacciones en un sistema de agua continental son: área inundada, cobertura de vegetación, registro biótico como biomasa de algas, fitoplancton, zooplancton, fauna acuática más compleja, estructura térmica de la columna de agua, sales o metales en suspensión, concentración de oxígeno disuelto, pH, salinidad, intensidad de luz, energía potencial, estado trófico, cantidad y características del sedimento, entre diversas otras (Wetzel, 2001).

2.2. Antecedentes de Hidrodinámica de cuerpos de agua.

Una característica de los sistemas acuáticos es su respuesta a los distintos procesos de transporte hidrodinámico. La densidad del agua depende de su temperatura, por lo que su variación en profundidad condiciona la existencia de capas de agua con distintas densidades, es decir, estratos superiores más cálidos, menos densos e inferiores más densos y fríos, fenómeno denominado estratificación. Este proceso representa una conversión de energía térmica en una estabilidad mecánica, que afecta a la mezcla vertical de masa, energía y momentum en este tipo de cuerpo (Gómez, 2005).

En lagos y embalses es frecuentemente observada una estratificación térmica, que puede ocurrir una, dos o más veces durante el año, definiendo al cuerpo de agua como monomítico, dimítico o polimítico respectivamente. Una característica que tienen las lagunas someras de mediana o baja profundidad, es que este proceso posee una frecuencia menor, existiendo tres posibles regímenes de perfiles de temperatura: (1) donde no existe estratificación térmica de la columna y la temperatura se encuentra homogénea (mezcla completa), (2) donde existe un proceso de absorción de calor durante el día alcanzando una temperatura homogénea, para luego en la noche tener estratificación, denominado mezcla diurna, y (3) donde el gradiente de temperatura se mantiene día y noche generándose una estratificación permanente (Kadlec, 2008). López (2001) demostró que la Laguna Carén mantiene escenarios de estratificación, energizados principalmente por el esfuerzo de corte generado por el viento y el flujo neto de energía.

La temperatura de la columna de agua responde a distintos procesos de transporte y de calidad del flujo de agua, sujetos a la interacción de los forzantes meteorológicos, cambios volumétricos de agua, vegetación, sedimentos, morfología y batimetría del sistema. En el equilibrio, el comportamiento de la temperatura se obtiene del balance energético radiativo: radiación de onda corta, larga, flujo de calor sensible (convección), latente (evapotranspiración), flujo de calor de los sedimentos (Jensen & Andersen, 1992) y los procesos de mezcla turbulenta en la columna de agua.

Respecto al estudio de la dinámica de un cuerpo de agua, es importante recalcar la baja velocidad de su escorrentía, que se traduce en un tiempo de residencia hidráulico mayor que el de los cauces superficiales, como los ríos, permitiendo el desarrollo de ciertos procesos biológicos y fisicoquímicos que definen la biodiversidad del ecosistema. La descripción de estas interacciones se manifiesta en el cambio espacial y temporal de las variables de estado del sistema ambiental, siendo los parámetros forzantes, factores externos al ecosistema, los causantes de esta dinámica. Las condicionantes se relacionan con los siguientes aspectos: meteorología, hidrología e hidrogeología (Baladrón, 2011). Las características meteorológicas del biotopo, las cuales dependen de su ubicación geográfica, inducen patrones de respuesta de estado cíclicas: anuales, estacionales, diurnas e incluso intradiarias. Radiación solar incidente, velocidad y dirección del viento,

temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica, son los forzantes meteorológicos determinantes que se estudiarán.

Los efectos del viento en los cuerpos de agua se reflejan en múltiples de sus características tanto hidrodinámicas como estéticas, por ejemplo: la disposición de la vegetación emergente en el interior y al borde del sistema, incidiendo en la dirección de escurrimiento de las masas de agua las que no seguirán necesariamente la del viento (Baladrón, 2011); actúa como el forzante en la resonancia de las ondas internas del cuerpo de agua (Rozas, 2013), al no haber una corriente principal de flujo de caudal. El viento es el principal mecanismo de transferencia de energía en la columna de agua, además, debido a esta interacción, se producen ondas superficiales e internas que son trascendentales en la resuspensión del sedimento (Teeter et al., 2001).

El cambio volumétrico de agua disponible en el sistema queda definido por sus variaciones hidrológicas, las cuales influyen en las variables de estado como: la temperatura en la columna de agua, vegetación superficial, área de inundación, entre otras. Es por esto que un registro del nivel freático, caudales afluentes y efluentes, precipitación, evaporación, régimen hidrológico, entrega información de este aspecto.

En relación a la hidrogeología, la estratigrafía y permeabilidad del suelo determinan ciertos comportamientos. La morfología de las cubetas lacustres produce efectos importantes sobre la totalidad de los principales parámetros físicos, químicos y biológicos del sistema (Wetzel. 2001).

2.3. Antecedentes de Calidad del Agua.

El estado de calidad del agua de un cuerpo de agua es definido a partir de un rango admisible para múltiples parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, entre otros. Se pueden mencionar: pH, temperatura, DBO, fósforo, nitrógeno, hidrocarburos, aceites y grasas, coliformes, etc. El rango será definido por el uso al que se destinará el agua, es por esto, que el estado de calidad del agua es una clasificación relativa y no absoluta, más bien, es una convención o acuerdo entre los interesados que pretenden alcanzar un objetivo de calidad ambiental común. Por ejemplo, en Chile se tienen normas que regulan la concentración de ciertos indicadores de calidad en la descarga de cuerpos de agua, dependiendo del cuerpo receptor. Para descargas a cuerpos de agua superficiales se tiene el Decreto Supremo N°90, a aguas subterráneas el D.S. N°46 y a alcantarillado el D.S. N°609.

La sociedad en la actualidad espera mantener un grado de producción primaria razonable en lagos, embalses o estuarios, es decir, se hace necesario controlar los nutrientes que

sirven de fuente energética para el crecimiento de flora y fauna planctónica. La eutroficación es una condición de enriquecimiento en la concentración de nutrientes en un cuerpo de agua, donde el nitrógeno y fósforo son los de mayor impacto. De acuerdo a esto, existen tres principales categorías de estado trófico: oligotrófico, mesotrófico y eutrófico, ordenadas en ascenso al nivel de concentración de estos parámetros.

Parte del metabolismo de un cuerpo de agua, por ejemplo, un lago o embalse, es la transición desde un estado oligotrófico a uno eutrófico, sin embargo, se espera que esto tome un tiempo de cientos a miles de años, situación que se ha acelerado debido a las intervenciones antropogénicas como el exceso en la descarga de fósforo y/o nitrógeno, cambios de uso de suelo, variaciones hidrológicas, entre otras (Gómez, 2005). Existe un innegable nexo en el cambio del estado del agua a un nivel eutrófico con un aumento en la producción primaria, un descenso en el oxígeno disuelto, pérdida de biodiversidad y aumento en la turbidez (Correll, 1998). Este fenómeno además se complementa por la acción de otros forzantes como la disponibilidad de luz solar, la temperatura, el viento, entre otros. Existen diferentes elementos que controlan la eutroficación: carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, azufre, magnesio, potasio, sodio, fierro, manganeso, zinc, cobre, boro, entre otros. Al ser el incremento de los niveles en el agua un proceso acelerado por actividades antrópicas de impacto directo en la cuenca, es necesario restringir la descarga, por lo que el nivel de nutrientes generalmente es asociado a un único indicador, el fósforo o el nitrógeno. (López. 2001).

A diferencia de lagos o embalses, los humedales o lagunas poseen una mayor interacción agua-sedimento que permite una incorporación más rápida del material sedimentado a la columna de agua. Junto a esto, la temperatura del fondo en estos reservorios de agua es mayor, lo que incrementa la mineralización del nutriente en el lecho, donde se absorbe. Sin embargo, es probable que tiempo después se libere ese nutriente hacia el agua producto de la fuerte dinámica, este proceso se denomina carga interna de nutriente. Generalmente es preponderante la carga interna de fósforo respecto a la de nitrógeno, debido a la amonificación que sufre este último (Scheffer, 2004).

El fósforo (P) es un componente esencial para la vida en la Tierra, es base estructural de los ácidos nucleicos que permiten la formación de ADN y ARN. En los ambientes acuáticos principalmente está en los flujos superficiales y se encuentra en forma particulada o disuelta, como también orgánica e inorgánica. A pesar de las diversas maneras en que se encuentra biológicamente activo (ácidos nucleicos, fosfolípidos, proteínas, ATP, azúcares, entre otras), el fósforo es química o enzimáticamente hidrolizado a ortofosfato (HPO_4^{-2} , $H_2PO_4^{-}$), que es la única forma en que el P soluble es asimilado por algas, bacterias y plantas.

El P particulado puede depositarse en el fondo, donde las comunidades microbianas lo absorben para usos estructurales. En ciertas condiciones como anoxia en el fondo, baja concentración de fósforo en el agua, florecimiento de algas específicas, entre otras, este P que se encontraba a disposición de los sedimentos, es liberado a la columna de agua, proceso denominado descarga o carga interna de fósforo; este comportamiento hace que sea muy sensible su concentración. Por ejemplo, si el sistema es oligotrófico, el fondo se mantendrá oxigenado y el fósforo será retenido en los sedimentos, en cambio, si se torna eutrófico, en el sedimento se puede alcanzar anoxia liberando el P desde el lecho y difundiéndose en la columna de agua. Por esta razón, el sedimento cumple un rol de amortiguador o *buffer* de fósforo, que afecta el nivel de concentración y altera el indicador de calidad del cuerpo de agua (Baladrón, 2011; Correll, 1998). En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento del fósforo en medio acuático.

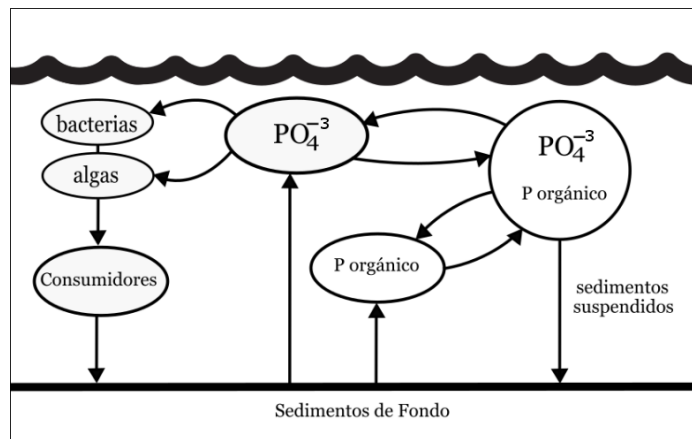


Figura 2.1. Ciclo del fósforo en medio acuático.

El nitrógeno (N), en comparación con el fósforo es menos frecuentemente indicado como nutriente limitante, debido a que no se acumula fuertemente en los sedimentos, puede liberarse como gas en la atmósfera bajo algunas condiciones y ciertos tipos de microalgas lo utilizan como nutriente (Scheffer, 2004)

El proceso de descomposición de la materia orgánica comienza con la fragmentación, que resulta en detritos que se depositan en el lecho del cuerpo de agua, posteriormente se libera nitrógeno como ion amonio (NH_4^+), etapa llamada amonificación del detrito. Este ion difunde en el medio acuático para ser utilizado como fuente de N por algas y macrófitas. En la capa superior aeróbica del sedimento, el amonio es transformado a nitrato (NO_3^-) mediante la nitrificación. A diferencia del fosfato, el amonio y el nitrato son absorbidos por los sedimentos en muy baja cantidad y no precipitan de forma insoluble en el fondo. Esto explica porqué el nitrógeno responde dinámicamente ante una disminución en la descarga externa al cuerpo de agua, no teniendo el fósforo la misma rapidez en la reacción, producto de la descarga interna de sedimentos (Scheffer, 2004).

En condiciones anaeróbicas, el nitrato puede ser microbiológicamente transformado a nitrógeno gas N_2 que difunde a la atmósfera. Esta etapa denominada denitrificación, provoca la mayor pérdida de nitrógeno desde cuerpos de agua. Respecto a las fuentes de ingreso de nitrógeno al agua, aparte de los afluentes, existen ciertas cianobacterias que fijan el nitrógeno atmosférico N_2 , de tal manera de transformar el elemento y hacerlo utilizable por el resto del plancton. De acuerdo a estudios realizados en lagos alemanes, en un periodo de crecimiento de algas el nitrógeno fijado por las cianobacterias alcanza el 20% del total (Scheffer, 2004). En la Figura 2.2 se muestra el comportamiento del nitrógeno en un sistema acuático.

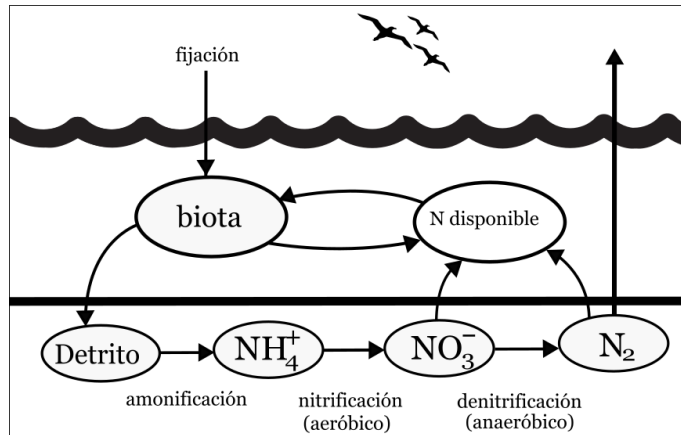


Figura 2.2. Ciclo del nitrógeno en medio acuático.

El oxígeno disuelto (OD) es otro determinante del estado de calidad del agua de un sistema. La concentración de este elemento en la columna define la actividad microbiológica, la degradación de la materia orgánica, y la actividad fotosintética, por lo que probablemente es el parámetro más importante en la sustentabilidad de la biota acuática. El oxígeno en un sistema acuático, como un humedal o una laguna, se cuantifica entre la producción y las reacciones que lo consumen. Su presencia se debe a los procesos de fotosíntesis de la biomasa vegetal acuática, al intercambio de elementos gaseosos con la atmósfera y sedimentos, como la reaireación producida por el viento. Las reacciones que lo consumen son principalmente la respiración biológica, la oxidación química y la descomposición de la materia orgánica. Como resumen el OD es utilizado para cumplir con las demandas de cuatro categorías: demanda de los sedimentos, requerimientos de respiración de la biota acuática, demanda química de compuestos nitrogenados y la demanda bioquímica de oxígeno (Baladrón, 2011).

Otra característica a considerar en las aguas someras es la turbiedad. El estado prístino de la mayoría de los humedales y lagunas someras corresponde probablemente al de un cuerpo de agua claro y con una rica vegetación acuática. En muchos casos el exceso en la descarga de nutrientes ha cambiado esta situación a una de mayor turbidez. Un escenario

con vegetación dominada por fitoplancton, algas de superficie y sedimento resuspendido hacen que el nivel de turbiedad se incremente, lo que puede llevar a un escenario de florecimiento de algas (*algal bloom*). Por estas razones, la comunidad limnológica pretende pasar de un estado dominado por fitoplancton y zooplancton, a uno compuesto por algas de fondo, macrófitas y peces.

La conductividad eléctrica corresponde a la capacidad de un cuerpo de agua de conducir electricidad, por lo que es un indicador que se vincula con los sólidos disueltos totales que actúan como iones, como sales o metales. También se relaciona directamente con la salinidad en el agua, que para el caso de estudio, se espera tenga valores referidos a aguas dulces, es decir aproximadamente menor a los 50 [mS/cm] (Fipps, 2003).

Respecto al estado trófico del cuerpo de agua, se utiliza un rango de valores en la concentración de nitrógeno total (TN), fósforo total (TP) y clorofila-a, indicador del nivel de producción primaria en el agua, propuesto por Smith et al. (1999) y utilizado en instancias gubernamentales como el Ministerio del Medio Ambiente y la Dirección General de Aguas (DGA) para caracterizar lagos, embalses y lagunas en el país. Los rangos de concentraciones de parámetros de calidad del agua se indican en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Rangos de concentraciones de indicadores de estado trófico (Smith et al., 1999).

Estado Trófico	TN [mg/l]	TP [mg/l]	Clorofila a [µg/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

2.4. Hipótesis de análisis.

Respecto a la hidrodinámica de la laguna, se espera, de acuerdo a bibliografía (Baladrón, 2011; Rozas, 2013; Scheffer, 2004), una estratificación diaria o intradiaria, debido a la baja profundidad del cuerpo de agua, la fuerte interacción en el flujo de energía que generaría el viento y el balance radiativo. Además, se espera un papel importante de los sedimentos en la dinámica de la temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes.

Para la calidad del agua, se espera encontrar conductividad eléctrica baja, característica principal de los cuerpos de agua dulce, un perfil de oxígeno disuelto variable en el tiempo

y en la profundidad (Baladrón, 2011), con valores aceptables para el desarrollo de vida unicelular y más compleja, es decir, entre $5 \left[\frac{mg}{l} \right]$ y $12 \left[\frac{mg}{l} \right]$ (Davis, 1975). Para los nutrientes un nivel de concentración alto, cercano a la categoría de eutrófico, hipótesis formulada acorde a lo apreciado en terreno. Este nivel trófico se asocia directamente con una fuerte producción primaria, sobre todo de fitoplancton, por lo que es esperable tener importantes niveles de clorofila-a y fósforo.

Es bueno recalcar que el énfasis de esta memoria es el de realizar un análisis preliminar cualitativo de la hidrodinámica de la Laguna Carén, es decir, encontrar patrones del comportamiento del agua y describirlo con la ayuda de gráficos y diagramas.

