



Universidad de Concepción

FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN ACUÁTICA EN AGUAS CONTINENTALES

Lien Rodríguez / Roberto Urrutia / Daniela Rivera
José Luis Arumí / Jongel Durán Llacer



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Fundamentos de la teledetección acuática en aguas continentales.

Lien Rodríguez, Roberto Urrutia, Daniela Rivera,

José Luis Arumí y Longel Durán Llacer.

Abril 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN ACUÁTICA EN AGUAS CONTINENTALES

Lien Rodríguez / Roberto Urrutia / Daniela Rivera
José Luis Arumí / Iongel Durán Llacer

SERIE COMUNICACIONAL CHRIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Lien Rodríguez

Ingeniera Informática.
Doctora en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Profesora Asistente Facultad de Ingeniería,
Arquitectura y Diseño, Universidad San Sebastián.
Colaboradora CRHIAM.



Roberto Urrutia

Biólogo.
Doctor en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Profesor Titular Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Daniela Rivera

Ingeniera Civil Ambiental.
Doctora (c) en Recursos Hídricos,
Universidad de Concepción.



José Luis Arumí

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy.
Major on Engineering.
Profesor Titular Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Jongel Durán Llacer

Geógrafo.
Universidad de La Habana, Cuba.
Doctor en Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Postdoctoral asociado a Hémera
"Centro de Observación de la Tierra", Universidad Mayor.

RESUMEN

Recientemente, con el desarrollo de las tecnologías y las comunicaciones se ha potenciado la teledetección como herramienta útil aplicada al monitoreo de los sistemas acuáticos a nivel global. Los ecosistemas acuáticos continentales representan un alto valor en materia del recurso hídrico. El monitoreo de parámetros de calidad del agua a través de imágenes satelitales continua en proceso de mejora y es cada vez más utilizado. En Chile se han realizado en los últimos años investigaciones con los satélites predominantemente Landsat, Sentinel y Modis, en función de las variables involucradas en el estudio. En la presente serie comunicacional, se muestran los principios básicos en el área de teledetección y su potencial aplicación en ecosistemas acuáticos chilenos. Todo ello con el objetivo de aportar en el levantamiento de información relevante para la gestión hídrica en la toma de decisiones en futuras políticas públicas.

INTRODUCCIÓN

La teledetección ha sido definida de muchas maneras. Incluye tanto la fotografía aérea tradicional, las mediciones geofísicas, como los estudios de los campos gravitatorios y magnéticos de la Tierra, e incluso los estudios sísmicos y de sonar (Antoine *et al.*, 2020). Sin embargo, en el contexto de la era de las Tecnologías y las Comunicaciones (TIC), el término teledetección suele implicar mediciones digitales de la energía electromagnética, a menudo en longitudes de onda que no son visibles para el ojo humano (Gupta, 2017). Una gran ventaja de la teledetección es que el producto final suele ser una imagen de la superficie terrestre que podemos visualizar e interpretar como si fuera una fotografía analógica. Por tanto, muchos de los términos y conceptos (por ejemplo, brillo, contraste, color, intensidad) nos resultan familiares y tenemos una intuición física de su significado.

Muy a menudo, el objetivo final de un estudio de teledetección es simplemente ser capaz de ver suficientemente bien alguna característica o los cambios que se producen en ella. Así, la definición de un buen resultado puede ser tan subjetiva como decidir cuál de una serie de fotografías es la mejor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las imágenes de teledetección son algo más que simples fotografías digitales, y hay que entender bien su significado físico.

Las técnicas de teledetección miden la interacción de la superficie de la Tierra (o mejor, de sus metros superiores) con la energía electromagnética del sol y, por tanto, son intrínsecamente una forma de información geográfica (Jafarbiglu *et al.*, 2022). De ahí que el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para almacenar y mostrar información de teledetección sea tan común que los términos teledetección y SIG son casi sinónimos. El uso y la generación de modelos digitales de elevación es un ejemplo de la fusión de estos dos campos, cuando están debidamente referenciados geográficamente (por ejemplo, se determina cuidadosamente la ubicación de cada medición) y las imágenes.

