



GEOINGENIERÍA
Revista Ciencias de la Tierra

Autor de correspondencia

Diego Cornejo Salgado
diego.cornejo@usach.cl
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Geoespacial y Ambiental
Universidad de Santiago de Chile

Autores

Eric Miranda San Martín
Jaime Andrés Backit Gutierrez
Diego Cornejo Salgado

Artículo de investigación / Research Article

<https://doi.org/>



Estudio de posibles fuentes contaminantes en la cuenca del lago villarrica, mediante técnicas de sensores remotos entre los años 2017 y 2019

Study of possible polluting sources in the Villarrica lake basin, using remote sensing techniques between 2017 and 2019

Resumen

La cuenca del lago Villarrica ha experimentado eventos de proliferación de algas en los últimos 5 años, en donde se han visto cambios en su condición trófica, llegando a considerarse como "zona saturada" en el año 2017 por el Ministerio del Medio Ambiente. Dentro de los parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad de las aguas continentales, se encuentran la concentración de clorofila-a y la profundidad del disco de Secchi como medidor de transparencia. Los algoritmos Ocean Color 2 y estimador de profundidad del disco de Secchi (ZSD) fueron utilizados para la estimación de la clorofila-a y transparencia del agua del lago Villarrica.

Junto con las estimaciones de los parámetros fisicoquímicos, se confeccionó una matriz de riesgo asociada a las posibles situaciones de riesgo, para clasificarlas según su gravedad y frecuencia para la determinación de posibles fuentes de contaminación del lago Villarrica. La metodología aplicada dio resultados satisfactorios, al ser posible la detección de posibles fuentes de contaminación mediante el uso de técnicas de sensores remotos en imágenes Sentinel2.

Palabras Claves: Contaminación, Clorofila-a, contaminación de aguas, Sentinel-2, Disco de Secchi, Lago Villarrica.

Abstract

The Villarrica Lake basin has experienced algal proliferation events during the last five years, where the changes in its trophic condition have been observed, and it has even being considered a "saturated zone" in 2017 by the Ministry of the Environment. The concentration of chlorophyll-a and the depth of the Secchi disk as a measure of transparency are among the physicochemical parameters used to determine the quality of inland waters. The Ocean Color 2 and Secchi disk depth (ZSD) algorithms were used to estimate chlorophyll-a and water transparency of the Villarrica Lake. Apart from the estimation of the aforementioned physicochemical parameters, a risk matrix associated with possible risk situations was prepared, to classify the potential risks according to their severity and frequency to determine possible sources of contamination of the Villarrica Lake.

The applied methodology gave satisfactory results, as it was possible to detect possible contamination sources through remote sensing techniques using Sentinel2 images.

Keywords: Pollution, Chlorophyll-a, water pollution, Sentinel-2, Secchi Disc, Villarrica Lake.

Estudios previos

Dado el reporte de la Red de Control de Lagos de la Dirección General de Aguas (4), el Ministerio del Medio Ambiente elaboró el Decreto Supremo N°43, del 19 de octubre de 2017, que establece que la cuenca del Lago Villarrica está saturada, ya que, de acuerdo con los resultados de este informe, se analizaron muestras de clorofila a para establecer la condición trófica a partir de su concentración según el índice de Smith de 1999 (10), otorgando al lago una condición oligotrófica. Otras muestras indican el aumento de nutrientes tales como fósforo y nitrógeno, causando que las algas microscópicas presentes en esta cuenca se alimenten de éstos, desencadenando un desarrollo acelerado, consumiendo el oxígeno disponible en el agua destinada a la fauna que conviven en el lugar, causando la muerte de aquellas especies y desestabilizando la cadena trófica.

Varios reportajes periodísticos (6)(8), señalan al sobrepoblamiento de los alrededores como uno de los factores influyentes en la condición actual que presenta el lago. En estos reportajes se demostró la turbidez del agua utilizando Discos Secchi, la cual ha aumentado con el paso de los años, según indican los expertos .

entrevistados y que es confirmado por algunos lugareños, donde la concurrencia de público aumenta debido a sus atractivos turísticos y las playas que bordean el lugar.

Además, los sectores costeros al Lago Villarrica han presentado un aumento en la edificación de departamentos, siendo una variable para estudiar sobre el destino de los desechos o bien, las plantas de tratamiento de agua que pudiesen encontrarse en el lugar no estén realizando el proceso adecuadamente. Adicionalmente, es posible que algunas fuentes de contaminación provengan de algunas filtraciones de los sistemas de alcantarillado, situación que podría afectar directa o indirectamente los cuerpos de agua. Es por ello por lo que las autoridades de las comunas de Pucón y Villarrica han decidido elaborar un Plan de Descontaminación, con la participación del Ministerio del Medio Ambiente y la comunidad, con el fin de evitar que la situación del lago se vuelva irreversible.

Por otra parte, a partir del documento elaborado por “Vigilantes del Lago” y la Fundación de Red de Nuevas Ideas (35) se han producidos diversos episodios de afloramiento de algas y fitoplancton, afectando el ecosistema presente en el lugar. Los registros de estos acontecimientos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Registros de Afloramiento de algas y fitoplancton en el Lago Villarrica Período 1993-2018

Evento	Año	Descripción
1er. Afloramiento	1993	Relatado por el Dr. Hugo Campos. No existe registro fotográfico. Especie: Mycosistes aeruginosa
2do. Afloramiento	Primavera 2005	Especie: Clorófitas.
3er. Afloramiento	Verano 2008	Especie: Fragilaria sp. Duración aproximada de 30 días
4to. Afloramiento	Primavera 2008	No existen antecedentes de algas involucradas
5to. Afloramiento	Verano 2010	Especie: Dolichospermum sp. Duración aproximada de 30 días.
6to. Afloramiento	Otoño 2010	Especie: Dolichospermum sp.
7mo. Afloramiento	Verano 2011	Especie: Dolichospermum sp.
8vo. Afloramiento	Verano 2012	Especie: Dolichospermum sp.
9no. Afloramiento	Verano 2015	Especie: Dolichospermum sp.
10mo. Afloramiento	Verano 2016	Especie: Dolichospermum sp.
11vo. Afloramiento	Verano 2017	Especie: Spirogyra sp.
12vo. Afloramiento	Verano 2018	Especie: Dolichospermum sp.
13vo. Afloramiento	Otoño 2018	Especie: Dolichospermum sp. En un hecho inédito, por primera vez la extensión del afloramiento cubre la totalidad de la superficie acuática del Lago Villarrica

Fuente: Elaboración Propia basado en: http://www.vigilanteslagos.org/images/Ambiental/lagovillarrica/INFORME_BLOOMMS_LAGO_VILLARRICA.pdf

Figura 1 Afloramiento de algas, Ribera sur Lago Villarrica, Playa Pucón

http://www.vigilanteslagos.org/images/Ambiental/lagovillarrica/INFORME_BLOOMS_LAGO_VILLARRICA.pdf



Objetivo General

Realizar un estudio de los contaminantes en la cuenca del lago Villarrica, mediante técnicas de sensores remotos entre el periodo 2017 y 2019.

Objetivos específicos

- Analizar los afluentes y tributarios del Lago Villarrica con sus respectivas estaciones de aforo.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de las imágenes procesadas en Sentinel-2.
- Aplicar un modelo estimador de clorofila-a en imágenes Sentinel-2.
- Aplicar un modelo estimador de profundidad de disco de Secchi en imágenes Sentinel-2.
- Analizar mediante regresión lineal los resultados obtenidos de los estimadores con mediciones in situ.
- Confeccionar mapas temáticos en GIS, que muestren los resultados obtenidos.
- Elaborar una matriz de riesgo aplicada a las posibles fuentes de contaminación del lago.
- Concluir sobre las fuentes de contaminación obtenidas a partir de las metodologías empleadas y su validación para ser aplicadas sobre otras cuencas hidrográficas.

Disco de Secchi

Es un instrumento de medición de la penetración luminosa, y por ello de la turbidez, en masas de agua como ríos, lagos y mares. Mide de 20 a 30 centímetros de diámetro y para un mejor contraste, está dividido en cuatro secciones pintadas de blanco y negro alternativamente. Las mediciones con este instrumento se realizan a nivel de las superficies del cuerpo de agua,

se introduce al disco de Secchi atada a una cuerda graduada métricamente. Se anota la profundidad que el disco alcanza hasta que se pierde de vista. El procedimiento se realiza a lo menos en 3 ocasiones y se registran en un cuaderno de campo las 3 mediciones de las cuales es posible obtener una media que puede ser utilizada en análisis posteriores.