2.5. Marco Teórico.

2.5.1 Hidrodinámica de la laguna.

Para el análisis de la hidrodinámica de la laguna Carén es preciso conocer los períodos de estratificación y la frecuencia con que ocurren. En las secciones anteriores se menciona que las principales fuentes que inyectan energía a un sistema léntico de agua son el viento y el balance radiativo. Esta energía mecánica se convierte a energía potencial, ya que se desprecia la cinética porque es baja la velocidad de escorrentía. Entonces, para un lago o laguna estratificada, en contextos donde las capas inferiores son más densas que las superiores (por ejemplo, en verano), se tiene el centro de gravedad más cerca del lecho, es decir, la materia se concentra en la profundidad. Este escenario de estratificación posee una energía potencial menor que el caso de mezcla completa con una densidad constante del agua en la vertical. Ciertos autores han definido esta diferencia de energía como el trabajo o la resistencia que opone el cuerpo de agua estratificado a los forzantes externos que alteran esta situación (Ruttner, 1963).

$$EP = \int_0^H \rho(z, t)gz dz \quad (2.1)$$

donde:

EP : Energía potencial del cuerpo de agua $\left[\frac{J}{m^2} \right]$

H : Profundidad total del cuerpo de agua $[m]$

ρ : Densidad del agua $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

g : Aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

z : Profundidad $[m]$

$$EP_{mezcla} = \int_0^H \rho_{mezcla} g z dz = \frac{\rho_{mezcla} g H^2}{2} \quad (2.2)$$

donde:

ρ_{mezcla} : Densidad del cuerpo de agua bien mezclado $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

La densidad del agua es una función de la presión, la salinidad y la temperatura (UNESCO, 1980). Para el caso de estudio se desprecia la salinidad, ya que es cuerpo de agua dulce. La presión se asume hidrostática respecto al nivel de superficie del agua, por lo que la densidad dependerá de la profundidad y la temperatura:

$$\rho(T, S, P) = \frac{\rho(T, S, 0)}{1 - \frac{P}{K(T, S, P)}} \quad (2.3)$$

donde:

ρ : Densidad del agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

T : Temperatura del agua [$^{\circ}C$]

S : Salinidad [psu]

P : Presión [atm]

K : Coeficiente de compresibilidad del agua [atm]

$$\rho(T, S, 0) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (2.4)$$

donde los términos a_i son constantes:

$$a_0 = 999.8425$$

$$a_1 = 6.794 \cdot 10^{-2}$$

$$a_2 = -9.095 \cdot 10^{-3}$$

$$a_3 = 1.002 \cdot 10^{-4}$$

$$a_4 = -1.120 \cdot 10^{-6}$$

$$a_5 = 6.536 \cdot 10^{-9}$$

La presión se calcula como:

$$P = \frac{\rho(T, S, P) g z}{101325} + 1 \quad (2.5)$$

El coeficiente de compresibilidad del agua se parametriza de acuerdo a la temperatura y la presión.

$$K(T, P) = E + FP + GP^2 \quad (2.6)$$

con:

$$E = 19652.21 + 148.421T - 2.327T^2 + 1.36 \cdot 10^{-2}T^3 - 5.155 \cdot 10^{-5}T^4 \quad (2.7)$$

$$F = 3.240 + 1.437 \cdot 10^{-3}T + 1.161 \cdot 10^{-4}T^2 - 5.779 \cdot 10^{-7}T^3 \quad (2.8)$$

$$G = 8.51 \cdot 10^{-5} - 6.123 \cdot 10^{-6}T + 5.279 \cdot 10^{-8}T^2 \quad (2.9)$$

Teniendo el registro de temperatura en el tiempo, es posible obtener la densidad del agua en el tiempo. Primero se calculan los perfiles de temperatura con espaciamento en profundidad acorde a lo dispuesto en la estación de monitoreo en terreno. Con esto se tiene la densidad en la vertical sin efectos de presión utilizando la ecuación (2.4), después se estiman los perfiles verticales de P y K con las expresiones (2.5) y (2.6). Con estos valores y la ecuación (2.3) se consigue la densidad en profundidad corregida por efectos de presión. Esta matriz de densidad se utiliza para recalculer la matriz de presión con la expresión (2.5) y el coeficiente de compresibilidad con (2.6), así hasta alcanzar la convergencia de la matriz de densidad corregida por efectos de presión.

Cuando la estratificación es estable, es decir, estratos de agua menos densa se posicionan en sectores superiores a los más densos, se genera un movimiento oscilatorio de parcelas de fluido debido a la interacción de la gravedad con los efectos boyantes, o de cambios de densidad (Rozas, 2013). La frecuencia de este movimiento se denomina frecuencia boyante o de Brunt-Väisälä y se define como:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad (2.10)$$

donde:

g : Aceleración de gravedad $[\frac{m}{s^2}]$

ρ_0 : Densidad de referencia $[\frac{kg}{m^3}]$

ρ : Densidad del agua $[\frac{kg}{m^3}]$

z : Profundidad $[m]$

2.5.2 Forzantes energéticos.

Un indicador que cuantifica el efecto del viento y de la forzante meteorológica, como el balance radiativo neto sobre la laguna, es la longitud de Monin-Obukhov (Imberger, 1985), que representa la distancia donde la energía entregada por el viento iguala a la inyectada por los efectos boyantes o de diferencia de energía potencial. El lugar geométrico formado por estas profundidades muestra el área influenciada por el viento.

$$l = \frac{u_*^3}{B} \quad (2.11)$$

donde:

u_* : Velocidad de corte en la superficie del agua [$\frac{m}{s}$]

B : Flujo boyante [$\frac{m^2}{s^3}$]

$$B = \frac{g\alpha_{ec}H^*}{c_p\rho_1} \quad (2.12)$$

donde:

α_{ec} : Coeficiente de expansión del agua [$^{\circ}C^{-1}$]

H^* : Flujo neto de energía [$\frac{W}{m^2}$]

c_p : Calor específico del agua [$\frac{J}{kg^{\circ}C}$]

ρ_1 : Densidad del primer estrato de agua [$\frac{kg}{m^3}$]

Para cuantificar la reacción que el viento produce en el sistema acuático de estudio, es necesario analizar la interfaz agua-aire, en donde existe continuidad del esfuerzo de corte. De su expresión general y una definida por las ciencias de capa límite atmosférica (Garratt, 1994), se encuentra una relación para el corte en la superficie del agua y para la velocidad del aire medida con la estación de monitoreo.

$$\tau_{agua} = u_{*_{agua}}^2 \rho_{agua} \quad (2.13)$$

$$\tau_{aire} = u_{*_{aire}}^2 \rho_{aire} \quad (2.14)$$

De acuerdo a Garratt (1994):

$$u_{*_{aire}}^2 = C_{D10} u_{10}^2 \quad (2.15)$$

con:

$C_{D_{10}}$: Coeficiente de arrastre en el aire, medido a diez metros [-]

u_{10} : Velocidad del viento medida a diez metros $\left[\frac{m}{s}\right]$

Por continuidad de corte:

$$\tau_{aire} = \tau_{agua} \quad (2.16)$$

$$u_{*_{agua}}^2 = \frac{\rho_{air}}{\rho_{agua}} C_{D_{10}} u_{10}^2 \quad (2.17)$$

Perfil logarítmico de velocidad en el aire:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.18)$$

$$u_{10} = u_{ins} \left[\frac{\ln(10) - \ln(z_0)}{\ln(z_{ins}) - \ln(z_0)} \right] \quad (2.19)$$

$$z_0 = 10 e^{-\kappa/\sqrt{C_{D_{10}}}} \quad (2.20)$$

donde:

κ : Constante de Von Karman [-].

z_{ins} : Altura instrumental, donde está el sensor de medición [m].

z_0 : Rugosidad de la superficie donde se mide el esfuerzo de corte [m].

En la Figura 2.3 se aprecian las principales fuentes que energizan un cuerpo de agua.

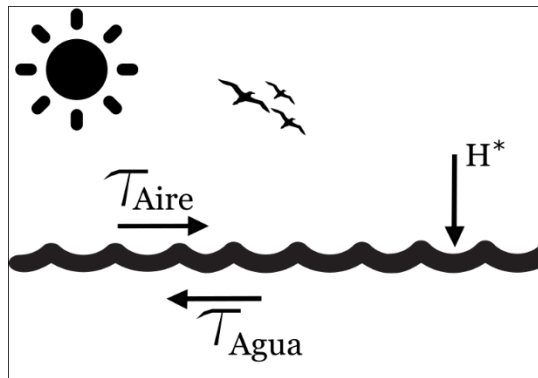


Figura 2.3. Diagrama interfaz aire-agua.

El balance de energía en la superficie de la laguna H^* , es la resultante de los flujos de calor intercambiados con la atmósfera, que son: onda corta incidente y reflejada, onda larga incidente y emitida, y flujos turbulentos de calor sensible y latente (Vergara, 2017) y se escribe como:

$$H^* = (1 - \alpha)H_{oc} + H_{ol_{aire}} - H_{ol_{agua}} - H_s - H_l \quad (2.21)$$

donde H_{oc} es la radiación de onda corta incidente emitida por el sol y medida por el piranómetro de la estación meteorológica, α es el albedo de la superficie y representa el porcentaje de radiación reflejada. $H_{ol_{aire}}$ es la radiación de onda larga emitida por el aire sobre el cuerpo de agua y se caracteriza por la relación de cuerpo negro de Stefan-Boltzman con emisividad asociada a la atmósfera. $H_{ol_{agua}}$ es la radiación de onda larga, pero en este caso relativa al agua. H_s y H_l son los flujos turbulentos asociados al calor sensible y latente por evaporación respectivamente. La Figura 2.4 indica gráficamente estos procesos.

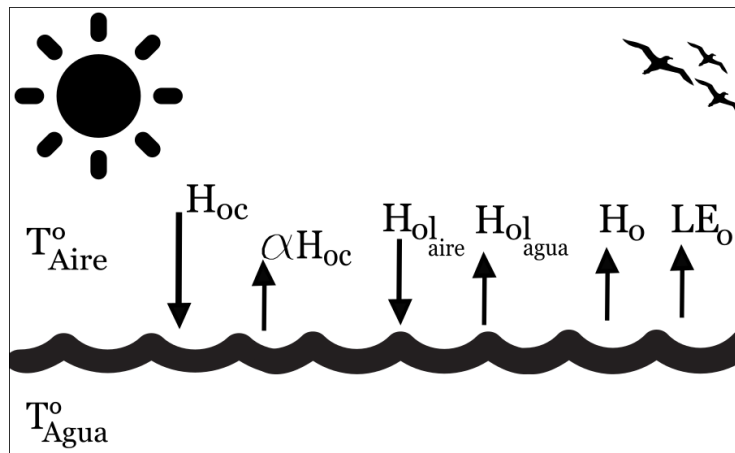


Figura 2.4. Balance de energía en la superficie de un cuerpo de agua.

$$H_{ol_{aire}} = \sigma \varepsilon_{aire} (T_{aire} + 273.25)^4 \quad (2.22)$$

donde:

σ : Constante de Stefan-Boltzman [-]

ε_{aire} : Emisividad del aire [-]

T_{aire} : Temperatura del aire [°C]

La emisividad del aire es obtenida a partir de Idso y Jackson (1969):

$$\varepsilon_{aire} = (1 - 0.261e^{-7.77 \cdot 10^{-4}(273 - T_{aire})^2}) \quad (2.23)$$

$$H_{ol_{agua}} = \sigma \varepsilon_{agua} (T_{agua} + 273.25)^4 \quad (2.24)$$

donde:

ε_{agua} : Emisividad del agua [-]

T_{agua} : Temperatura del agua [°C]

La emisividad del agua de acuerdo a de la Fuente & Niño (2010) para un cuerpo de agua claro y día despejado es:

$$\varepsilon_{agua} = 0.97 \quad (2.25)$$

El albedo superficial en cuerpos de aguas claras es cercano al 3%, lo que significa que un 97% de la radiación solar incidente se transmite a la columna de agua. Para aguas con mayor grado de eutroficación o sólidos suspendidos, los valores varían entre un 12% - 27% (Baladrón, 2011).

Tanto el calor sensible H_s como el latente H_l son procesos de transporte difusivo vertical de calor y vapor de agua respectivamente, en las primeras capas de la interfaz agua-aire, es decir, ambos fenómenos son cuantificados mediante la ley de Fick dominados por la turbulencia, de esta forma se demuestra que:

$$H_s = - \left(\frac{100}{P} \right)^{0.285} (\rho c_p)_{aire} \kappa^2 u_{wind} \frac{T_{aire} - T_{agua}}{\ln \left(\frac{z_{wind}}{z_0} \right) \ln \left(\frac{z}{z_{0e}} \right)} \quad (2.26)$$

donde:

u_{wind} : Velocidad del viento calculada a una altura z_{wind} $\left[\frac{m}{s} \right]$

P : Presión atmosférica [hPa]

ρc_p : Capacidad calórica del aire $\left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$

κ : Constante de Von Karman [-]

T_{aire} : Temperatura del aire [°C]

T_{agua} : Temperatura del agua [°C]

z_{wind} : Altura donde se calcula el viento [m]

z_0 : Rugosidad de la superficie donde se mide el esfuerzo de corte [m]

z_{0e} : Rugosidad de la superficie asociada a la evaporación [m]

La rugosidad de la superficie asociada a la evaporación es (Garratt, 1994):

$$z_{0e} = \frac{z_0}{7.389} \quad (2.27)$$

El cálculo del calor latente H_l se obtiene de similar manera que el calor sensible, con la diferencia que es proporcional al calor latente de evaporación del agua.

$$H_l = EL_w \quad (2.28)$$

donde:

E : Tasa de evaporación $\left[\frac{kg}{s m^2}\right]$

L_w : Calor latente de evaporación del agua $\left[\frac{J}{kg}\right]$

$$E = -0.622 \frac{\rho_{aire}}{P} \kappa^2 u_{wind} \frac{e(z) - e_0}{\ln\left(\frac{z_{wind}}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_{0e}}\right)} \quad (2.29)$$

donde:

ρ_{aire} : Densidad promedio del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

κ : Constante de Von Karman [-]

P : Presión atmosférica [hPa]

$e(z)$: Presión de vapor medido en z [hPa]

e_0 : Presión de vapor medido en $z = z_{0e}$ [hPa]

Donde la presión de vapor es función de la presión de vapor saturada:

$$e(z) = \frac{HR}{100} e_s(T_{aire}) \quad (2.30)$$

HR : Humedad relativa del aire [%]

e_s : Presión de vapor de saturación [hPa]

Y la presión de vapor saturado:

$$e_s(T) = 6.11 \exp\left(\frac{17.625T_{aire}}{T_{aire} + 243.04}\right) \quad (2.31)$$

Donde para e_0 , se tiene que en $z = z_{oe}$ la humedad relativa $HR=100\%$, por lo que la presión de vapor queda como $e_0 = e_s(T_{agua})$.

METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio.

La Laguna Carén es un cuerpo de agua dulce ubicado en el sector poniente de la Región Metropolitana, específicamente en la comuna de Pudahuel. Sus coordenadas UTM están comprendidas entre los 326555 E - 329025 E y los 6298961 N - 6300277 N y está a 460 [msnm]. En la Figura 3.1 se aprecia su ubicación espacial.

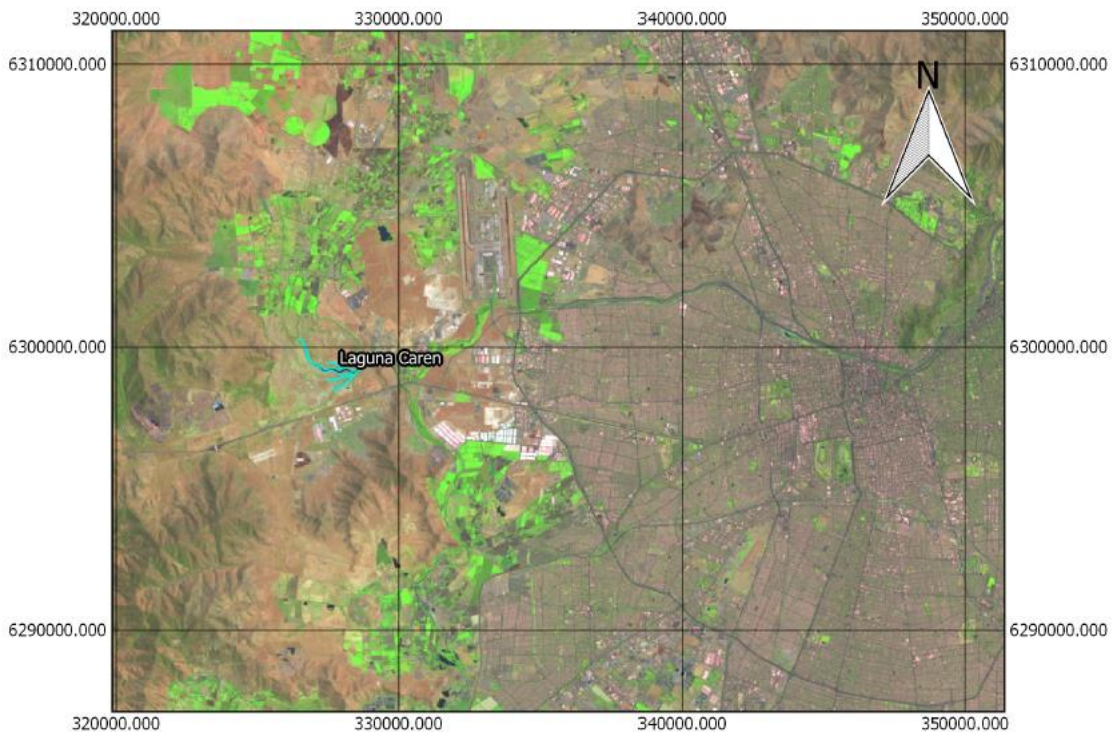


Figura 3.1. Ubicación Laguna Carén en Región Metropolitana.

La laguna es parte central del Parque Científico Tecnológico Laguna Carén de la Universidad de Chile, el que pretende ser un espacio donde lo público y privado, e instituciones nacionales y extranjeras, confluyan en iniciativas innovadoras en investigación científica y desarrollo tecnológico. Actualmente el parque posee 1011 [Há]

entregadas por el Ministerio de Bienes Nacionales en 1994 a la universidad y están administradas por la Fundación Valle de Lo Aguirre, dependiente de la casa de estudios.

El predio se localiza en una zona semiárida, caracterizada por lomajes suaves en la mayor parte de su extensión y en una proporción menor por dos cerros de altura moderada y laderas suaves a escarpadas. Uno en el extremo suroriente, junto a la laguna, y el otro en el norponiente, entre ambos cubren un 15% de la superficie total del parque (López, 2001).

El clima imperante corresponde a uno mediterráneo templado, controlado por el Anticiclón del Pacífico, por lo que durante el verano se tienen características secas, fuerte radiación y vientos intensos desde la costa. En el invierno el anticiclón se desplaza al norte permitiendo el ingreso de sistemas frontales que acarrean nubes, lluvias y bajas temperaturas. En la Figura 3.2 se muestra una vista sur de la Laguna para un día de verano.



Figura 3.2. Vista sur laguna Carén.

El mayor afluente de la laguna es el estero Carén, que recibe el aporte de tres pequeñas cuencas: Lo Aguirre, Noviciado y Lipangue, donde la contribución es debida principalmente a aguas lluvias. La laguna es artificial y fue construida para el transporte de relaves mineros desde el año 1982 (de Miguel, 2006), por lo que cuenta con un muro de tierra compactada de aproximadamente 100 metros de longitud y 6 metros de altura que represa el agua, formando la laguna. En el muro posee un vertedero de seis compuertas que descargan al estero Lampa, en el sector más oriente.



Figura 3.3. Taguas nadando en Laguna, frente sector de cámping.

Los servicios ecosistémicos que presta la laguna consisten en: ser receptor de la materia orgánica y nutrientes que acarrearán las aguas que drenan sus cuencas aportantes, almacén de volumen de agua en sector árido, hábitat de múltiples especies de flora y fauna como: patos, garzas, taguas, treiles, lechuzas, hualas, loicas, coipos, juncales, totoraes, eucaliptos, espinos, etc., sistema de saneamiento de agua, regulación del microclima, sitio deportivo como remo, kayak y pesca, lugar de recreación y esparcimiento en contacto con un ecosistema acuático aledaño a zonas urbanas, entre muchos más. En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran algunos de estos servicios.