Recientemente se ha utilizado la teledetección para monitorear la óptica hidrológica de sistemas acuáticos diversos (Gholizadeh *et al.*, 2016; Elhag, *et al.*, 2019; Sagan *et al.*, 2020). Existe un mayor número de estudios de parámetros de calidad del agua en costas y océanos que en aguas continentales. Además, la mayoría de los estudios que vinculan teledetección en aguas interiores del continente son desarrollados en el hemisferio norte.

FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN

Existen diversos sensores que captan la energía proveniente de las ondas electromagnéticas de distintas cubiertas, algunos se clasifican como pasivos cuando reciben la energía de una fuente exterior a ellos (ej: sol); activos cuando son capaces de emitir su propio haz de energía (ej: radar). A continuación, se diferencian algunos conceptos que detallan características de los sensores para entender posteriormente sus diferencias.

Resolución del sensor

La resolución se define como la capacidad de todo un sistema de teledetección, incluidas las antenas de los objetivos, la pantalla, la exposición, el procesamiento y otros factores, para ofrecer una imagen nítida. La resolución de un sistema de teledetección puede ser de diferentes tipos.

- **Resolución espectral:** de un instrumento de teledetección (sensor) está determinada por los anchos de banda de la radiación electromagnética utilizada por los canales espectrales del sensor. Una alta resolución espectral se consigue con anchos de banda estrechos que, en conjunto, proporcionan una firma espectral más precisa para objetos discretos que los anchos de banda amplios.

- **Resolución radiométrica:** viene determinada por el número de niveles digitales discretos en los que se pueden dividir las señales.
 - **Resolución espacial:** en términos de las propiedades geométricas del sistema de formación de imágenes, suele describirse como el campo de visión instantáneo (IFOV). El IFOV se define como el ángulo de visión máximo en el que un sensor puede detectar eficazmente la radiación electromagnética.
 - **Resolución temporal:** está relacionada con la cobertura repetitiva de un objetivo específico por parte del sistema de teledetección. La resolución temporal del satélite Landsat 7/8 es de 16 días.
-

PLATAFORMAS, SATÉLITES Y SENSORES

Un sistema ideal de teledetección consiste en:

- 1) Una fuente de energía uniforme. Esta fuente proporcionará energía en todas las longitudes de onda, con un nivel de salida alto, constante y conocido, independientemente del tiempo y el lugar, y puede ser pasiva (el Sol) o activa (un sistema de radar).
- 2) Una atmósfera que no interfiera. Se trata de una atmósfera que no modificará la energía de la fuente en ningún modo activo o pasivo, tanto si la energía está de camino a la superficie terrestre como si procede de ella. De nuevo, lo ideal es que esto se mantenga independientemente de la longitud de onda, el tiempo, el lugar y la geometría de observación.
- 3) Una serie de interacciones únicas entre energía y materia en la superficie terrestre. Estas interacciones generarán una radiación reflejada y/o emitida, no sólo específica con respecto a la longitud de onda, sino también conocida por ser invariable y única para cada tipo de característica de la superficie terrestre de interés.
- 4) Un súper sensor. Se trata de un sensor altamente sensible a todas las longitudes de onda, que proporciona datos espacialmente detallados sobre la radiación absoluta (o reflectancia) de una escena (en función de la longitud de onda), a lo largo de todo el espectro. Este supersensor será sencillo y fiable, no requerirá prácticamente energía ni espacio, y su funcionamiento será preciso y económico.

