

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN TRÓFICA DEL LAGO VILLARRICA  
UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES**

**JAVIERA BRAVO H.<sup>1</sup>**  
**TORADJI URAOKA O.<sup>2</sup>**  
**HUGO N. ULLOA.<sup>3</sup>**  
**YARKO NIÑO C.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

El estudio de la clorofila “a”, índice de biomasa planctónica, permite conocer el estado trófico en un lago. Dado que los métodos de medición tradicionales presentan limitantes al momento de ofrecer un monitoreo de alta cobertura espaciotemporal, incursionar en la utilización de imágenes satelitales para tener un mayor control sobre la ecología de los lagos puede resultar altamente beneficioso. En el diagnóstico de la condición trófica del lago Villarrica se evalúa la aplicabilidad de los satélites Sentinel 2 y 3, y de diversos algoritmos empíricos de estimación de clorofila “a”, calibrados y/o validados a partir de datos in situ. Para Sentinel 2 se estudian algoritmos de 2 bandas de tipo: azul-verde, verde-rojo, rojo-infrarrojo cercano, y los algoritmos oceanográficos OC2v4 y OC4v4. Para Sentinel 3 se evalúan los algoritmos OC5 y C2RCC. Los resultados muestran que los algoritmos de mayor desempeño son el OC2v4 y OC4v4 de Sentinel 2. Durante los años 2018, 2019 y 2020 el lago Villarrica se mantuvo en condición oligotrófica, distinguiéndose las zonas litorales Villarrica, La Poza y Pucón por presentar un mayor nivel de trofía. La temporada de verano y principios de otoño de 2020 indicó una alta variabilidad en el estado trófico del lago reportándose dos floraciones algales. La génesis de las microalgas coincidió con el área litoral Pucón, el cual recibe la carga de nutrientes proveniente del río Trancura, sin embargo, la circulación general indujo su desplazamiento, afectando otras zonas de este ecosistema acuático.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: javiera.bravo.1@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Izumi Consultores SpA - email: toradji@izumi.cl

<sup>3</sup> Profesor Asistente, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Pennsylvania, USA - email: ulloa@sas.upenn.edu

<sup>4</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - email: ynino@ing.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El lago Villarrica ha experimentado en los últimos años un deterioro en la calidad de sus aguas, reportándose numerosos eventos de proliferación de algas que no siempre coinciden con las fechas en que se realizan campañas de monitoreo por parte de la Dirección General de Aguas (DGA) (Vigilantes del Lago, 2020a). Hasta 2017 el lago se mantuvo en condición meso-oligotrófica (DGA 2014; DGA, 2018), sin embargo, en 2018 fue declarado zona saturada por clorofila “a” (Chl-a), transparencia y fósforo disuelto, por lo que comenzó la elaboración del Plan de Descontaminación que tiene por objetivo recuperar los niveles señalados en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) del lago Villarrica (MMA, 2020).

Gracias a la teledetección de océanos y lagos, se puede obtener información cuantitativa de los tipos de sustancias presentes en el agua y sus concentraciones, debido a las variaciones espectrales en la forma y magnitud de la señal captada por los satélites (IOCCG, 2000). En particular, el estudio de la Chl-a, pigmento que se utiliza como índice de biomasa algal, permite determinar la condición trófica de un ecosistema acuático. En el último tiempo, la aparición de nuevos satélites como los Sentinel 2 (S2) y Sentinel 3 (S3) sugiere evaluar su aplicabilidad en el control y estudio de lagos, ya que se posicionan como instrumentos potencialmente adecuados para la estimación de Chl-a (IOCCG, 2018).

Los componentes ópticamente activos, es decir, aquellos que interactúan con la luz mediante procesos de absorción y dispersión, influyen en las propiedades ópticas del agua, y se pueden englobar fundamentalmente en tres: fitoplancton, material suspendido y materia orgánica disuelta coloreada (CDOM). Según la contribución de cada uno de estos, las aguas se clasifican en Caso 1 o Caso 2, donde las primeras están dominadas principalmente por fitoplancton y las segundas son aguas más complejas influenciadas por los tres componentes (IOCCG, 2000). Según el tipo óptico de agua se determina el algoritmo más adecuado para estimar Chl-a. Ha et al. (2017) evaluaron 3 grupos de algoritmos de 2 bandas de tipo: azul-verde, verde-rojo y rojo-infrarrojo cercano; el primero se ocupa en aguas caracterizadas por fitoplancton y los demás en aguas con un mayor grado de turbidez y CDOM, así como también en aquellas que presenten un nivel de trofia superior (Sòria-Perpinyà et al., 2021; CEA, 2014). Otros algoritmos, aplicables en aguas Caso 1, son los algoritmos oceanográficos: destacan entre ellos la cuarta versión del OC2 y OC4 desarrollados originalmente para el satélite SEAWIFS (O’Reilly et al., 2000) y el OC5 calibrado para S3 (O’Reilly & Werdell, 2019). Por último, un algoritmo aplicable en aguas Caso 2 corresponde al Case 2 Regional CoastColour (C2RCC) de Doerffer & Schiller (2007).

El objetivo de este trabajo es realizar un diagnóstico de la condición trófica del lago Villarrica. Para esto, se evaluará la aplicabilidad de distintos algoritmos de detección de Chl-a utilizando los satélites S2 y S3, estudiando concordancia entre la distribución espaciotemporal de las microalgas y patrones hidrodinámicos descritos en el lago.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al lago Villarrica, ubicado en la región de la Araucanía, Chile. (Figura 1). Al este colinda con la ciudad de Pucón y al oeste con la ciudad de Villarrica. Su principal afluente es el río Trancura y su principal efluente el río Toltén. Tiene una superficie de 176 km<sup>2</sup>,

una profundidad máxima de 165 m y está a una altitud de 230 m.s.n.m. Es un lago de tipo monomítico temperado, caracterizado por la ocurrencia de eventos de viento fuerte que son una condición forzante sobre su estructura térmica vertical (Meruane, 2005).