Figura 3.4. Remero en Laguna Carén.

3.2. Diseño e instalación de estación de monitoreo ambiental.

La estación de monitoreo ambiental es el conjunto de instrumentos y sensores capaces de registrar las variaciones de los forzantes principales que energizan la laguna Carén, mencionados en el capítulo anterior. El régimen térmico en el cuerpo de agua es medido por termistores marca HOBO modelo Water Temp Pro v2 sujetos a un cordel que cuelga de una boya. Las variables meteorológicas se registran con una estación energizada por medio de un panel fotovoltaico. Se obtienen perfiles de: T°, pH, conductividad, oxígeno disuelto y clorofila-a mediante una sonda Hydrolab modelo MS5 y se muestrea la laguna con una botella de van Dorn o *water sampler* para su posterior análisis de calidad en laboratorio.

Una variable fundamental para el diseño de la estación de monitoreo es la morfología de la laguna Carén, con el fin de conocer las zonas de mayor o menor profundidad. Para esto se realiza un levantamiento del lecho de la laguna (batimetría) con una sonda de escaneo echoMAP 42dv marca Garmin, mostrada en la Figura 3.5. Este instrumento es utilizado tanto por navegantes profesionales como recreativos, para describir estructuras, objetos y peces bajo el agua. Mediante la emisión de ondas que se reflejan en el fondo, o con cualquier elemento que obstruya su paso, entrega una imagen hasta los 230 metros de profundidad. La unidad cuenta con tecnología GPS, por lo que se consigue un plano georreferenciado de la disposición espacial del humedal.



Figura 3.5. EchoMAP 42 dv Garmin en operación.

La adquisición de los datos batimétricos se hizo los días 4 y 5 de octubre de 2016. El instrumento se dispuso en la popa del bote con que cuenta la Fundación Valle Lo Aguirre y, con la ayuda del jefe de mantención del predio Hernán Toledo, se recorrió la laguna de la manera más exhaustiva posible.

El diagrama con la batimetría de la laguna se aprecia en la Figura 3.6. Es importante mencionar que no se accede con el bote a todos los sectores debido a la baja profundidad (por ejemplo, el brazo norte que empalma en el centro de la laguna).

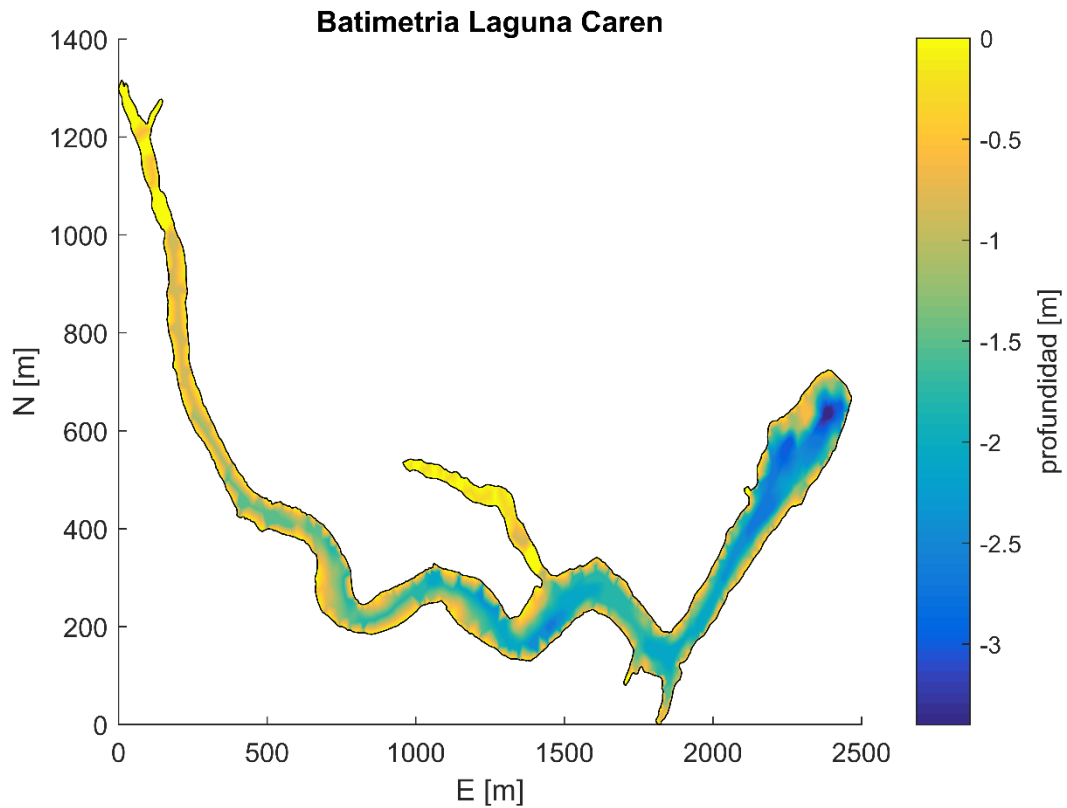


Figura 3.6. Batimetría de la laguna Carén octubre 2016.

A partir de este resultado es posible indicar las siguientes características morfométricas agrupadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros morfométricos Laguna Carén octubre 2016.

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen	839304.9	m^3
Área	306692.5	m^2
Profundidad media	0.56	m
Profundidad máxima	3.4	m

El diseño de las boyas contempla una definición de la cantidad, ubicación y espaciamiento entre sensores de temperatura (termistores) en la vertical. Para la cantidad, acorde a la superficie del área de estudio y los recursos disponibles, son dos las boyas a instalar. Estas son utilizadas en las disciplinas náuticas para demarcar zonas de resguardo y protección, fabricadas de polipropileno y resistentes a la radiación solar. La primera boya se ubica en el sector Norte más profundo y la otra en la parte Sur, al centro de la laguna, mostradas en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Ubicación de boyas de medición Norte (izquierda) y Sur (derecha).

El espaciamiento entre termistores se ajusta a la profundidad del sector donde está la boya y a la cantidad de sensores disponibles en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Con estos antecedentes se instalan nueve sensores, espaciados cada 30 [cm] por boya. El primero de ellos situado aproximadamente a 10 [cm] de profundidad, por lo que, el noveno sensor alcanza los 2.5 [m] desde el nivel del agua, disposición indicada en la Figura 3.8. Los sensores registran la temperatura cada 5 minutos. La instalación de las boyas se realizó en dos días, uno para cada boya. La primera fue ubicada en la zona norte, el 16 de noviembre de 2016, y la segunda en la parte sur, el 17 de noviembre.

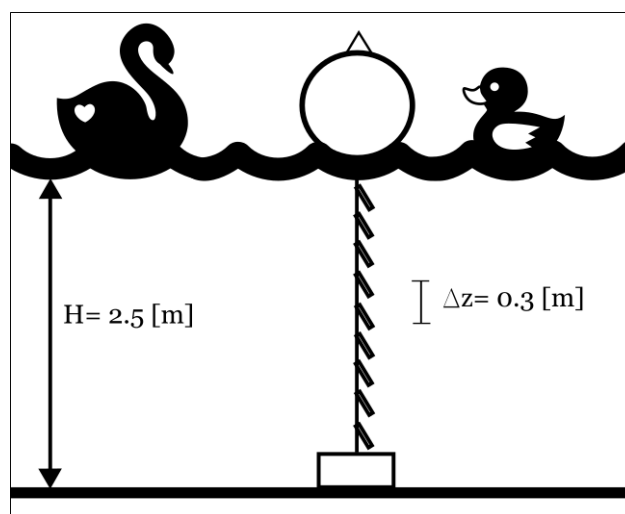


Figura 3.8. Diseño de boyas de medición de temperatura.

Los forzantes meteorológicos se analizan mediante el registro continuo de seis variables: temperatura del aire, humedad relativa del aire, radiación solar incidente, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento. Para esto se cuenta con los sensores y dispositivos indicados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Componentes estación meteorológica

Instrumento y/o sensor	Marca	Modelo
Datalogger	Campbell Scientific	CR1000
Fuente de poder 12 [V]	Phoenix	KB1275
Panel Solar de 10 [W]	BP Solar	SX10M
Trípode de soporte	Li-Cor	CM225
T° y humedad relativa	Vaisala	HMP-L11
Piranómetro	Li-Cor	LI200X
Barómetro	Vaisala	PTB110
Anemómetro y veleta	Wind Sentry	03002

La ubicación de la estación es un acuerdo con el personal a cargo del predio Carén, y debe representar las condiciones meteorológicas del sector junto con resguardarla ante posibles alteraciones de terceros. Acorde a esto, se sitúa sobre una estructura de hormigón armado de las instalaciones de la planta elevadora de aguas 1 (PEA1) en el sector urbanizado del parque Científico-Tecnológico Laguna Carén, que se indica en la Figura 3.9. El registro de las mediciones es cada 5 minutos, al igual que el de los termistores.



Figura 3.9. Estación meteorológica Carén.

Las coordenadas de las boyas de medición de temperatura y la estación meteorológica se muestran en la Tabla 3.3 y se aprecia la ubicación espacial en la Figura 3.10.

Tabla 3.3. Coordenadas geográficas de estación de monitoreo ambiental Laguna Carén.

	Coordenada Este [m]	Coordenada Norte [m]
Boya Norte	328970	6299588
Boya Sur	328046	6299168
Estación Meteorológica	327295	6298968

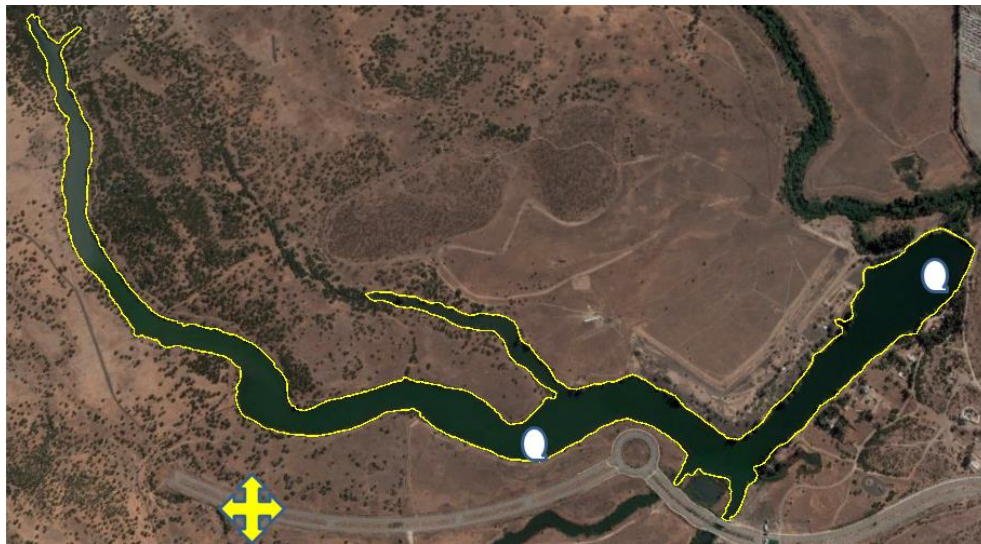


Figura 3.10. Disposición espacial de la estación de monitoreo ambiental Laguna Carén. La cruz representa la ubicación de la estación meteorológica, las figuras blancas, las boyas de medición. (Fuente. Google Earth)

3.3. Muestreo de perfiles con sonda CTD.

El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile cuenta con una sonda multiparámetro MS5 de Hydrolab, capaz de registrar mientras desciende: conductividad eléctrica, temperatura, pH, oxígeno disuelto, presión y clorofila-a. Se crean perfiles de estas variables en sectores aledaños a las boyas. La Tabla 3.4. indica las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo y la Figura 3.11 la disposición espacial en la laguna.

Tabla 3.4. Coordenadas geográficas puntos de medición CTD.

Punto	Coordenada E [m]	Coordenada N
P1	328950	6299586
P2	328903	6299538
P3	328869	6299555
P4	328890	6299589
P5	328075	6299196
P6	328029	6299169
P7	328025	6299198
P8	328074	6299235
P9	328387	6299014
P10	328403	6299002

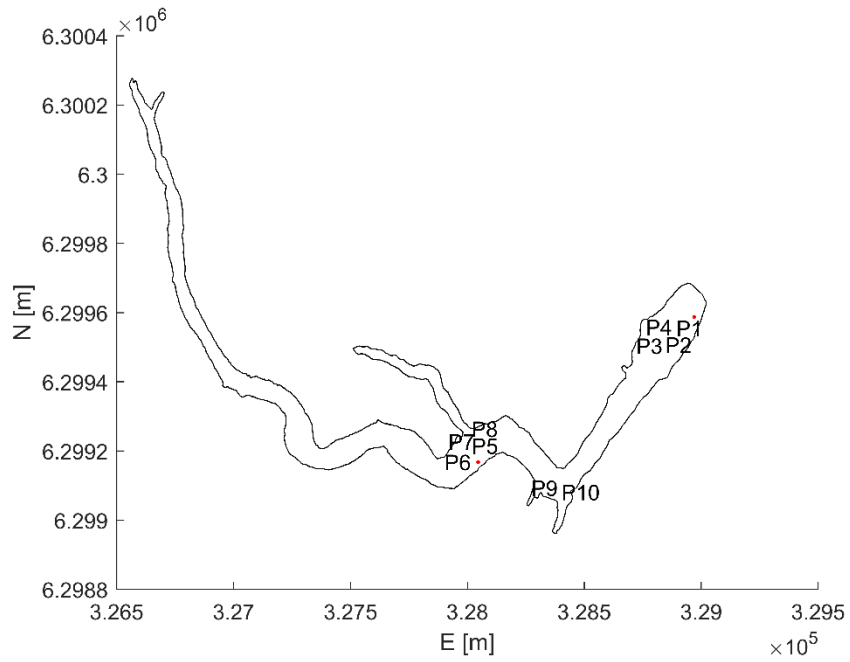


Figura 3.11. Disposición espacial de puntos de muestreo en Laguna Carén.

RESULTADOS

4.1. Resultados de campañas de medición hidrodinámica.

Con el fin de cumplir con los objetivos de estudio, se realizan tres campañas de medición de temperatura del agua y variables meteorológicas. Durante la última, se agrega a la boya Norte dos sensores de conductividad eléctrica, junto al primer y último termistor, y tres sensores de oxígeno disuelto el primero cercano a la superficie, el segundo en el medio y el otro en la parte más profunda, todos marca HOBO. En la Tabla 4.1 se especifica las fechas de inicio y término de las campañas.

Tabla 4.1. Fechas de inicio y término de campañas de medición.

	Fecha de inicio	Fecha de término
Campaña 1	18 de noviembre de 2016 00:00 [hrs]	06 de diciembre de 2016 12:00 [hrs]
Campaña 2	07 de diciembre de 2016 14:00 [hrs]	18 de enero de 2017 08:00 [hrs]
Campaña 3	28 de enero de 2016 00:00 [hrs]	08 de marzo de 2017 08:00 [hrs]

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestra el comportamiento de la diferencia de energía potencial del cuerpo de agua (gráficos a) y la densidad en la vertical (gráficos b) para la boya Norte en las tres campañas de medición. En ellas se aprecian cambios bruscos en la diferencia de energía potencial, teniendo fuertes peaks a nivel diario. Este ΔE es la energía necesaria para que el cuerpo de agua alcance la mezcla, por lo que mientras mayor sea esta diferencia, más estable es la estratificación, contrariamente cuando se anula, se tiene un escenario mezclado.

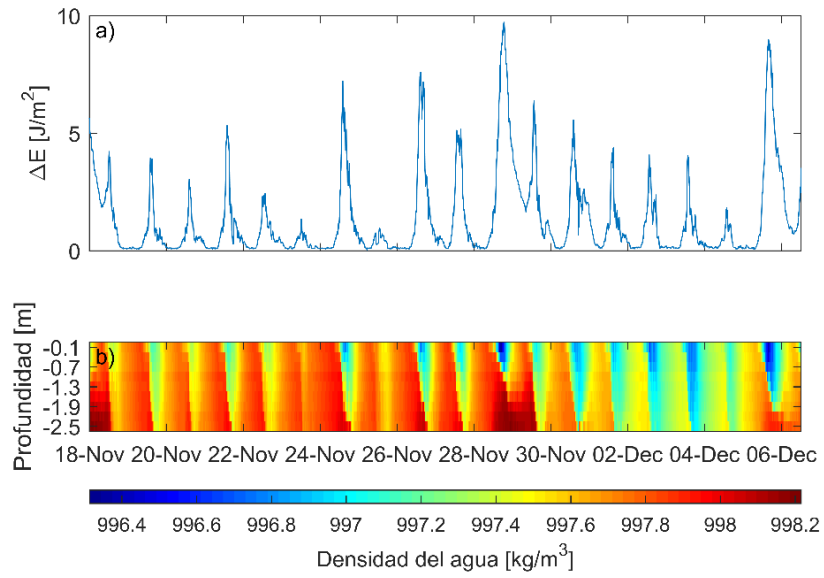


Figura 4.1. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Norte. Campaña 1.

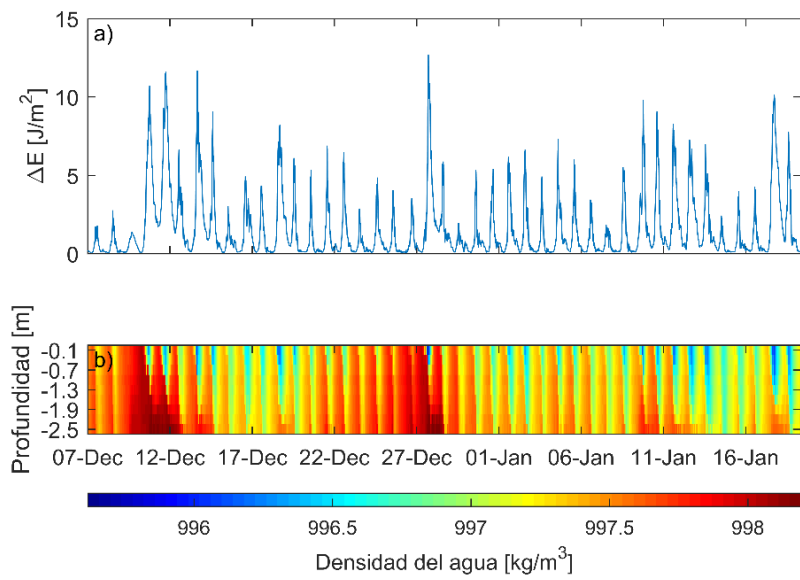


Figura 4.2. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Norte. Campaña 2.