- 5) Un sistema de tratamiento de datos en tiempo real. En este sistema, en el instante en que se genere la respuesta de radiancia (o reflectancia) frente a la longitud de onda para un elemento del terreno, se procesará en un formato de imagen interpretable y se reconocerá como único para el elemento del terreno concreto del que procede. Este procesamiento se realizará casi instantáneamente (en tiempo real), proporcionando información oportuna. Debido a la naturaleza consistente de las interacciones energía/materia, no habrá necesidad de datos de referencia en el procedimiento analítico. Los datos derivados proporcionarán información sobre el estado biogeofísico de cada característica de interés.
- 6) Múltiples usuarios de datos. La comunidad de usuarios está formada por personas que tienen un amplio conocimiento tanto de la tecnología de adquisición de imágenes de RS (sensoreo remoto) como de las técnicas de interpretación y análisis. El mismo conjunto de datos ofrecerá una inteligencia diferente a los distintos usuarios, debido a su amplio contenido de información sobre determinados recursos terrestres.

Misión Landsat

Las misiones Landsat están compuestas por nueve satélites operativos de observación de la Tierra que utilizan sensores remotos para recoger datos e imágenes de nuestro planeta como parte del Programa Nacional de Imágenes de la Tierra (NLI) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

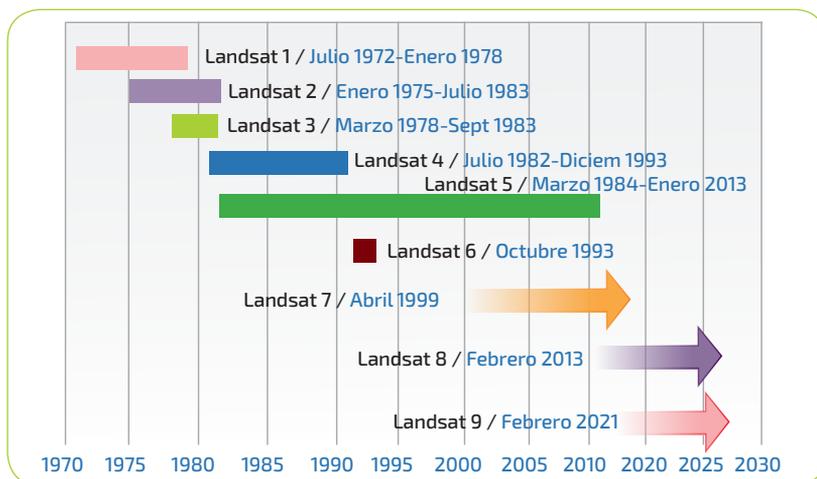


Figura 2.

Misiones Landsat 1-9. Fuente: Elaboración propia

Debido a su resolución temporal y espacial (ver tabla) es una de las misiones más exitosas, además se encuentran operativos los tres últimos satélites lanzados, por lo tanto, en función del periodo a analizar entre ellos pueden ser complementarios.

Tabla 1.

Comparación entre características de satélites en sistemas continentales.

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Bandas Espectrales
Landsat 7	ETM	15,30, 60 m	16 días	8 (azul-verde, verde, roja, IR reflejada y termal, pancromática)
Landsat 8	OLI	15, 30 m	16 días	9 (azul-verde, verde, roja, IR cercana, IR reflejada y termal, pancromática)
Terra	MODIS	250, 300 m y 1 km	2 veces al día	36 (roja, azul, IR, NIR,MIR)
Aqua	MODIS	250, 300 m y 1 km	2 veces al día	36 (roja, azul, IR, NIR,MIR)

Misión Copernicus Sentinel

La misión Copernicus Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) está compuesta por siete satélites enfocados a la observación de distintos elementos sobre la superficie terrestre y acuática. Dentro de los sensores que son comúnmente utilizados para aplicaciones acuáticas está Sentinel 3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) y Sentinel 2 MultiSpectral Instrument (MSI). En particular Sentinel 2 MSI se ha utilizado preferentemente para las aguas continentales debido a su alta resolución espacial de 10 m (para la mayoría de las bandas en el espectro visible), lo que permite el monitoreo de lagos y lagunas de menor tamaño, ~ 900 m² (Ogashawara *et al.*, 2021). Por otro lado, una de las ventajas de esta misión es que está compuesta por dos constelaciones que posibilita la observación terrestre a una resolución temporal a 5 días e incluso 2-3 días para latitudes medias (ESA, 2015). La figura que se muestra a continuación contiene las fechas del lanzamiento de los distintos satélites, así como las misiones programadas a futuro.

