

Proyecto FIC Más Azul:

Aplicación e integración de tecnologías de información y nuevas herramientas biotecnológicas, para el monitoreo colaborativo de lagos, que asegure la conservación del recurso hídrico, resguarde la salud humana, animal y contribuya al desarrollo integral de la Región.

Código BIP 4018207-0

INFORME ETAPA #3

Objetivo 4: Evaluar la utilización de la teledetección como técnica para el monitoreo de calidad de agua de cuerpos lacustres.

Elaborado por: MSc. -Ing. Manuel Castro.
MSc. Patricio Acevedo.

ETAPA 3:

Descripción de algoritmo C2RCC y Caso de Estudio/validación con Sentinel-3 WFR/OLCI Level-2

Tabla de Contenido

	Páginas
RESUMEN	2
DESCRIPCIÓN DE ALGORITMOS	4
C2RCC ALGORITMO	4
OC4ME CHL-A – TSM – KD490	5
CASO DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN	7
DISPONIBILIDAD DE DATOS EFR/WFR	7
PROCESAMIENTO DE DATOS EFR	8
COMPARACIÓN CON MEDICIONES DESDE ESTACIONES	19
CONSIDERACIONES	21
REFERENCIAS	24

Resumen

En el presente informe se presenta una descripción de los algoritmos utilizados en el procesamiento de los datos obtenidos desde el sensor OLCI del satélite Sentinel-3, a fin de obtener los productos relacionados con la calidad de agua y posteriormente, un caso de estudio y validación.

Respecto a los algoritmos, se presenta el denominado C2RCC, que es utilizado por la Agencia Espacial Europea (ESA, siglas en inglés), para la obtención de los productos de nivel 2, Water Reduced Resolution (OL_2_WRR) o Full Resolution (OL_2_WFR), a partir de información del sensor OLCI de Sentinel-3. En el caso del algoritmo OC4Me (incorporado en el algoritmo C2RCC), se usa para el cálculo de la concentración de clorofila, la transparencia del agua (KD490) y la absorción a los 443 nm, a partir de datos del sensor OLCI de nivel 1 en baja o alta resolución espacial (OL_1_ERR y OL_1_EFR). Este último algoritmo está disponible no solo para imágenes Sentinel-3, sino también Sentinel-2 y Landsat-8, en el software libre Sentinel Application Platform (SNAP), disponible a través de la ESA. En la segunda parte del informe, se utiliza el software SNAP en el procesamiento de las imágenes OL_1_EFR, para posteriormente correlacionar con las mediciones realizadas en el lago Llanquihue.

El uso de imágenes OL_1_EFR con el software SNAP permite alcanzar una temporalidad mayor de análisis, facilitando el procesamiento de los datos (a fin de obtener la concentración de clorofila chl_a (mg/m³), la concentración total de material sólido suspendido TSM (g/m³) y el coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar KD-489 (1/m). Estas imágenes están disponibles para ser descargadas desde el Copernicus Open Access Hub (scihub.copernicus.eu/dhus/#/home), en particular desde el 25 de abril de 2016. En el caso de los productos OL_2_WFR sólo están disponibles en los últimos 365 días (a partir de la fecha de consulta) en la plataforma EUMETSAT Copernicus Online Data Access (scihub.copernicus.eu/dhus/#/home).

Finalmente se realizó una comparación de las concentraciones de clorofila medidas en el lago, con aquellas obtenidas desde el satélite Sentinel-3, en principio para los años 2016 al 2021, donde se cuenta con imágenes diarias. Desde la base de datos de las mediciones en el lago Llanquihue, para el periodo de los años 2018 al 2019, no se informan mediciones de concentración de clorofila. Además, para el periodo de los años 2020 al 2021 no se realizaron mediciones de concentración clorofila. Cabe recordar que las campañas de mediciones en el lago se realizaron exclusivamente en los meses de marzo y agosto de cada año. Por lo anterior la única alternativa para correlacionar los datos medidos en el lago con la obtenida desde satélite estuvo acotada a los años 2016 (sólo en agosto), 2017 y 2018.

Dadas las condiciones de nubosidad sobre el lago para las fechas en donde existen coincidencia de datos disponibles, se obtuvo que sólo para el 01 de agosto de 2017 se cuenta con una imagen libre de nubes, exclusivamente para las estaciones de muestreo Ensenada y ZMAX. Los resultados de la comparación de valores de concentración de clorofila entregaron diferencias menores a 0.2 mg/m³.

Si bien los resultados obtenidos en dicha comparación son auspiciosos, cabe mencionar que sólo se analizaron dos datos, lo que no permite determinar robustez y/o correlación estadística.

Adicionalmente, se observa en la imagen una fuerte variación espacial en las concentraciones entre píxeles aledaños, lo que indica que las condiciones del lago para el 01 de agosto de 2017 no necesariamente tienen una distribución homogénea entre píxeles, y por lo tanto es esperable que

tampoco se cuente con dicha homogeneidad al interior de cada pixel. En particular en el caso de la estación Ensenada, al existir un error aproximado de 100 metros en la georreferenciación de la imagen, entonces la variación entre la concentración de clorofila medida en el lago y la estimada desde el satélite, podría aumentar hasta los 0.85 mg/m³.

En función de lo descrito anteriormente, y con el objetivo de realizar una validación espacial/temporal de los datos obtenidos desde el satélite, se propone tener una futura campaña de mediciones de la concentración de clorofila en el lago Llanquihue, considerando una matriz cuadrada de al menos 36 puntos de medición separados regularmente cada 100 metros, en su diseño experimental. Esto permitiría calcular el valor promedio de al menos 6 puntos de medición que represente una superficie similar a la de un pixel de 300x300 metros, de una imagen del satélite Sentinel-3.

Descripción de Algoritmos

C2RCC Algoritmo

La corrección atmosférica del “Case 2 Regional CoastColour” (C2RCC, Figura 1) es una versión de espectro completo que utiliza un conjunto de redes neuronales que se entrenan en la reflectancia simulada de la parte superior de la atmósfera (TOA). Las simulaciones de transferencia radiativa incluyen el sistema completo del océano y la atmósfera, es decir, se incluye un modelo de agua específico en las simulaciones. A través del algoritmo C2RCC se generan los productos de agua Level-2 (Level-2 Water) en con los datos del sensor Sentinel 3/OLCI de la ESA. Los productos generados son las propiedades ópticas inherentes (inherent optical properties, IOPs), la absorción y la dispersión de los diferentes constituyentes; las tres principales concentraciones ópticamente relevantes, es decir, pigmentos de fitoplancton, materia suspendida total y sustancia amarilla. Además, el algoritmo C2RCC admite varios sensores: desde Sentinel-3 OLCI, Sentinel-2 MSI, Landsat-8 OLI y el sensor de herencia MERIS, tanto en la tercera y cuarta versión de reprocesamiento. También admite datos de los sensores MODIS, VIIRS y SeaWiFS.

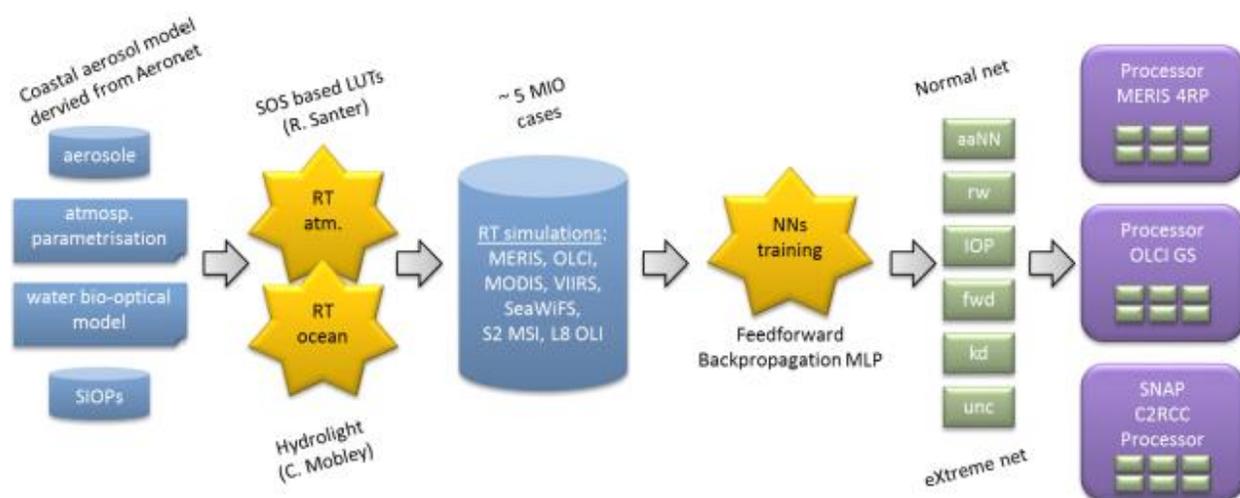


Figura 1. Diagrama de procesos del algoritmo C2RCC.