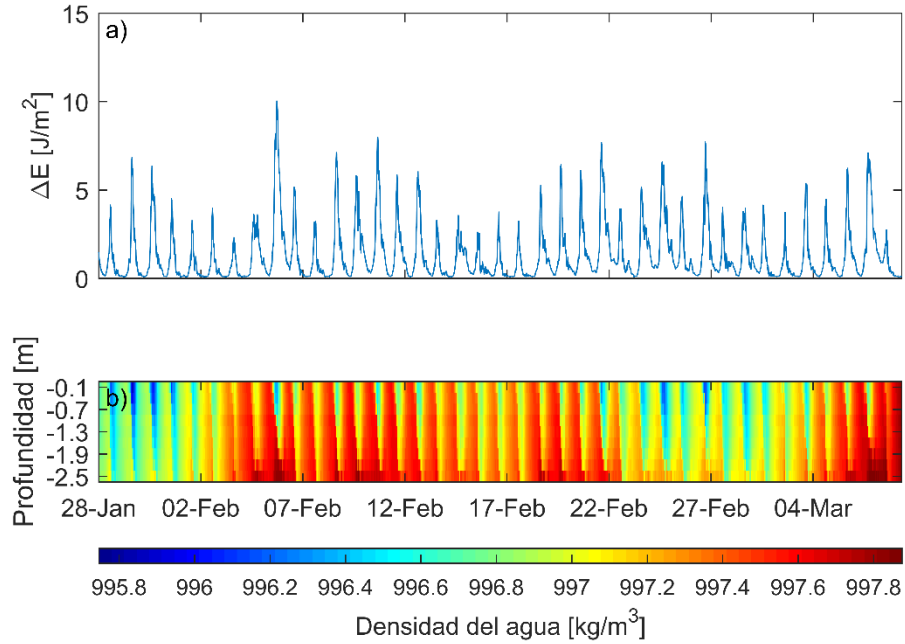


Figura 4.3. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Norte.
Campaña 3.

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran el comportamiento de la diferencia de energía potencial (gráficos a) y densidad en la vertical (gráficos b) para la boya Sur.

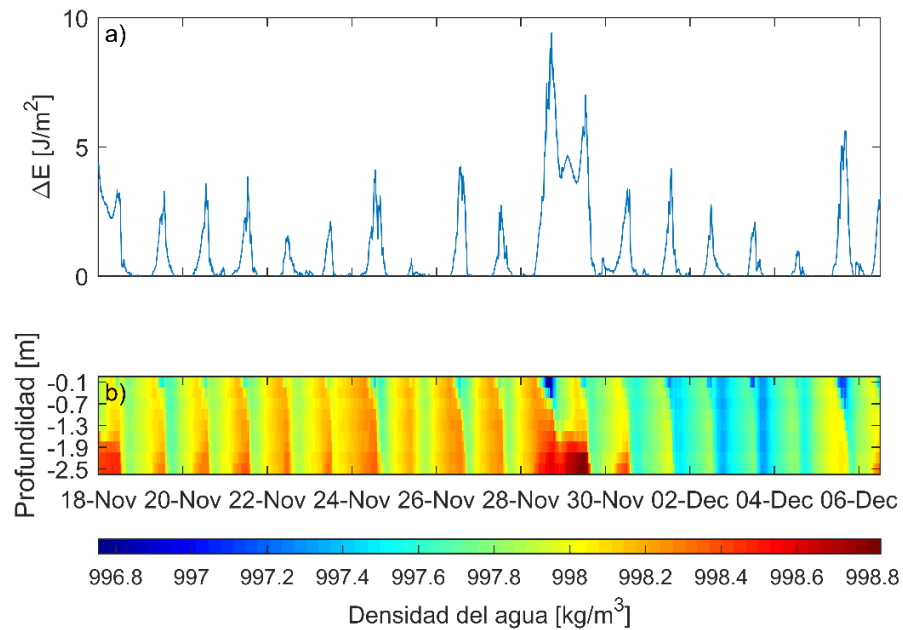


Figura 4.4. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Sur.
Campaña 1.

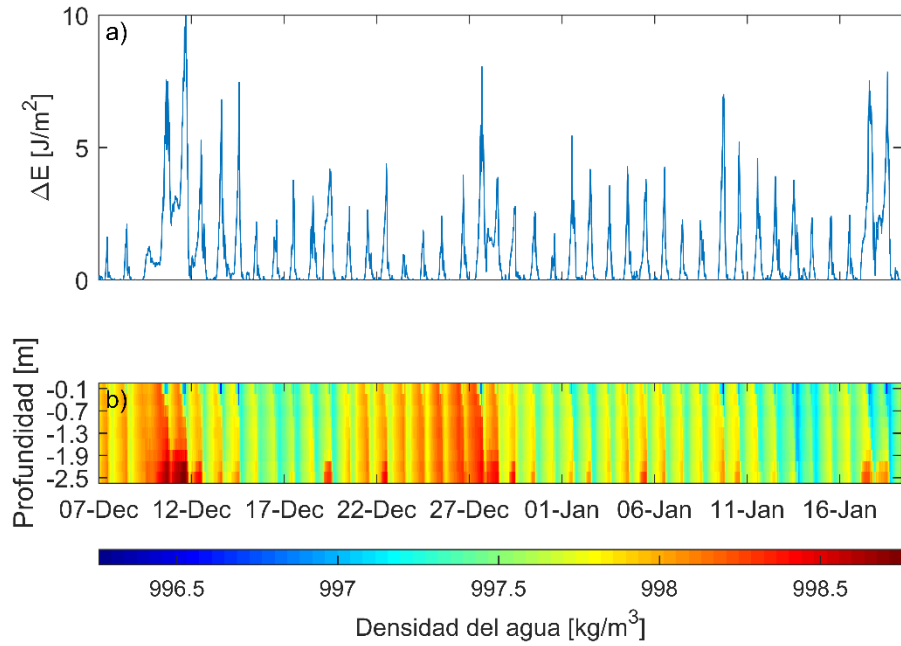


Figura 4.5. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Sur. Campaña 2.

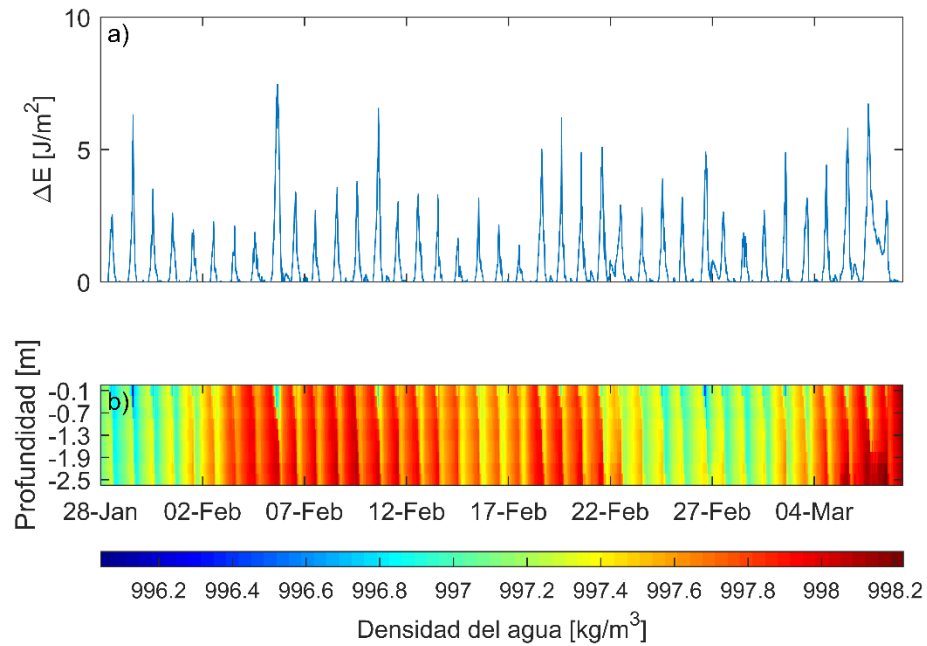


Figura 4.6. a) Delta de Energía. b) Variación de la densidad boya Sur. Campaña 3.

Durante la segunda campaña, existió un problema con el instrumento de medición de velocidad del viento (anemómetro), por lo que los resultados meteorológicos para este período se acotan desde el 07 de diciembre de 2016 al 13 de diciembre de 2016, el anemómetro se arregla en la tercera campaña. En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se aprecia el comportamiento de las variables meteorológicas para las tres campañas. Al final de este apartado se encuentran las tablas con el resumen de los registros para cada campaña.

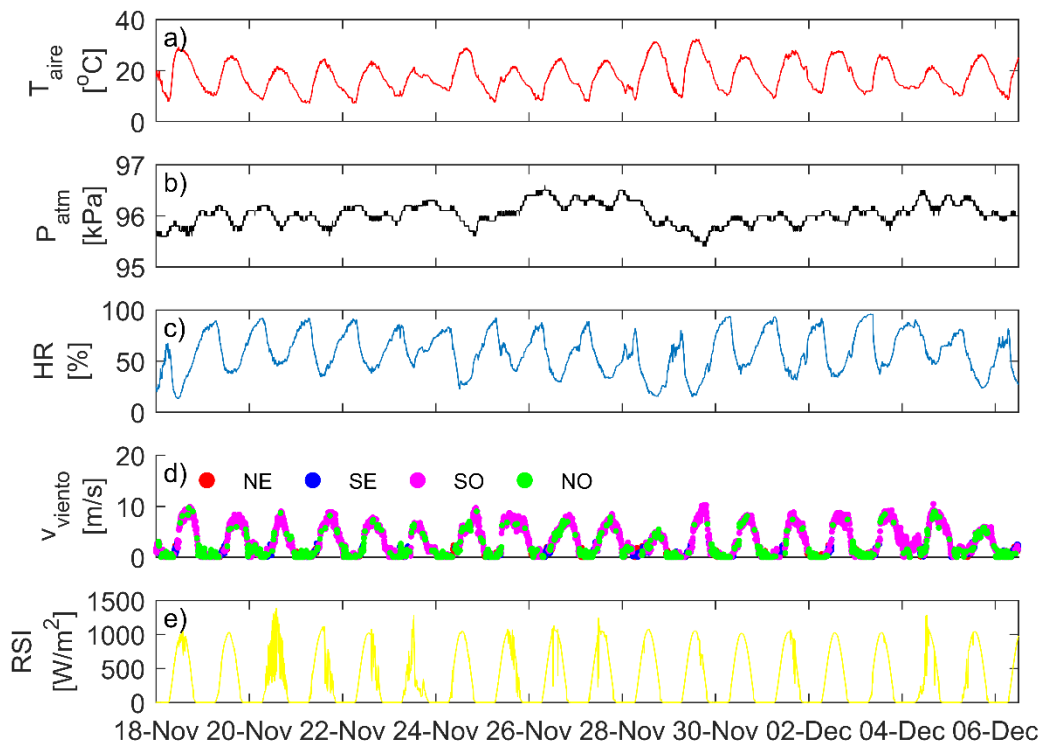


Figura 4.7. Registro meteorológico. Campaña 1.

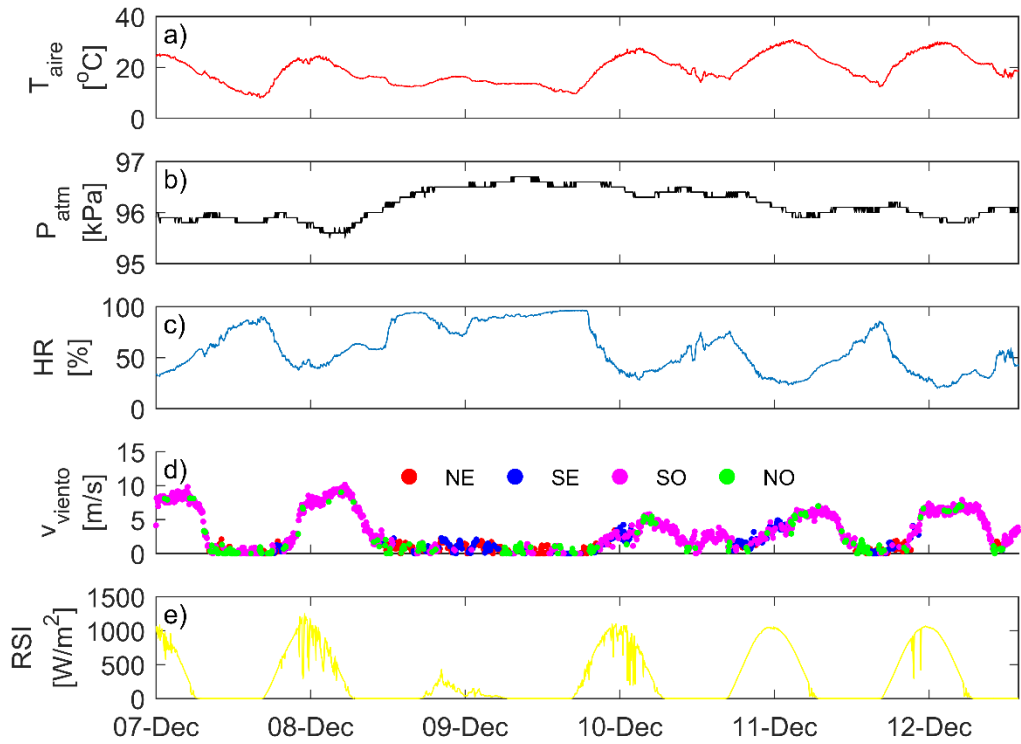


Figura 4.8. Registro meteorológico. Campaña 2.

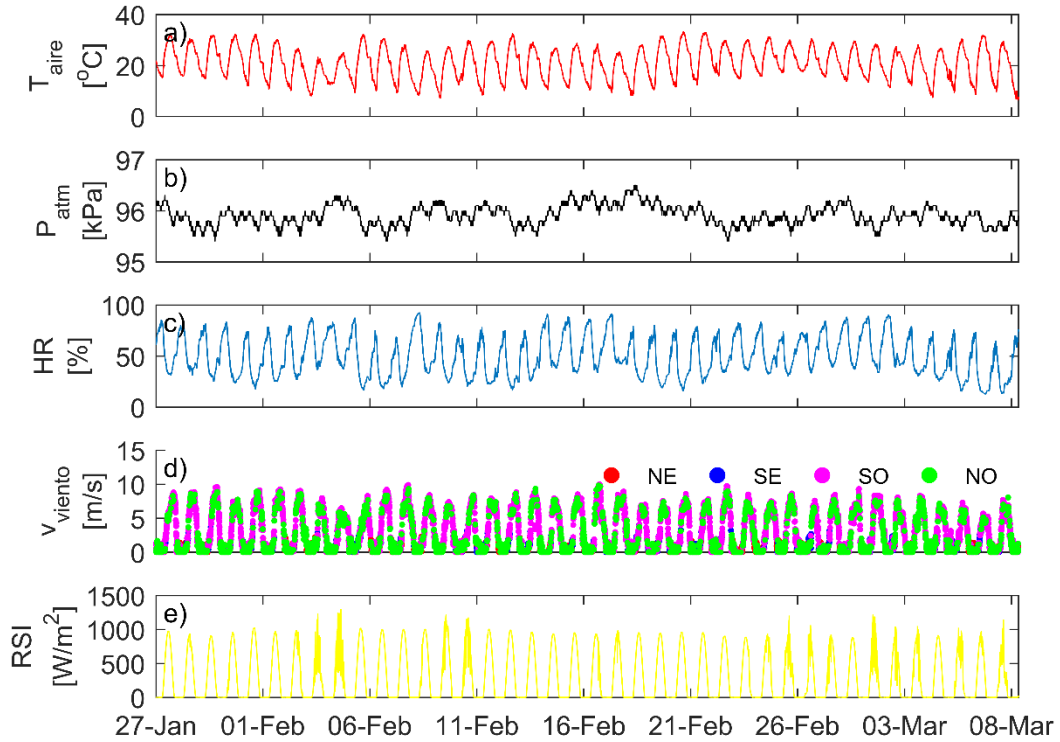


Figura 4.9. Registro meteorológico. Campaña 3.

El balance radiativo es calculado con la ecuación 2.21 utilizando los siguientes valores: $\alpha_{superficie} = 0.17 [-]$ (Baladrón, 2011), $c_{p\ aire} = 1213.36 \left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$ (Howell & Buckius, 1987), $L_w = 2.26 \cdot 10^6 \left[\frac{J}{kg \ m^3} \right]$ (Baladrón, 2011), $\rho_{aire} = 1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, $z_{ins} = 5.07 [m]$.

Con estos datos se tiene el balance de energía en la superficie del agua de los flujos turbulentos y radiativos para la Laguna Carén en las tres campañas, mostrados en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12. Al final del apartado se encuentran las tablas con el resumen de las principales componentes de este balance para las tres campañas.

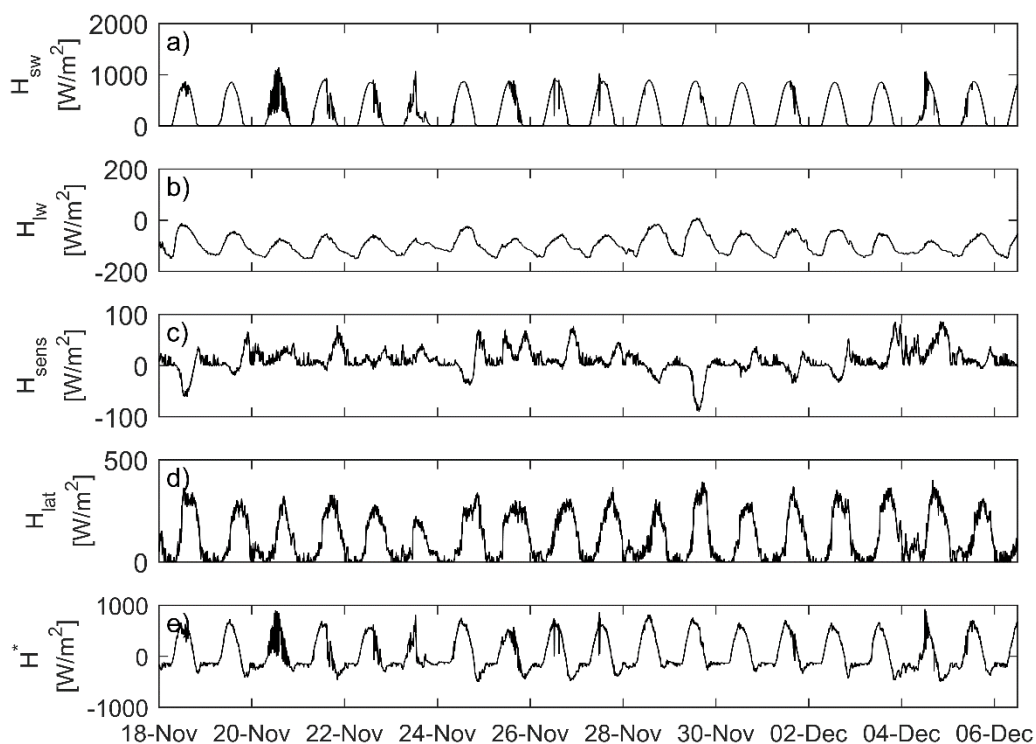


Figura 4.10. Balance radiativo Laguna Carén. Campaña 1.