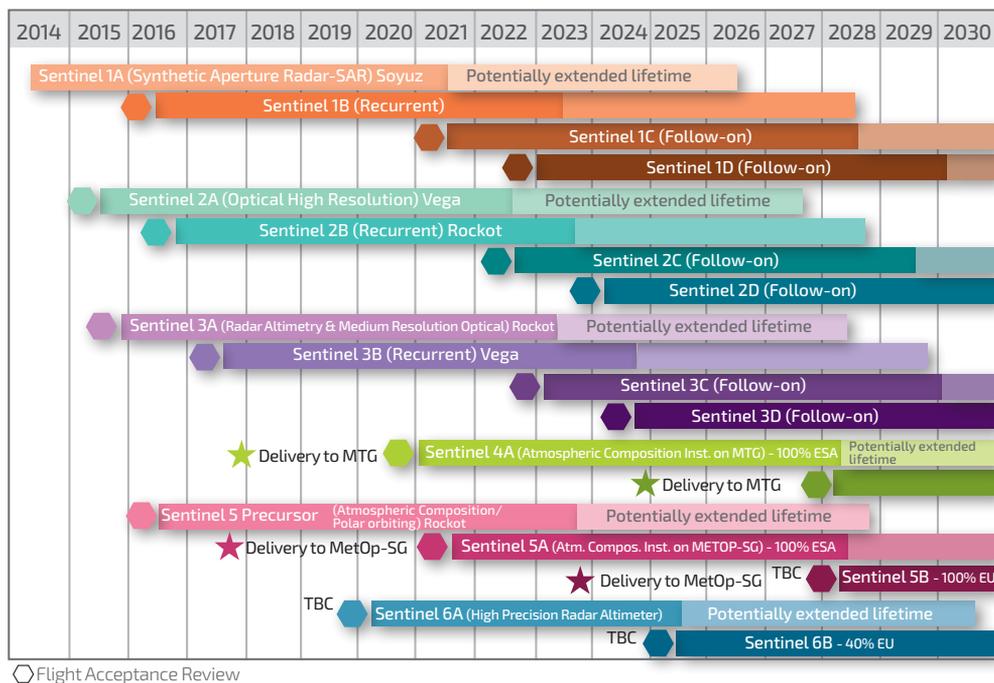


Figura 3.

Fecha de lanzamiento de satélites Sentinel pasados y futuros.

Fuente: Copernicus Sentinel.

Las principales características del sensor Sentinel 3 OLCI y 2A/B MSI se describen a continuación:

Tabla 2.

Satélite, sensor, resolución espacial y temporal, y bandas espectrales de los sensores de la misión Copernicus Sentinel con aplicaciones acuáticas.

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Bandas Espectrales
Sentinel 2A/B	2A/B	10, 20, 60 m	5 días	13 (aerosol, azul, verde, roja, red-edge 1, red-edge 2, red-edge 3, infrarrojo cercano 1, infrarrojo cercano 2, vapor de agua, cirrus, infrarrojo de onda corta 1, infrarrojo de onda corta 2)
Sentinel 3	OLCI	300, 1200 m	2 días	21 (0a1 - 0a21)

TELEDETECCIÓN EN AGUAS CONTINENTALES

Las propiedades ópticas son el vínculo entre el sistema acuático y la información que puede obtenerse por teledetección. Las mismas están condicionadas por los distintos procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el medio acuático.