Figura 2 Disco de Secchi en terreno
<https://rickly.com/limnological-weighted-secchi-disc-8in-diameter/>

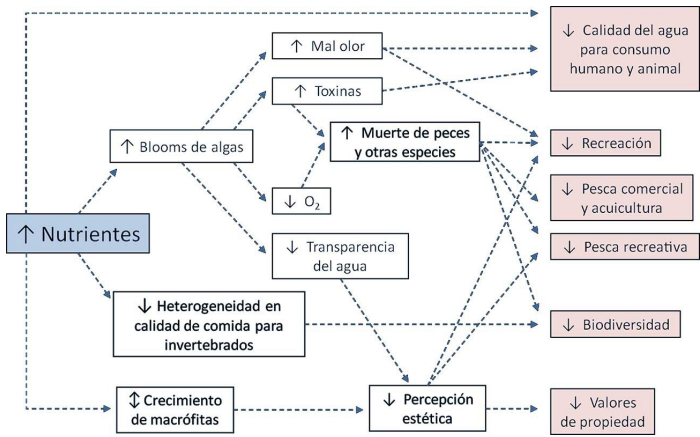
Eutrofización de cuerpos de agua continentales

La eutrofización es un proceso ocasionado por un aumento considerable de nutrientes tales como fósforo, nitrógeno en un ecosistema acuático (aumento de la actividad orgánica), lo que conlleva a la ocurrencia de eventos de proliferación de algas.

Si bien un lago puede sufrir variaciones naturales en su productividad, también es posible que se produzca un proceso denominado eutrofización cultural, que consiste en el aporte de desechos humanos o de animales a partir de un inadecuado manejo de la cuenca y que tiene como consecuencia la alteración del estado trófico presente en el lago, favoreciendo la actividad de cianobacterias y algas, que se ven beneficiadas por la producción de nitrógeno y fósforo entre otros compuestos orgánicos. (25)

La eutrofización, por su parte, se entiende como enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema acuático.

En la siguiente ilustración, se indica como las algas o cianobacterias se ven favorecidas por el aumento de estos compuestos orgánicos:



http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-51209_Agies_lagovillarrica.pdf

Clasificación trófica de un lago según OCDE

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) llevó a cabo el “Programa de cooperación sobre la eutrofización” en la década de los setenta, que contó con la participación de importantes científicos de 18 países. A partir de este programa, se establecieron las bases para la clasificación de categorías tróficas, cuyos parámetros son: clorofila-a, fósforo total, nitrógeno total y transparencia del disco de Secchi (18).

La clasificación según la OCDE se divide en cuatro estados tróficos a partir de los parámetros mencionados:

Oligotrófico: Es un estado considerado bajo en productividad de nutrientes en un cuerpo de agua. Se caracteriza por tener aguas muy claras, una baja presencia de algas y otras plantas. Estas aguas son de alta calidad para beber. Los lagos de estos tipos se encuentran generalmente en regiones frías y la mezcla de nutrientes es lenta debido a la temperatura de las aguas (18).

Mesotrófico: Es el nivel intermedio de productividad de nutrientes, disminuye la claridad de las aguas y aumenta la actividad de desarrollo de algas, plantas y la fauna marina (18).

Eutrófico: Cuerpos de agua de este tipo presentan una alta actividad de productividad biológica. Disminuye la claridad de las aguas considerablemente, el ambiente es idóneo para el crecimiento de la fauna debido a los altos niveles de oxígeno proporcionado por el aumento y desarrollo de algas, también producido por la elevada cantidad de nutrientes presentes en el fondo acuático. Esta situación se puede volver insostenible como consecuencia a un alto nivel de respiración vegetal que consume el oxígeno disuelto y afecta directamente a la fauna presente (18).

Hipereutrófico: Es el estado más alto de productividad orgánica con respecto a los mencionados anteriormente. Se caracteriza por el excesivo crecimiento de plantas y algas, ya que se encuentran en un ambiente óptimo para el desarrollo. Lagos de este tipo presentan una baja claridad de sus aguas (inferiores a 1 m de visibilidad vertical). Es posible encontrar zonas muertas en las profundidades del agua, debido a que las algas a menudo sofocan la fauna del lugar por el consumo de oxígeno (18).

Es posible clasificar el estado trófico de un lago a partir de los parámetros de clorofila-a, fósforo total, nitrógeno total y transparencia del disco de Secchi. La OCDE estableció los valores máximos para cada una de los estados tróficos, los que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 2.1: Clasificación de estados tróficos según parámetros OCDE

Tipología	Fósforo total (mg/m³)	Clorofila “a” media (mg/m³)	Clorofila “a” máxima (mg/m³)	Profundidad de Secchi (m)
Ultra oligotrófico	≤4	≤1	≤25	≥12
Oligotrófico	≤10	≤2,5	≤8	≥6
Mesotrófico	10-35	2,5-8	8-25	6-3
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1,5
Hipereutrófico	≥100	≥25	≥75	≤1,5

Fuente: Elaboración propia basado en <http://eimaformacion.com/calculo-del-estado-trofico/>

Algoritmo Ocean Color 2 (OC2)

Consiste en un conjunto de operaciones matemáticas que se aplican a una imagen satelital para lograr diferenciar elementos de interés, mediante la interpretación de los valores de píxel. En particular, el algoritmo OC2 se utiliza en teledetección para la estimación de manera remota de concentración de clorofila-a (en mg/m³) en aguas oceánicas, a través de la reflectancia de las partículas. Sin embargo, se ha demostrado su eficacia en el uso del estimador en aguas continentales, particularmente en cuerpos de agua ultra oligotróficos a mesotróficos (17). Ocean Color 2 se centra en las longitudes de onda que oscilan entre los 440 y 670 nm (azul y verde) debido a que el fitoplancton presenta una alta absorción de energía en estas bandas, característica que hace que posible su discriminación y, por ende, su detección utilizando técnicas de sensores remotos (12).

Las ecuaciones, adaptadas y calibradas al Instrumento Multiespectral de Sentinel-2 (S2-MSI) se presentan a continuación (17):

$$[R_{660}] = 10^{[0.078217 - 2.7864[R_{490} + 2.5875[R_{660} - 2.39565[R_{660} - 0.2496]]]}$$

Ecuación 2.1

En donde x se define como:

$$[R] = \log_{10} (R_{490}/R_{560})$$

En donde R es el valor de reflectancia para las bandas espectrales 490 nm y 560 nm. El resultado final muestra la concentración estimada de clorofila-a, expresada en mg/m³

Estimador de Profundidad de Disco de Secchi (ZSD)

Como se definió anteriormente, la profundidad del disco de Secchi otorga una medición in situ que está relacionada con la atenuación de la luz en cuerpos de agua y la visibilidad vertical. Para realizar la estimación de este parámetro de forma remota en aguas continentales, se utilizó el algoritmo (14) modificado, validado y calibrado por Pereira-Sandoval (23), el cual relaciona el ratio 490/560, que es usado para mostrar la transparencia de las aguas oceánicas (13);(21);(22), en donde se tiene que el fitoplancton es el principal componente que afecte a la atenuación de la luz; éste es empleado como una función lineal a partir del procedimiento de calibración y validación realizado por Pereira-Sandoval et al. Luego, el algoritmo:

$$ZSD = \frac{1}{3.3435} [3.3435 \times \ln (R_{490}/R_{560}) + 1.7422]$$

Ecuación 2.2

En donde R es el valor de reflectancia para las bandas espectrales 490 nm y 560 nm.

El resultado final muestra la profundidad estimada de visibilidad del disco de Secchi, expresada en metros.

Características del lago Villarrica

El lago Villarrica (o Mallolafquén en mapudungun) se ubica en la Región de la Araucanía, en la provincia de Cautín y al norte del volcán Villarrica, con coordenadas geográficas 39°15'00"S 72°05'00"O. Al suroeste y bordeando el lago se encuentra la ciudad de Villarrica y al noreste se encuentra ubicada la localidad de Pucón. Cuenta con una superficie de aproximadamente 175 km², una longitud de 23,5 km y un volumen aproximado de 21 km³ (3)



Figura 3: Imagen satelital de la ubicación del lago Villarrica

Afluentes y cuenca del lago Villarrica.