Los productos generados a partir de la aplicación del algoritmo C2RCC son algunos constituyentes de agua (CHL, TSM), absorción (a 443 nm) y caracterización de la transparencia del agua (KD490), (Figura 2, Tabla 1).

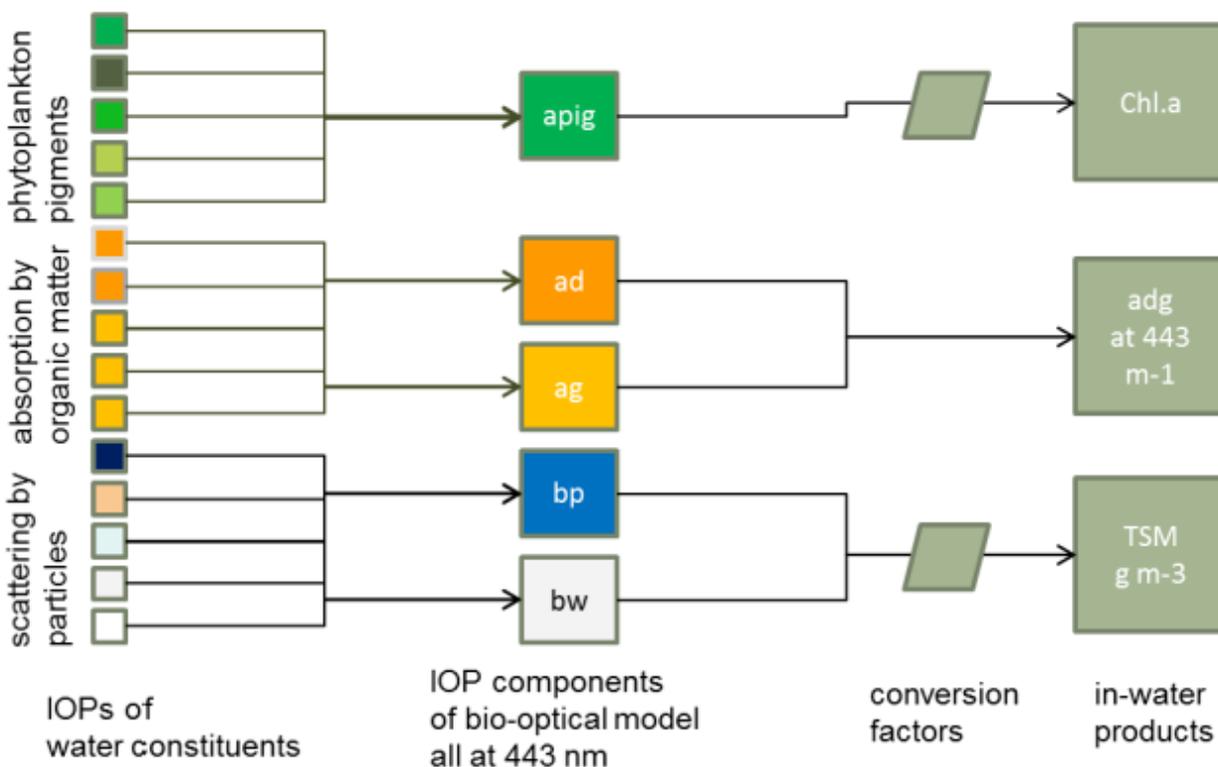


Figura 2. Modelo Bio-óptico utilizado en el algoritmo C2RCC para el cálculo los parámetros de calidad de agua.

OC4Me | chl-a – TSM – KD490

El OC4Me es un polinomio basado en el uso de un modelo semi-analítico, a su vez basado en el análisis de AOP (Aerosol Optical Properties) medidos in-situ durante las últimas décadas en varias regiones oceánicas (Bricaud et al., 1998; Morel et al., 2001). A partir de este polinomio se puede describir:

La concentración de clorofila, Chl, se define mediante el algoritmo semi-analítico de relación de banda máxima (MBR, Maximum Band Ratio) "OC4Me", desarrollado por Morel et al., 2007. En la última versión del algoritmo de índice de pigmento MERIS (describe completamente en el documento MERIS ATBD 2.9, Algorithm Theoretical Basis Documents). Y se expresa de la siguiente manera:

$$\log_{10}[Chl] = \sum_{x=0}^4 (A_x (\log_{10}(R_j^i))^x) \quad [1]$$

Es la relación de irradiancia-reflectancia de la banda i, entre 443, 490 y 510 nm, sobre la de la banda j a 560 nm. La banda para el numerador se selecciona de modo que se maximice la relación. La ecuación [1] está incorporada dentro de un ciclo iterativo que incluye el cálculo de la irradiancia-reflectancia de la reflectancia de salida de agua direccional que requiere una corrección bidireccional, la cual depende de la estimación de Chl. La convergencia se alcanza cuando la diferencia entre las dos estimaciones de Chl están por debajo de un umbral.

El coeficiente de atenuación (KD490, ecuación [2]) utiliza el algoritmo OK2-560 como se describe por Morel et al., 2007. Se obtiene como la suma del valor (hipotético) del coeficiente de atenuación difusa para agua de mar pura Kw (490) y una contribución vinculada al estado biológico del agua. Este último se expresa, en transformada logarítmica, como un polinomio de la relación de irradiancia-reflectancia entre 490 y 560 nm, de forma muy similar al algoritmo de recuperación de clorofila OC4Me. Dado que se deriva utilizando el mismo enfoque bio-geofísico, tiene el mismo dominio de validez.

$$K_d(490) = K_w(490) + K_{bio}(490), \log_{10}(K_{bio}(490)) = \sum_{x=0}^4 B_x (\log_{10}(R_{560}^{490}))^x \quad [2]$$

Tabla 1. Descripción de productos de calidad de agua y producto geofísico atmosférico | C2RCC

Variable	Descripción	Unidades	Input Bands
chl_oc4me and chl_NN	Concentración de clorofila-a (chl_a), calculada utilizando algoritmos "OC4Me" o de red neuronal	mg m ⁻³	- Oa3 to Oa6 - Oa1-Oa12, Oa16, Oa17, Oa18 and Oa21
TSM_NN	Concentración total de materia en suspensión.	g m ⁻³	Oa1-Oa12, Oa16, Oa17, Oa18 and Oa21
KD490_M07	Coeficiente de atenuación difusa para irradiancia descendente, a 490 nm.	m ⁻¹	Oa4 and Oa6

Caso de Estudio y Validación

Disponibilidad de datos EFR/WFR

El sensor Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) está montado en las plataformas satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B, puestos en órbita el 15 de mayo de 2016 y 25 de abril de 2018, respectivamente. Ambas plataformas están actualmente operativas.

Entre los productos obtenidos desde el sensor OLCI está el Level-1 Earth Reduced Resolution (OL_1_ERR) o Full Resolution(OL_1_EFR), los cuales entregan información de la radiancia en el TOA, la longitud de onda central, el ancho de banda FWHM y la irradiancia solar para las 21 bandas que conforman el sensor, como también información de coordenadas geográficas, con resolución completa (EFR 300 m) y reducida (ERR 1200 m).

Los productos diarios OL_1_EFR y OL_1_ERR están disponibles para ser bajados desde el 25 de abril de 2016, en el Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Otro de los productos del sensor OLCI es el Level-2 Water Reduced Resolution (OL_2_WRR) o Full Resolution(OL_2_WFR), los cuales incluyen parámetros geofísicos del agua y atmósfera con resolución completa (300 m) y reducida (1200 m), los que son descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de agua y producto geofísico atmosférico.

Variable	Descripción	Unidades	Input Bands
Rxxx	Reflectancia direccional de superficie, corregida para la reflexión especular de la atmósfera y el sol	adimensional	all except Oa13, Oa14, Oa15, Oa19 and Oa20
chl_oc4me and chl_NN	Concentración de clorofila-a (chl_a), calculada utilizando algoritmos "OC4Me" o de red neuronal	mg m ⁻³	- Oa3 to Oa6 - Oa1-Oa12, Oa16, Oa17, Oa18 and Oa21
TSM_NN	Concentración total de materia en suspensión.	g m ⁻³	Oa1-Oa12, Oa16, Oa17, Oa18 and Oa21
KD490_M07	Coeficiente de atenuación difusa para irradiancia descendente, a 490 nm.	m ⁻¹	Oa4 and Oa6
ADG_443_NN	Absorción de material detrítico coloreado y disuelto a 443 nm.	m ⁻¹	Oa1, Oa12, Oa16, Oa17, Oa21
PAR	Flujo de energía cuántica del sol en el rango espectral 400-700 nm.	μEinstein m ⁻² s ⁻¹	-
T865 and A865	Carga de aerosol, expresada en profundidad óptica a una longitud de onda determinada (865 nm) y dependencia espectral de la profundidad óptica del aerosol, entre 779 y 865 nm.	adimensional	Oa5, Oa16 and Oa17
IWV	Columna de vapor de agua integrada	kg m ⁻²	Oa18, Oa19

Los productos diarios OL_2_WFR y OL_2_WRR están disponibles exclusivamente para un año antes de la fecha en que se realice la búsqueda, en la plataforma EUMETSAT Copernicus Online Data Access (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Procesamiento de datos EFR

Una alternativa para obtener productos tales como la concentración de clorofila chl_a (mg/m³), la concentración total de material sólido suspendido-TSM (g/m³) y el coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar KD-489 (1/m), para fechas anteriores a las disponibles en los productos OL_2_WFR o OL_2_WRR, es procesar las imágenes OL_1_EFR o OL_1_ERR (a disposición desde abril de 2016).