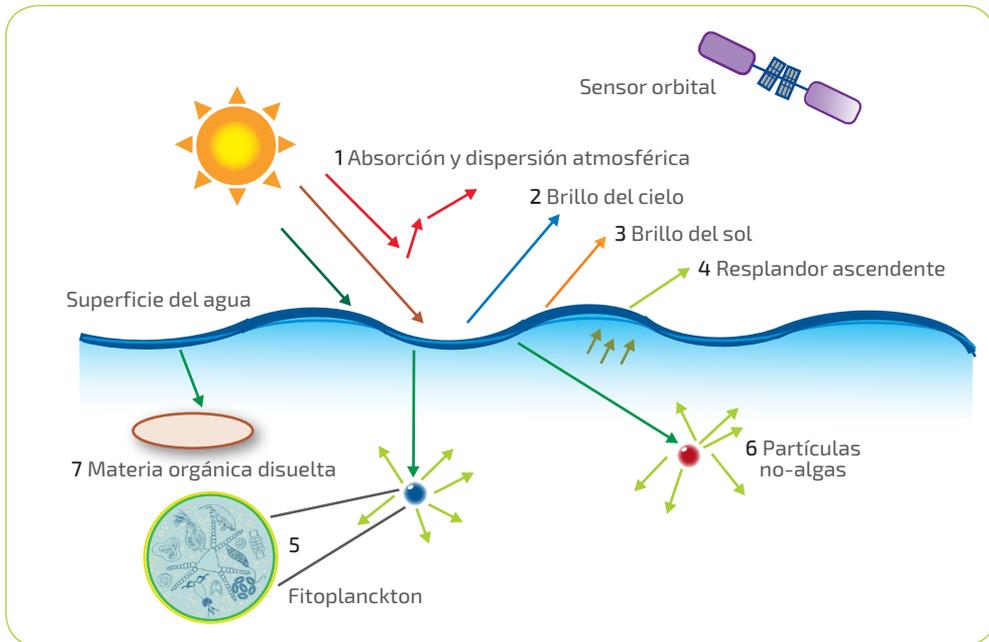


Figura 4.

Trayectorias del Haz luminoso a través de la interfaz aire-agua.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura se muestran las trayectorias que recorren la luz antes de ser captada por los sensores. Primero, algunos fotones son absorbidos o dispersados por los gases o aerosoles atmosféricos. Los fotones que alcanzan la superficie del agua se reflejan o transmiten al agua. Algunos fotones que ingresan al agua son absorbidos o dispersados por los componentes del agua (fitoplancton, materia orgánica disuelta coloreada, partículas minerales, moléculas de agua). Luego, parte de la luz dispersada hacia arriba por la atmósfera, la superficie de agua y por la columna de agua llegan a los sensores satelitales.

Ventajas del uso de sistemas de teledetección

Los datos a base de percepción remota ofrecen una cobertura casi global comparada con mediciones puntuales espacialmente no uniformes en la superficie terrestre. Además, brindan datos donde no existe información disponible en lugares remotos o de difícil acceso. Los modelos en sistemas terrestres integran observaciones en la superficie terrestre y de la percepción remota, y ofrecen parámetros frecuentes uniformemente cuadrículados de datos de los recursos hídricos. Los datos son gratis y se encuentran disponibles en línea, como en el USGS Earth Explorer, Copernicus Open Access Hub con los catálogos de Landsat y Sentinel, respectivamente, o el Sentinel Hub EO Browser que contiene los catálogos de imágenes satelitales de libre distribución.

Cada vez más los estudios de sistemas acuáticos continentales involucran técnicas de teledetección. Debido a las ventajas señaladas anteriormente, el monitoreo remoto se ha convertido en una herramienta. En Chile, se reportan en los últimos años un mayor número de publicaciones en el área.

USO DE IMÁGENES SATELITALES PARA LA OBSERVACIÓN DE LAGOS DE CHILE: EJEMPLO DEL LAGO VILLARRICA

El monitoreo tradicional es utilizado para conocer las características químicas, físicas y biológicas de las aguas continentales. Estas prácticas son esenciales para tomar decisiones acertadas, con la finalidad de proteger los cuerpos de agua y para alertar sobre problemas actuales y emergentes (Behmel *et al.*, 2016).