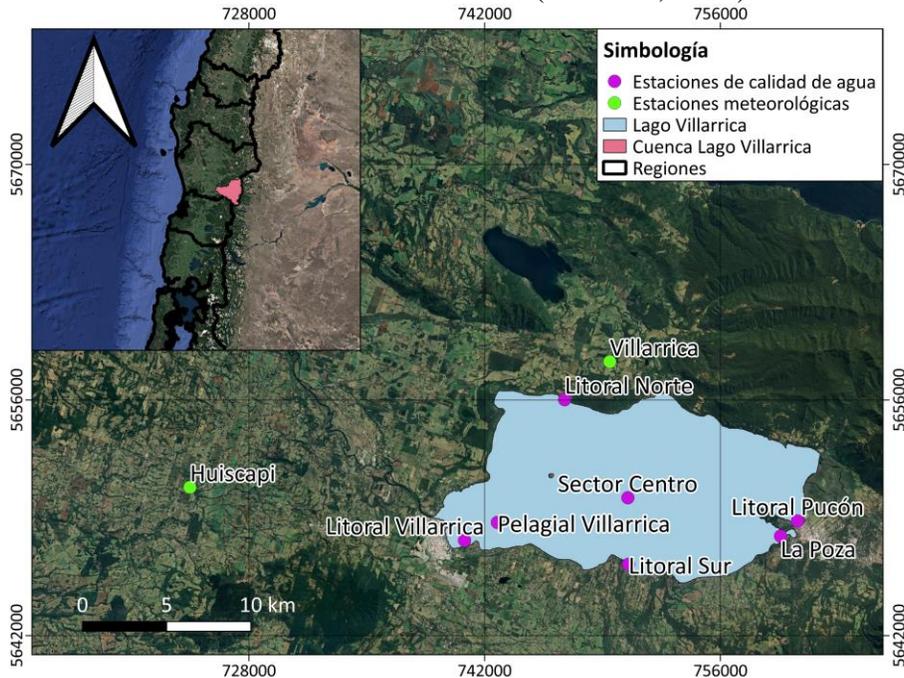


Figura 1: Zona de estudio junto con estaciones de calidad de agua y estaciones meteorológicas.

En este trabajo, se seleccionan dos casos de estudio: i) Caso 1: período 2018-2019 y ii) Caso 2: período enero-abril 2020. El primero es una etapa exploratoria para evaluar algoritmos de detección de Chl-a, mientras que el segundo se analiza con la intención de utilizar los algoritmos de mejor desempeño y describir de manera completa dos eventos de proliferación de algas, estudiando patrones de distribución de las microalgas en el lago.

## 2.2 DATOS DE CAMPO

### Datos de Chl-a

Los datos de Chl-a in situ fueron facilitados por el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la DGA. En el caso del período 2018-2019, las muestras puntuales analizadas en laboratorio se obtuvieron desde las 7 estaciones de monitoreo que se observan en la Figura 1. Entre enero y abril de 2020 se utilizó una sonda de monitoreo continuo ubicada en el sector La Poza, la cual entrega datos de fluorescencia de Chl-a cada media hora.

### Datos meteorológicos

Se descargaron datos en línea desde las estaciones Huiscapí para el período 2018-2019 y Villarrica para el período enero-abril 2020 (Figura 1), pertenecientes al INIA (<https://agrometeorologia.cl/>) y a la DMC (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/>), respectivamente. Esta información permite corregir las imágenes S3 y caracterizar las condiciones meteorológicas entre enero y abril de 2020.

## 2.3 IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes satelitales pertenecen a las series S2 y S3 del programa Copernicus sobre observación y vigilancia de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA). Se descargaron desde el sitio web Earth Explorer de la USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y del Copernicus Open Access Hub

de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>), de manera libre y gratuita. La misión S2, en órbita desde 2015, se basa en las operaciones simultáneas de dos satélites idénticos, S2A y S2B. Cada uno posee un instrumento multiespectral (MSI) que cubre 13 bandas desde el rango espectral visible hasta el infrarrojo de onda corta, con una resolución espacial de 10, 20 y 60 m, y una resolución temporal de 5 días. En este trabajo se utilizaron productos de nivel 1C para el período 2018-2019 y de nivel 2A para el período enero-abril 2020. El primero entrega reflectancias al tope de la atmósfera y el segundo a nivel de superficie. Por su parte, la misión S3 consta de dos satélites, 3A y 3B, cuyo lanzamiento ocurrió en 2016 y 2017, respectivamente. Ambos transportan el Ocean and Land Color Instrument (OLCI) que cubre 21 bandas espectrales con una resolución temporal de 2 días. Se utilizó el producto “OL\_1\_EFR\_” a una resolución espacial de 300 m, que entrega radiancias al tope de la atmósfera.

## 2.4 ALGORITMOS DE CHL-A

En la Tabla 1 se resumen los algoritmos empleados. La notación en el nombre de los algoritmos de 2 bandas indica qué bandas de S2 ocupan. Por ejemplo, el algoritmo b3b2 utiliza las bandas B3 y B2. Es importante señalar que S2 no tiene una banda centrada en los 510 nm, por lo que el algoritmo OC4v4 es modificado seleccionándose solo el máximo entre los 443 y 490 nm. Los algoritmos de 2 bandas deben ser calibrados y validados, mientras que los demás son algoritmos que solo son validados con los datos de Chl-a in situ.

Tabla 1: Algoritmos para detección de Chl-a.  $Rrs_{\lambda}$ : Reflectancia del sensor centrada a una longitud de onda  $\lambda$ .  $a_{pig}$ : Coeficiente de absorción del pigmento del fitoplancton.