El procesamiento de las imágenes OL_1_EFR o OL_1_ERR se puede realizar con el software SNAP, que es posible bajarlo de manera libre en la web Science Toolbox Exploitation Platform SNAP Download (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>).

Como antes se mencionó, los productos OL_1_EFR o ERR, están disponibles para ser bajados desde Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Al ser bajados y desempaquetados, se obtendrá una carpeta con los archivos presentados en la Figura 3.

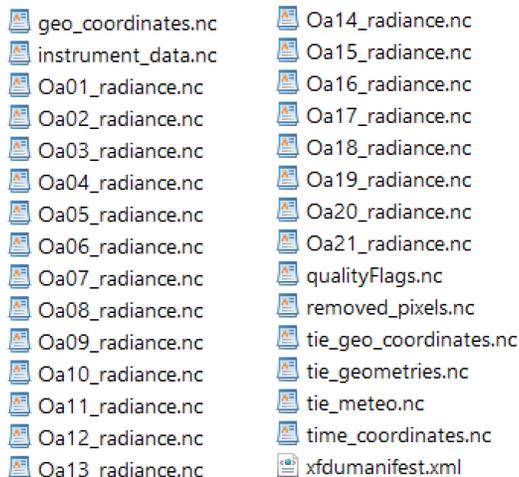


Figura 3. Archivos contenidos en los productos OL_1_EFR o OL_1_ERR.

Para cargar el producto en el software SNAP, sólo es necesario “arrastrar” el archivo xfdumanifest.xml a la ventana “Product Explorer” de SNAP (Figura 4). Como ejemplo se ha cargado en SNAP el producto EFR del 9 de febrero de 2021.

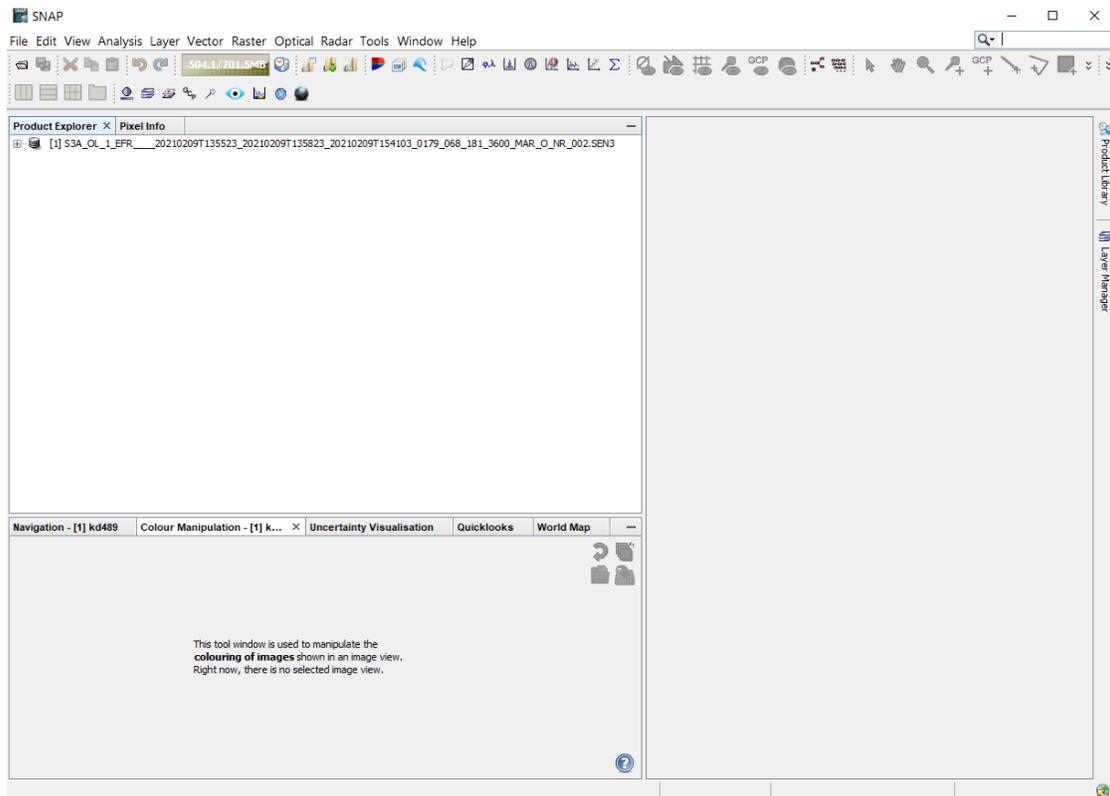


Figura 4. Carga del producto OL-1_EFR en SNAP.

Como un paso previo al procesamiento del producto OL_1_FR, es recomendable obtener una subimagen que corresponda al área de estudio o interés, así disminuir el tiempo necesario para el procesamiento final. Para obtener la subimagen, es necesario “pinchar” sobre el nombre del archivo y posteriormente seguir la secuencia “Raster/Subset” (Figura 5). En la nueva ventana (que no se abrirá de manera inmediata), será posible establecer los bordes de la subimagen que se desea obtener, simplemente utilizando el cursor y botón izquierdo del mouse para ajustar cualquiera de los bordes de la imagen original. También será posible hacerlo ingresando la ubicación (fila/columna) de alguna de las esquinas de la subimagen, o en su lugar sus coordenadas geográficas (Figura 6). Para finalizar el proceso oprima el botón “OK”.

Como resultado, se abrirá una nueva imagen en la ventana “Product Explorer”, que tendrá como primera parte de su nombre “subset_0_of”. Para visualizarla, ponga el cursor sobre el nombre de la imagen, presione el botón derecho, y escoja la opción “Open RGB Image Window” (Figura 7). En la ventana emergente presione “OK”. La subimagen se desplegará (Figura 8).

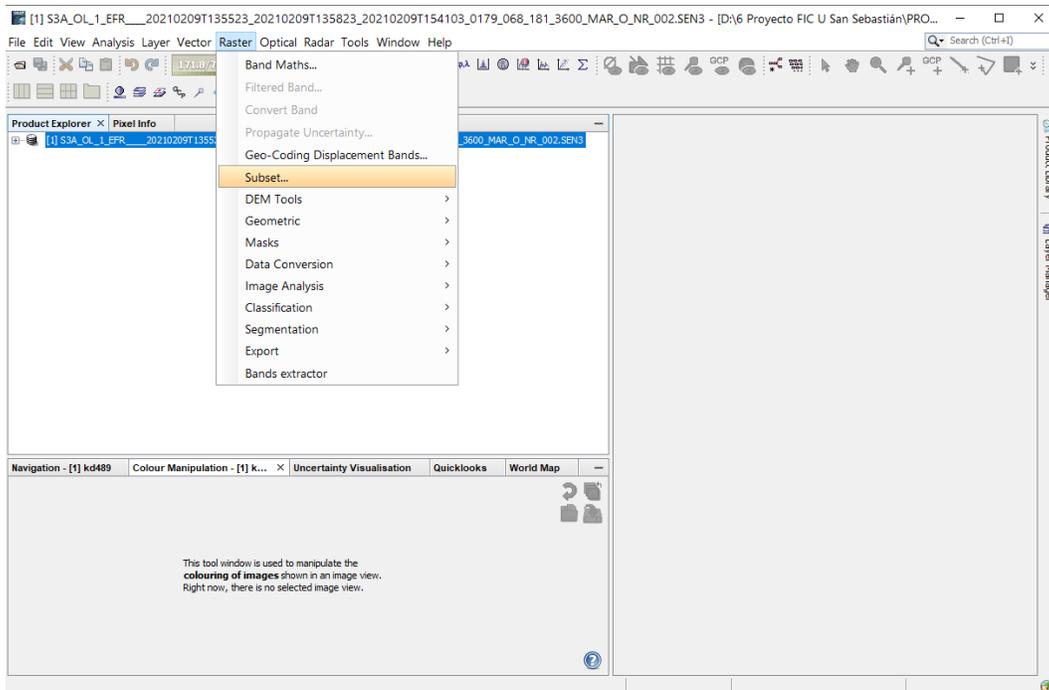


Figura 5. Secuencia para abrir la ventana de generación de una subimagen.