El lago Villarrica forma parte de la hoya hidrográfica del río Toltén. Esta hoya se desarrolla entre los 38°50' y los 39°35' de latitud sur, y entre los 73°15' y los 71°20' de longitud, limita por el norte con la cuenca del río Imperial, por el este con la cuenca del río Biobío y con el límite internacional, por el sur con el río Valdivia y por el oeste con las cuencas costeras del Lago Budi y el río Queule. La superficie total de la hoya es de 7.900 km².

El río Toltén nace en el desagüe del Lago Villarrica a orillas de la ciudad del mismo nombre; en su recorrido recibe varios afluentes entre los cuales los más importantes son el río Allipén, el río Dónguill y el río Mahuidanche. El Lago Villarrica es alimentado directamente por varios esteros laterales en ambas riberas. En el extremo oriente, próximo al balneario de Pucón, recibe su afluente más importante, que es el río Trancura (Pucón o Minitué), con un área total de 2.323 km². Este río nace en las grandes alturas del volcán Lanín en el extremo sur poniente de la cuenca del río Toltén,

Llegando a la localidad de Curarrehue recibe los aportes del río Maichín. Desde ese lugar hasta el Lago Villarrica recibe varios afluentes entre los cuales el más importante es el río Liucura. Los ríos que drenan el sector alto de la hoya hidrográfica del río Toltén, tienen un régimen hidrológico pluvial, con regulación natural (23). El tiempo de renovación hidráulica para el lago Villarrica se encuentra entre 2 y 4 años (28).

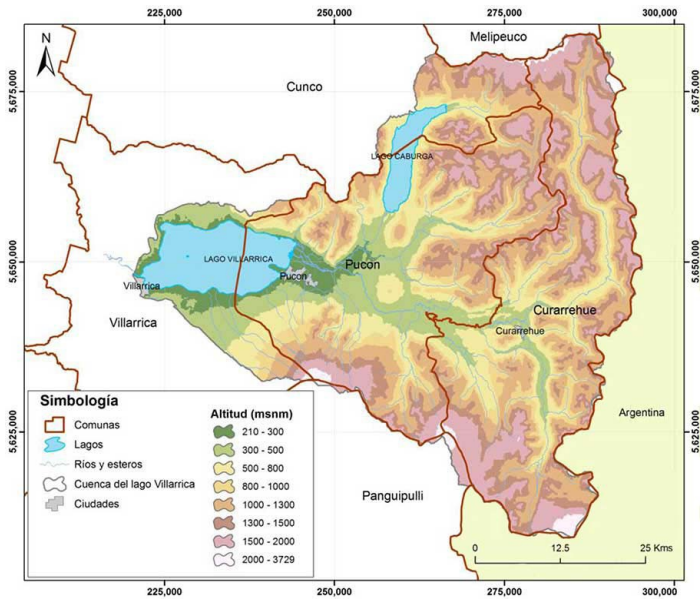


Figura 4 Mapa Cuencas Lago Villarrica

Norma Secundaria de Calidad Ambiental del lago Villarrica

A raíz de los altos índices de contaminación en los que se encontraba el lago Villarrica en el año 2017, el Ministerio de Medio Ambiente declaró “zona saturada” y estableció una norma secundaria, con el fin de resguardar el lago y que esta situación no se vuelva irreversible, lo que podría dañar considerablemente la flora y fauna del lugar.

A continuación, se exponen algunos de los decretos establecidos en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental con respecto al Lago Villarrica, los cuales son la base de los parámetros de contaminación que puedan afectar al cuerpo de agua y los valores máximos posibles para que se produzca un incumplimiento de la norma establecida:

-.Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, señala que el Estado tiene la función de dictar normas secundarias de calidad ambiental para la regulación de la presencia de contaminantes en el medio ambiente, con el fin de prevenir un riesgo para la protección o preservación del ecosistema.

-. Decreto Supremo N°19 de 27 de mayo de 2013, del

Ministerio del Medio Ambiente, el cual establece las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las Aguas Continentales Superficiales del Lago Villarrica, define los valores máximos de clorofila-a, transparencia del disco de Secchi y fósforo disuelto. Dichos índices se muestran a continuación:

Parámetros	Unidad	Criterio	Área de Vigilancia					
			PEL	LIT-Poza	LIT-Pucón	LIT-Norte	LIT-Villarrica	LIT-Sur
Transparencia (Secchi)	m	Promedio anual	≥ 9	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7	≥ 7
		Mínimo	≥ 5	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
Clorofila "a"	µg/L	Promedio anual	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
		Máximo	≤ 6	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Fósforo (P) disuelto	mg P/l	Promedio anual	≤ 0,010	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,015
		Máximo	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025

Valores máximos definidos en la Normas Secundarias de Calidad ambiental del lago Villarrica

A partir del artículo 12° del Decreto Supremo N°19, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente y Programa de Medición y Control de Calidad Ambiental, establece las áreas de vigilancia y las estaciones de monitoreo para las aguas superficiales del lago Villarrica las cuales se señalan en la siguiente ilustración:

ÁREAS DE VIGILANCIA OFICIALES				
Código	Nombre Área de vigilancia	Estación de monitoreo*	Coordenadas UTM Datum WGS 84, HUSO 18S	
			N (m)	E (m)
PEL-CE	Zona pelagial CENTRO	09420010-5	5.650.192	750.473
LIT-PU	Bahía Pucón (LIT - Pucón)	09420013-k	5.648.855	760.636
LIT-NO	Sector Norte (LIT - Norte)	09420014-8	5.656.005	746.795
LIT-VI	Sector Villarrica (LIT-Villarrica)	09420005-9	5.647.562	740.885
LIT-SU	Sector Molco (LIT - Sur)	09420012-1	5.646.215	750.494
LIT-PO	Sector La Poza (LIT - Poza)	09420007-5	5.647.905	759.575

Estaciones y áreas de vigilancia oficiales del lago Villarrica

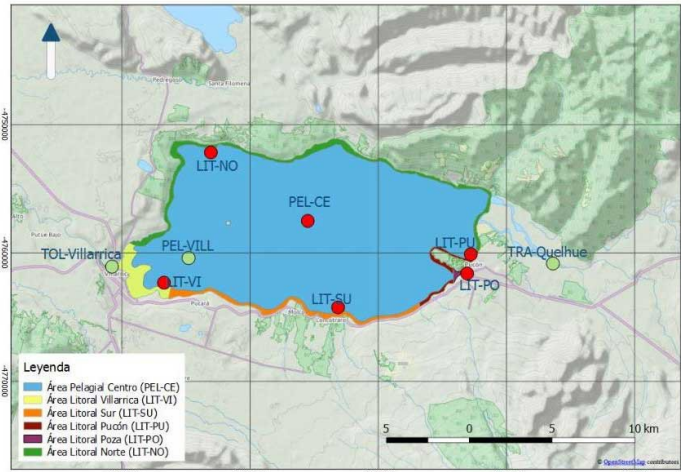


Figura 5 Estaciones de Monitoreo: Ubicación in situ de las distintas áreas y estaciones de monitoreo

Fecha Campaña	PEL - CE	LIT - PU	LIT - NO	LIT - VILL	LIT - SUR	LIT - PO
18/10/2017	0,7	1,1	0,6	1,1	1,3	1,8

Tabla 4.2: Concentración de clorofila-a (mg/m³) en áreas de vigilancia del lago Villarrica

Fuente: Elaboración propia basada en Tercer Informe de Calidad: Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Superficiales de la Cuenca del Lago Villarrica (34)

Área de vigilancia	E UTM	N UTM	Huso	[Chl-a] In Situ(mg/m³)	[Chl-a] Estimado (mg/m³)
LIT-PO	241942	5647899	19	1.8	0.620365
LIT-PU	243001	5648987	19	1.1	0.173649
PEL-CE	750508	5650209	18	0.7	-0.001789
LIT-NO	746946	5655894	18	0.6	0.24699
LIT-VILL	740818	5647634	18	1.1	0.588268
LIT-SU	750537	5646295	18	1.3	0.011517

Tabla 4.3: Comparación de concentración de clorofila-a in situ y estimada con algoritmo OC2

La aplicación del algoritmo OC2 en ArcMap se basó en una rutina de procedimientos en la herramienta Model Builder, en donde se cargaron las imágenes del lago en las bandas 2 y 3 y se programaron dos funciones en dos distintas calculadoras ráster: la primera para ejecutar la resta de los logaritmos base 10 de ambas imágenes (lo que corresponde al valor “x” de la ecuación

La imagen muestra la concentración de clorofila-a en el lago Villarrica, la cual está representada por tonalidades oscuras a medida que ésta se densifica.