Satélite	Nombre	Expresión	Referencia
S2	OC2v4	$Chl-a = 10^{(0,139-2,336R+0,879R^2-0,135R^3)} - 0,07$ $R = \log_{10}(Rrs_{490}/Rrs_{555})$	O'Reilly et al. (2000)
	OC4v4	$Chl-a = 10^{(0,366-3,067R+1,930R^2+0,649R^3-1,532R^4)}$ $R = \log_{10}(\max(Rrs_{443}, Rrs_{490}, Rrs_{510})/Rrs_{555})$	O'Reilly et al. (2000)
	b3b1	$Rrs_{560}/Rrs_{443}$	Ha et al. (2017)
	b3b2	$Rrs_{560}/Rrs_{490}$	Ha et al. (2017)
	b3b4	$Rrs_{560}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)
	b5b4	$Rrs_{705}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)
	b6b4	$Rrs_{740}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)
	b7b4	$Rrs_{783}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)
	b8ab4	$Rrs_{865}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)
b8b4	$Rrs_{842}/Rrs_{665}$	Ha et al. (2017)	
S3	OC5	$Chl-a = 10^{0,432-3,130R+3,054R^2-1,451R^3-0,249R^4}$ $R = \log_{10} \frac{\max(Rrs_{413}, Rrs_{443}, Rrs_{490}, Rrs_{510})}{Rrs_{560}}$	O'Reilly & Werdell (2019)
	C2RCC	$Chl-a = 21 a_{pig}^{1,04}$	Doerffer & Schiller (2007)

## 2.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Se seleccionaron imágenes sin nubosidad y con la menor ventana temporal entre fecha de detección de la imagen y monitoreo in situ. Su procesamiento se realizó en el software SNAP 7.0 de la ESA. Las imágenes S2 nivel 1C fueron corregidas atmosféricamente con el complemento Sen2Cor y re-

muestreadas a resolución espacial de 10 m con el método del vecino más cercano. Las imágenes S3 se corrigieron con el C2RCC, aplicable en aguas costeras y continentales Caso 2. El C2RCC, además de entregar la reflectancia a nivel del agua, deriva sus propiedades ópticas inherentes, tales como el coeficiente de absorción del pigmento del fitoplancton y el coeficiente de dispersión de materia total suspendida (MTS), que luego son convertidos en concentraciones de Chl-a y MTS, respectivamente (Doerffer & Schiller, 2007). Posteriormente, se aplicaron los algoritmos y se extrajo la información resultante desde el píxel en el cual está contenida la estación en el caso de las imágenes S3, y desde polígonos de 30x30 m en torno a la estación central en el caso de las S2. Finalmente, se construyeron los mapas de distribución espacial de Chl-a en QGIS 3.10.

## 2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La calibración y validación de los algoritmos se realizó mediante un análisis estadístico en R. Los parámetros estadísticos utilizados son el coeficiente de determinación  $R^2$  (Ecuación 1), el p-valor y la raíz del error cuadrático medio  $RMSE$  (Ecuación 2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2)$$

donde  $x_i$  y  $\hat{x}_i$  son el valor observado y simulado, respectivamente,  $\bar{x}$  es el promedio de los valores observados y  $n$  es el número de datos. En el período 2018-2019 los valores observados de Chl-a son las muestras puntuales superficiales analizadas en laboratorio por la DGA, mientras que en enero-abril 2020 son el promedio diario de los datos nocturnos de fluorescencia de Chl-a entre las 21:00 y 6:00 hrs., ya que se registran valores menores en el día por la fotoinhibición (DGA, 2020).

Para comparar el desempeño de los algoritmos evaluados en este trabajo con la literatura actual, se ocupan como referencia los resultados de  $R^2$  y  $RMSE$  obtenidos por Sòria-Perpinyà et al. (2021) en la validación de algoritmos para la estimación de Chl-a mediante satélites S2 y S3.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 DATOS MEDIDOS EN TERRENO

Entre 2018 y 2019 las concentraciones de Chl-a en superficie sitúan al lago Villarrica en un estado oligotrófico según Smith et al. (1999), como se detalla en la Tabla 2. Por otra parte, entre enero y abril de 2020 se aprecia una tendencia creciente en la fluorescencia de Chl-a en sector La Poza, alcanzando un máximo al 23 de marzo de 2020, el que luego desciende bajo los 4  $\mu\text{g/l}$  (Figura 2).

Entre enero y abril de 2020 ocurrieron tres eventos de viento Puelche, los que se caracterizan por un flujo de dirección este de naturaleza cálida y seca (Meruane, 2005). El primero ocurrió entre los días 20 y 22 de febrero (velocidad máxima de 9,8 m/s), el segundo el día 25 de marzo (velocidad máxima de 7,2 m/s), y el tercero del 7 al 8 de abril (velocidad máxima de 8,7 m/s). El evento del 25 de marzo es el de menor duración e intensidad en cuanto a las condiciones meteorológicas. Además, es importante destacar que es altamente probable que exista una subestimación en la velocidad del viento registrada en la estación Villarrica, debido a su ubicación geográfica, por lo que es de esperar que se desarrollen velocidades más extremas en el lago.

Tabla 2: Concentración mínima, máxima y promedio de Chl-a superficial. N: número de mediciones.

Año	N	Fecha	Época	Promedio [µg/l]	Máx. [µg/l]	Mín. [µg/l]	Promedio Anual [µg/l]	Límite oligotrófico Smith et al. (1999)
2018	14	27, 28 feb.	Verano	0,8	1,2	0,3	2,5	3,5 µg/l
		23, 24 oct.	Primavera	4,2	5,3	1,7		
2019	28	28, 29 ene.	Verano	2,4	3,7	0,8	1,8	
		26, 27 feb.						
		19, 20 nov.	Primavera	1,2	2,2	0,4		
		3, 4 dic.						