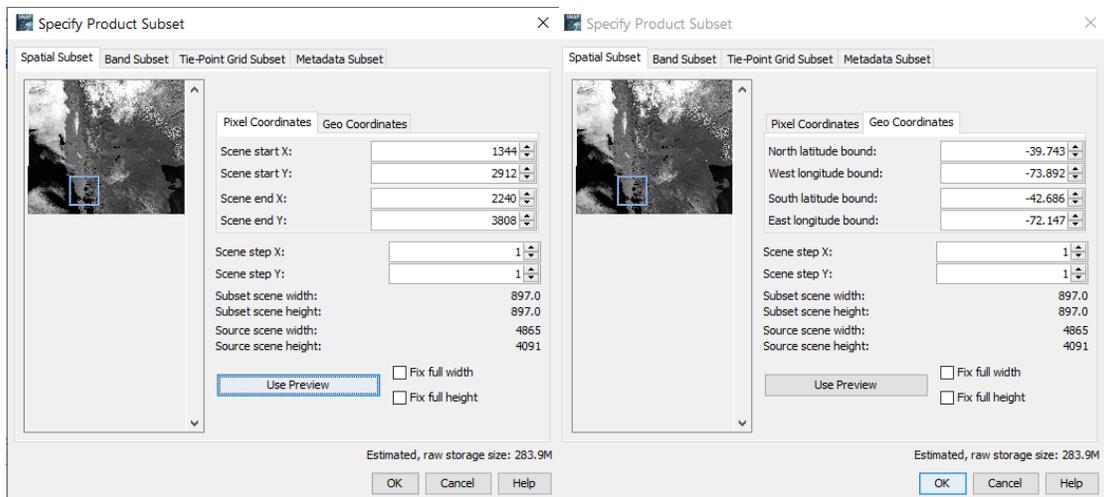


Figura 6. Ventana de obtención de una subimagen (Specify Product Subset).

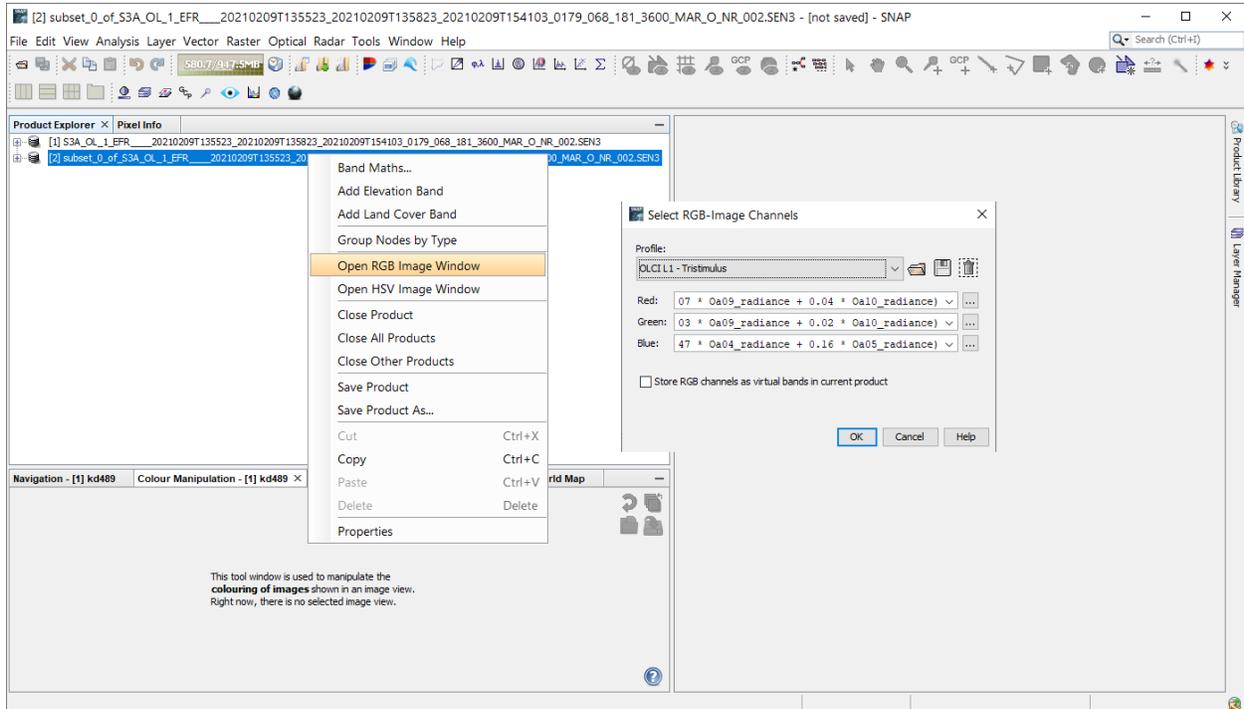


Figura 7. Secuencia para la visualización de la subimagen generada.

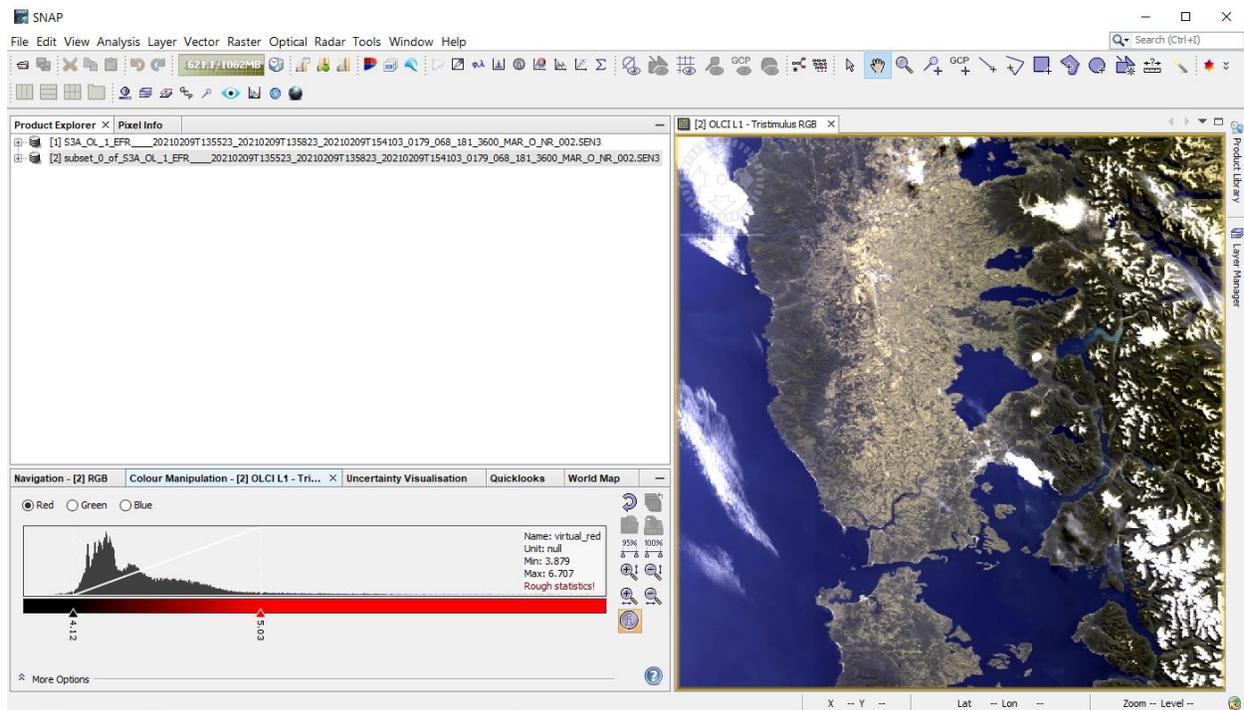


Figura 8. Visualización de la subimagen generada (en color real).

Para realizar el procesamiento final del producto OL_1_EFR a fin de obtener los parámetros de la calidad de agua, es necesario “pinchar” sobre el nombre del archivo y posteriormente abrir la secuencia “Optical/Thematic Water Processing/C2RCC Processor/OLCI” (Figura 9). Se abrirá la ventana emergente correspondiente al C2RCC OLCI Processor (Figura 10). En esta ventana, en la pestaña “I/O Parameters”, en la sección “Target Product” es posible modificar el formato de salida y el directorio (carpeta) donde se guardará la imagen procesada.

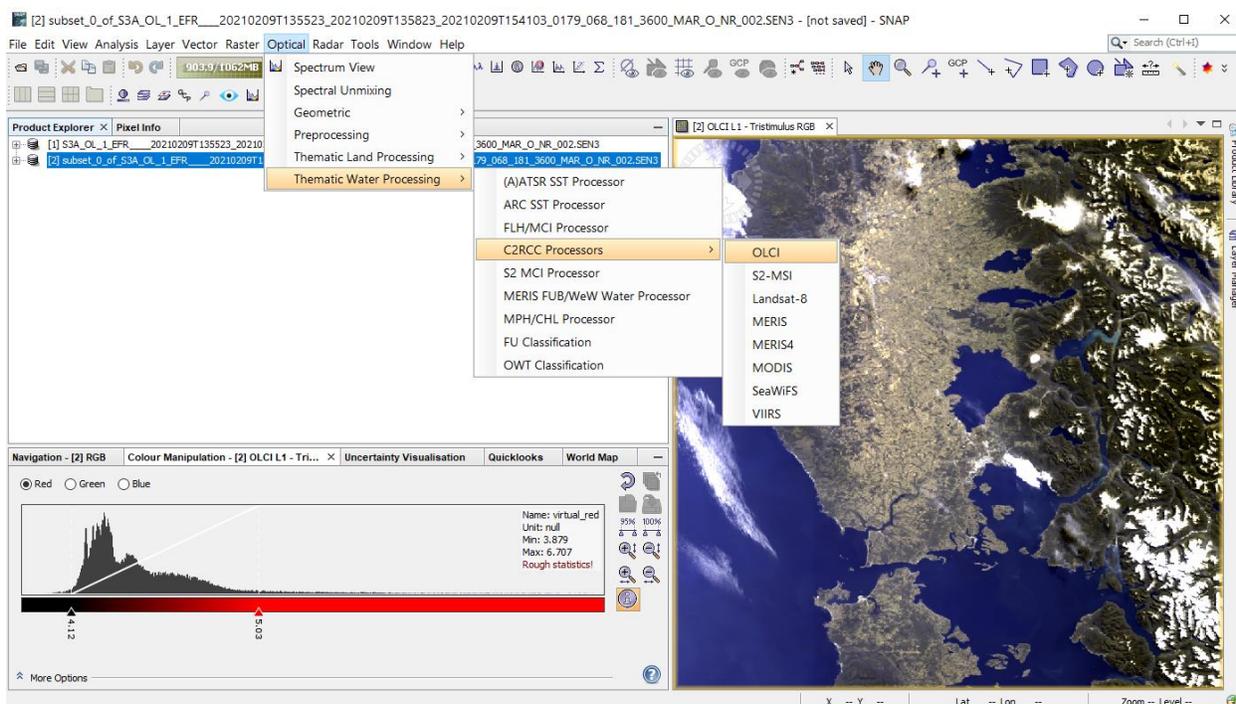


Figura 9. Secuencia para abrir la ventana de procesamiento.

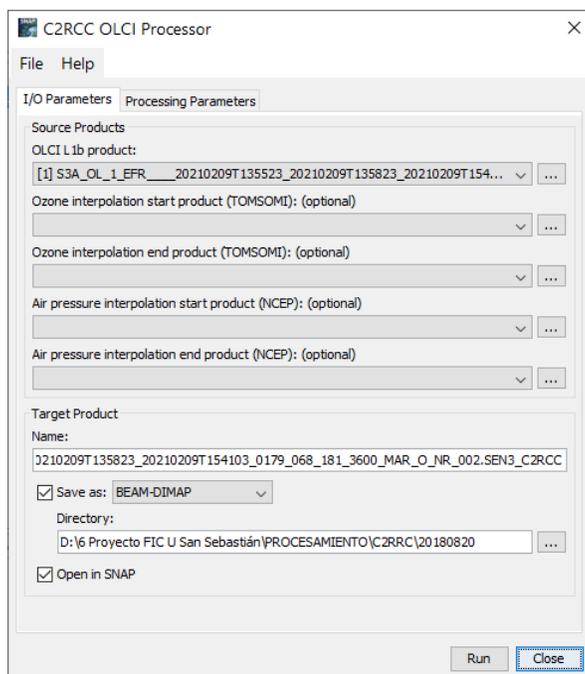


Figura 10. Ventana de procesamiento, pestaña I/O Parameters

También en la misma ventana emergente, en la pestaña “Processing Parameters” (Figura 11), se recomienda actualizar los valores de la salinidad y temperatura del cuerpo de agua en estudio, para la fecha de adquisición de la imagen.

Adicionalmente, al oprimir el botón con tres puntos horizontales (...), en la fila “Valid-pixel expression”. se abrirá una nueva ventana emergente donde se podrá establecer que el cálculo de los parámetros de agua sean obtenidos exclusivamente para los lagos. Para esto modifique el texto en el recuadro “Expression:” de tal manera de dejarlo como “quality_flags.fresh_inland_water”, como se presenta en la Figura 12. Posteriormente presione “OK” y finalmente “Run”. La imagen resultante tendrá al final de su nombre “_C2RCC”. Esta imagen contendrá un gran número de capas o bandas de información, que podrán ser revisadas pinchando sobre el signo más a la izquierda del nombre de la imagen, en la pestaña “Product Explorer”. Entre estas capas de información se podrá encontrar la información de la concentración de clorofila (conc_chl), la concentración total de material sólido suspendido-TSM (conc_tsm) y el coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar (kd489).

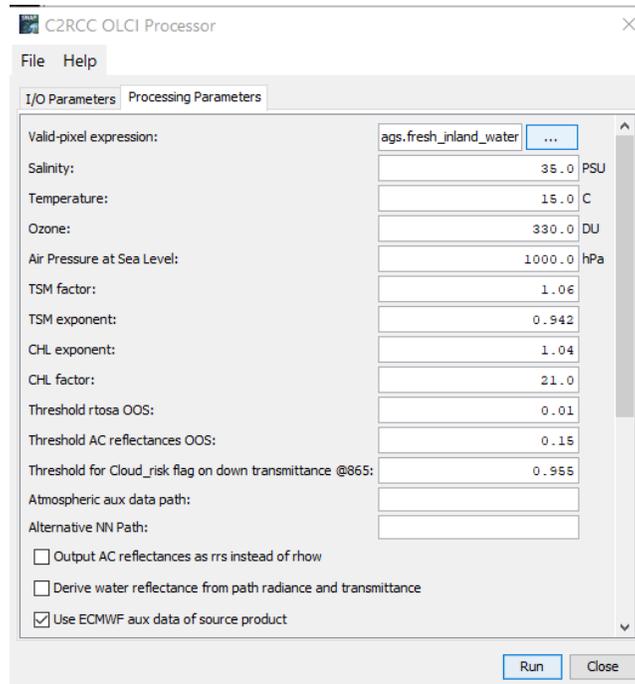


Figura 11. Ventana de procesamiento, pestaña Processing Parameters

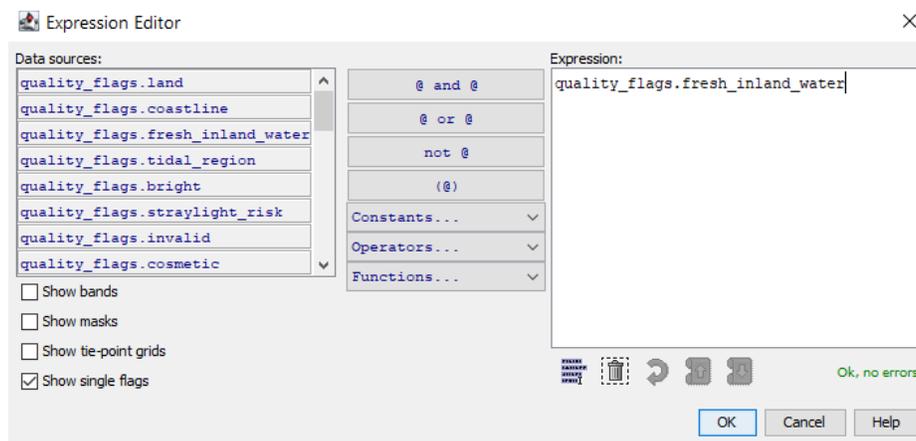


Figura 12. Ventana de procesamiento "Valid-pixel expression".

Como ejemplo se presenta en la Figura 13 la imagen resultante para la concentración de clorofila, aplicando la paleta de colores "CHL_SeaWiFs.cpd" contenida en el software SNAP.

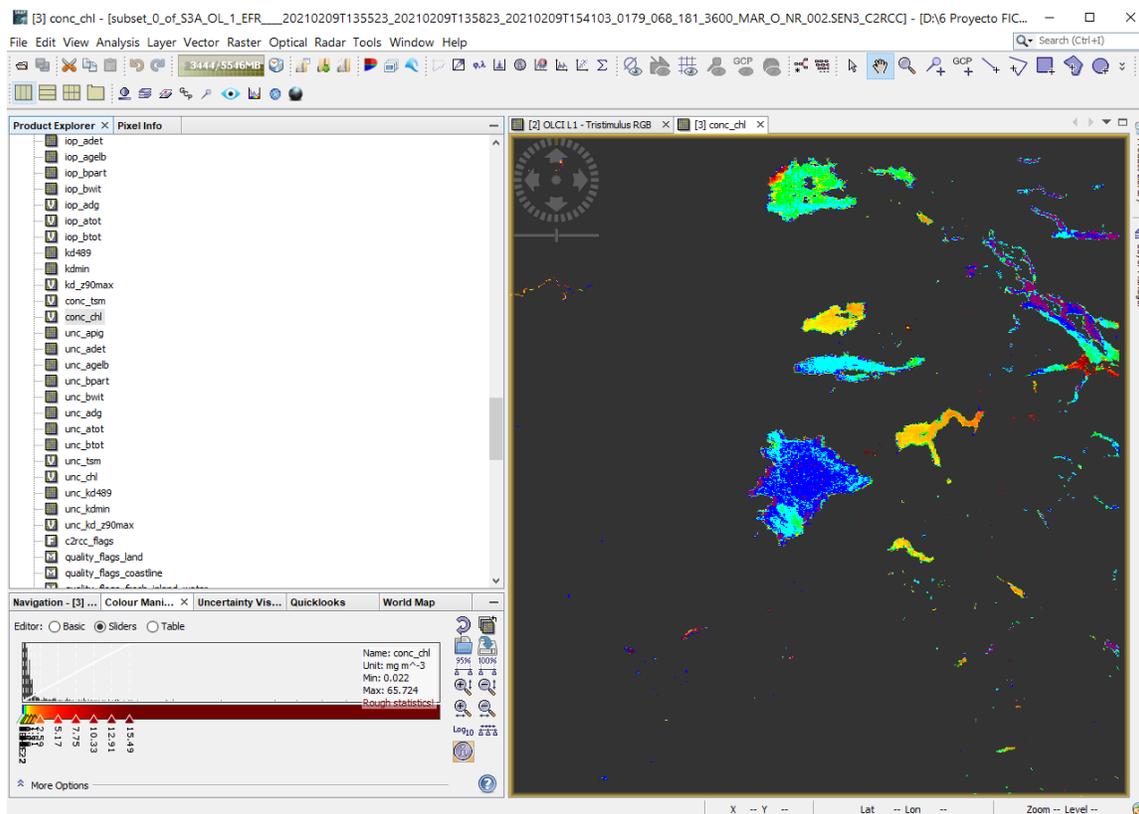


Figura 13. Visualización de la imagen resultante para la concentración de clorofila.

Para reproyectar la imagen obtenida a un sistema de coordenadas de referencia elegido, tal como el estándar "WGS84", se deberá seguir la secuencia "Raster/Geometric/Reprojection" (Figura 14), al hacerlo se abrirá la ventana emergente de la Figura 15. También se podrá escoger el nombre y ubicación final de la imagen. Para ejecutar presione "Run". La imagen resultante se presenta en la Figura 16.

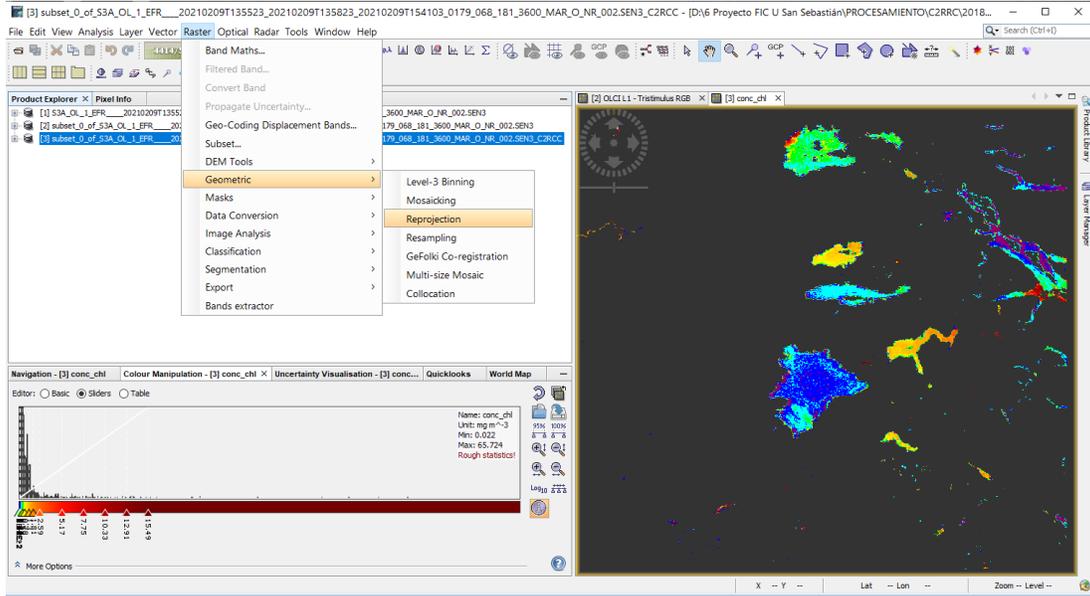


Figura 14. Secuencia para abrir la ventana de georeferenciación.

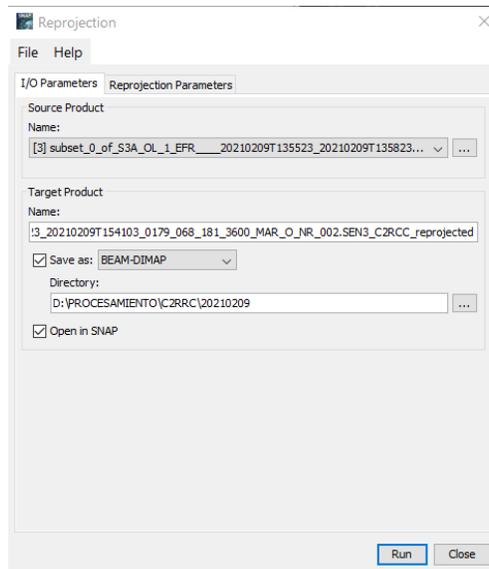


Figura 15. Ventana para la reproyección.

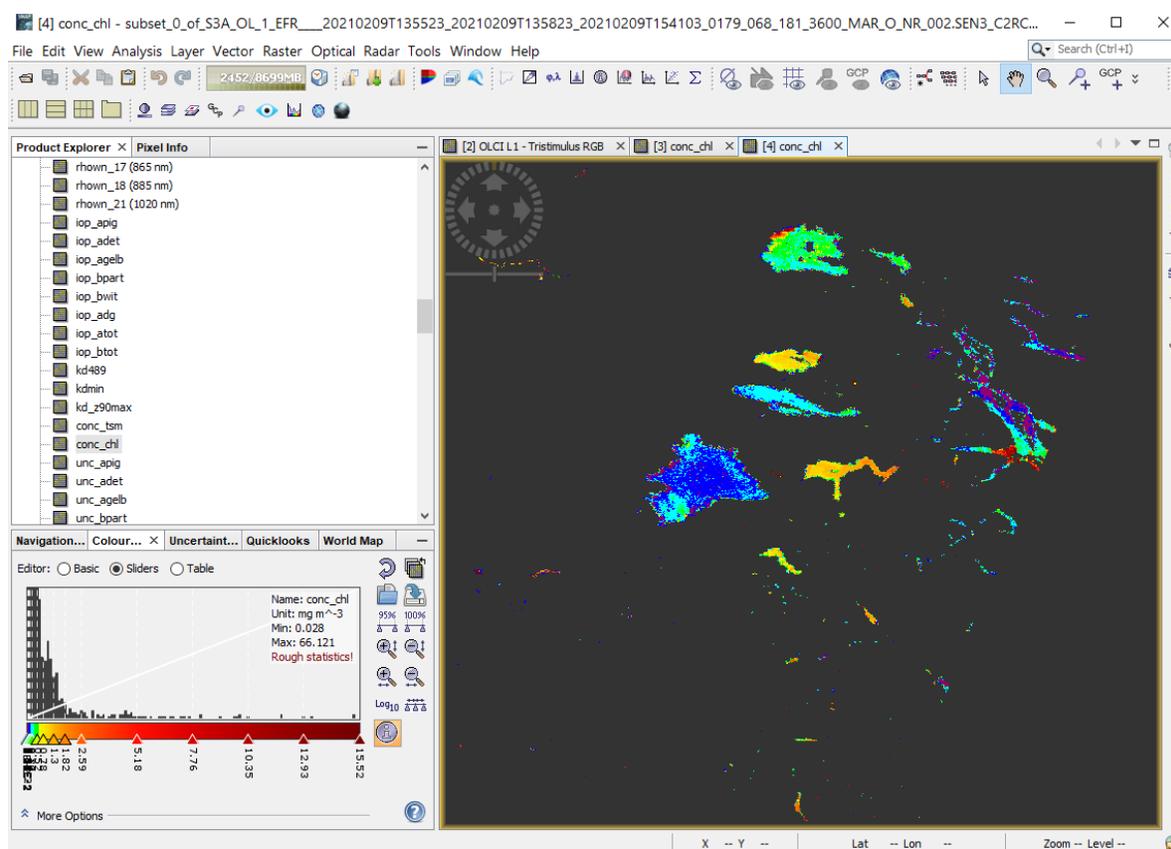


Figura 16. Imagen reproyectada.

Para exportar alguna de las bandas contenidas en la imagen final, es posible hacerlo siguiendo la secuencia “Raster/Bands extractor” (Figura 17). Se abrirá la ventana emergente “Bands extractor” (Figura 18). En ella, en la pestaña “I/O Parameters” se podrá explicitar el nombre, ubicación y formato de salida. Se recomienda usar como formato GeoTIFF, para hacer más fácil la visualización en cualquier software de manejo de imágenes satelitales. En la pestaña “Processing Parameters” se debe escoger la banda a ser extraída, en nuestro ejemplo la de concentración de clorofila (conc_chl). Para proceder con la extracción, presionar “Run”.

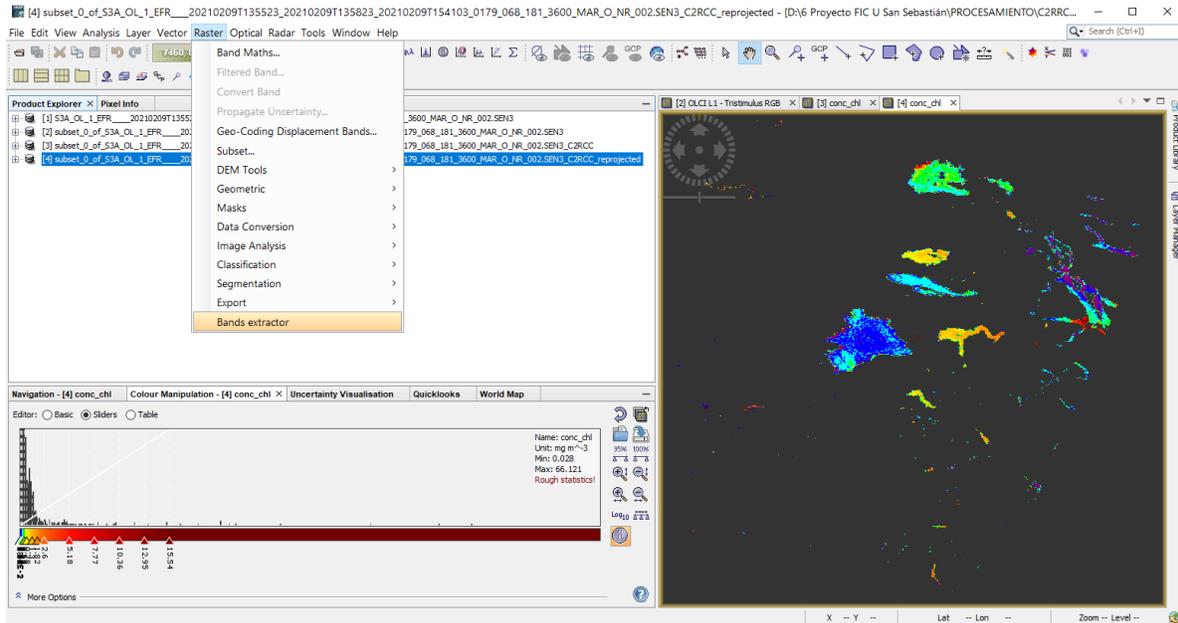


Figura 17. Secuencia para extraer una banda específica.

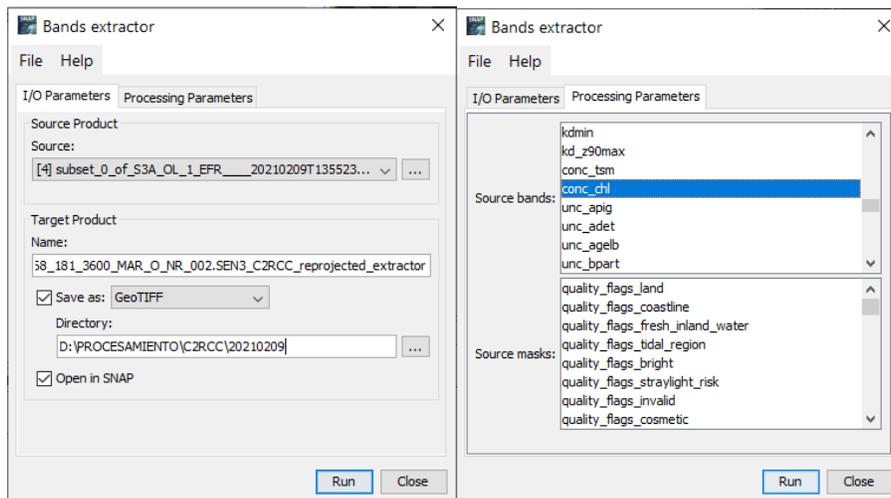


Figura 18. Ventana emergente “Bands extractor”.

Comparación con mediciones desde estaciones

De acuerdo a la base de datos a disposición, se seleccionó la concentración de clorofila (mg/m^3) como la variable a ser comparada desde la información obtenida directamente desde el lago, con aquella suministrada desde satélite.

En general los datos informados desde mediciones en el lago Llanquihue, para las estaciones Pto. Octay, Pto. Varas, Frutillar y Ensenada (Figura 19), cubren el periodo desde 1986 a agosto de 2019, exclusivamente en los meses de marzo y agosto de cada año. En particular para la concentración de clorofila la información está disponible hasta agosto de 2017. En los años 2018 y 2019 no se informaron datos de clorofila. En marzo de 2015 y marzo-agosto de 2017, se cuenta adicionalmente con la información de clorofila para la estación ZMAX (Figura 19).

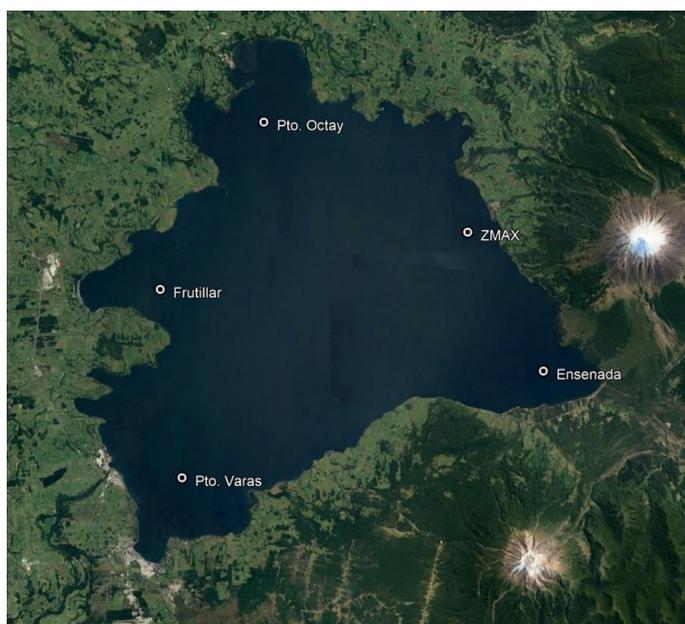


Figura 19. Ubicación de las estaciones de muestreo en el lago Llanquihue.

Por su parte, la información satelital del producto OL_1_EFR del sensor OLCI de Sentinel 3 está disponible diariamente desde el 25 de abril de 2016, mientras que la información del producto OL_2_WFR lo está exclusivamente desde abril de 2020. Por lo anterior, y visto que no se cuenta con datos de medición de clorofila en el lago para los años 2019, 2020 y 2021, la única alternativa para cruzar la información medida en el lago con la obtenida desde satélite está acotada a los años 2016 (sólo en agosto), 2017 y 2018. Se revisaron las condiciones de nubosidad sobre el lago para estas fechas, obteniéndose que sólo para el 01 de agosto de 2017 se tiene una imagen libre de nubes, exclusivamente para las estaciones de muestreo Ensenada y ZMAX (Figura 20).

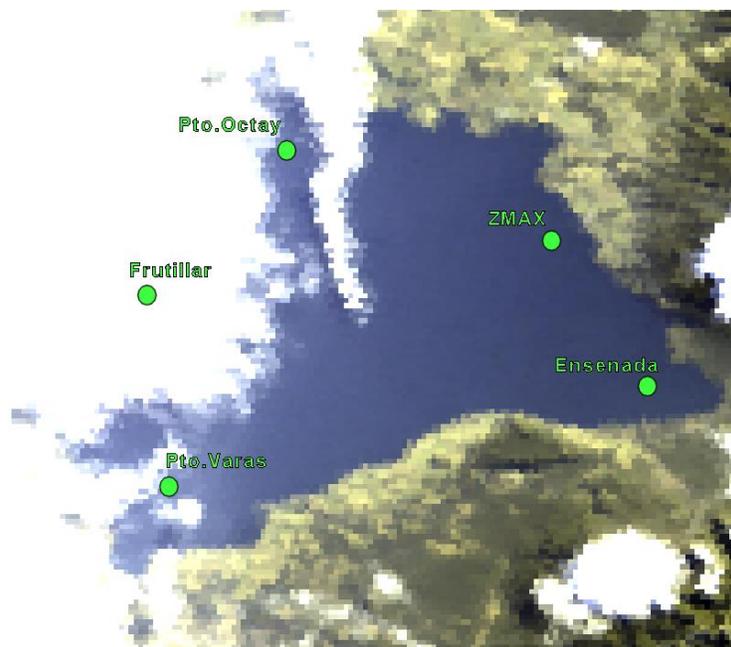


Figura 20. Imagen Sentinel 3 del 01 de agosto de 2017.

Los datos informados desde las estaciones para las concentraciones de clorofila el 01 de agosto de 2017 fueron de 0.957 (mg/m³) y 1.140 (mg/m³), para Ensenada y ZMAX, respectivamente (Tabla 3).

La imagen OL_1_EFR del 01 de agosto de 2017 se procesó usando el algoritmo C2RCC incorporado en el software SNAP, utilizando como datos de temperatura la informadas desde las estaciones de medición en el lago (11.2 °C) y de salinidad desde un informe desarrollado por el Instituto de Fomento Pesquero (Oyarzo, 2020), que entrega un valor de 0.05 PSU.

Tabla 3. Concentraciones de clorofila desde estaciones e imagen satelital (01 de agosto de 2017).

Estación	Concentración de clorofila (mg/m ³)	
	Medida en el lago	Desde imagen satelital
Ensenada	0.957	1.120
ZMAX	1.140	1.004

Los resultados obtenidos para la concentración de clorofila desde la imagen satelital fueron de 1.120 (mg/m³) y 1.004 (mg/m³), para Ensenada y ZMAX, respectivamente (Tabla 3, Figura 21). Con lo que la diferencia de los datos informados desde las estaciones en el lago, con los obtenidos desde satélite es menor a 0.2 mg/m³.

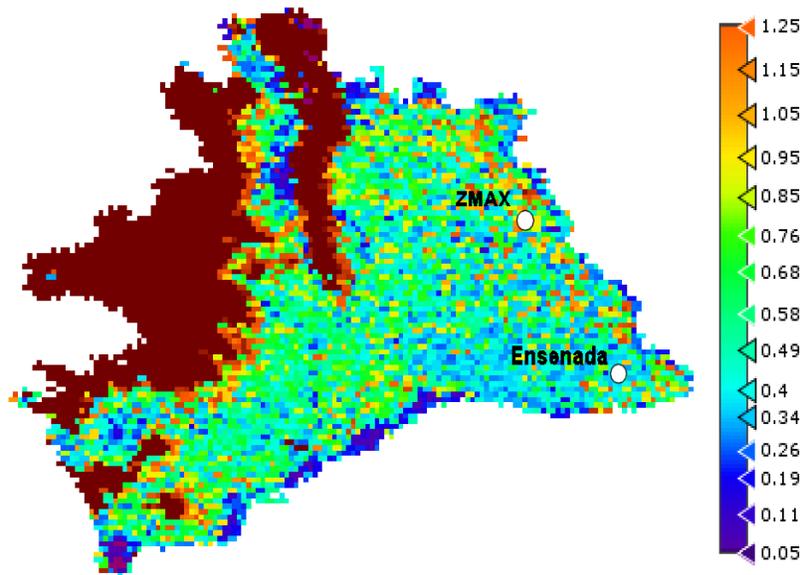


Figura 21. Concentración de clorofila (mg/m³) para la imagen del 01 de agosto de 2017.

Consideraciones

Si bien los resultados obtenidos en la comparación de las concentraciones de clorofila medidas directamente en el lago, con aquellas obtenidas desde información satelital son auspiciosos, se debe considerar que sólo se analizaron dos datos, lo que claramente no permite inferir resultados con respaldo estadístico.

Adicionalmente, es importante tener presente que la información satelital para la concentración de clorofila corresponde a un “promedio” de 300x300 metros (9 ha). Sólo en el caso que la concentración de clorofila sea homogénea en toda la superficie de 9 ha correspondiente a un pixel, entonces se podría esperar que el valor de dicha concentración sea similar al medido en cualquier punto del lago ubicado al interior de dicho pixel.

0.423	0.520	0.307	1.059	1.647	0.574
0.309	1.120★	0.276	0.806	1.004★	0.356
0.507	0.600	0.556	1.137	0.885	0.996

Figura 22. Ubicación geográfica de las estaciones Ensenada (izquierda) y ZMAX (derecha) sobre la matriz de nueve pixeles del producto satelital con información de la concentración de clorofila (mg/m³). Los números en color negro representan dichas concentraciones

En particular para el 01 de agosto de 2017, la comparación entre las concentraciones de clorofila informadas desde las estaciones en el lago y la imagen satelital se realizó considerando exclusivamente el pixel en el que geográficamente se localizan las estaciones Ensenada y ZMAX representadas con una estrella en color negro en la Figura 22. En esta figura y a fin de analizar la homogeneidad de las concentraciones de clorofila, se presentan subimágenes de 9 pixeles, con 8 de ellos rodeando el pixel en donde geográficamente están ubicadas las estaciones antes mencionadas. En esta figura se entregan también los valores de concentración de clorofila en mg/m³ correspondiente a cada pixel. Es claramente observable que los valores de dichas concentraciones varían considerablemente entre pixeles vecinos, lo que puede significar que no se cumple con una distribución homogénea en las concentraciones de clorofila. De igual forma se podría esperar que la concentración de clorofila no se distribuya de manera homogénea “al interior” de cada pixel.

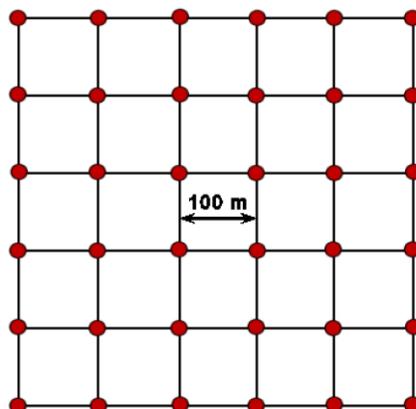


Figura 23. Distribución de mediciones in-situ que asegura que al menos seis de ellas corresponderá con un pixel de 300x300 metros.

Por lo anterior, en caso de planificar una campaña de mediciones en el lago, y a fin de poder realizar posteriormente una comparación con la información obtenida a partir de las imágenes Sentinel-3, sería necesario realizar el mayor número de mediciones en un área de nueve hectáreas, correspondiente a un pixel de la imagen. En este caso el valor resultante de la concentración de clorofila desde las mediciones en el lago se obtendría con el valor promedio. Para asegurar que se tengan al menos seis puntos de medición coincidentes por lo menos con un pixel de la imagen, sería necesario construir una red de 36 puntos de mediciones ubicados en una matriz cuadrada, con una distancia de 100 metros entre dichos puntos (Figura 23).

Referencias

- Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K., & Claustre, H. (1998). Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 103, 31033-31044.
- Morel, A., Gentili, B., Claustre, H., Babin, M., Bricaud, A., Ras, J., et al. (2007). Optical properties of the "clearest" natural waters. *Limnology and Oceanography*, 52, 217-229.
- Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P. J., Hooker, S. B., & Franz, B. A. (2007). Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 111, 69-88
- Morel, A., & Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 106, 7163-7180.
- Oyarzo, C., Henríquez, L., Riquelme, P., Pérez, C., Cook, S., Meyer, D., Hinojosa, P., Pesse, N., Vera, R. (2020). Informe Final del "Desarrollo de campañas de monitoreo de bioindicadores en el marco del programa de vigilancia de las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas del lago Llanquihue". Instituto de Fomento Pesquero.
- (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjC_behrqfwAhUVpJUCHeQiDYIQFjADegQIBRAD&url=http%3A%2F%2Fcatalogador.mma.gob.cl%3A8080%2Fgeonetwork%2Fsrv%2Fspa%2Fresources.get%3Fuuid%3Df0eb77f6-266f-48c4-9efc-a55c778172c7%26fname%3DInforme%2520Final%2520Monitoreo%2520Bioindicadores%2520lago%2520Llanquihue.pdf%26access%3Dpublic&usg=AOvVaw22TNMWQ3qMpyeZyADWbKN9)