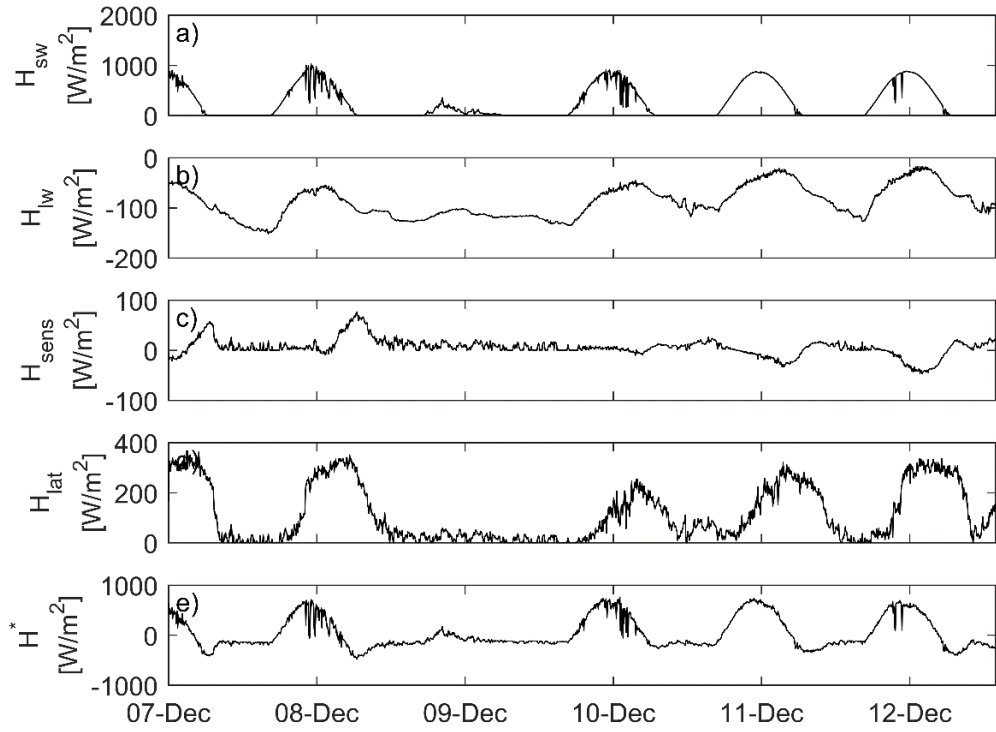


Figura 4.11. Balance radiativo Laguna Carén. Campaña 2.

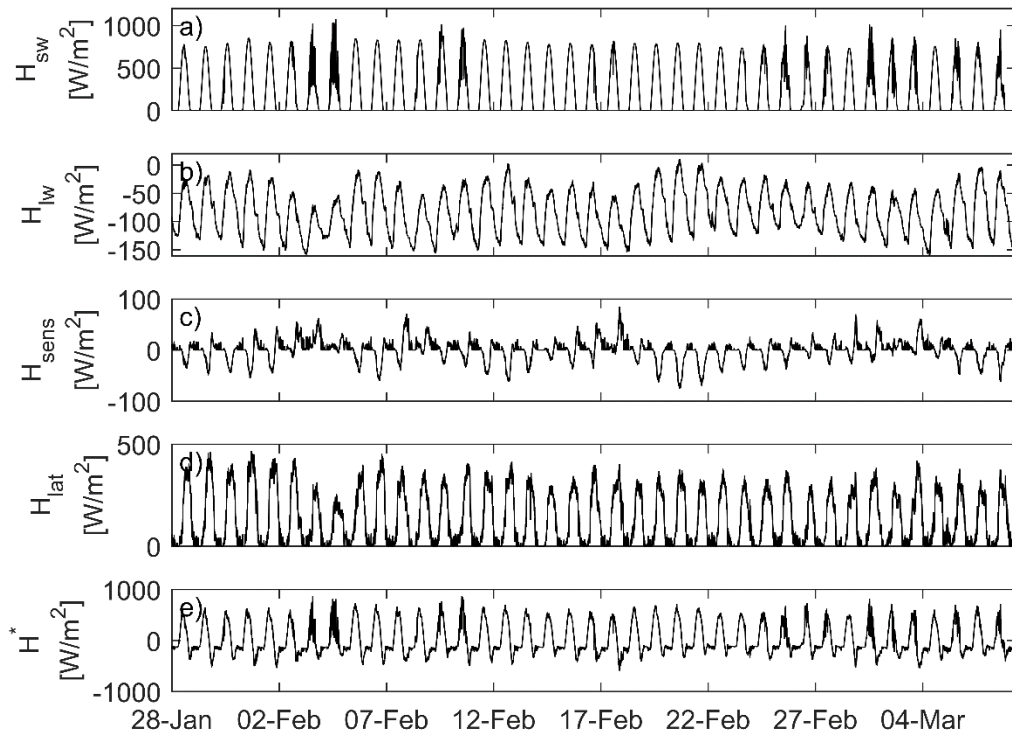


Figura 4.12. Balance radiativo Laguna Carén. Campaña 3.

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 exponen la tasa de evaporación desde la superficie de la laguna Carén, con una frecuencia de muestreo de 5 [min].

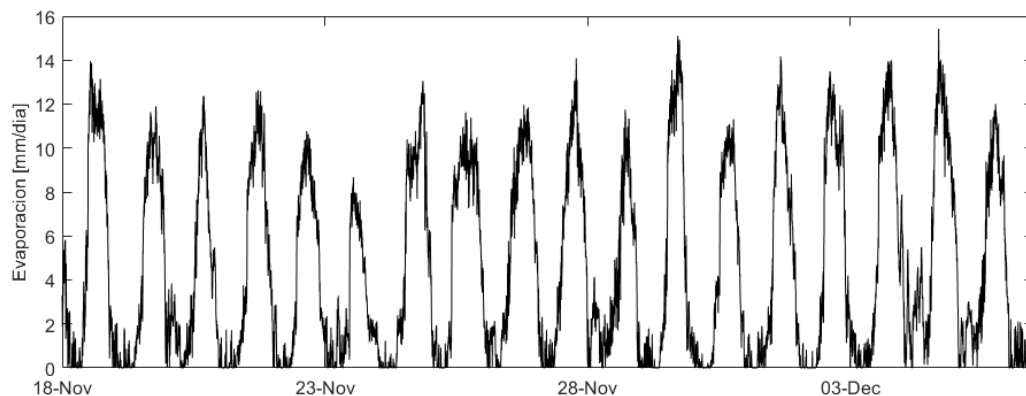


Figura 4.13. Tasa de evaporación. Campaña 1.

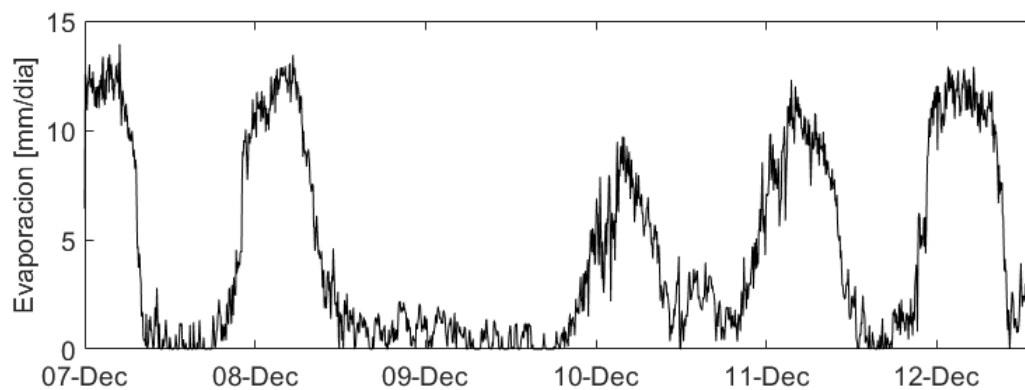


Figura 4.14. Tasa de evaporación. Campaña 2.

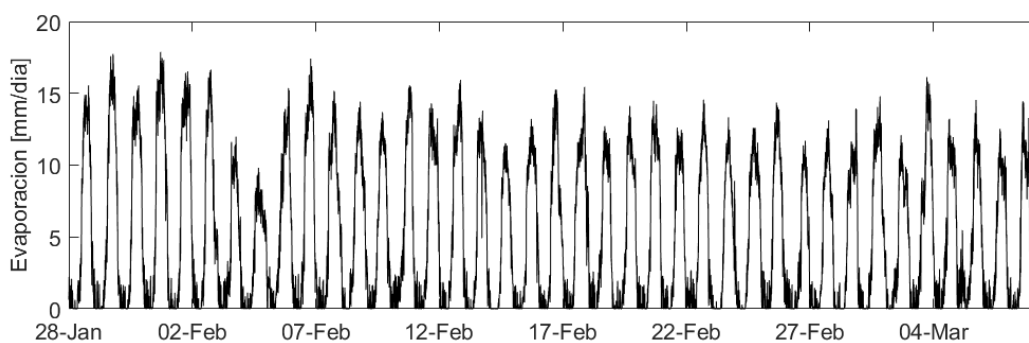


Figura 4.15. Tasa de evaporación. Campaña 3.

Para analizar el efecto de los forzantes meteorológicos, específicamente la velocidad del viento, u_*^3 sobre el comportamiento de la estratificación del agua B , se utiliza la longitud de Monin-Obukhov mencionada en la ecuación 2.11. Los valores que se consideran son: $\alpha_{ec} = 2.1 \cdot 10^{-4} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$, y $c_{p_{agua}} = 4181 \left[\frac{J}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$.

La Figura 4.16 muestra este indicador para un período con estratificación y mezcla completa, sin embargo, no es claro apreciar valores coherentes con la profundidad de la laguna. Por esto, se estudian los componentes de la longitud de Monin-Obukhov por separado, para así comparar los dos forzantes principales (u_*^3 y B) y definir cuál es el dominante y que papel cumple cada uno. Con este objetivo se muestran casos de estratificación fuerte y mezcla completa por campaña, con el fin de encontrar patrones de hidrodinámica de la laguna.

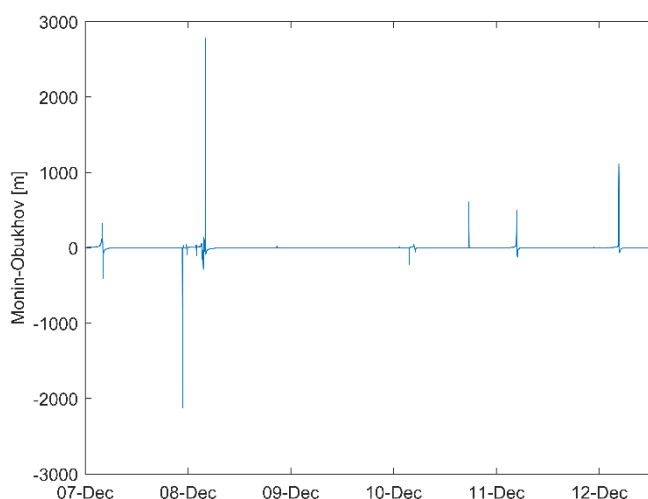


Figura 4.16. Longitud de Monin-Obukhov, 07 - 12 de diciembre.

4.2. Análisis de casos por campañas de monitoreo.

En la primera campaña de medición, se obtuvo un escenario de estratificación estable, desde el mediodía del 28 de noviembre hasta el final del día 29 de noviembre. Este comportamiento no es observado durante el resto de la campaña, ya que en las Figuras 4.1 a la 4.6, se aprecia el siguiente patrón de hidrodinámica:

Mezcla completa por las mañanas, para incrementar la estratificación con el paso del día, donde se alcanza el peak de diferencia de energía potencial ΔE tiempo antes del peak de velocidad del viento u_*^3 (Figura 4.17.a). Otra característica cualitativa de la estratificación, es que empieza a crecer esta diferencia de energía ΔE cuando el flujo boyante se torna positivo $B > 0$ y a la inversa, desciende cuando se vuelve negativo $B < 0$.

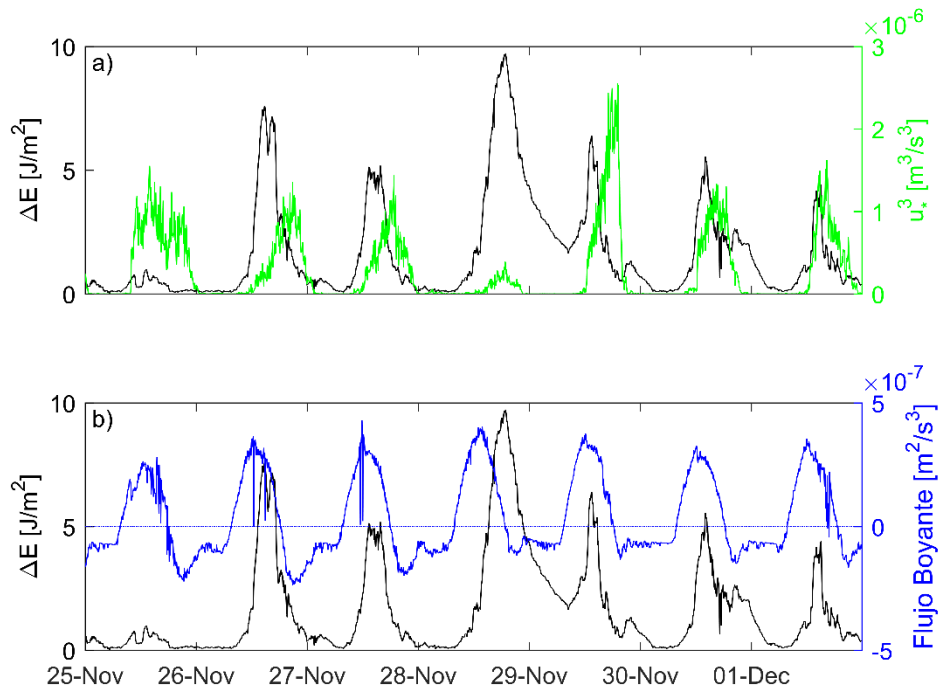


Figura 4.17. a) Diferencia de energía potencial y forzante de viento en boya Norte.

b) Diferencia de energía potencial y flujo boyante. Semana 25 nov - 02 dic. Campaña 1.

La temperatura de la superficie del agua respecto a la del aire denota el signo del calor sensible, y es determinante en las variaciones del balance radiativo. Las Figuras 4.18 y 4.20 muestran la estabilidad de la temperatura del agua comparada a la del aire para las campañas 1 y 2 respectivamente, fenómeno explicado por el alto calor específico del agua.

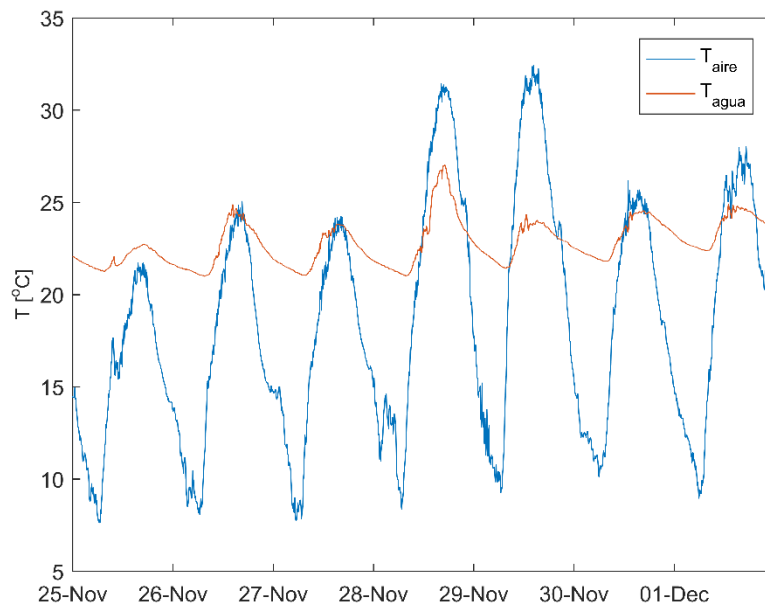


Figura 4.18. Temperatura del aire y la superficie del agua. Semana 25 nov - 02 dic. Campaña 1.

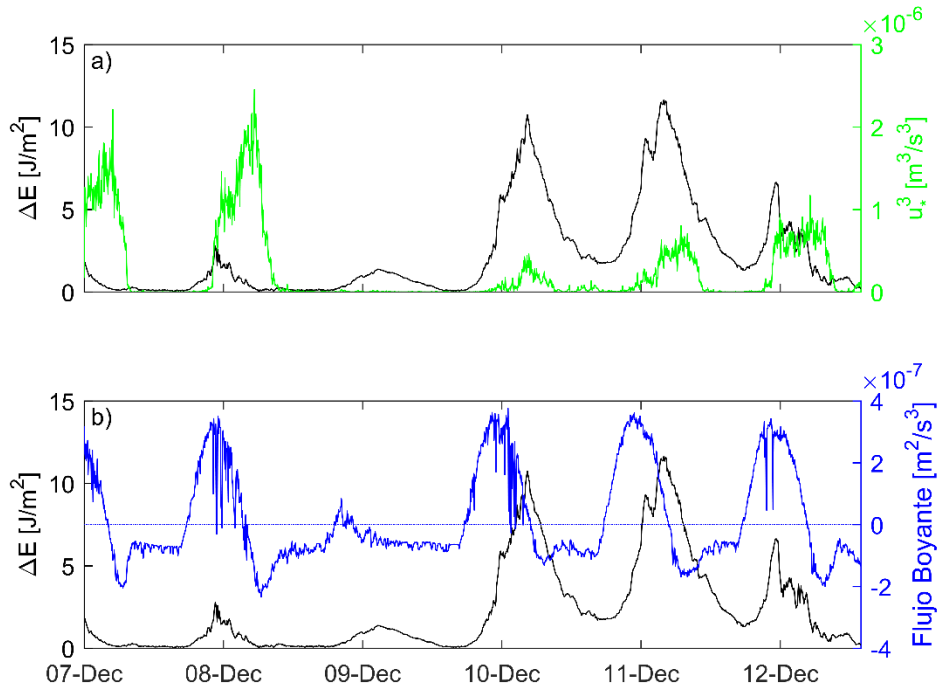


Figura 4.19. a) Diferencia de energía potencial y forzante de viento en boya Norte. b) Diferencia de energía potencial y flujo boyante. Semana 07 dic - 13 dic. Campaña 2.

Para la segunda campaña de monitoreo, la Figura 4.19 muestra en los días 8 y 9 de diciembre un cuasi-escenario de mezcla completa, producto de un viento intenso el día 8 y un flujo boyante cercano a cero para el día 9, a pesar del viento calmo. Luego de estos casos de mezcla, el balance radiativo se normaliza, y al ser el flujo boyante mayor a cero, (el agua comienza a recibir energía en forma de calor desde la atmósfera), comienza a incrementarse la diferencia de energía, proceso que se acentúa en los dos días siguientes 10 y 11 de diciembre con vientos calmos.