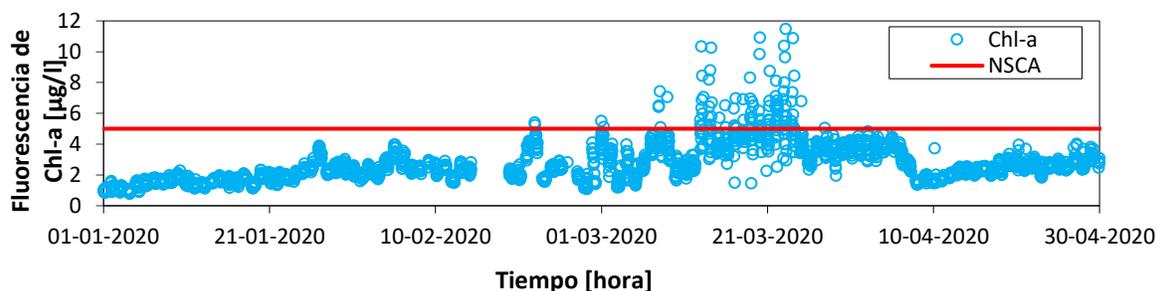


Figura 2: Datos nocturnos (21 a 6 hrs.) de fluorescencia de Chl-a en estación La Poza.

En la Figura 3a y la Figura 3b, las series diarias de humedad relativa promedio y temperatura máxima, respectivamente, señalan un descenso abrupto en la humedad relativa promedio del aire a valores bajo un 30% durante los días 21 de febrero y 8 de abril, alcanzándose temperaturas máximas en torno a los 29°C y 28°C. Estos acontecimientos coinciden con tendencias crecientes en la fluorescencia de Chl-a como se observa en la Figura 3c, la cual alcanza su máximo en el mes de marzo en el sector La Poza. Para el día 25 de marzo los valores de temperatura máxima y humedad relativa son menos extremos y no indican un aumento notorio en la Chl-a.

### 3.2 ALGORITMOS DE CHL-A

#### Calibración

El algoritmo b3b2 con un ajuste lineal es el que mejor se correlaciona con los datos de campo, con un  $R^2$  de 0,46 y un p-valor de 0,001. Los demás algoritmos no tienen correlación. Lo resultados se presentan en detalle en Bravo (2021).

#### Validación

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la validación de los algoritmos contrastados con Sòria-Perpinyà et al. (2021).

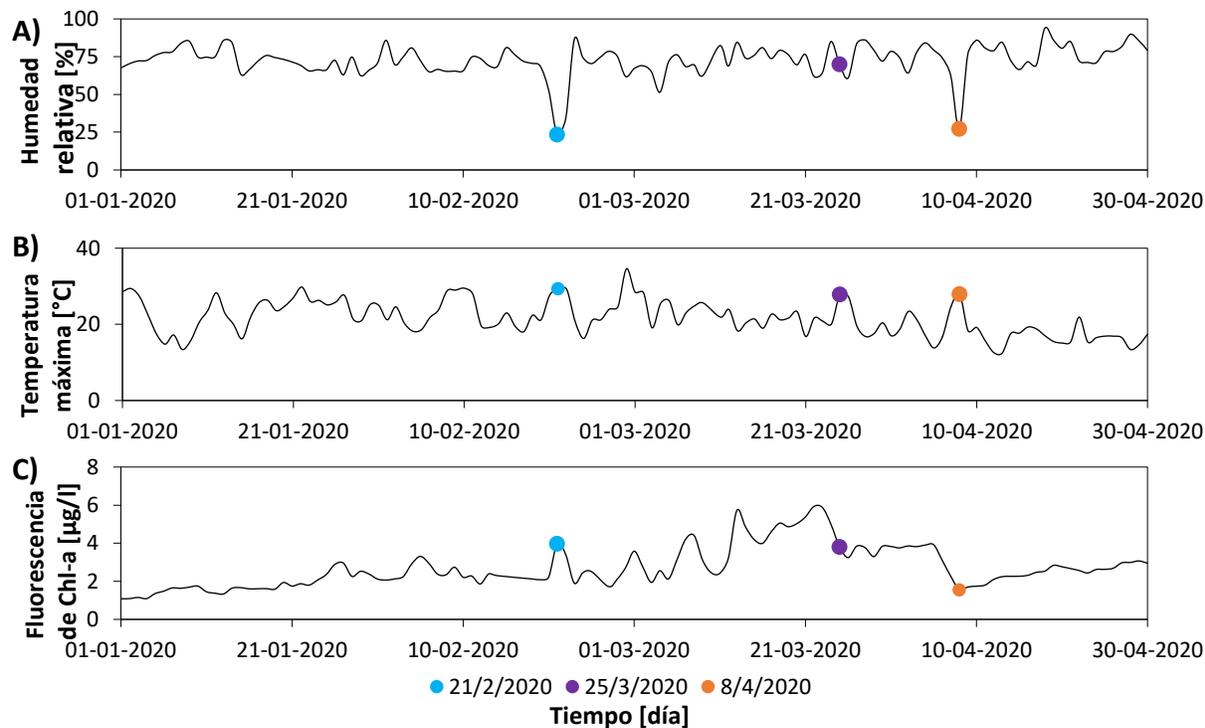


Figura 3: Serie diaria de A) humedad relativa promedio, B) temperatura máxima y C) fluorescencia de Chl-a promedio, entre enero y abril de 2020.

Tabla 3: Validación de algoritmos para los satélites S2 y S3 en ambos casos de estudio.