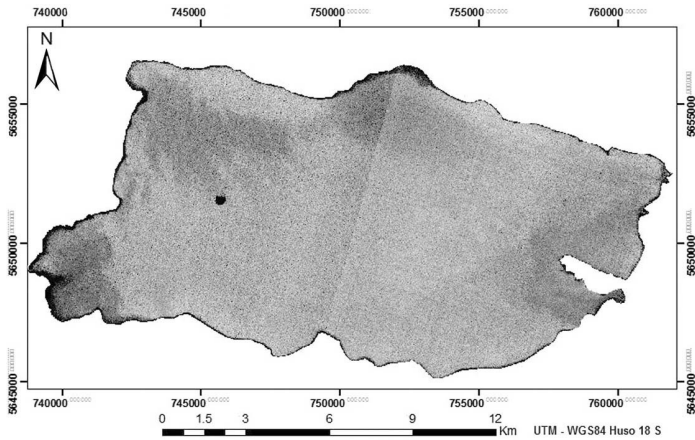


Imagen del lago Villarrica procesada con algoritmo OC2.
Fecha de captura: 21/10/2017

Antes de aplicar el método a las demás imágenes, se debe corroborar si el procedimiento realizado es correcto; para ello, se compararon los valores obtenidos mediante percepción remota (valor del píxel) correspondiente a la coordenada UTM del área de vigilancia, con el valor de concentración de clorofila-a de las muestras in situ respectivas, según lo expuesto en la tabla 4.2. Por regresión lineal, lo esperado es una recta lineal con pendiente positiva y cercana a 1 y error cuadrático cercano a 1 (lo que indica que hay una buena correlación entre los datos de campo y los estimados). A continuación, se exponen los resultados del algoritmo:

Determinación de las posibles fuentes de contaminación

Recopilación de información para la determinación de posibles fuentes de contaminación en comunas cercanas al lago villarrica.

Para la determinación de las posibles fuentes de contaminación en el sector del Lago Villarrica, es que se ha empleado un modelo de riesgos que permitan identificar factores que influyen en la polución del Lago. Cabe mencionar que un riesgo es la probabilidad de que ocurra un suceso que pueda ocasionar algún daño a personas o entorno. La forma de señalar estos riesgos puede ser de manera subjetiva, indicando algo más perceptivo desde el punto de vista de varias personas o a través de recopilación de información durante un periodo de tiempo determinado considerando la tendencia estadística de estos con respecto a uno o varios incidentes. Estos riesgos reciben el nombre de riesgo añadido (subjetivo) o riesgo estimado (estadística). (25)

Para la elaboración de este modelo de riesgo se ha accedido a diversas fuentes de información, tales como la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), Secretaria Regional Ministerial del Medio Ambiente de la Región de la Araucanía (SEREMI del MA) sobre denuncias o sumarios sanitarios (bajo la Ley de Transparencia Activa) que se han realizado en los alrededores del Lago Villarrica y que tenga relación directa con los afluentes y el mismo cuerpo de agua, siendo las comunas de Pucón y Villarrica las más investigadas por su ubicación geográfica. Además, se ha realizado un catastro de pisciculturas y termas en los alrededores a partir de la Geodatabase creada previamente a partir de información disponible en línea y de acceso gratuito.

Expedientes de fiscalización de la comuna de Villarrica:

La información que se muestra a continuación corresponde al total de expedientes emitidos desde el 2013 a la fecha en la comuna de Villarrica, disponibles en la página web del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), los cuales son agrupados según la cantidad de rubros autorizados que funcionan en el lugar y que hayan incumplido alguna norma, por la cual fue emitido dicho expediente:

Expedientes por instrumentos de fiscalización en comuna de Villarrica

Instrumentos de fiscalización	Casos
Normas de emisión	336
Resoluciones de calificación ambiental	7
Otros	6
Total	349

Fuente: Elaboración Propia basado en SNIFA

Expedientes de fiscalización de la comuna de Pucón

De igual forma, para la comuna de Pucón se extrajo la información en el sitio web del SNIFA sobre los expedientes de fiscalización, los cuales se exponen a continuación:

Tabla 5.2: Expedientes por instrumentos de fiscalización en comuna de Pucón.

Instrumentos de fiscalización	Casos
Normas de emisión	173
Resoluciones de calificación ambiental	3
Otros	3
Total	179

Fuente: Elaboración propia basada en SNIFA

Catastro de posibles fuentes de contaminación

Se realizó la recopilación de información a partir de datos geoespaciales de pisciculturas, termas, hospedajes, entre otros, que son los aportes de producción, fuentes de trabajo y de desarrollo para las comunas que bordean al lago.
La actividad antrópica en Pucón y Villarrica se caracteriza por la presencia de distintas empresas dedicadas al

cultivo y crianza de salmones cuyo proceso reproductivo ocurre a comienzos de otoño. Se caracteriza además por el turismo, lo que implica la edificación de distintos recintos para poder albergar la demanda de turistas. Con ello, y al estar cerca de una zona volcánica, las aguas termales de recreación y de uso medicinal resulta ser un atractivo turístico para los visitantes.

Otra posible fuente identificada a partir del uso de la Geodatabase elaborada es la presencia de una planta de tratamiento de aguas servidas que hace uso de distintos esteros para su descarga. Según el informe elaborado por la SEREMI del Medio Ambiente en conjunto con la Universidad de la Frontera (UFRO) (29), estas descargas se llevan a cabo en Costanera Villarrica, sector Carmelito, estero Carmelito, Castillo zona norte y Frente Capitanía de Puerto Villarrica.

Matriz de riesgos aplicado a la contaminación

Una matriz de riesgo es una cuantificación de los principales causantes de contaminación en el lago Villarrica, que se realiza a través de un esquema que permite valorizar un suceso considerado como cualitativo, es decir, una acción o acto al que no se le puede asignar un valor numérico.

Se plantea un posible evento adverso y luego las causas y consecuencias a raíz de este. Una vez investigadas las relaciones que existen entre las posibles fuentes de contaminación, con toda la información y datos obtenidos a partir de denuncias ambientales en el SNIFA y capas de información geoespacial, es necesario cuantificar la posible frecuencia con lo que puedan ocurrir estos sucesos, considerando que el riesgo nulo no existe, esto porque todo suceso descrito tiene una cierta probabilidad de ocurrencia (distinto a 0). (25)

Luego se evalúa la gravedad del suceso, orientado a la cantidad de personas que pueda afectar, ya sea a una persona en particular, una vivienda o la población que habita tanto en Villarrica como en Pucón y se les asigna valores de menor a mayor con respecto a la gravedad y de mayor a menor con respecto a la frecuencia del suceso.

Caso: Contaminación del Lago Villarrica		
RIESGOS		
Fuente / Situación	Acto	Incidente potencial
Botes, lanchas y motos de agua	Número de embarcaciones presentes en el lago. Estación de combustible a orillas del lago en el sector de Pucón	Derramar combustible al momento de carga.
Centros termales	La cantidad de centros termales en los alrededores de los afluentes del lago Villarrica	Aumento en la cantidad de oxígeno disuelto en los Ríos afluentes

Caso: Contaminación del Lago Villarrica		
RIESGOS		
Fuente / Situación	Acto	Incidente potencial
Actividades turísticas en el borde del lago	En época estival, aumenta considerablemente la cantidad de actividades de recreación en el lago	Al aumentar la cantidad de turistas, existe un aumento en los desechos proveniente de hoteles y servicios de hospedajes
Pisciculturas	Aplicación de un proceso de cultivos continuo con microalgas. Utilización de humedales artificiales. Utilización de membranas	Se desconoce las emisiones que generan estos procesos, sin embargo, la demanda energética y de utilización de agua son elevados
Áridos al borde de los afluentes del lago Villarrica	Extracción de áridos a las orillas de los Ríos afluentes	La extracción de áridos en zonas prohibidas afecta la turbidez de los afluentes que llegan al lago
Reutilización de agua	Empleo de este método para la realización de procesos industriales	El agua utilizada después de proceso industriales, pueden ser ricos en residuos orgánicos
Sólidos en suspensión	La presencia de sólidos en suspensión tanto en afluentes como en la superficie del lago.	Sólidos en suspensión no permite la llegada de la luz, afectando el proceso trófico en las zonas profundas del lago
Procesos de cultivos en pisciculturas	Cada una de las empresas utiliza un proceso singular para el uso de alimentos y químicos	No se puede homogeneizar el proceso, por lo que es difícil hacer un control de nutrientes general para todos.
Límite de cargas de nutrientes	Actualmente no existe un límite máximo con respecto a la carga de nutrientes a los afluentes.	La carga de nutrientes directa al lago acelera los procesos orgánicos
Falta de fiscalización	A partir del 2017 cambio la modalidad de fiscalización por lo que disminuyo la cantidad de estos	No se cumplen los decretos estipulados en la Norma Secundaria
Límite de utilización de aguas	Las empresas que utilicen las aguas provenientes de los ríos no cuentan con un límite máximo del uso de este	Se puede utilizar grandes cantidades de agua para el proceso, afectando el periodo de retorno del lago
Plataforma Pública de información	No existe una plataforma de libre acceso que sirva de recopilatorio con respecto al estado del lago	La desorganización de información afecta a la toma de medidas en concreto
Desechos de agua con detergente por alcantarillado	Los detergentes están elaborados a base de fosfatos para la eliminación de desechos en prendas, sábanas o toallas	El desechar agua con detergente por el sistema de alcantarillado resulta en un riesgo de aumento en los procesos orgánicos en el lago
Educación sobre cuidados para turistas y lugareños	Se desconoce si existe informativos sobre las actividades que pueden realizar las personas en los alrededores del lago	La desinformación hace que las personas actúan por su cuenta
Tratamiento de aguas servidas en Curarrehue	La localidad de Curarrehue no cuenta con una planta de tratamiento de aguas, solo utilizan fosas sépticas	La utilización de fosas sépticas afecta el ciclo de las aguas subterráneas que llegan al lago
Rendimiento de planta de tratamiento de aguas servidas en Pucón	Existe la posibilidad que se trate los servicios de agua potable con muchos compuestos químicos que facilita los procesos orgánicos en el lago	En época estival podría estar sobrepasado el límite máximo de tratamiento de agua
Estaciones de monitoreo	No se cuenta con una gran cantidad de estaciones de monitoreo y los resultados se entregan cada 2 años	La falta de estaciones hace difícil la posibilidad de utilizar modelos para la estimación de clorofila-a o profundidad del disco de Secchi
Parámetros de estudio del estado trófico del lago Villarrica	Actualmente para poder determinar la eutrofización del lago se utilizan parámetros de disco de Secchi, clorofila-a, fósforo y nitrógeno	Actualmente no se poseen suficientes parámetros para apoyar la información ya existente
Uso de abonos ricos en fósforo para procesos de cultivos	Los lugareños utilizan abonos ricos en material orgánico para la fertilización de campos en el área de la agricultura.	El fósforo tiene una incidencia importante en la contaminación del lago y esta puede provenir de aguas subterráneas o afluentes del sector de agricultura

Medidores de riesgo utilizados

Un medidor de riesgo permite detectar de forma inmediata posibles amenazas y, a partir de su valoración, poder tomar las mejores decisiones en favor del ecosistema. Para ello se han utilizado dos medidores: la probabilidad de un suceso y la gravedad o severidad de un incidente en particular.

Probabilidad de ocurrencia de un incidente

Con la información recopilada del informe del SEREMI de la Región de la Araucanía (29), de la página web del SNIFA. Se elaboró la siguiente tabla de probabilidades de ocurrencia a un incidente en concreto. Se consideraron valores arbitrarios para el puntaje; si bien los valores poseen una progresión geométrica, el objetivo es poder diferenciar la frecuencia con que ocurre suceso. El tiempo que considera el acontecimiento de un incidente en particular dentro del período de un año. Teniendo esto en cuenta, se muestra en la siguiente tabla la clasificación y valoración de la probabilidad de ocurrencia de un suceso de riesgo:

Clasificación y valoración de probabilidad de un suceso

Clasificación	Probabilidad de ocurrencia	Puntaje
Baja	El incidente potencial se ha presentado por un mes o menos en el área, en el período de 1 año.	3
Media	El incidente potencial se ha presentado 3 a 4 meses en el área, en el período de 1 año.	5
Alta	El incidente potencial se ha presentado de 6 a 9 meses en el área, en el período de 1 año	7
Muy alta	El incidente potencial se ha presentado a lo largo de todo el año en el área.	9

Severidad o gravedad de un incidente

Para la clasificación de la gravedad de la ocurrencia de un hecho, se consideró si el incidente afecta al lago al corto, mediano o largo plazo y, si éste se puede solventar con medidas rápidas (calificación más baja) o bien, si la severidad del suceso afecta de manera directa a todas las personas y el ecosistema del lago, como también si se desconoce la gravedad real del incidente (para la clasificación más alta) Al igual que en la tabla de probabilidades, los valores que están en progresión geométrica se utilizaron con el fin de diferenciar la clasificación del daño que puede generar un incidente y se agrupó en la siguiente tabla:

Clasificación	Severidad o Gravedad	Puntaje
Ligeramente dañino	No afecta a la contaminación a corto o mediano plazo y es posible controlarlo mediante medidas simples	4
Dañino	Existe un riesgo intermedio con respecto a la contaminación del lago, el cual puede afectar a mediano plazo	6
Muy dañino	Afecta directamente a la contaminación del lago y existe la posibilidad de sobrepasar los niveles estipulados en la norma secundaria de calidad ambiental	8
Extremadamente dañino	El riesgo resulta grave para la integridad de las personas, la flora y fauna del lugar y es necesario tomar medidas de contingencia. Si no existe información sobre el incidente, se categoriza como el peor escenario posible.	10

Para poder evaluar y clasificar el riesgo, se multiplican las puntuaciones de la probabilidad de un incidente por el valor de la puntuación de la severidad de este. Lo anterior se evalúa utilizando el siguiente diagrama de calor, según el puntaje total obtenido.

Para riesgo bajo se asignó la casilla de color verde; esto implica que el suceso tiene un impacto bajo y solucionable con medidas de acción puntuales.

Para riesgo moderado se asignó el color azul; sucesos de este tipo requieren un poco más de atención con medidas que permitan un control de la situación a mediano plazo.

Para riesgo importante se asignó el color amarillo, que corresponden a incidentes que comprometen a una mayor cantidad de personas y que requiere de medidas locales para el control, además de futuras fiscalizaciones.

Para riesgo crítico, se asignó el color rojo; corresponden a posibles riesgos de gran impacto que afecten a la comunidad completa y el ecosistema que habita en los bordes del lago. Como se mencionó anteriormente, en esta casilla se incluyen aquellas empresas que no disponen de su real impacto en las aguas del lago. Se deben tomar medidas de control para resguardar la salud de las personas y el ecosistema, el cual debe ser periódico hasta tener la eventual situación bajo control.

Resultados de la evaluación en matriz de riesgos.

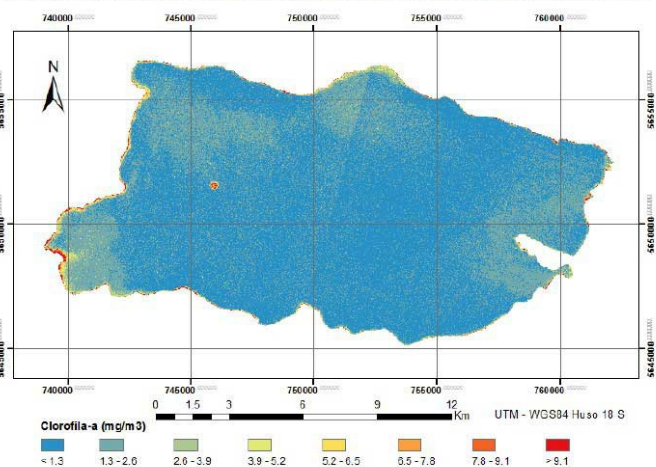
Una vez realizado la investigación de cada una de las posibles fuentes o situaciones que están relacionadas con respecto a la polución del lago, realizó una evaluación del riesgo que estos pueden generar en el lago, ya sea afectando a los afluentes como el río Trancura o Liucura, o afectándolo de manera directa. En la tabla a continuación se muestra cada evaluación de las 19 distintas posibles fuentes, clasificándolos a partir del puntaje obtenido como resultado de nuestra investigación:

Evaluación de Riesgos				
Incidente potencial	Probabilidad	Severidad	Evaluación del Riesgo	Clasificación del Riesgo
Derramar combustible al lago al momento de carga.	5	6	30	Riesgo moderado
Aumento en la cantidad de oxígeno disuelto en los ríos afluentes por desagüe de termas.	5	4	20	Riesgo bajo
Al aumentar la cantidad de turistas, existe un aumento en los desechos proveniente de hoteles y servicios de hospedajes.	7	6	42	Riesgo moderado
Se desconoce las emisiones que generan las pisciculturas, sin embargo, la demanda energética y de utilización de agua son elevados.	9	10	90	Riesgo Crítico
La extracción de áridos en zonas prohibidas afecta la turbidez de los afluentes que llegan al lago.	5	8	40	Riesgo moderado
El agua utilizada después de procesos industriales puede ser rica en residuos orgánicos al ser devuelta.	7	8	56	Riesgo importante
Sólidos en suspensión no permiten la llegada de la luz al fondo del lago, afectando el proceso trófico en las zonas profundas.	7	10	70	Riesgo Crítico
No se puede homogeneizar el proceso de piscicultura, por lo que es difícil hacer un control de nutrientes general.	9	10	90	Riesgo Crítico
Derramar combustible al lago al momento de carga.	5	6	30	Riesgo moderado
Aumento en la cantidad de oxígeno disuelto en los ríos afluentes por desagüe de termas.	5	4	20	Riesgo bajo
Al aumentar la cantidad de turistas, existe un aumento en los desechos proveniente de hoteles y servicios de hospedajes.	7	6	42	Riesgo moderado
Se desconoce las emisiones que generan las pisciculturas, sin embargo, la demanda energética y de utilización de agua son elevados.	9	10	90	Riesgo Crítico
La extracción de áridos en zonas prohibidas afecta la turbidez de los afluentes que llegan al lago.	5	8	40	Riesgo moderado
El agua utilizada después de procesos industriales puede ser rica en residuos orgánicos al ser devuelta.	7	8	56	Riesgo importante
Sólidos en suspensión no permiten la llegada de la luz al fondo del lago, afectando el proceso trófico en las zonas profundas.	7	10	70	Riesgo Crítico
No se puede homogeneizar el proceso de piscicultura, por lo que es difícil hacer un control de nutrientes general.	9	10	90	Riesgo Crítico

Resultados de las imágenes Sentinel-2 procesadas con algoritmo OC2

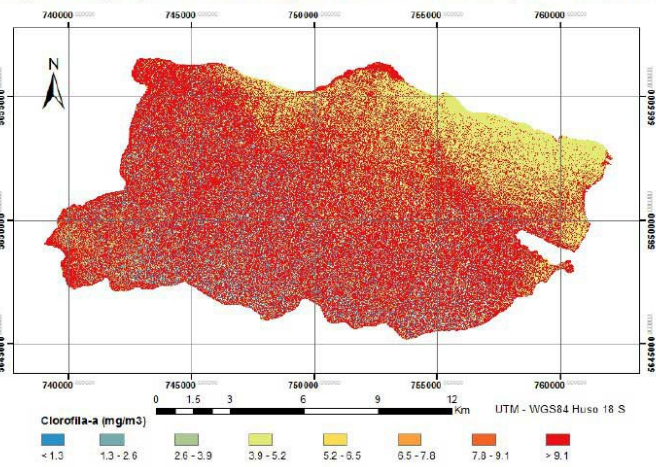
Una vez aplicado el algoritmo OC2 a las distintas imágenes Sentinel-2, se establecieron 8 marcas de clase para distintos niveles de concentración de clorofila-a en intervalos de 1.3 mg/m³; el motivo de esta clasificación es para poder establecer un mismo punto de comparación para todas las imágenes procesadas. Además, con el intervalo utilizado, se pueden distinguir 3 estados tróficos a partir de la concentración de clorofila-a, según la Tabla 2.2: oligotrófico (Chl-a < 2.5 mg/m³), mesotrófico (2.5 mg/m³ < Chl-a < 8 mg/m³) y eutrófico (Chl-a > 8 mg/m³).

Figura: Imagen procesada con algoritmo OC2. Fecha de captura: 21-10-2017



Fuente: Elaboración propia en ArcMap versión 10.5

Figura: Imagen procesada con algoritmo OC2. Fecha de captura: 25-07-2017



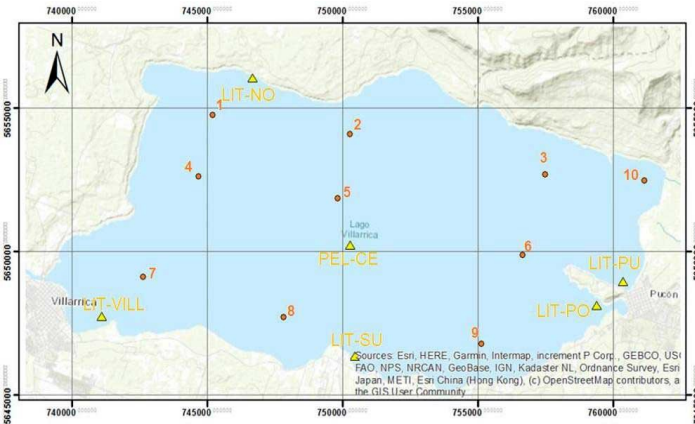
Fuente: Elaboración propia en ArcMap versión 10.5

Concentración de clorofila-a en áreas de vigilancia, utilizando algoritmo OC2

Parámetros	Unidad	Criterio	Área de Vigilancia							
			PEL	LIT-Puñ	LIT-Puñón	LIT-Morte	LIT-Villarrica	LIT-Sur		
			Promedio anual	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	
Clorofila "a"	µg/L	Máximo	≤ 6	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10		

Área Vigilancia	07-03-2017	25-07-2017	21-10-2017	05-12-2017	05-03-2018	03-06-2018	13-09-2018	27-12-2018	05-03-2019	15-06-2019	11-09-2019
PEL-CE	2.69	4.75	0.54	1.47	1.68	3.36	0.91	1.04	1.07	8.00	0.57
LIT-PU	4.53	4.43	1.01	2.44	2.70	5.72	1.80	2.27	3.22	16.45	2.85
LIT-NO	4.85	20.50	2.05	1.71	1.94	12.24	1.43	1.65	1.98	10.05	0.52
LIT-VI	3.43	5.44	1.49	2.98	2.57	4.53	0.99	1.54	2.07	10.98	1.03
LIT-SU	2.31	9.06	1.15	1.23	2.36	7.03	0.71	1.23	1.74	9.06	1.65
LIT-PO	3.09	10.89	2.43	1.68	3.01	1.96	1.90	1.57	1.43	7.98	0.89

Áreas de vigilancia y distribución de puntos para muestreo de clorofila-a

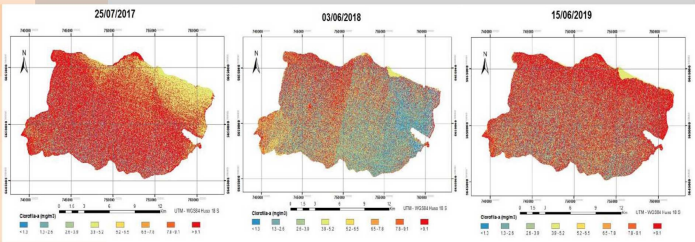


Muestras estimadas con OC2 en puntos auxiliares

Punto	Clorofila-a estimada con algoritmo OC2										
	07-03-2017	25-07-2017	21-10-2017	05-12-2017	05-03-2018	03-06-2018	13-09-2018	27-12-2018	05-03-2019	15-06-2019	11-09-2019

1	3.89	23.24	1.59	1.99	2.35	24.27	0.84	1.29	1.97	9.87	0.85
2	4.10	63.98	1.33	1.40	3.01	1.44	1.10	1.07	0.88	33.25	0.76
3	3.75	42.86	0.65	1.71	2.87	1.65	0.47	1.46	2.16	7.12	1.37
4	4.27	2.96	1.41	3.38	1.05	3.38	1.18	0.98	1.61	3.43	0.41
5	4.43	4.43	1.32	2.36	1.42	22.28	0.22	0.91	2.30	1.42	0.41
6	2.63	18.75	1.07	1.57	2.52	0.74	0.93	1.50	1.65	3.85	1.00
7	2.15	19.09	0.90	2.87	1.98	2.99	1.15	1.72	1.20	2.24	1.48
8	1.82	14.28	0.44	1.74	2.37	5.35	0.46	1.24	1.89	6.99	1.87
9	5.12	3.93	0.58	1.98	1.46	1.72	1.26	1.14	1.27	1.44	0.95
10	7.11	4.43	1.03	2.12	1.76	0.48	0.74	1.18	1.74	0.07	1.62

ANÁLISIS DE RESULTADOS



Se observa claramente cómo los niveles de clorofila-a superan los 5 mg/m³ en general, por lo que el lago se puede clasificar como eutrófico. El sector noreste, en las cercanías de la localidad de Quelhue y el sur de Pucón son las zonas con menor concentración de clorofila-a en comparación al resto del lago.

Acercándose a la época invernal, comienzan nuevamente a aumentar notablemente las concentraciones de clorofila-a, en donde el lago pasa a estar en una mezcla entre las condiciones mesotrófica y eutrófica, las cuales se ven acentuadas por la unión de las imágenes Sentinel-2. Las mayores concentraciones se encuentran en el sector poniente del lago Villarrica. Probablemente se deba a un evento de proliferación que está comenzando. Al igual que en los años 2018 y 2017, se muestra que en el año 2019 también se sigue la misma tendencia a un gran aumento de la concentración de clorofila-a, en donde el lago Villarrica se encuentra en una condición eutrófica. Dado que se presenta el mismo fenómeno en la época invernal en tres años, se presume que debe haber algún fenómeno que favorezca las condiciones para que ocurran estos eventos de proliferación.

Conclusiones

Se concluye que se cumplió con el objetivo principal propuesto, ya que se logró establecer las posibles fuentes de contaminación mediante técnicas de teledetección; en particular, se logró aplicar un modelo estimador de clorofila-a para imágenes Sentinel-2.

Junto con ello, se concluye que resulta viable la utilización de medidores de riesgo para establecer la determinación de las posibles fuentes de contaminación que afectan al lago Villarrica. Se concluye que, para obtener resultados óptimos, se debe procurar utilizar información real sobre las denuncias e información geoespacial que permita visualizar de mejor forma los riesgos a identificar.

A partir de la cantidad de expedientes del Servicio Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (figuras 5.1 y 5.2) y, en conjunto con los resultados obtenidos de la matriz de riesgo confeccionada, en base a estos resultados se concluye que la industria de acuicultura es la que más afectación tiene en las aguas del lago Villarrica, ya que puede tener gran importancia en la modificación del ecosistema presente en el acuífero y, de la misma forma, puede tener una afectación directa a la salud de las personas que hacen uso público del lago, situación que resulta crítica dada la alta afluencia de público al sector debido a sus atractivos y actividades turísticas.

Con respecto al algoritmo estimador de clorofila-a, se

concluye que su utilización en la cuenca del lago Villarrica resulta óptima dada su condición trófica. Como se explicó en el documento de Pereira-Sandoval (23), los resultados de sus calibraciones consideraban óptimo el uso de este algoritmo en cuerpos de agua oligotróficos ([chl-a] < 10 mg/m³), sin embargo, se debió realizar un proceso de ajuste del algoritmo; teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que el algoritmo OC2 puede ser aplicado en imágenes Sentinel-2 sobre cuerpos de agua que tengan similares condiciones tróficas al lago Villarrica, considerando que se debe verificar la concentración del pigmento estimada en comparación con muestras in situ. Lo anterior se respalda además del error medio absoluto obtenido (0.33 mg/m³), lo que resulta bastante tolerable considerando los distintos intervalos en los que se clasifican las condiciones tróficas según la OCDE (Tabla 2.1)

Para el algoritmo estimador de profundidad del disco de Secchi (ZSD), se concluye que su utilización en el lago Villarrica no resulta óptima, presuntamente por la baja cantidad de muestras in situ para el proceso de calibración, con los cuales que se demostró estadísticamente que no hubo una buena correlación lineal de datos entre la profundidad estimada y la de las muestras en campo. Se presume que dicho estimador podría resultar óptimo para utilizar en aguas más turbias, ya que la mejor correlación de puntos se dio con los valores más bajos de transparencia del agua.

Se concluye además que, para aplicar correctamente técnicas de teledetección en imágenes satelitales, se debe tener en cuenta el nivel en el que se encuentra la imagen. Es decir, resulta un procedimiento fundamental la realización de las correcciones atmosféricas para obtener valores de reflectancia a nivel de piso, ya que al no realizar esta operación los valores de reflectancia de los objetos serán distintos, lo que puede conllevar a errores tanto en la interpretación de los datos como en las cuentas digitales de los píxeles de la imagen procesada.

Se concluye que la utilización de sensores remotos resulta óptima para el monitoreo de fenómenos de proliferación de microalgas tanto en aguas continentales como en aguas oceánicas, siempre y cuando se ejecuten las técnicas de sensores remotos apropiadas para el fenómeno a observar.

Finalmente se concluye que, con la cantidad de datos a la que se pudo acceder, los objetivos de esta investigación se cumplieron para lo correspondiente al algoritmo estimador de clorofila Ocean Color 2, sin embargo, no así para el estimador de profundidad del disco de Secchi (ZSD), probablemente por una cantidad inapropiada de datos para su calibración.

Recomendaciones

Se recomienda tener una cantidad de muestras mayor en lago para efectos de una calibración óptima de los modelos estimadores a utilizar. Por este motivo es que se propone la instalación de una cuadrilla de boyas que realicen mediciones de parámetros fisicoquímicos de manera periódica, para así tener mejor control y conocimiento respecto a la condición trófica del lago.

Se propone la imposición de un impuesto a aquellas empresas que no dispongan de información con respecto a las Normas de Calidad Ambiental, utilización de recursos hídricos y los aportes de nutrientes que realicen. Una vez se demuestre el cumplimiento de dichos estándares, se reclasificarán según su riesgo y podrán seguir con su funcionamiento normal, siempre y cuando los parámetros no superen las normas establecidas.

Se propone relacionar las concentraciones de clorofila-a con condiciones geográficas tales como pendientes, profundidad, estudios gravimétricos.

Otro aspecto importante para considerar en las imágenes satelitales es la presencia de nubes sobre la zona del lago; al tratarse de una zona al sur de Chile, donde es frecuente encontrar cielos nublados, se debe tomar en cuenta que no siempre se tendrá una completa disponibilidad de imágenes que permitan visualizar la superficie terrestre con sensores pasivos.

Tomando en cuenta las altas concentraciones de clorofila-a en las imágenes de invierno, para corroborar que los datos del algoritmo estimador son válidos se recomienda la utilización de un espectro radiómetro de campo; teniendo en conocimiento la fecha y hora de captura de imagen

del satélite, se utilizaría este instrumento para calibrar los niveles de radiancia en terreno con las radiancias remotamente censadas.

Junto con ello, se recomienda realizar campañas de recolección de muestras

in situ en períodos de invierno, a fin de comprobar y corroborar lo estimado por el algoritmo sobre las altas concentraciones de clorofila-a.

Con respecto a los algoritmos estimadores, tanto de clorofila-a como de profundidad de disco de Secchi, se propone la utilización de estos mismos en aguas con distintas condiciones tróficas para una posible comparación de los comportamientos de estos modelos y sus resultados. De igual forma, se invita al

mejoramiento y difusión de estas herramientas, ya que sirven como complemento para el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos relacionados con la calidad de las aguas y, por ende, cualquier situación anómala que dé indicios de contaminación en cuerpos de aguas continentales..