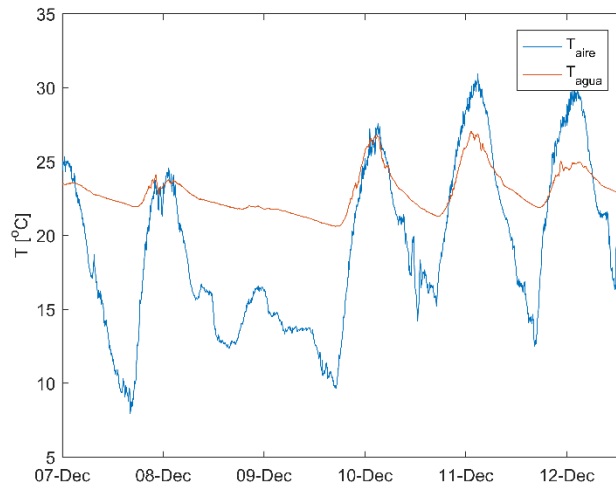


Figura 4.20. Temperatura del aire y la superficie del agua. Semana 07 dic - 13 dic. Campaña 2.

En la tercera campaña de muestreo se apreció un comportamiento más uniforme, con mezcla completa, estratificación y después mezcla otra vez. En la Figura 4.21 se observan tres días con un flujo boyante periódico, acompañados por peaks de viento. La diferencia entre el tiempo en que se alcanza el máximo del efecto boyante (Figura 4.21 b) con el máximo de viento (Figura 4.21 a) es de entre 2 a 3 horas. Durante ese lapso la estratificación crece de una manera paulatina y suave, hasta que aparece el peak de viento entregando un monto considerable de energía al sistema. Fenómeno que acelera el proceso de intercambio de temperatura entre aire-agua, en circunstancias donde el aire está a una temperatura mayor respecto al agua (Figura 4.22). Esta es una de las explicaciones de la coordinación de los peaks de viento con los de energía potencial de estratificación. Respecto al día 7 de marzo, el flujo boyante resulta menos periódico que los días anteriores y además la forzante de viento se duplicó respecto al día anterior, escenario favorable para la mezcla completa producida el día 8 de marzo.

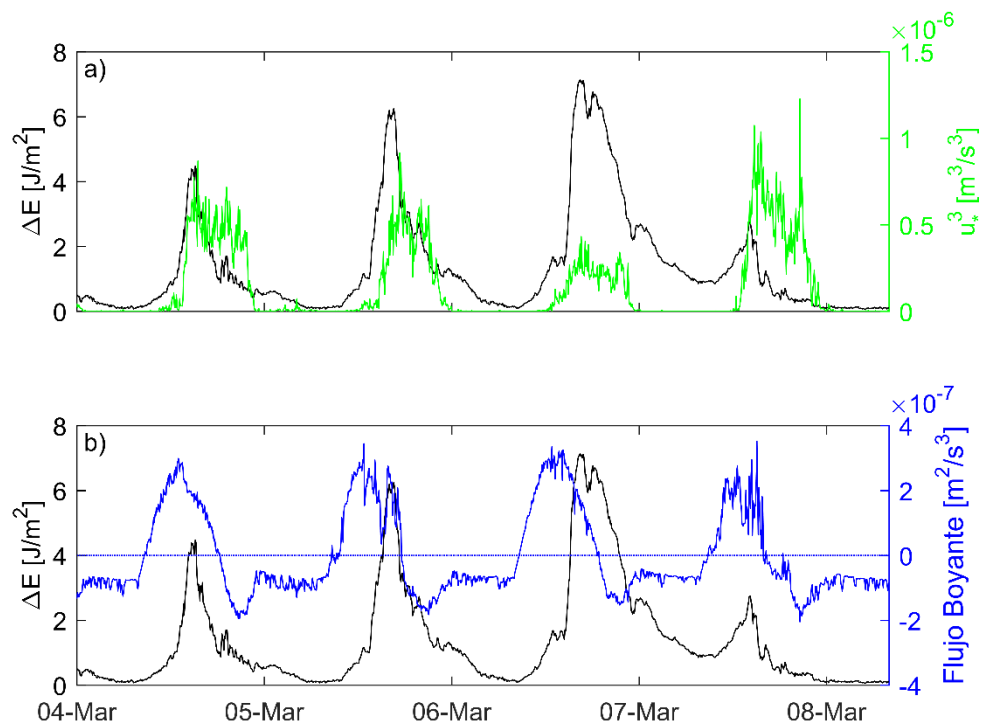


Figura 4.21. a) Diferencia de energía potencial y forzante de viento en boya Norte.

b) Diferencia de energía potencial y flujo boyante. Semana 04 mar - 08 mar. Campaña 3.

En la Figura 4.23 es posible encontrar los tres escenarios hidrodinámicos, marcados por el intenso gradiente vertical de temperatura que conlleva a un gradiente de densidad (Figura 4.24). El día 6 de marzo comienza la estratificación gracias al viento calmo, y sigue hasta iniciar el día 7 de marzo. En este proceso se alcanza un gradiente de $4.5 [^{\circ}\text{C}]$ entre el estrato superior con el más profundo. Es importante notar que el enfriamiento en el lecho de la laguna, puede asociarse a una absorción de calor de los sedimentos.

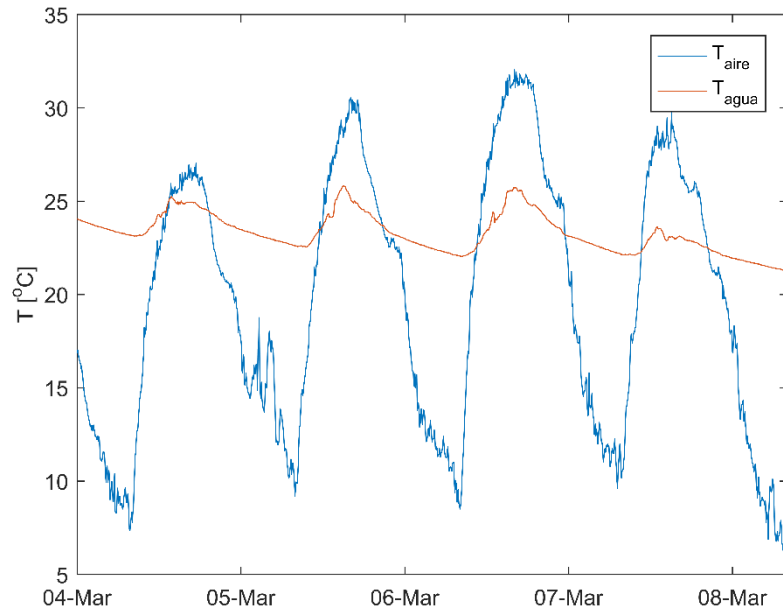


Figura 4.22. Temperatura del aire y la superficie del agua. Semana 04 mar - 08 mar. Campaña 3.

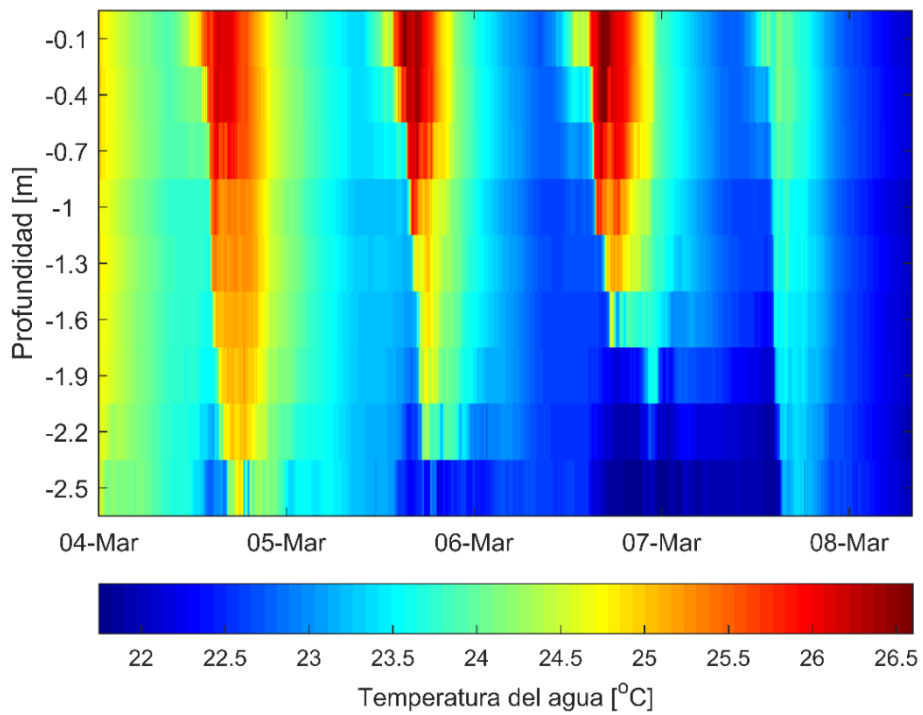


Figura 4.23. Temperatura del agua en boya Norte. Semana 04 mar - 08 mar. Campaña 3.

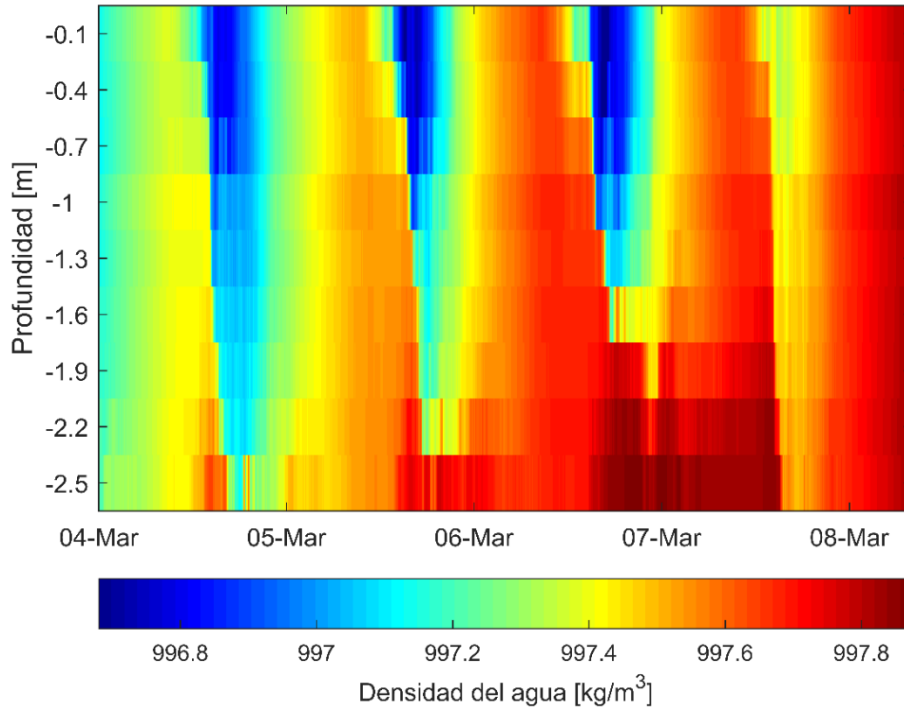


Figura 4.24. Densidad del agua en boya Norte. Semana 04 mar - 08 mar. Campaña 3.

La frecuencia de Brunt-Väisälä es un parámetro que muestra el lugar geométrico donde se forma la termoclina, en caso de que exista. La termoclina es la región formada por los puntos de mayor gradiente de densidad en la vertical, es decir, la profundidad donde se tiene la mayor diferencia entre estratos contiguos. En un modelo de tres capas se localiza en el metalimnio y es un indicador estudiado vastamente por la limnología.

En la Figura 4.25 se aprecian las frecuencias de movimientos entre dos estratos consecutivos de fluido. Los puntos más rojos definen el lugar donde existiría la termoclina, ya que es un gradiente fuerte de densidad lo que produce estas interacciones. En la Figura 4.25 no se observa una termoclina clara, lo que tiene sentido debido al ciclo mezcla-estratificación-mezcla que se genera a diario.

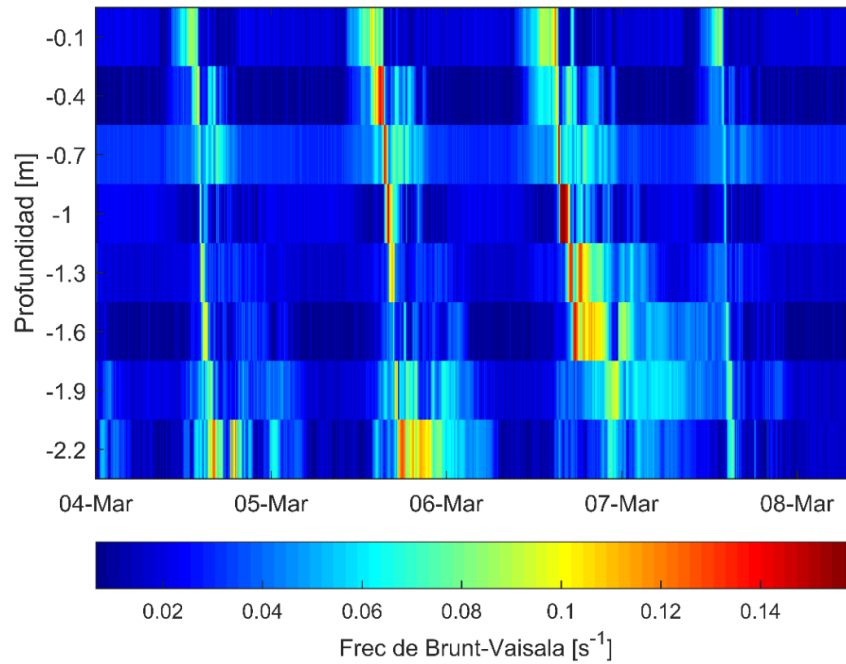


Figura 4.25. Frecuencia de Brunt-Väisälä en boya Norte. Semana 04 mar- 08 mar. Campaña 3.

En la última campaña de registro, se añadieron sensores de conductividad y OD a la boya Norte de monitoreo del agua, comportamiento apreciado en las Figuras 4.26 y 4.27.

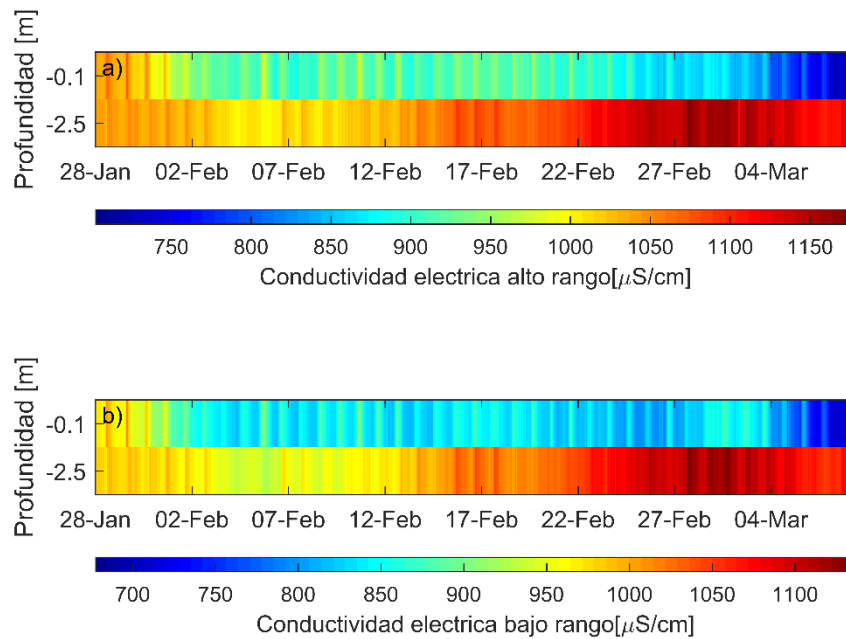


Figura 4.26. a) Conductividad eléctrica en el agua de rango alto. b) Conductividad eléctrica rango bajo en boya Norte. Campaña 3.

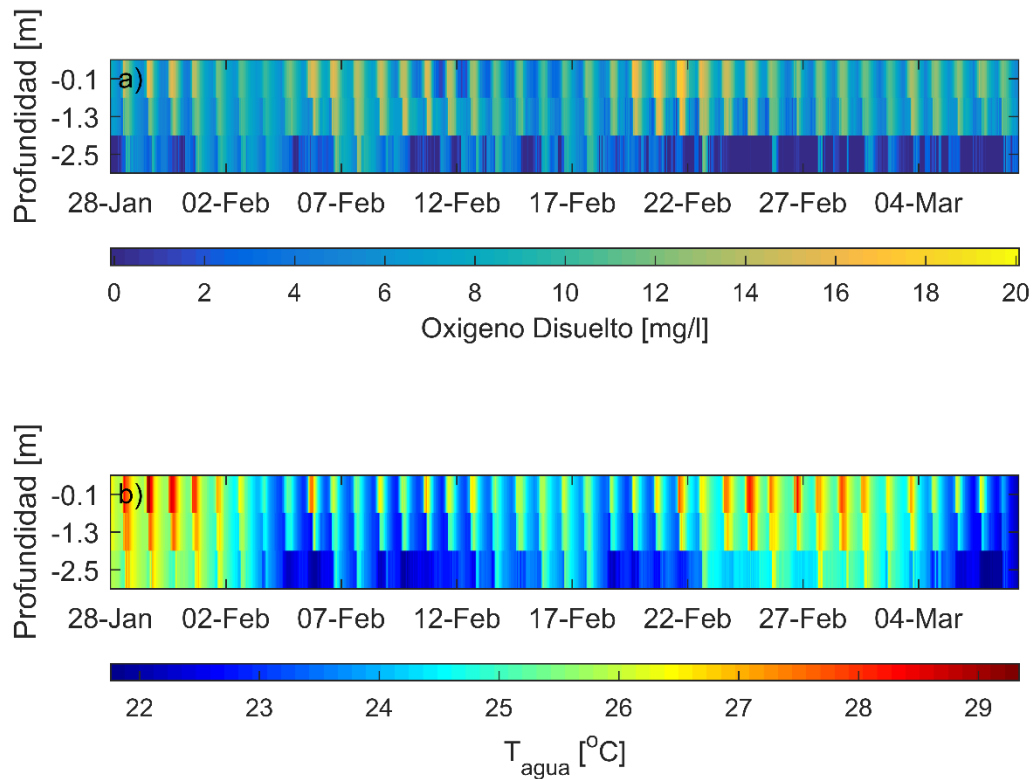


Figura 4.27. a) Concentración de oxígeno disuelto. b) Temperatura del agua en boya Norte. Campaña 3.

La conductividad en el agua se midió en alto y bajo rango, ya que no se tenían antecedentes para este parámetro. En la Figura 4.26 se aprecia una serie de valores asociados a agua dulce, del orden de $1 \left[\frac{mS}{cm} \right]$. Se tiene un aumento con la profundidad, factor que puede entregar una característica del tipo de sedimento. Una hipótesis es que tenga metales precipitados los que al resuspenderse y luego disolverse producen este aumento en la conductividad eléctrica.

La Figura 4.27 presenta la variación del oxígeno disuelto (OD) en los 40 días de medición de la campaña 3, con un promedio de $6.84 \left[\frac{mg}{l} \right]$ en todo el período y profundidad, valor aceptable para el desarrollo de vida de peces, los cuales requieren de una mayor concentración de este elemento para subsistir (Davis, 1975). Otro proceso destacable son los episodios de anoxia que se generan en el fondo, con escenarios críticos para la fauna béntica teniendo un promedio de oxígeno disuelto de $3.28 \left[\frac{mg}{l} \right]$ para el último estrato.

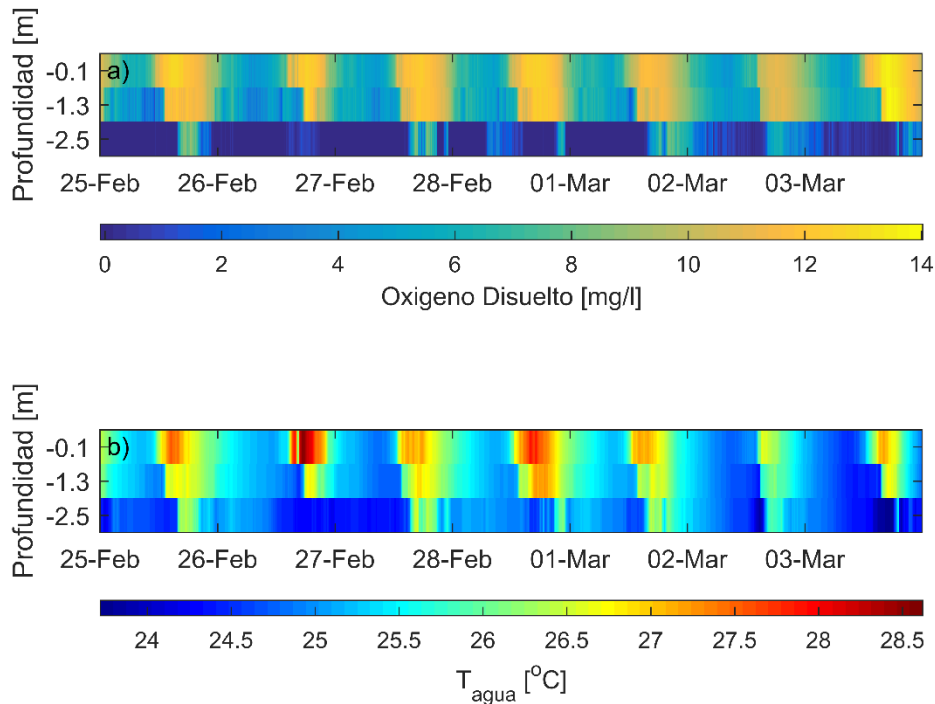


Figura 4.28. a) Concentración de oxígeno disuelto. b) Temperatura del agua en boya Norte. Semana 25 feb - 03 mar. Campaña 3.

Es posible asociar este detrimento en el OD al fuerte gradiente de temperatura, que perjudica la producción primaria fotosintética del fondo, ya que a menores temperaturas, menor es el metabolismo de la flora, lo que disminuye el intercambio de gases (Baladrón, 2011). Por lo que lapsos de bajo OD están asociados a temperaturas promedio menores del agua y para mayor OD mayor temperatura promedio del agua. En la Figura 4.28 se muestran los cambios del oxígeno disuelto durante la semana del 25 de febrero al 03 de marzo, con casos de anoxia en el fondo intensificados por gradientes de temperatura. El estrato inferior alcanza una concentración promedio de $1.4 \left[\frac{mg}{l} \right]$, el medio $7.65 \left[\frac{mg}{l} \right]$, y $8.65 \left[\frac{mg}{l} \right]$ para el superior.

Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran el comportamiento del OD junto a la diferencia de energía potencial ΔE comparada con la forzante del viento u_*^3 y el flujo boyante B respectivamente. En la Figura 4.29 es posible apreciar escenarios de bajos niveles de OD posteriores a estratificaciones de la laguna, contexto acompañado de vientos aproximadamente nulos. La Figura 4.30 reafirma el patrón de comportamiento mencionado en el inicio de la sección 4.2 y se observa que los casos de menor concentración de OD en el lecho se tienen cuando el flujo boyante B alcanza sus mínimos diarios.

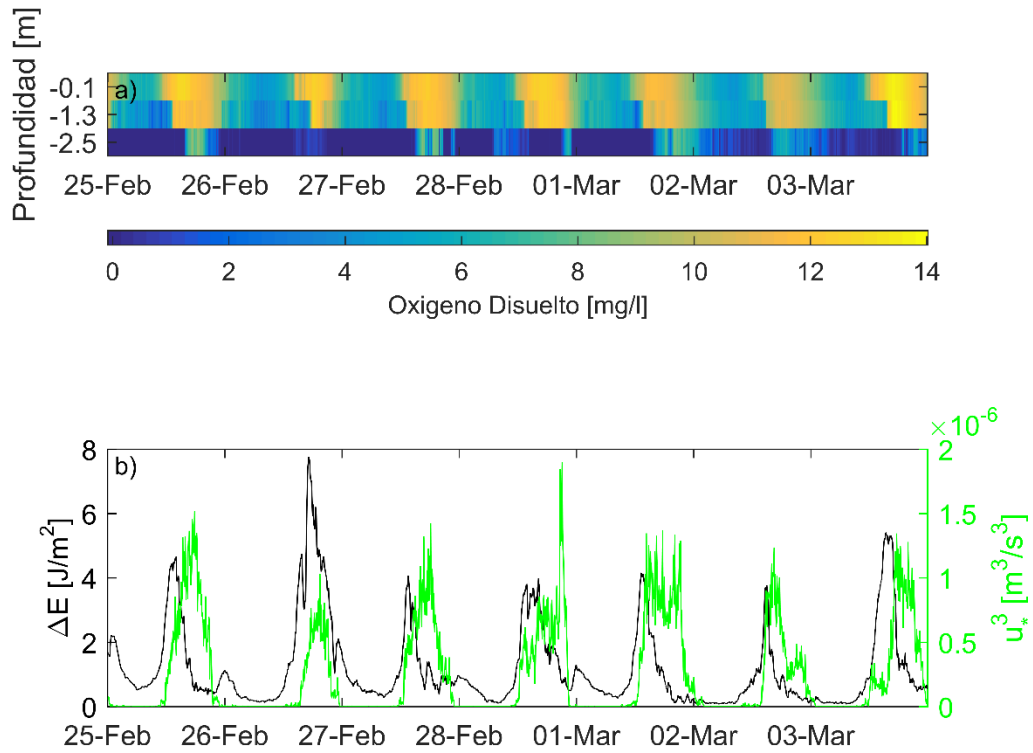


Figura 4.29. a) Concentración de oxígeno disuelto. b) Diferencia de energía potencial y forzante de viento en boya Norte. Semana 25 feb - 03 mar. Campaña 3.

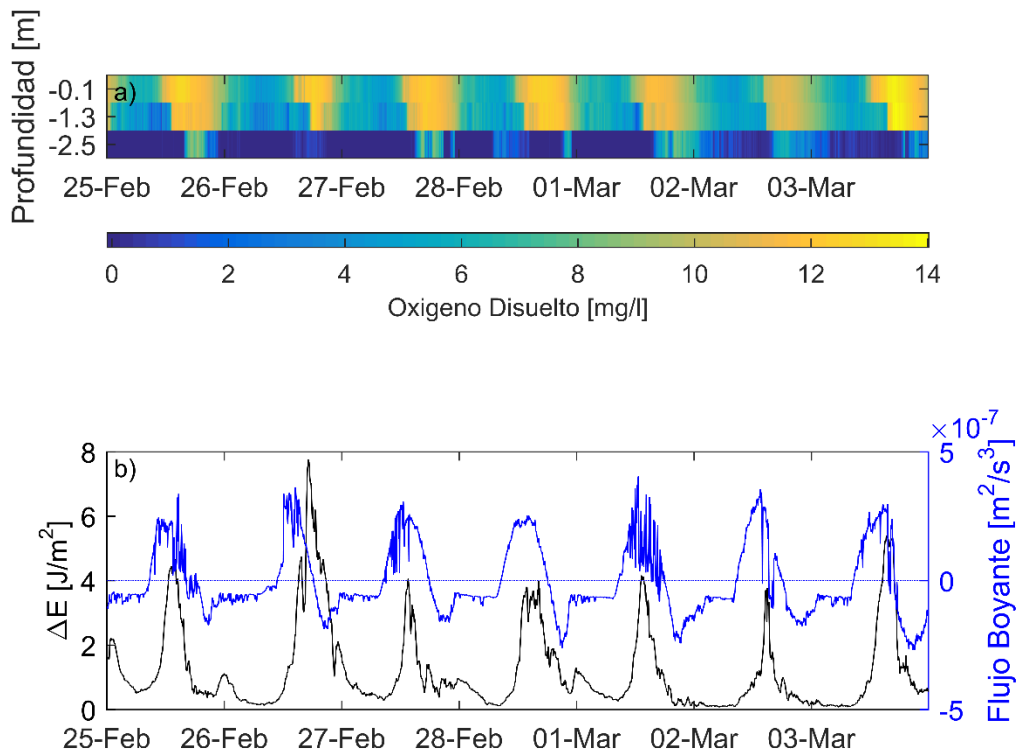


Figura 4.30. a) Concentración de oxígeno disuelto. b) Diferencia de energía potencial y flujo boyante en boya Norte. Semana 25 feb - 03 mar. Campaña 3.

A continuación, en la Tabla 4.2 se indican los valores promedio, máximo y mínimo de las variables meteorológicas registradas por la estación de monitoreo. La Tabla 4.3 muestra los flujos radiativos, el balance y la evaporación promediados por campaña.

Tabla 4.2. Valores meteorológicos característicos promediados por campaña.

		Campaña 1			Campaña 2			Campaña 3		
		\bar{X}	Máx	Mín	\bar{X}	Máx	Mín	\bar{X}	Máx	Mín
T aire	[°C]	17.73	32.42	7.15	19.05	30.92	7.95	20.91	33.53	6.29
P atm	[kPa]	96.00	96.60	95.40	96.16	96.7	95.5	95.91	96.50	95.40
HR	[%]	58.42	96.00	12.81	58.72	96.5	19.91	49.84	92.80	12.52
RSI	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	529.64	1385.00	0.00	462.62	1247.00	0.00	472.03	1297.00	0.00
Vel. viento	$\left[\frac{m}{s}\right]$	3.13	11.34	0.00	2.94	10.14	0.00	3.02	9.96	0.00

Tabla 4.3. Valores del balance radiativo promediados por campaña.

Variable	Unidad	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3
Flujos Turbulentos	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-128.54	-120.19	-131.77
Flujos Radiativos	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	176.74	152.18	155.93
Balance de Energía	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	48.19	31.99	24.16
Evaporación	$\left[\frac{mm}{día}\right]$	4.55	4.40	5.08

4.3. Perfiles con sonda CTD.

Se realizaron cuatro jornadas de mediciones los días 8 y 9 de febrero, 15 y 16 de marzo de 2017, entre las 8:00[h] y 9:00[h]. Por motivos de disponibilidad del bote facilitado por la Fundación Valle Lo Aguirre, no se efectuó un muestreo en la jornada de las tardes. En las Figuras 4.31 y 4.32 se muestra el perfil de subida y bajada para un punto el día 16 de marzo. En el anexo en CD se adjuntan los registros para el día 8 de febrero y 15 de marzo.

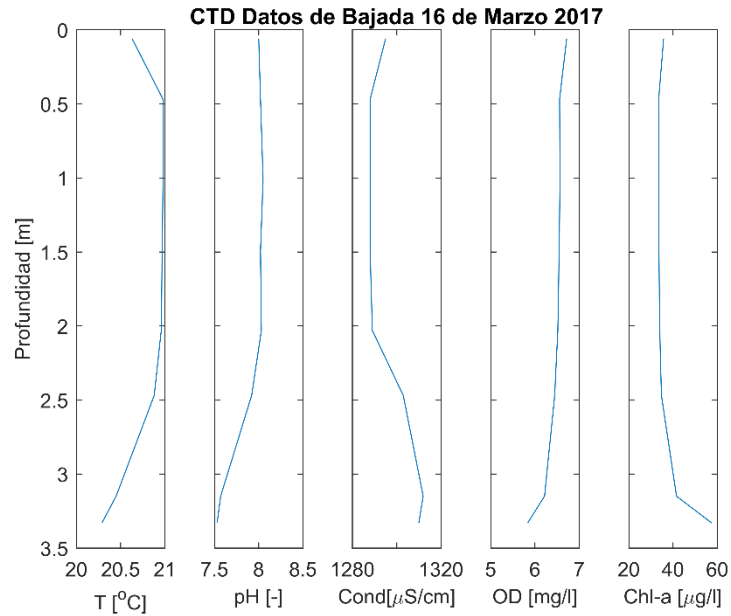


Figura 4.31. Perfil de bajada Punto 4, 16 de marzo de 2017.

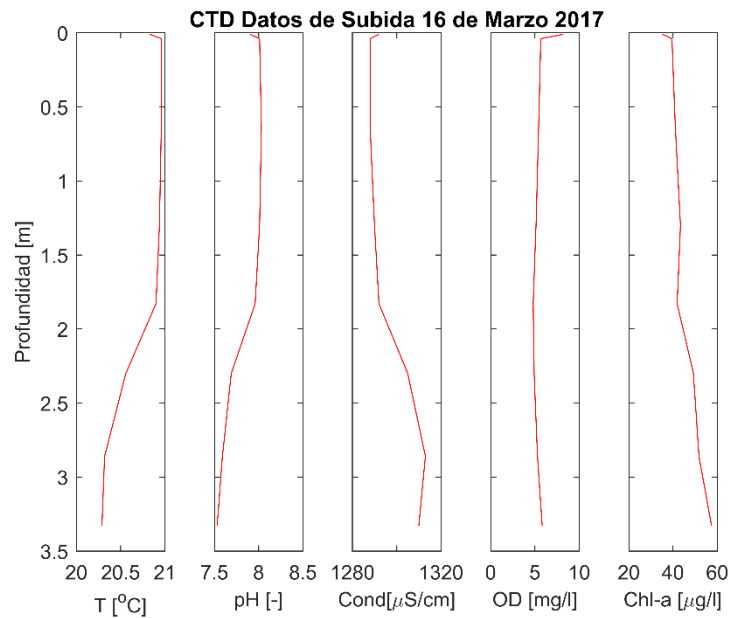


Figura 4.32. Perfil de subida Punto 4, 16 de marzo de 2017.

En los perfiles mostrados en la Figura 4.31 y Figura 4.32 se ve una reducción de la temperatura del agua, del oxígeno disuelto y del pH en profundidad, al contrario de la conductividad y la clorofila. El punto corresponde a uno cercano a la boya Norte. La Figura 4.33 muestra el instrumento CTD utilizado junto al capitán del bote en la Laguna Carén.



Figura 4.33. Sonda multiparámetro MS5 en área de estudio.

4.4. Análisis de calidad del agua.

Un objetivo de la memoria es caracterizar la laguna respecto a su estado trófico, para esto se tomaron y analizaron muestras de agua en los puntos mostrados en la Figura 4.34.



Figura 4.34. Puntos de muestreo calidad del agua.

Para la toma de muestra, se utiliza una botella de van Dorn o *water sampler*, que la obtiene a una profundidad determinada. Es importante transportar la muestra en un envase de polietileno y realizar el análisis preferentemente de inmediato, o sino dentro de las siguientes 48 horas. En anexos se adjunta una guía de procedimiento para la toma de muestras y el posterior análisis de los indicadores con los reactivos disponibles en el Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo.

Los parámetros a medir son: fósforo total, fósforo reactivo (como ortofosfato), nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitrato y pH. El muestreo consta de tres puntos que siguen la dirección del curso de agua: punto 1 en sector de confluencia de los afluentes principales que forman la laguna; punto 2 en el medio de la laguna junto a un brazo afluente proveniente del sector sur y, punto 3 ubicado en las compuertas de descarga al estero Lampa. Se tomó una muestra del estrato superior de la columna de agua y otra cercana al lecho, para observar posible dependencia con la profundidad. En la Tabla 4.4, se muestra el resultado de los análisis fisicoquímicos, para dos jornadas de medición una el 28 de marzo a las 14:00 [h] y la siguiente el 30 de marzo a las 09:00 [h].

Tabla 4.4. Resultados análisis fisicoquímico.

Punto	Campaña	Posición	$NH_3 - N$ [$\frac{mg}{l}$]	NO_3^- [$\frac{mg}{l}$]	N_{total} [$\frac{mg}{l}$]	PO_4^{-3} [$\frac{mg}{l}$]	P_{total} [$\frac{mg}{l}$]	pH [uni]
1	28-Mar	Lecho	0.2	0.671	LD	0.22	0.820	6.0
		Superficie	0.0	0.632	LD	0.33	0.347	6.5
	30-Mar	Lecho	0.7	0.414	LD	0.81	2.56	6.0
		Superficie	0.4	0.330	LD	0.5	0.392	6.0
2	28-Mar	Lecho	6.0	1.99	9.6	5.14	7.88	7.0
		Superficie	5.8	2.12	10.1	3.73	4.48	6.5
	30-Mar	Lecho	12.9	4.11	18.7	3.22	29.5	6.5
		Superficie	10.9	1.77	13.8	4.76	5.3	6.5
3	28-Mar	Lecho	0.1	0.049	LD	0.18	1.15	7.5
		Superficie	0.1	0.050	LD	0.17	0.789	7.5
	30-Mar	Lecho	0.8	LD	LD	0.28	0.675	7.0
		Superficie	0.7	LD	LD	0.30	0.737	7.0

Con:

Nitrógeno amoniacal: $NH_3 - N$

Nitrato: NO_3^-

Nitrógeno total: N_{total}

Fósforo reactivo como ortofosfato: PO_4^{-3}

Fósforo total: P_{total}

Los resultados muestran la capacidad de remoción de nutrientes de la laguna, principalmente de nitrato (97% de remoción para el 28 de marzo), característica intrínseca que cumplen los humedales.

Según el criterio de estado trófico de Smith de la Tabla 2.1 (Smith et al., 1999) y utilizando el punto y jornada más desfavorable para cada parámetro analizado, la Laguna Carén estaría en un estado hipereutrófico en nitrógeno total, fósforo total y clorofila-a, de acuerdo a las muestras estudiadas para los primeros dos indicadores y usando los valores de los perfiles medidos con la sonda multiparámetro para el último, a pesar de tener algunos valores fuera del rango de medición (LD).

Nivel de estado trófico que se puede intuir mediante una inspección visual en terreno. En la Figura 4.35 se muestra un afluente del sector medio de la laguna, sitio donde se alcanzaron los valores más altos para todos los parámetros estudiados.



Figura 4.35. Afluente al sector medio de la Laguna Carén

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.

El ciclo de los forzantes hidrodinámicos principales en la Laguna Carén definen el ritmo de la mezcla en la columna de agua. Variaciones en la velocidad del viento y en el flujo de energía sobre la superficie de agua determinan que se tenga una dinámica diaria.

El cuerpo de agua comienza el día mezclado hasta aproximadamente el mediodía, hora en que el flujo neto de energía H^* se torna positivo (Figura 4.17) para dar paso a la estratificación, la laguna se estratifica y permanece así hasta que o sopla el viento intensamente, o H^* se torna negativo, o los dos procesos en conjunto. Esto valida la hipótesis inicial respecto a un comportamiento hidrodinámico diario. Es importante destacar que el viento ocasiona una modificación en el nivel de estabilidad de la estratificación mientras que el flujo de energía es el que da inicio y término a este proceso.

Los sedimentos inducen cambios en la distribución espacio-temporal de la temperatura del agua (Figura 4.23). Se aprecian temperaturas menores en los sectores cercanos al fondo que aumentan el gradiente de densidad en la vertical, fenómeno asociado a un proceso de absorción de temperatura por parte del sedimento. Es por esto que el sedimento actúa como un reservorio energético que de acuerdo a los requerimientos que éste posea, puede liberar o absorber calor por difusión, modificando la hidrodinámica de la laguna.

Respecto de las mediciones de los sensores de conductividad, estos entregaron características de agua dulce y muestran un aumento en profundidad (Figura 4.26), que puede dar un indicio referente al tipo de sedimento y biota béntica. La distribución de oxígeno disuelto manifiesta una dinámica estrechamente relacionada con la de la temperatura (Figuras 4.27 y 4.28). Se aprecian escenarios de anoxia que validan la tesis propuesta por Baladrón (2011) para un humedal, con sedimentos y plancton de fondo los posibles responsables de este déficit de OD. A pesar de esto, se tiene un promedio de oxígeno aceptable para la biocenosis acuática.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos de calidad del agua reflejan una situación esperable. El nivel de nutrientes en la laguna es alto y la sitúa en un estado hipereutrófico (Smith et al., 1999). Existe un punto de muestreo que excede en todos los parámetros a los otros en la Laguna. Ubicado en el sector sur, en el afluente donde desaguan volúmenes de agua tratada por una planta de aguas servidas de sectores residenciales aledaños, por lo que es un punto estratégico de estudio para intentar cambiar la laguna a un estado trófico menor. Algunos factores que inciden en este resultado son la alta turbidez de la laguna, debida a la resuspensión de sedimentos que genera el viento y al material en suspensión que arrastran los flujos superficiales de la Región Metropolitana; el sobrepoblamiento de fitoplancton que aumentan la producción primaria; la falta de

plantas de fondo y ribereñas, y la descarga excesiva de nitrógeno, fósforo y materia orgánica por parte de los afluentes.

Los pasos a seguir, para alcanzar un conocimiento acabado de las interacciones en este ecosistema son:

- Dar continuidad al registro de datos, añadir nuevos sensores y/o instrumentos a la estación de monitoreo, por ejemplo, para medir flujo de calor en la interfaz aire-agua o agua-sedimento, concentración de CO₂, de clorofila-a, nivel de turbiedad, intensidad lumínica, etc. e implementar una tecnología de adquisición remota del registro.
- Desarrollar un modelo numérico hidrodinámico que describa los distintos procesos de transporte de energía, masa y momentum en el cuerpo de agua, de tal manera que sean complementados con los registros de la estación.
- Caracterizar el tipo de sedimento y sus requerimientos energéticos y de oxígeno disuelto para añadirlo cuantitativamente a los factores que alteran la hidrodinámica de la laguna.

Por último, es fundamental para definir alguna medida que mejore el estado trófico, describir la taxonomía del plancton en la laguna. Con esa información se puede hacer una fitoremediación, biomanipulación, etc., sin alterar la biota acuática y el comportamiento hidráulico de la laguna.

BIBLIOGRAFÍA

- Baladrón, M. F. (2011). Estudio de la hidro-termodinámica del ecosistema humedal Ciénagas del Name. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Brink, P., Russi, D., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., ... Davidson, N. (2013). La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales. Resumen ejecutivo. Convención sobre los Humedales de Importancia.
- Correll, D. L. (1998). Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review, *The Journal of Environmental Quality*, 27: 261-266.
- Davis, J. (1975). Minimal Dissolved Oxygen Requirements of Aquatic Life with Emphasis on Canadian Species : a Review. Department of Environment, Fisheries and Marine Service. Pacific Environment Institute.
- de la Fuente, A. (2014). Heat and dissolved oxygen exchanges between the sediment and water column in a shallow salty lagoon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 596–613. <https://doi.org/10.1002/2013JG002413>.
- de la Fuente, A., & Niño, Y. (2010). Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile. *Limnology and Oceanography*, 55(1), 279–288. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0279>.
- de Miguel, A. (2006). Desarrollo de un sistema de pago por servicios ambientales en la Laguna Carén. Trabajo de titulación para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Ambiente. Universidad de Santiago de Chile.
- Fipps, G. (2003). Standards and Salinity Management and Salinity Management Water Analysis : The Texas A&M University System.
- Garratt, J. R. (1994). The atmospheric boundary layer. *Cambridge Atmospheric and Space Science Series*, 37, 89–134.
- Gómez, M. (2005). Estudio sobre la eutroficación y medidas de conservación en la laguna chica de San Pedro de la Paz, Concepción. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Howell, J., & Buckius, R. (1987). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Ed. McGraw-Hill. New York.

- Idso, S., & Jackson, R. (1969). Thermal Radiation from the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 74(23).
- Imberger, J. (1985). The diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 30(4), 737–770. <https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.4.0737>.
- Jensen, H. S., & Andersen, F. O. (1992). Importance of temperature , nitrate , and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow , eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography*, 37(3), 577–589.
- Kadlec, R. and S. W. (2008). *Treatment Wetlands (2a Edición)*. CRC Press.
- López, A. E. (2001). Estudio de la hidrodinámica de la Laguna Carén y su influencia en el comportamiento de sus principales contaminantes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Meruane, C., & Niño, Y. (2005). Modelos numéricos y mediciones de campo: herramientas complementarias para el estudio de lagos: Caso Lago Villarrica. XII Congreso Chileno de Hidráulica. SOCHID.
- Morales, C. (2000). Diagnóstico de la calidad del agua de la Laguna Carén. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Rozas, C. (2013). Análisis modal para el estudio de resonancia de ondas internas excitadas por el viento en el Lago Villarrica. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Ruttner, F. (1963). *Fundamentals of Limnology*. University of Toronto Press.
- Scheffer, M. (2004). *Ecology of Shallow Lakes*. Springer-Science+Business Media.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication : impacts of excess nutrient inputs on freshwater , marine , and terrestrial ecosystems, *Environmental Pollution* 100 (1999) 179-196.
- Teeter, A. M., Johnson, B. H., Berger, C., Stelling, G., Scheffner, N. W., Garcia, M. H., & Parchure, T. M. (2001). Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water , vegetated areas (lakes , reservoirs , estuaries and lagoons), *Hydrobiologia* 444 (2001) 1–23.

UNESCO. (1980). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. UNESCO.

Vergara, J. (2017). Estudio de la variabilidad intradiaria de los flujos de calor, masa y momentum en la interfaz aire-agua de una laguna somera salina del altiplano chileno. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile.

Vidal-Abarca, R. (2005). La Limnología, una ciencia de síntesis: Conceptos y Breve historia de la Limnología. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Agrarias UAGRM.

Wetzel, R. (2001). Limnology. (A. Press, Ed.) (3er ed.).

Wetzel, R., & Likens, G. (2004). Limnological Analyses (3er ed.). Ed Springer.

ANEXOS

Anexo A. Guía de Análisis fisicoquímico de muestras de agua.

A.1. Instrumento de muestreo.

Para tomar las muestras de agua se cuenta con un *water sampler*, o botella de van Dorn, instrumento de fácil uso que permite obtener un volumen de agua a una determinada profundidad. Consiste en un recipiente cilíndrico dispuesto de manera horizontal, con tapas que se cierran súbitamente al dejar caer un peso que activa el mecanismo formado por elásticos y amarras metálicas.



Figura A.1. *water sampler* o botella de van Dorn.

Uso:

- 1) Mantener el instrumento en posición horizontal.
- 2) Abrir las tapas de los extremos y fijarlas con las amarras metálicas en los soportes superiores.
- 3) Cerrar el paso de la manguera ubicada en la parte superior del instrumento.
- 4) Sumergir el *water sampler* y una vez ubicado en la profundidad deseada, intentar agitar o mover horizontalmente el instrumento de tal manera de colmarse con agua del lugar.
- 5) Soltar el peso.
- 6) Levantar el recipiente cuidadosamente desde el agua.
- 7) Para obtener la muestra, suelte el seguro que contrae la manguera y vacíe la muestra al recipiente receptor.

C.2 Preparación del análisis.

A continuación, se delinear los pasos para analizar las muestras obtenidas, mediante el uso de equipos e instrumentos del laboratorio de Calidad del Agua Gabriela Castillo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y reactivos de medición marca Hach especificados para cada parámetro: Nitrato, Fósforo Total, Fosfato, Nitrógeno Total y Nitrógeno Amoniacal.

Una vez obtenida las muestras de agua en terreno se recomienda realizar el análisis correspondiente antes de 48 horas. Pasado este tiempo existen alteraciones en los resultados los que no serían representativos.

Los procedimientos de análisis de cada uno de los indicadores se encuentran en el manual digital del espectrofotómetro DR5000 que está disponible en el Laboratorio Calidad del Agua.

Los métodos dependen del rango de concentración, alto o bajo, en que se espera encontrar cada uno de los parámetros en el agua. Es importante tener una previa estimación del valor que se desea medir para así escoger el método conveniente de medición.

Se requiere de botellas de muestreo apropiadas para la mantención de las muestras. En algunos métodos es necesario titularlas o neutralizarlas (estos se detallan en el manual de procedimiento de los reactivos HACH), por lo que se recomienda contar con botellas de polietileno de alta densidad. Para la recepción directa desde el *WaterSampler*, es necesario embeber con agua de la muestra y enjuagar mínimo 3 veces el envase antes de que reciba el contenido final. Durante el trayecto desde el lugar de muestreo al laboratorio es requisito que sea en condiciones frías, por lo que puede utilizarse una nevera portátil con hielo o elementos refrigerantes.

C.3. Análisis de Nitrato: Método 10206, dimetilfenol.

Almacenar la muestra de terreno en botellas limpias a 4 °C o menos si la muestra se tiene que analizar en las 24 a 48 horas siguientes. Calentar a 20-23 °C previo a realizar el análisis.

Disponer del conjunto de reactivos de nitrato RB TNT 835, pipeteador para muestras de 0,2 ml y punta de pipeteador. Además, es imprescindible disponer de un portacubetas y papel higiénico o pañuelos desechables para limpiar la cubeta.

Uso del equipo:

- 1) Pipetear 1 ml de muestra en la cubeta de reactivo.
- 2) Pipetear 0,2 ml de solución A en la cubeta.
- 3) Tapar y agitar lentamente invirtiendo la cubeta de reacción 2-3 veces hasta que las rayas de solución no sean visibles.
- 4) Espere 15 minutos.
- 5) Una vez suene el temporizador del equipo, limpie cuidadosamente el exterior de la cubeta preparada en el soporte portacubetas. Cierre la tapa y el instrumento entregará el valor requerido.

C.4. Análisis de Fósforo Total: Método 10209, del ácido ascórbico.

Almacenar la muestra de agua en una botella de muestreo lavada previamente con una solución de ácido clorhídrico 1:1 y enjuagadas con agua desionizada. En caso de no ser posible realizar el análisis luego de haber tomado las muestras, conservar ajustando el pH a 2 o menos con ácido sulfúrico a 4 °C. Antes de realizar el análisis, calentar las muestras a 15-25 °C y neutralizar con hidróxido sódico 5 N.

Disponer de conjunto de reactivos TNT844 HR, reactor con perforaciones de 13 mm (o usar adaptadores), pipeteador para 100-1000 µl, puntas de pipeteador y estantes de cubetas de ensayo. Además, es imprescindible disponer de un portacubetas y trozos de papel para limpiar la cubeta.

Uso del equipo:

- 1) Encender el reactor y calentar a 100 °C.
- 2) Quitar cuidadosamente la tapa de lámina protectora del DosiCap Zip. Desenroscar el tapón de la cubeta.
- 3) Pipetear con precaución 0,5 ml de muestra en la cubeta.
- 4) Voltar el DosiCap Zip tal que el lado del reactivo apunte a la cubeta. Enroscar bien el tapón de la cubeta.
- 5) Agitar la cubeta hasta disolver el reactivo del tapón.
- 6) Colocar la cubeta en el reactor, cerrar la tapa y calentar una hora a 100°C.
- 7) Luego, sacar con extremo cuidado la cubeta del reactor y colocarla en un estante de cubetas de ensayo y dejar que se enfríen a temperatura ambiente.

- 8) Pipetear 0,2 ml del reactivo B en la cubeta enfriada. Cerrar inmediatamente el recipiente del reactivo B.
- 9) Enroscar un DosiCap C gris en la cubeta.
- 10) Invertir la cubeta 2-3 veces para disolver el reactivo.
- 11) Esperar 10 minutos.
- 12) Tras los 10 minutos volver a invertir la cubeta 2-3 veces.
- 13) Limpiar cuidadosamente el exterior de la cubeta y colocarla en el soporte portacubetas. Cerrar la tapa y el instrumento entregará el valor requerido.

c.5. Análisis del Fósforo Reactivo (Ortofosfato): Método 8048, del ácido ascórbico.

Almacenar las muestras en botellas de muestreo lavadas con ácido clorhídrico y aclarados con agua desionizada. Conservarlas a una temperatura menor o igual a 4°C. Calentar a temperatura ambiente antes de realizar el ensayo.

Uso del equipo:

- 1) Seleccionar el test en el equipo.
- 2) Insertar adaptador para cubeta cuadrada de cara al usuario.
- 3) Llenar una cubeta cuadrada de una pulgada hasta la marca de 10 [ml] con la muestra.
- 4) Añadir el contenido de un sobre de PhosVer 3 en polvo. Tapar la cubeta inmediatamente y agitar vigorosamente durante 30 segundos para mezclar.
- 5) Seleccionar en pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK.
- 6) Preparación del blanco: llenar otra cubeta cuadrada de una pulgada hasta la marca de 10 ml con muestra.
- 7) Una vez suene el temporizador, limpiar bien el exterior de la cubeta (el blanco) y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado de cara al usuario. Cerrar la tapa.
- 8) Limpiar bien el exterior de la cubeta (muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado de cara al usuario. Cerrar la tapa.
- 9) Mirar el resultado.

C.6. Análisis del Nitrógeno Total: Método 10071, digestión de persulfato.

Conservar la muestra en botellas de muestreo limpias y reduciendo el pH a 2 o inferior con ácido sulfúrico concentrado (al menos 2 ml/l). Almacenar a 4 °C o menos. Antes de

realizar el análisis, calentar las muestras a temperatura ambiente y neutralizar con hidróxido sódico 5 N.

Disponer de un conjunto de reactivos de nitrógeno total Test N Tube LR, reactor, micro embudo, pipeta 1-10 ml más puntas y estante de enfriamiento de tubos de ensayo. Además, es imprescindible disponer de un portacubetas y trozos de papel para limpiar la cubeta.

Uso del equipo:

- 1) Encender el reactor y calentar a 105 °C.
- 2) Mediante un embudo, añadir el contenido de un sobre de reactivo de persulfato de nitrógeno total en polvo a dos tubos de reactivo de digestión de hidróxido de nitrógeno total. Limpiar bien el reactivo que haya podido quedar en la tapa o en la tosca del tubo.
- 3) Muestra preparada: Añadir 2 ml de muestra a un tubo.
- 4) Preparación del blanco: Añadir 2 ml de agua desionizada a otro a tubo.
- 5) Tapar ambos tubos. Agitar vigorosamente durante al menos 30 segundos para mezclar. El reactivo de persulfato puede no disolverse completamente al agitar. Esto no afectará la precisión.
- 6) Colocar los tubos en el reactor. Calentar durante exactamente 30 minutos.
- 7) Sacar los tubos del reactor (usando dediles) y enfriarlos a temperatura ambiente.
- 8) Seleccionar el test.
- 9) Destapar los tubos digeridos y añadir el contenido de un sobre A de reactivo de nitrógeno total en polvo a cada tubo.
- 10) Tapar los tubos y agitar durante 15 segundos.
- 11) Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK.
- 12) Después de 3 minutos suena el temporizador. Destapar los tubos y añadir un sobre B de reactivo en polvo a cada tubo.
- 13) Tapar los tubos y agitar durante 15 segundos. El reactivo no se disolverá completamente, lo cual no afectará la precisión. La solución adoptará un color amarillo.
- 14) Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK.
- 15) Después de 2 minutos sonará el temporizador. Destapar dos tubos C de reactivo TN y añadir 2 ml de muestra digerida y tratada a un tubo. Añadir 2 ml de blanco de reactivo y tratado al otro tubo C de reactivo TN.
- 16) Tapar los tubos e invertirlos diez veces para mezclar. Aplicar inversiones lentas y cuidadosas para conseguir una completa recuperación.
- 17) Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK. Comienza un período de 5 minutos y el color amarillo se intensificará.
- 18) Limpiar bien el exterior del blanco de reactivo y colocarlo en el soporte portacubetas circular de 16 mm.

19) Seleccionar en la pantalla: Cero.

20) Limpiar bien el exterior del tubo de reactivo y colocarlo en el soporte portacubetas de 16 mm. Mirar resultado.

C.7. Análisis del Nitrógeno Amoniacal: Método 10031, salicilato.

Conservar las muestras en botellas de muestreo limpias y reducir el pH a 2 o inferior, con al menos 2 ml de ácido clorhídrico. Almacenar a 4°C o menos. Antes del análisis calentar a temperatura ambiente y neutralizar el pH de 7 con hidróxido sódico 5 N.

Disponer de reactivo de nitrógeno amoniacal Test N Tube AmVer de rango alto, micro embudo, pipeta y puntas de pipeta. Además, es imprescindible disponer de un portacubetas y trozos de papel para limpiar la cubeta.

Uso del equipo:

- 1) Seleccionar el test.
- 2) La muestra preparada: añadir 0,1 ml de muestra a un test N Tube de reactivo diluyente AmVer para nitrógeno amoniacal de rango alto.
- 3) Preparación del blanco: añadir 0,1 ml de agua sin amoniaco a un Test N Tube de reactivo diluyente de AmVer para nitrógeno amoniacal de rango alto.
- 4) Añadir el contenido de un sobre de reactivo salicilato de amoniaco en polvo para 5 ml de muestra a cada tubo.
- 5) Añadir el contenido de un sobre de reactivo cianurato de amoniaco en polvo a cada tubo.
- 6) Tapar bien los tubos y agitar concienzudamente para disolver el polvo.
- 7) Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK.
- 8) Después del período de 20 minutos, limpiar bien el exterior del blanco y colocarlo en el soporte portacubetas circular de 16 mm.
- 9) Seleccionar en la pantalla: cero.
- 10) Limpiar bien el exterior del tubo de la muestra y colocarlo en el soporte portacubetas circular de 16 mm.
- 11) Leer el resultado.