<b>CASO 1: PERÍODO 2018-2019</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>RMSE [µg/l]</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Sòria-Perpinyà et al., 2021</b>	
				<b>RMSE [µg/l]</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
S2	b3b2	2,24	0,33	0,94	0,55
	OC2v4	0,94	0,34		
	OC4v4	1,01	0,25		
S3	C2RCC	2,08	0,04	0,92	0,57
	OC5	1,97	0,01		
<b>CASO 2: ENERO-ABRIL 2020</b>					
S2	OC2v4	1,23	0,17	0,94	0,55
	OC4v4	0,91	0,41		
S3	OC5	2,27	0,78	0,92	0,57

Para el Caso 1, el algoritmo de mejor desempeño es el OC2v4 de S2, con un RMSE de 0,94 y un  $R^2$  de 0,34. Los algoritmos de S3 muestran correlaciones deficientes, con valores de RMSE que duplican los de S2. La Figura 4a y la Figura 4b contrasta los datos de Chl-a in situ y simulada para ambos satélites, mostrando una subestimación en la Chl-a estimada. Respecto al algoritmo b3b2, los datos del 3 de octubre de 2018 se alejan bastante de la recta 1 a 1 (Figura 4c), posiblemente por la amplia ventana temporal (18-19 días) entre imagen detectada y datos medidos en terreno. Por esto mismo, la validación de todos los otros algoritmos se realiza solo con imágenes que tienen una

ventana temporal de 3 o menos días. En el Caso 2 se evalúan solo algoritmos oceanográficos, donde la Chl-a modelada es nuevamente subestimada por los 3 algoritmos (Figura 4d y Figura 4e). El algoritmo más exacto corresponde al OC4v4 de S2 con un RMSE de 0,91  $\mu\text{g/l}$ , y el más preciso es el OC5 de S3, pues es el que presenta la mayor correlación entre datos medidos y simulados. En base a estos resultados, los algoritmos seleccionados para la construcción de mapas de distribución espaciotemporal de Chl-a son el OC2v4 en el período 2018-2019 y el OC4v4 entre enero y abril de 2020, complementándolo con el OC5 de S3 para aumentar la temporalidad de las escenas.

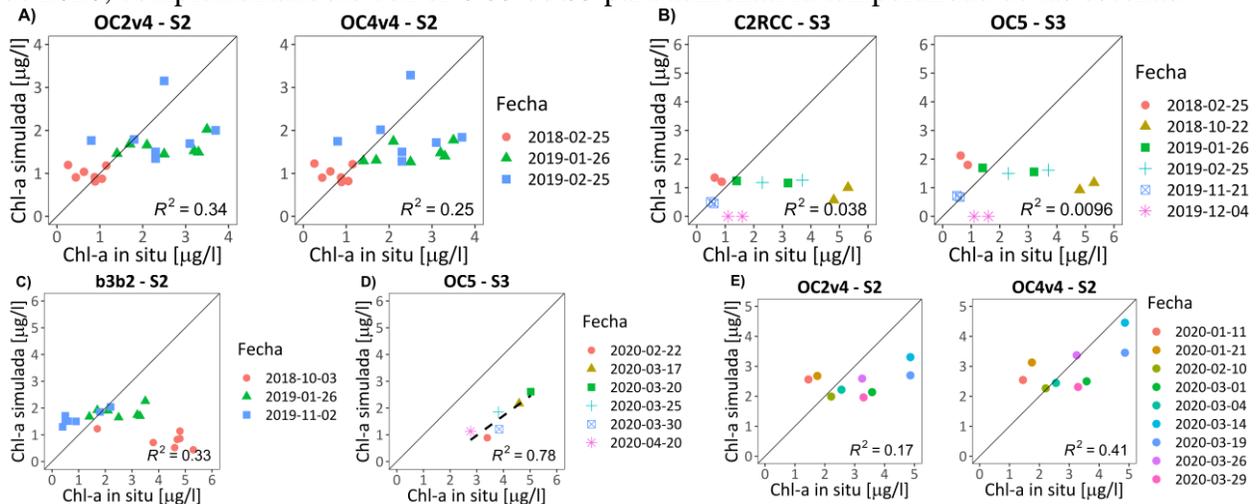


Figura 4: Validación de algoritmos de S2 y S3 para el Caso 1 (A, B, C) y Caso 2 (D, E) de estudio, junto con las fechas (yyyy-mm-dd) de las imágenes satelitales.

En términos de RMSE, el OC2v4 y OC4v4 de S2 presentan valores del orden de lo reportado por Sòria-Perpinyà et al. (2021), pero con  $R^2$  inferiores. Los demás algoritmos tienen un desempeño inferior en cuanto a  $R^2$  y RMSE, excepto el OC5 de S3 que presenta un  $R^2$  de 0,78. El desempeño superior en los algoritmos evaluados por estos autores en contraste con los del presente trabajo, se puede atribuir a un set de datos más extenso que permitió calibrar y validar un modelo ( $N=106$ ), así como a la utilización de convolución sobre firmas espectrales para su calibración, es decir, no se ocuparon los métodos de corrección atmosférica de este estudio.

#### 4. DISCUSIÓN

Los algoritmos que hacen uso de las bandas azul y verde son los más apropiados para describir comportamiento de Chl-a, en particular los oceanográficos, debido a un tipo óptico de agua de magnitud espectral baja y un máximo en la región azul del espectro electromagnético según se detalla en Bravo (2021), a causa de aguas en condición oligotrófica, alta transparencia y baja presencia de biomasa fitoplanctónica. Diversos factores pueden influir en la correlación entre Chl-a medida y simulada. Tales son: la resolución espectral y radiométrica del sensor, el efecto de adyacencia en los puntos de observación litorales, presencia de brillo solar, la ventana temporal y el método de corrección atmosférica empleado. Respecto a esto último, el bajo rendimiento del C2RCC ha sido reportado por otros autores y se puede atribuir a rangos de entrenamiento limitados de las propiedades ópticas del agua y atmosféricas (Alcântara et al., 2018; Kravitz et al., 2020).