Bibliografía

1- LUGO, J. Diccionario geomorfológico. 1ª ed. México: Ciudad Universitaria, 2011.

2- SCHOOLMEESTER, T., JOHANSEN, K.S., ALFFHAN, B., BAKER, E., HESPIG, M. y VERVIST, K. Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. 1ª ed. UNESCO y GRID-Arendal, 2018.

3- SERNAGEOMIN. Chile: Territorio Volcánico. 1ª ed. Chile: Santiago, 2018.

4- MOP, Dirección General de Aguas. Diagnóstico de la Condición Trófica de Cuerpos Lacustres utilizando Nuevas Herramientas Tecnológicas. Chile: Santiago, 2014. Disponible en:
<https://snia.mop.gob.cl/sad/LGO5517.pdf>

5- GREEN, N. R, Monitoring spatial and temporal water quality changes in Iowa lakes using airborne hyperspectral imagery, 2005. Disponible en:
<https://scholarworks.uni.edu/etd/583>

6- Chilevisión Noticias, Lago Villarrica en peligro: La depredación indiscriminada de humedales por parte de proyectos inmobiliarios. En: Chilevisión Noticias. Chilevisión, 07-03-2019 [Fecha de consulta 17-09-2019]. Disponible en:
https://www.chvnoticias.cl/reportajes/lago-villarrica-peligro-inmobiliarias_20190307/

7- ESCOBAR, M. Identificación de Regiones Contaminadas en la Superficie del Lago Villarrica con base en Imágenes Sentinel en el período 2017-2018. Chile: Los Ángeles, 2019. Universidad de Concepción.

8- Meganoticias. Villarrica y Llanquihue: Los lagos contaminados del sur de Chile. En: Meganoticias. Mega, 26-03-2018 [Fecha de consulta 17-09-2019]. Disponible en:
<https://www.mega.cl/noticias/nacional/219504-villarrica-y-llanquihue-los-lagos-contaminados-del-sur-de-chile.html>

9- BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Referencias: Contaminación en el Lago Villarrica. Chile, 2018. [Fecha de consulta: 23-09-2019]. Disponible en: https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/detalle_documento.html?id=74039

10- MOP, Dirección General de Aguas. 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. Chile: Santiago, 2018. [Fecha de consulta: 24-09-2019]. Disponible en: <http://documentos.dga.cl/LGO5740.pdf>

11- SABINS, F. F. Remote sensing: principles and interpretation / Floyd F. Sabins -3ra ed. ©1997

12- O'REILLY, J. E. Ocean color chloro-phyll-a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, 2000.

13- MUELLER, J. L. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, K (490), using water-leaving radiances at 490 and 555 nm. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, 2000

14- ALIKAS, K & KRATZER, S. Improved retrieval of Secchi depth for optically-complex waters using remote sensing data. Ecological Indicators, 2017

15- CLAVERO, J. & MORENO, H. Ignimbritas Licán y Pucón: Evidencias de erupciones explosivas andesítico-basálticas postglaciales del volcán Villarrica, Andes del Sur, 39°25' S. In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas, Vol. 1, p. 250-254. Concepción, 1994.

16- AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, [En línea] [Fecha de consulta: 20-09-2019]. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

17- CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetección espacial. 2ª ed. Ediciones RIALP, S.A., Madrid: 1995. Disponible en: <http://pdfhumanidades.com/sites/default/files/apuntes/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>

18- MORENO, D. QUINTERO, J. LÓPEZ, A. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. 2010 [En línea] [Fecha de Consulta: 3/12/2019]. Disponible en: <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>

19- ESCUELA DE INGENIERÍA Y MEDIO AMBIENTE [En línea] [Fecha de consulta: 15/12/2019]. Disponible en: <http://eimaformacion.com/calculo-del-estado-trofico/>

20- NOWAKOWSKI, T. Arianespace successfully launches europe's sentinel-2A earth observation satellite. 2015 [En Línea][Fecha de consulta: 29/09/2019] . Disponible en: <https://www.spaceflightinsider.com/missions/earth-science/arianespace-successfully-launches-europes-sentinel-2a-earth-observation-satellite/>

21- VAN OENE, J. Esa's sentinel 2B spacecraft steps into the Spotlight. 2016 [En línea] [Fecha de Consulta: 29/09/2019]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20161212103937/http://www.spaceflightinsider.com/organizations/esa/esas-sentinel-2b-spacecraft-steps-spotlight/>

22- GIARDINO, C., M. PEPE, P. A. BRIVIO, P. GHEZZI & E. ZILIOLI. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. Science of the Total Environment, 2001. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969700006926>

23- PEREIRA-SANDOVAL, M. et al. Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2. 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332033271_Calibration_and_validation_of_algorithm_ms_for_the_estimation_of_chlorophyll-a_concentration_and_secchi_depth_in_inland_waters_with_Sentinel-2

24- BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Hidrografía de la región de la Araucanía. [En línea] [Fecha de Consulta: 15/10/2019]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/hidrografia.htm>

25- DAVIS. M., MASTEN S. Ingeniería y ciencias ambientales, McGraw-Hill INTERAMERICANA S.A. de C.V, 2005. [Fecha de Consulta: 17/10/2019]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/337233673/Ingenieria-y-Ciencias-Ambientales-Mackenzie-L-Davis-y-Susan-J-Master-Mc-Graw-Hill>

26- UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. ¿Qué es el tiempo geológico? [En línea] [Fecha de Consulta: 18/10/2019]. Disponible en: <http://www.geologiauach.cl/contenido.php?sec=24&cont=37>

- 27- ACOSTA, M. Qué es la clorofila y sus tipos. [En línea] [Fecha de consulta: 21/02/2020]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-clorofila-y-sus-tipos-2579.html>
- 28- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Informe técnico de antecedentes para declarar la cuenca del lago Villarrica como zona saturada por clorofila "a", transparencia y fósforo disuelto. [En línea] [Fecha de Consulta: 18/10/2019]. Disponible en: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2018/proyectos/2_Informe_Tecnico_declaratoria_y_Anexos.pdf
- 29- SEREMI DE LA REGIÓN DE LA ARAUCANIA, UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA. Análisis y evaluación de medidas de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para incorporar al plan de descontaminación del lago Villarrica. 2019 [Fecha de Consulta 24/09/2019]. Disponible en: http://www.sustentapucon.cl/wp-content/uploads/2019/11/Informe_Final_25-04-2019-1.pdf
- 30- FERRE, M. FEIR 40: Modelos de Regresión. 2019 [En línea] [Fecha de Consulta: 21/11/2019]. Disponible en: <http://gauss.inf.um.es/feir/40/>
- 31- SANGAKU, S.L. Media aritmética. 2019 [En línea] [Fecha de Consulta: 21/11/2019]. Disponible en: <https://www.sangakoo.com/es/temas/media-aritmetica>
- 32- CHAI, T. DRAXLER, R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literatura .2014 [En línea] [Fecha de consulta: 02/12/2019] Disponible en: <https://www.geosci-model-dev.net/7/1247/2014/gmd-7-1247-2014.pdf>
- 33- VILLARRICA. Flora y fauna. [En línea] [Fecha de Consulta: 24/11/2019] Disponible en : <https://www.visitvillarrica.cl/nuestra-ciudad/en-los-rios-y-lagos-1517152524/>
- 34- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Tercer Informe de calidad: "NORMAS SECUNDARIAS DE CALIDAD AMBIENTAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA" [En línea] [Fecha de consulta 12/10/2019] Disponible en: http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=62a3bb83-6955-4d72-8a69-a9d06418bf9a&fname=3%C2%BA%20Informe%20de%20Calidad%20-%20Villarrica%20FINAL_Marzo-2019.pdf&access=public
- 35- BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. DECLARA ZONA SATURADA POR CLOROFILA "A", TRANSPARENCIA Y FÓSFORO DISUELTO, A LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA. 2017 [En línea] [Fecha de Consulta: 08/10/2019] Disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1121466>
- 36- CARI, L. Estadística para la investigación, Sesión 5. 2011. [En línea] [Fecha de Consulta: 02/12/2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/zarlenin/estadistica-para-la-investigacin-sesin5-version-mejorable>