Sin embargo, el monitoreo generalmente se ve restringido por recursos presupuestarios y humanos, y por las dificultades geográficas o climáticas que condicionan el acceso a un número importante de lagos y lagunas. A causa de esto, el número de estaciones que son utilizadas durante las campañas de terreno para la medición de parámetros de calidad de aguas son limitadas. Adicionalmente, estas estaciones suelen ser fijas para contar con una serie de datos temporales, lo que implica que las estaciones no siempre representan lo que está ocurriendo en zonas aledañas (Schaeffer *et al.*, 2013; Gholizal deh *et al.*, 2016).

En este contexto, las imágenes satelitales tienen la ventaja de poder extraer información sobre la superficie, donde uno de los parámetros con mayor relevancia es la clorofila-a, un bioindicador para estimar la biomasa del fitoplancton y el estado trófico de los cuerpos de agua (Rodríguez-López *et al.*, 2021). Esto permite evidenciar el potencial de esta herramienta con la posibilidad de ser utilizada para la observación complementaria al monitoreo tradicional (Yang *et al.*, 2022).

Para ilustrar esta situación se toma como ejemplo el Lago Villarrica, donde en la Figura 5 se muestran dos imágenes obtenidas a partir del satélite Sentinel 2 MSI del 15 y 25 de abril (2021). Adicionalmente, se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo asignadas para dar cumplimiento a la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) para el lago, promulgada a partir del DTO N°19/2013 del Ministerio de Medio Ambiente (MMA). De la NSCA se estableció la Resolución Exenta de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) N°671/2016 que define el Programa de Medición y Control de Calidad Ambiental (PMCCA) y emisión de informes de calidad. Para el caso del Lago Villarrica, la frecuencia mínima de monitoreo ha sido bianual, una vez durante primavera y otra en verano (MMA, 2020).

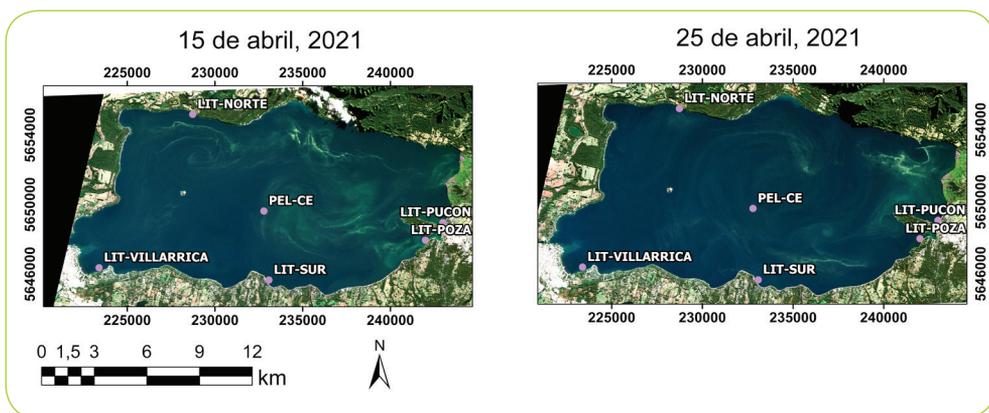


Figura 5.

Floraciones algales en el Lago Villarrica durante el 15 y 25 abril del 2021

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que las fechas de las imágenes corresponden a la época de otoño, es factible que estas no hayan sido captadas por el PMCCA, lo que permite inferir que no serán incorporadas en el 5to Informe de Calidad del Lago Villarrica. Este nuevo escenario permite comprobar que las floraciones algales también son comunes durante el otoño. Incluso, hay estudios que indican que el aumento de la temperatura a causa del cambio climático puede prolongar la duración de las floraciones. Esto último abre la discusión sobre la representatividad de los instrumentos de gestión ambiental dirigidos a evaluar, prevenir y mitigar las problemáticas ambientales en los lagos de Chile.

Como ya se mencionó en las secciones anteriores, las imágenes satelitales tienen la ventaja de extraer información a una escala temporal y espacial mayor a lo que se logra con un monitoreo tradicional. No solo es posible analizar cualitativamente las imágenes, sino que también es posible cuantificar, o estimar, las concentraciones de clorofila-a en el primer metro de la columna de agua (Ogashawara *et al.*, 2021). Para esto existen distintos métodos, donde el método empírico es el más común.