En el segundo caso de estudio, la alta correlación entre Chl-a medida y simulada por S3, resultado que difiere de lo observado durante el primer caso de estudio, parece indicar que al disminuir la

brecha temporal entre datos in situ y fecha de detección de la imagen, los resultados simulados por S3 son más precisos. Es recomendable continuar explorando la aplicabilidad de S3, pues sus resultados no son concluyentes. A raíz de la gran repercusión que puede tener el método de corrección atmosférica en la precisión de la estimación de Chl-a, en futuras investigaciones se podrían considerar otros métodos disponibles para OLCI, como son 6SV1, iCOR y Polymer, los que según Kravitz et al. (2020) preservarían de mejor manera las mediciones radiométricas in situ.

En la Figura 5 los mapas de Chl-a demuestran una alta variabilidad en la condición trófica del lago en un período de cuatro meses. Del 11 al 21 de enero existe un aumento en la trofia del lago, especialmente en el sector de Pucón. Este incremento, aunque no fue evidenciado por la sonda instalada en sector La Poza, es consistente con lo que se reportó durante el verano de 2020, ya que el 19 de enero se registró una concentración de Chl-a de 4,3  $\mu\text{g/l}$  frente a la playa grande de Pucón (Vigilantes del Lago, 2020b). Una semana después del primer Puelche (20-22 de febrero) comienza nuevamente un proceso de eutrofización que experimenta su estado más crítico entre el 4 y 14 de marzo, con concentraciones de Chl-a entre los 4 y 8  $\mu\text{g/l}$ , observándose un desplazamiento de las microalgas desde litoral Pucón a La Poza. Este evento de florecimiento de algas podría explicarse, entre otros factores ambientales propicios para el crecimiento de algas, por el transporte vertical de nutrientes acumulados en la termoclina hacia la capa superficial del lago, producto de la mezcla vertical inducida por el viento (Meruane, 2005). Así también, el transporte de las microalgas en dirección horaria es coherente con la dirección de las corrientes, las que en el centro del lago se dirigen a favor del viento y se devuelven por los bordes litorales hacia Villarrica si el viento proviene del oeste o hacia Pucón si es del este (Meruane, 2005). Posteriormente, en un intervalo de 3 días (17 al 20 de marzo) existe un aumento y disminución en la condición trófica del lago que, sin embargo, se atribuye a la combinación de imágenes S3 y S2, donde las primeras tienen un RMSE que duplica a las segundas, por lo que se estaría subestimando Chl-a no solo en sector La Poza, sino que en la totalidad del lago. Luego, entre el 25 y 26 de marzo, ocurre la intrusión de una pluma de microalgas desde litoral Pucón hacia el centro del lago impulsada por un viento de dirección este (Puelche del 25 de marzo). Desde el 29 de marzo la Chl-a está en torno a los 2  $\mu\text{g/l}$ .

En la Figura 6a se muestra la concentración de Chl-a promedio en el lago para las imágenes S2 utilizando el OC2v4 (2018-2019) y OC4v4 (enero-abril 2020). Todas las fechas, excepto las del 4 y 14 de marzo, están en el rango oligotrófico según Smith et al. (1999). En general, las floraciones algales ocurren de manera sectorizada en las zonas litorales, por lo que la zona pelágica del lago tiende a presentar bajos niveles de Chl-a. Así se observa en la Figura 6b, Figura 6c y Figura 6d, donde las áreas con mayor nivel de trofia son las zonas litorales Villarrica, Pucón y La Poza. Esta sectorización de los episodios de florecimiento de algas puede estar asociada a la carga de nutrientes (fósforo y nitrógeno) aportada por el río Trancura producto de las pisciculturas y uso de suelo (Bruning, 2018), la que se almacenaría en una capa térmica superior durante la temporada de estratificación (Galaz, 2020). Lo anterior, sumado a los episodios de viento fuerte que causan un aumento de Chl-a en superficie, posicionan al sector de Pucón como un lugar crítico para el origen de las microalgas, las que finalmente afectan otras zonas del lago, debido a la circulación general. Por esto último, sería pertinente colocar una sonda de monitoreo en las cercanías del río Trancura, con el objetivo de vigilar frecuentemente el lugar. De esta manera, aunque los algoritmos evaluados no permiten conocer una concentración exacta de Chl-a, deben ser considerados como un complemento a las mediciones de campo, ya que entregan una visión general de la evolución del estado trófico del lago, estableciendo la frecuencia y ubicación de los eventos de florecimiento de algas, lo que podría facilitar la toma de decisiones respecto a la calidad de sus aguas.

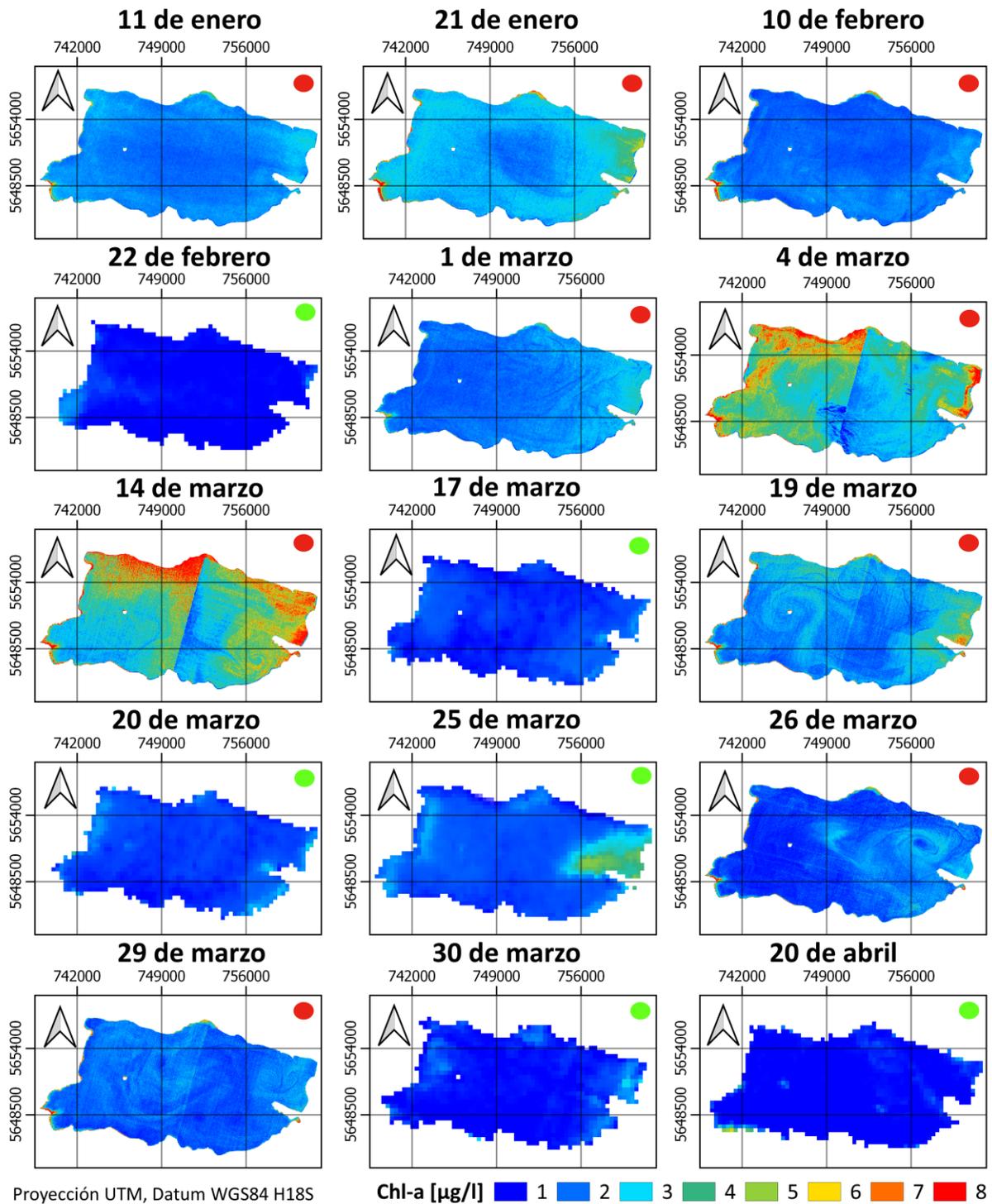


Figura 5: Chl-a en el lago Villarica entre enero y abril de 2020 utilizando los algoritmos OC4v4 (S2: círculo rojo) y OC5 (S3: círculo verde).

## 5. CONCLUSIONES

Los algoritmos que hacen uso de las bandas azul y verde son los más apropiados para estimar concentración de Chl-a en superficie. Los algoritmos oceanográficos fueron los de mayor

desempeño, en particular el OC2v4 y OC4v4 de S2 que superaron al OC5 de S3. Aunque obtener un algoritmo preciso para la estimación de Chl-a es una tarea compleja, hay que destacar que lograron representar la distribución espacial de Chl-a de forma consistente a las mediciones de campo, indicando zonas con un mayor grado de trofía en el lago. Durante 2018, 2019 y 2020 las imágenes estudiadas muestran al lago Villarrica en una condición oligotrófica, pero con una alta variabilidad en temporada estival, donde los patrones de distribución y desplazamiento de las microalgas concuerdan con su comportamiento hidrodinámico. Esto demuestra la necesidad de monitorear continuamente este sistema lacustre, ya que las campañas de muestreo desarrolladas en primavera y verano por la DGA no permiten tener una visión completa y de alta frecuencia del lago, por lo que incorporar a las prácticas convencionales el uso de imágenes satelitales de acceso libre y gratuito, como las S2, mejoraría considerablemente su vigilancia.

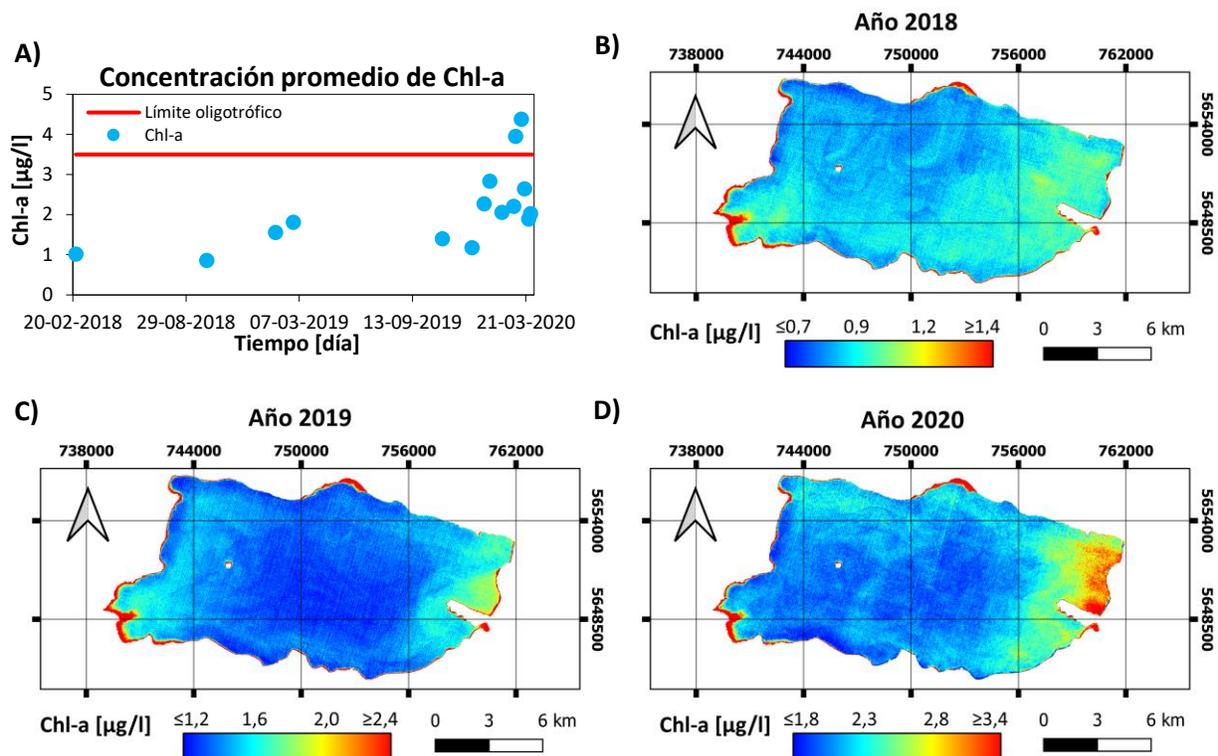


Figura 6: A) Promedio espacial de Chl-a con imágenes S2 y límite oligotrófico (Smith et al. (1999)). Concentración promedio de Chl-a con imágenes S2 durante los años B) 2018 (2 imágenes: 25 feb., 3 oct.), C) 2019 (4 imágenes: 26 ene., 25 feb., 2 nov., 22 dic.) y D) 2020 (7 imágenes: 11 ene., 21 ene., 10 feb., 1 mar., 19 mar., 26 mar., 29 mar.).

## REFERENCIAS

Alcântara, E., Piffer, C., Gomes, A., Bernardo, N., Fernando, A., Rodrigues, T., Watanabe, F. (2018). Performance analysis of the C2RCC processor in estimate the water quality parameters in inland waters using OLCI/Sentinel-3A images. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 9300-9303. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8517486](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517486)

Bravo, J. (2021). Diagnóstico de la condición trófica del lago Villarrica utilizando imágenes satelitales. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Bruning, M. (2018). Estudio de aporte de carga de nutrientes por fuentes contaminantes y análisis de escenarios de descontaminación mediante un modelo de calidad de aguas en el lago Villarrica. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Química. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Centro de Ecología Aplicada. (2014). Diagnóstico de la condición trófica de cuerpos lacustres utilizando nuevas herramientas tecnológicas. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas. (2014). Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA. Santiago.
- Dirección General de Aguas. (2018). Análisis de la relación entre la concentración de clorofila "a" y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros.
- Dirección General de Aguas. (2020). Reporte de datos de calidad de agua (clorofila) del Lago Villarrica obtenidos mediante un monitoreo de alta frecuencia.
- Doerffer, R., Schiller, H. (2007). The MERIS Case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3-4), 517-535.
- Galaz, F. (2020). Modelación numérica de la hidrodinámica del lago Villarrica ad portas del anteproyecto del plan de descontaminación aprobado mediante resolución exenta N°437/2020 del Ministerio del Medio Ambiente. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ha, N. T. T., Thao, N. T. P., Koike, K., & Nhuan, M. T. (2017). Selecting the Best Band Ratio to Estimate Chlorophyll-a Concentration in a Tropical Freshwater Lake Using Sentinel 2A Images from a Case Study of Lake Ba Be (Northern Vietnam). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), 290. doi:10.3390/ijgi6090290
- IOCCG. (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- IOCCG. (2018). Earth Observations in Support of Global Water Quality Monitoring. Greb, S., Dekker, A. and Binding, C. (eds.), IOCCG Report Series, No. 17, International Ocean Colour Coordinating Group, Dartmouth, Canada.
- Kravitz, J., Matthews, M., Bernard, S., Griffith, D. (2020). Application of Sentinel 3 OLCI for chl-a retrieval over small inland water targets: Successes and challenges. *Remote Sensing of Environment*. 237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111562>
- Meruane, C. (2005). El efecto del viento Puelche sobre la hidrodinámica y calidad de aguas del lago Villarrica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). Aprueba Anteproyecto del Plan de Descontaminación por clorofila "a", transparencia y fósforo disuelto para la cuenca del lago Villarrica. Recuperado de <https://planesynormas.mma.gob.cl/>
- O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Siegel, D.A., O'Brien, M.C., Toole, D., Mitchell, B.G., Kahru, M., Chavez, F.P., Struttton, P., Cota, G.F., Hooker, S.B., McClain, C.R., Carder, K.L., Müller-Karger, F., Harding, L., Magnuson, A., Phinney, D., Moore, G.F., Aiken, J., Arrigo, K.R., Letelier, R., Culver, M. (2000). Ocean Color Chlorophyll a Algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series vol. 11. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland (Part 3, Ch. 2. NASA-TM-2000-206892).
- O'Reilly, J. E., & Werdell, P. J. (2019). Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*, 229, 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
- 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(1-3), 179-196.
- Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., et al. (2021). Validation of Water Quality Monitoring Algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean Inland Waters with In Situ Reflectance Data. *Water*, 13(5), 686. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13050686>
- Vigilantes del Lago. (2020a). Informe blooms Lago Villarrica (1993-2020). Una contribución desde la ciencia ciudadana. <http://www.vigilanteslagos.org/>
- Vigilantes del Lago. (2020b). Reporte 11. Monitoreo Lago Villarrica, en Pucón 2020. <http://www.vigilanteslagos.org/>