Esta técnica correlaciona la reflectancia obtenida de las bandas – o combinación de bandas – disponibles de los sensores con concentraciones obtenidas in situ. Si bien en Chile los estudios son escasos, han aumentado en los últimos años, donde esta metodología ha sido la privilegiada. De los estudios realizados desde el 2018 en adelante se puede mencionar el de Briceño *et al.* (2018), Huovinen *et al.*, (2019), Rodríguez-López *et al.* (2020) y (2021), Duran-Llacer *et al.* (2022) y Barraza-Moraga *et al.* (2022) y los lagos que se han estudiado en estas publicaciones con métodos empíricos son el Vichuquén, Panguipulli, Villarrica y Lanalhue.

Otra metodología que ha ganado interés a nivel internacional en los últimos años son los estudios que incorporan las máquinas de aprendizaje y el aprendizaje profundo para estimar parámetros de calidad de agua (Ahmed *et al.*, 2022; Cui *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2022). Por ejemplo, una clasificación supervisada como Random Forest permite seleccionar puntos de entrenamiento en las imágenes para generar un modelo.

La Figura 6. muestra una clasificación basada en imágenes en falso color (B8, B4 y B3 para Sentinel 2 MSI) para el desarrollo de un modelo que detecta un nivel severo, moderado y leve de una floración algal según parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021). Esta combinación de bandas permite identificar de color fucsia-rojo y rosados tenues a los niveles severos y moderados de una floración, respectivamente (Ogashawara *et al.*, 2021). A partir de los resultados de la aplicación del modelo, es posible calcular la extensión y severidad de estos fenómenos, entregando una visión más detallada de lo que está ocurriendo sobre la superficie en el Lago Villarrica.

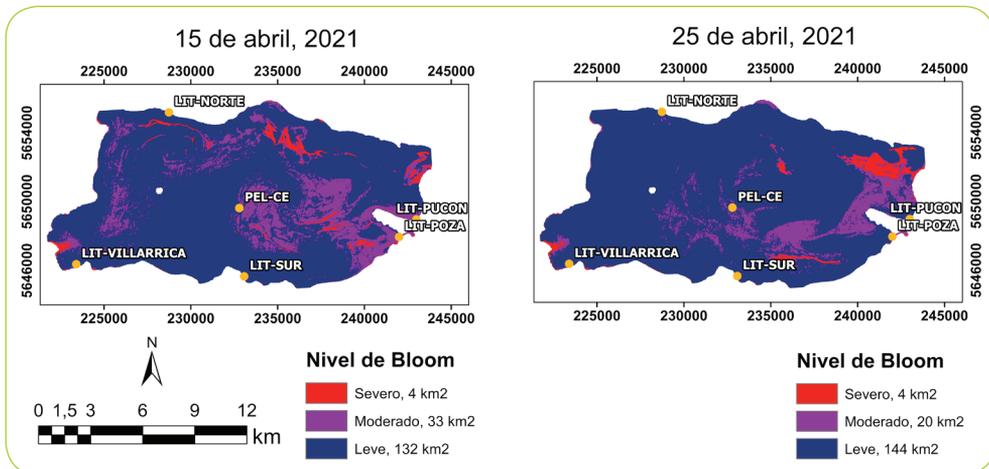


Figura 6.

Modelo para la detección de floraciones algales severas, moderadas y leves en el Lago Villarrica utilizando Random Forest para la clasificación. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La teledetección ha demostrado ser una valiosa herramienta para la adquisición de datos de la superficie terrestre, especialmente en los sistemas acuáticos continentales, donde ha mejorado la gestión de la calidad del agua. En Chile, su uso como complemento al monitoreo tradicional de parámetros limnológicos se ha incrementado en los últimos años, principalmente a través de los satélites Landsat, Sentinel y Modis. A pesar de estos avances, aún existen importantes lagunas que deben ser abordadas para aprovechar al máximo el potencial de la teledetección. Entre estas lagunas se encuentran la falta de una resolución espacial y temporal adecuada de los datos, la necesidad de desarrollar algoritmos específicos para cada región y la necesidad de mejorar la validación de los datos obtenidos por teledetección. A pesar de estas limitaciones, la teledetección sigue siendo una herramienta importante en la gestión de la calidad del agua en Chile, y su uso y desarrollo continuados pueden ayudar a subsanar estas deficiencias y mejorar la eficacia de la vigilancia de los sistemas acuáticos de agua dulce del país.

REFERENCIAS

- Ahmed, M.; Mumtaz, R.; Anwar, Z.; Shaukat, A.; Arif, O.; Shafait, F. A. 2022. Multi-Step Approach for Optically Active and Inactive Water Quality Parameter Estimation Using Deep Learning and Remote Sensing. *Water*, 14, 2112. <https://doi.org/10.3390/w14132112>
- Antoine, R., Lopez, T., Tanguy, M., Lissak, C., Gailler, L., Labazuy, P., & Fauchard, C. 2020. Geoscientists in the sky: Unmanned aerial vehicles responding to geohazards. *Surveys in Geophysics*, 41(6), 1285-1321.
- Barraza-Moraga, F., Alcayaga, H., Pizarro, A., Félez-Bernal, J., & Urrutia, R. 2022. Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in Lanalhue Lake Using Sentinel-2 MSI Satellite Images. *Remote Sensing*, 14(22), 5647. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs14225647>
- Behmel S, Damour M, Ludwig R, Rodriguez MJ. Water quality monitoring strategies - A review and future perspectives. 2016. *Sci Total Environ*. 15;571:1312-29. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.235. Epub 2016 Jul 8. PMID: 27396312.
- Cui, Y., Yan, Z., Wang, J. et al. 2022. Deep learning-based remote sensing estimation of water transparency in shallow lakes by combining Landsat 8 and Sentinel 2 images. *Environ Sci Pollut Res* 29, 4401-4413. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16004-9>
- Elhag, M., Gitas, I., Othman, A., Bahrawi, J., & Gikas, P. 2019. Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments, Saudi Arabia. *Water*, 11(3), 556.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298.
- Gholizadeh, M., Melesse, A., & Reddi, L. 2016. A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors*, 16(8), 1298. doi:10.3390/s16081298
- Gupta, R. P. 2017. *Remote sensing geology*. Springer.
- Jafarbiglu, H., & Pourreza, A. 2022. A comprehensive review of remote sensing platforms, sensors, and applications in nut crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106844.

- Mancuso, J., Weinke, A., Stone, I., Hamsher, S., Woller-Skar, M., Snyder, E. & Biddanda, A. 2021. Bloom and bust: Historical trends of harmful algal blooms in Muskegon Lake, Michigan, a Great Lakes estuary. *Freshwater Science* 2021 40:3, 463-477
- Sagan, V., Peterson, K. T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B. A., ... & Adams, C. 2020. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205, 103187.
- Schaeffer, B. A., Schaeffer, K. G., Keith, D., Lunetta, R. S., Conmy, R., & Gould, R. W. 2013. Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21), 7534–7544. doi:10.1080/01431161.2013.823524
- Tian S, Guo H, Xu W, *et al.* 2022. Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research International*. DOI: 10.1007/s11356-022-23431-9. PMID: 36217046.
- Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M., & Chen, F. 2022. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sensing*, 14(8), 1770. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs14081770>
- Yindong, T., Xiwen, X., Miao, Q., Jingjing, S., Yiyang, Z., Wei, Z., Mengzhu, W., Xuejun, W. & Yang, Z. 2021. Lake warming intensifies the seasonal pattern of internal nutrient cycling in the eutrophic lake and potential impacts on algal blooms. *Water Research*. V.188. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116570>



Universidad de Concepción

FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN ACUÁTICA EN AGUAS CONTINENTALES



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM