

Manual de Usuario Monitoreo de Costas Clorofila-a (CHL)

Documento Técnico

Junio 2026

Tabla de contenidos

1. Resumen ejecutivo	4
2. Introducción	5
3. Especificaciones del producto	6
3.1 Información general	6
3.2 Descripción del producto	7
3.3 Formato del producto	8
4. Resumen metodológico	13
4.1 Sistema de producción y procesado	13
4.2 Filtros e indicadores de calidad	14
4.3 Información de la grilla	14
4.4 Cadena de procesamiento	15
5. Limitaciones	19
6. Control y evaluación de calidad	20
6.1 Marco general de validación	20
6.2 Métricas de desempeño	22
6.2.1 Control interno de calidad	23
6.3 Evaluación de cobertura y consistencia	23
7. Referencias	25

Acceso y licencia

Archivos disponibles en <https://www.copernicuslac-chile.eu>

Licencia: Open & Free Data – CopernicusLAC Chile.

Citación recomendada:

- **Manual de usuario:** Copernicus LAC Chile (2025). *Manual de Usuario Monitoreo de Costas: Análisis mensual de Clorofila (0.01°) 2024 Nivel 4 para América Latina y el Caribe* (Versión 1.0). <https://www.copernicuslac-chile.eu>
- **Datos:** Copernicus LAC Chile (2025). *Clorofila (0.01°) para América Latina y el Caribe: Producto 2024 mensual Nivel 4 sin vacíos (gap-free)* (Versión 0.1) [Conjunto de datos]. <https://www.copernicuslac-chile.eu>

1. Resumen ejecutivo

Este manual describe el producto satelital de Clorofila-a desarrollado por el Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile. El producto de nivel 4 (L4) integra mediciones multifuente de distintos sensores ópticos (MODIS Aqua, VIIRS SNPP, VIIRS NOAA-20 y Sentinel-3 OLCI), cubriendo la región de América Latina y el Caribe con una resolución espacial de 0,01° (~1km en el ecuador) y resolución temporal mensual.

Al ser un producto L4, corresponde a una variable continua en el espacio, sin píxeles vacíos (gap-free), obtenida mediante interpolación óptima y reconstrucción basada en aprendizaje profundo, lo que garantiza continuidad espacial y coherencia bio-óptica.

La clorofila-a es un indicador integrador de la productividad primaria oceánica, con aplicaciones en la gestión pesquera, la detección de floraciones algales nocivas, el seguimiento de procesos de eutrofización costera y la vigilancia de ecosistemas sensibles, como los arrecifes de coral del Caribe. Este manual describe las especificaciones técnicas, la metodología de generación y el control de calidad del producto.

2. Introducción

La región de América Latina y el Caribe concentra algunos de los ecosistemas marinos más productivos y biodiversos del planeta, lo que confiere al monitoreo de la clorofila-a un valor estratégico particular para la gestión ambiental y pesquera regional. El sistema de la corriente de Humboldt, frente a las costas de Chile y Perú, sostiene una de las pesquerías más abundantes del mundo gracias a intensos procesos de surgencia que fertilizan las aguas superficiales; a esto se suman el Pacífico tropical oriental, la plataforma patagónica, el golfo de México y el mar Caribe, que completan un mosaico de regímenes oceanográficos muy diversos.

En todos estos sistemas, la clorofila-a actúa como indicador integrador de la productividad primaria, permitiendo localizar zonas de alta biomasa, anticipar la disponibilidad de recursos pesqueros y respaldar decisiones de manejo en una región donde la pesca y la acuicultura son pilares económicos y de seguridad alimentaria.

El seguimiento sistemático de la clorofila-a es también clave para la gestión ambiental costera, permitiendo detectar y dar seguimiento a las floraciones algales nocivas (recurrentes en los fiordos del sur de Chile, donde afectan a la salmonicultura y a la extracción de mariscos), identificar procesos de eutrofización asociados a descargas urbanas y agrícolas, y vigilar el estrés sobre ecosistemas sensibles, como los arrecifes de coral del Caribe. Estas capacidades otorgan a las herramientas basadas en sensores remotos un rol de alerta temprana esencial para proteger la salud pública, la actividad productiva y la integridad de los ecosistemas litorales.

Finalmente, la región de América Latina y el Caribe está fuertemente influenciada por la variabilidad climática, en especial por el ciclo El Niño-La Niña, que altera de forma drástica la productividad oceánica frente a Sudamérica. Las series temporales de clorofila-a permiten caracterizar estos eventos, evaluar el papel del océano en el ciclo del carbono y detectar tendencias de largo plazo en un escenario de cambio climático. Dado que el muestreo *in situ* en la región es escaso y discontinuo, la observación satelital ofrece una cobertura amplia, sistemática y comparable entre países, consolidándose como una herramienta indispensable para la investigación oceanográfica y la toma de decisiones a escala regional.

3. Especificaciones del producto

A continuación, se detallan las especificaciones técnicas del producto de Clorofila-a (CHL) del Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile, organizadas en los siguientes aspectos: información general del producto, descripción de su contenido y cobertura, y formato de distribución. Esta documentación está orientada a facilitar la correcta descarga, lectura e integración del producto en herramientas de análisis oceanográfico, ecológico y de gestión ambiental costera.

3.1 Información general

La presente subsección reúne los parámetros técnicos que definen el producto de Clorofila-a (CHL) generado por el Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile. Esta información proporciona al usuario una caracterización completa del producto antes de su descarga y aplicación en estudios de productividad primaria, ecología marina o gestión ambiental costera. La Tabla 1 resume los atributos generales del producto, incluyendo nombre, versión, sensores fuente (MODIS Aqua, VIIRS SNPP, VIIRS NOAA-20 y Sentinel-3 OLCI), resolución espacial (0,01°, ~1km), resolución temporal mensual, formato de distribución (NetCDF4 y ZARR), nivel de procesamiento (L4, gap-free), convenciones de metadatos (CF-1.7, ACDD-1.3) y dominio espacial del producto sobre la región de América Latina y el Caribe (Figura 1).

Tabla 1. Información general del producto clorofila-a (CHL).

Producto	2024-L4_CHL-a_monthly_v0.1
Resolución espacial	0.01° (~1 km)
Resolución temporal	Mensual
Variable	CHL
Formato (estándar)	NetCDF4, ZARR (CF-1.7, ACDD-1.3)
Cobertura Geográfica	Costas de América Latina y el Caribe hasta 200 millas náuticas (mn) mar adentro
Cobertura temporal	2024
Frecuencia de actualización	Anual

Fuente: Elaboración propia.

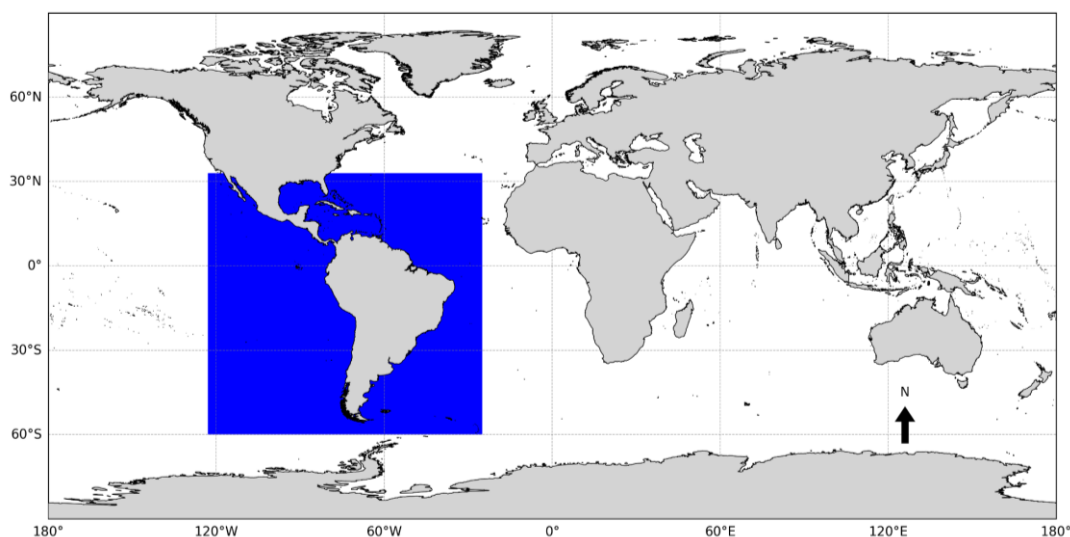


Figura 1. Dominio espacial (azul) del producto clorofila-a. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Descripción del producto

El conjunto de datos de Clorofila-a (CHL) para América Latina y el Caribe (LAC) entrega productos mensuales de nivel 4 (L4), generados a partir de observaciones satelitales de nivel 2 (L2) provenientes de los sensores Sentinel-3 OLCI, MODIS Aqua, VIIRS SNPP y VIIRS NOAA-20. Cada misión aporta reflectancia remota (R_{rs}) y estimaciones de clorofila obtenidas mediante algoritmos de la familia OCx/CI (OC3M, OC4v6/OCI, OC4ME) (O'Reilly, 2019), los cuales son mutuamente consistentes y adecuados para su integración multisensor.

El producto final ofrece campos mensuales continuos de CHL con una resolución espacial de 0.01° (~ 1 km). Para ello, se combina un esquema de fusión multisensor con técnicas de interpolación espacio-temporal y reconstrucción basada en redes neuronales, lo que permite obtener un campo sin espacios (gap-free) y coherente bio-ópticamente. El resultado es validado frente a mediciones *in situ* y comparado con modelos y productos internacionales, generando un conjunto de datos robusto para estudios ecológicos, análisis de productividad, modelación biogeoquímica y aplicaciones operativas en zonas costeras y oceánicas.

3.3 Formato del producto

El producto de CHL se distribuye en formato NetCDF4 y ZARR, bajo las convenciones Climate and Forecast Metadata (CF-1.7) y Attribute Convention for Data Discovery (ACDD-1.3), lo que permite almacenar grandes volúmenes de datos estructurados y con un fácil acceso para su posterior análisis.

A continuación, se presenta la estructura general de archivos NetCDF (Tabla 2), atributos globales de los metadatos (Tabla 3), variables principales (Tabla 4) y máscaras y valores de relleno (Tabla 5).

Tabla 2. Estructura general del archivo NetCDF.

Dimensión	Descripción	Tipo
time	tiempo de referencia (diario, promedio nocturno)	double
lat	latitud (grados norte)	double
lon	longitud (grados este)	double

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Atributos globales de los metadatos.

Atributo	Valor
institution	CopernicusLAC Chile
source	L3S monthly multi-sensor composites fused into gap-free L4 analysis (SLSTR reference)
id	2024-L4_CHL-a_monthly_v0.1
references	CF-1.7; ACDD-1.3
product_version	v1.0
time_coverage_start	2024-01-01T00:00:00Z
time_coverage_end	2024-12-31T23:59:59Z
geospatial_lat_min	-59.995
geospatial_lat_max	32.995
geospatial_lon_min	-122.995
geospatial_lon_max	-25.005

title	Monthly multi-sensor fused chlorophyll product, LAC 1 km
summary	Monthly multi-sensor fused chlorophyll-a product for LAC at 1 km
history	L3C-to-L3S daily multi-sensor fusion (2025-12-09); Monthly aggregation run (2025-12-17): chlor_a = exp(mean(ln(chl))); chlor_a_median = exp(median(ln(chl))); bitmasks = OR
time_coverage_resolution	P1M
collation_input	List of daily L3S files*
date_created	2026-01-06T11:43:39Z
date_modified	2026-01-06T11:43:39Z
project	CopernicusLAC Chile
processing_level	L4
processing_mode	delayed
license	free and open
geospatial_bounds	POLYGON((-122.995 -59.995 ...))
geospatial_bounds_crs	EPSG:4326
spatial_resolution	0.010° (~1 km)
temporal_resolution	monthly
instrument	multisensor
platform	multisensor
keywords	chlorophyll, ocean color, LAC, multisensor, OLCI, MODIS, VIIRS
publisher_name	CopernicusLAC Chile
publisher_email	info@copernicuslac-chile.eu
publisher_url	https://www.copernicuslac-chile.eu/
metadata_link	https://www.copernicuslac-chile.eu/
Conventions	CF-1.7, ACDD-1.3
_NCProperties	version=2, netcdf=4.9.3, hdf5=1.14.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Variables principales.

Variable	Nombre estándar (CF)	Descripción	Unidades	Tipo
chlor_a	mass_concentration_of_chlorophyll_a_in_sea_water	Concentración mensual de clorofila-a fusionada multisensor (variable principal). Calculada mediante fusión logarítmica y reconstrucción L4.	mg m ⁻³	float32
source_of_chl	(not applicable; no CF standard_name exists for bitmask)	Bitmask que indica qué sensores contribuyeron al valor final de CHL (MODIS, VIIRS-SNPP, VIIRS-N20, OLCI).	-	int16 / uint8
l2_flags	(not applicable; flag variable)	Banderas de calidad provenientes de datos L2 (cloud, glint, AC failure, geometrías inválidas). Combinadas mediante OR lógico entre sensores.	-	Int32
nobs_chl	number_of_observations (CF recommended)	Número de observaciones válidas utilizadas para generar el campo mensual (representatividad del compuesto).	-	int16 / int32
lat	latitude	Latitud del centro de píxel.	degrees_north	float64
lon	longitude	Longitud del centro de píxel.	degrees_east	float64
time	time	Tiempo del compuesto mensual (inicio del mes).	seconds since 1970/01/01	float64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Banderas y valores de relleno.

l2_flags: Máscaras de calidad		
Bandera	Nombre	Descripción
1	LAND	El píxel corresponde a tierra
2	CLOUD	Contaminación por nubes
4	HIGLINT	Alto glint solar no corregible
8	HISATZEN	Ángulo solar/sensor saturado o geometría inválida
16	HILT	Saturación radiométrica en la banda
32	CLDICE	Hielo/nubes de alta reflectancia
64	NAVWARN	Error potencial de geolocalización
128	ATMFAIL	Corrección atmosférica fallida
256	LOWLW	Radiancia demasiado baja (ruido)
512	CHLWARN	Advertencia en estimación de clorofila
1024	MAXAERITER	Iteraciones máximas de AC excedidas
2048	SEAICE	Hielo marino detectado
4096	HWHITE	Agua extremadamente brillante
8192	HISOLZEN	Ángulo solar alto en zonas polares

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Banderas y valores de relleno.

source_of_chl: trazabilidad multisensor		
Bandera	Nombre	Descripción
1	MODIS_Aqua	El píxel incluye contribución válida proveniente del sensor MODIS Aqua.
2	VIIRS_NPP	El píxel incluye contribución válida proveniente del sensor VIIRS de Suomi-NPP
4	VIIRS_NOAA20	El píxel incluye contribución válida proveniente del sensor VIIRS de NOAA-20.
8	OLCI	El píxel incluye contribución válida proveniente del sensor Sentinel-3 OLCI
16	model	El valor final fue completado, corregido o reconstruido mediante el módulo de análisis L4 (interpolación + U-Net).

A continuación, se presenta un ejemplo de visualización del producto, con el objetivo de ilustrar la representación espacial de la variable, la distribución de los valores sobre el área de estudio y el formato en que la información es desplegada al usuario dentro del servicio.

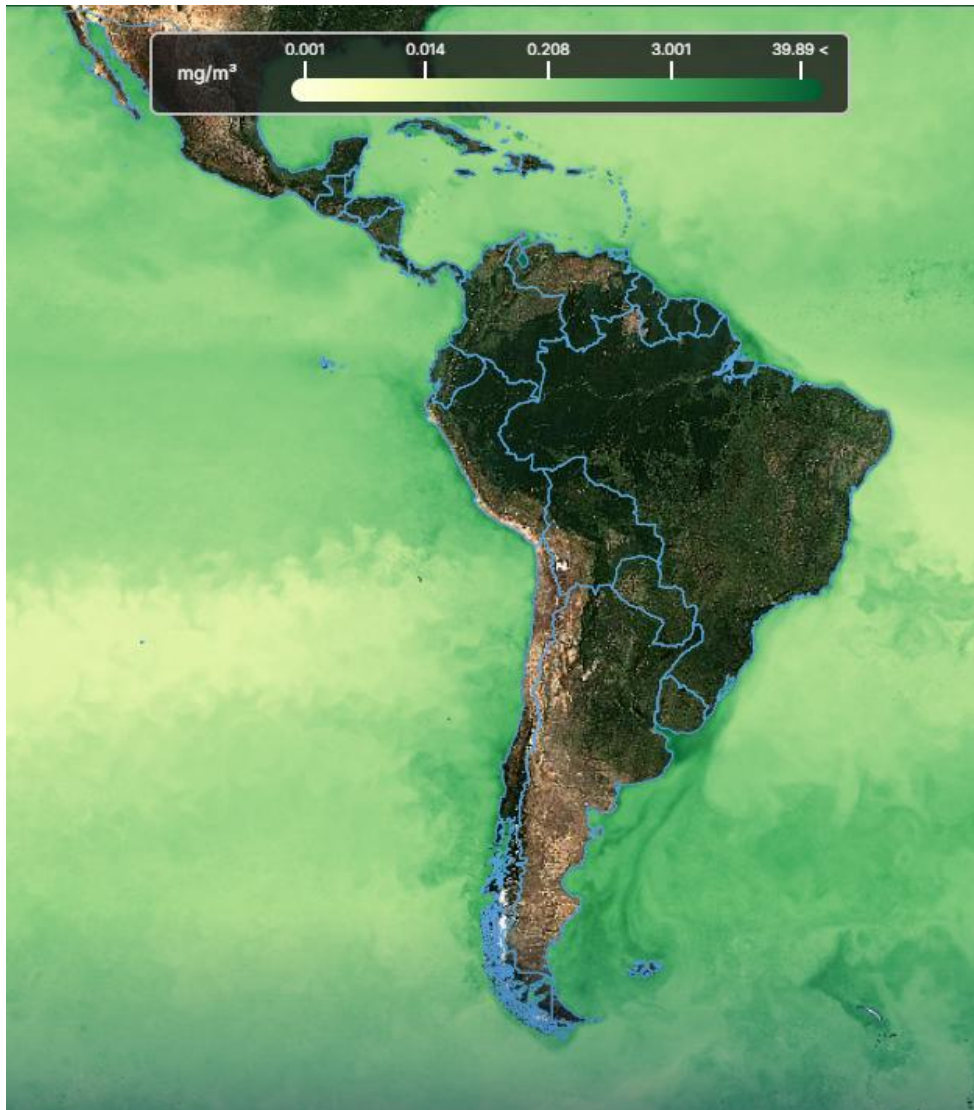


Figura 2. Despliegue del producto Clorofila-a (CHL), enero 2024. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

4. Resumen metodológico

4.1 Sistema de producción y procesado

El sistema de producción del producto de Clorofila de CopernicusLAC Chile se basa en protocolos OC-CCI/GlobColour. Se aplica QC de nivel 2, reproyección a 1km (L3U), composición diaria (L3C), fusión logarítmica multisensor (L3S) y composición mensual (L3M). La fusión se realiza solo para CHL; Rrs y NFLH se mantienen por sensor (CMEMS, 2024; Hernández et al., 2018; IOCCG, 2019; Maritorena et al., 2010; O'Reilly & Werdell, 2019).

Tabla 7. Fuentes de datos satelitales.

Conjunto de datos	Resolución espacial	Resolución temporal	Referencia / Fuente
OLCI – Sentinel-3A/B (L2)	~300 m (FR), remuestreado a 1 km	Revisita global ~1-2 días; entrega diaria	EUMETSAT – Copernicus Data Space: https://data.eumetsat.int
MODIS Aqua (L2)	1 km	Revisita diaria en órbita polar	NASA Earthdata: https://search.earthdata.nasa.gov
VIIRS – Suomi NPP / NOAA-20 (L2)	750 m – 1 km	Revisita diaria (~14-16 órbitas/día global)	NASA Earthdata / NOAA CoastWatch: https://search.earthdata.nasa.gov
Clorofila-a (algoritmos OCx / CI)	300 m – 1 km (según sensor)	Diaria	OC3M (MODIS), OC4v6/OCI (VIIRS), OC4ME (OLCI)
Batimetría	30" (~1 km) / 15" según versión	Estática	GEBCO: https://www.gebco.net
Máscara tierra-mar / máscara de observación	0.01° (rejilla LAC)	Estática	CopernicusLAC Chile (derivada de la grilla regional)
Temperatura Superficial del Mar (SST)	0.01° (~1 km)	Mensual / diaria	Servicio de Monitoreo de Costas – CopernicusLAC Chile
Datos <i>in situ</i> – clorofila y bio-óptica	Puntual (estaciones, campañas)	Variable según plataforma	NASA SeaBASS: https://seabass.gsfc.nasa.gov
Histórico multianual de Chl-a	4-25 km (según producto)	Mensual	ESA OC-CCI / GlobColour

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Filtros e indicadores de calidad

El control de calidad se aplica inicialmente a nivel 2 (L2), utilizando las banderas oficiales provistas por cada misión satelital. Estas incluyen CLOUD (presencia de nubes), LAND (contaminación por señal terrestre), HIGLINT (alto brillo por reflexión especular), HISATZEN (geometrías solares y de visión no válidas), HILT (saturación), NAVWARN (errores de geolocalización) y ATMFAIL (fallas en la corrección atmosférica). Todas las observaciones que presentan una o más de estas banderas críticas son descartadas antes del reprocesamiento. Adicionalmente, se aplican filtros físicos estrictos sobre la reflectancia remota (R_{rs}), eliminando valores negativos, saturados o fuera de rango bio-óptico razonable ($0-0.15 \text{ sr}^{-1}$), y sobre la clorofila estimada, descartando valores no físicos ($\text{CHL} < 0$) o no compatibles con las condiciones regionales ($\text{CHL} > 100 \text{ mg m}^{-3}$ en el dominio LAC oceánico). Estos pasos aseguran que solo píxeles radiométricamente consistentes contribuyan al producto.

Durante el remuestreo L3U, la composición L3C y la fusión multisensor L3S, los indicadores de calidad se incorporan mediante un esquema acumulativo basado en la operación lógica OR entre las variables de etiquetas de calidad (flags) válidas de todos los sensores que contribuyen a cada celda. Este procedimiento preserva la trazabilidad del origen y calidad de los datos, permitiendo identificar condiciones atmosféricas complejas, geometrías problemáticas o potenciales anomalías radiométricas incluso después de la fusión. La aplicación sistemática de estas máscaras y filtros garantiza que el producto final L4 se construya únicamente a partir de observaciones robustas, reduciendo la propagación de errores y mejorando la estabilidad bio-óptica del campo reconstruido.

4.3 Información de la grilla

Todos los productos y niveles se interpolan a una malla regular de 0.01° , con coordenadas en el centro de cada celda (lat, lon). El dominio se extiende de -123° O a -25° E y de -60° S a 33° N (Figura 3).

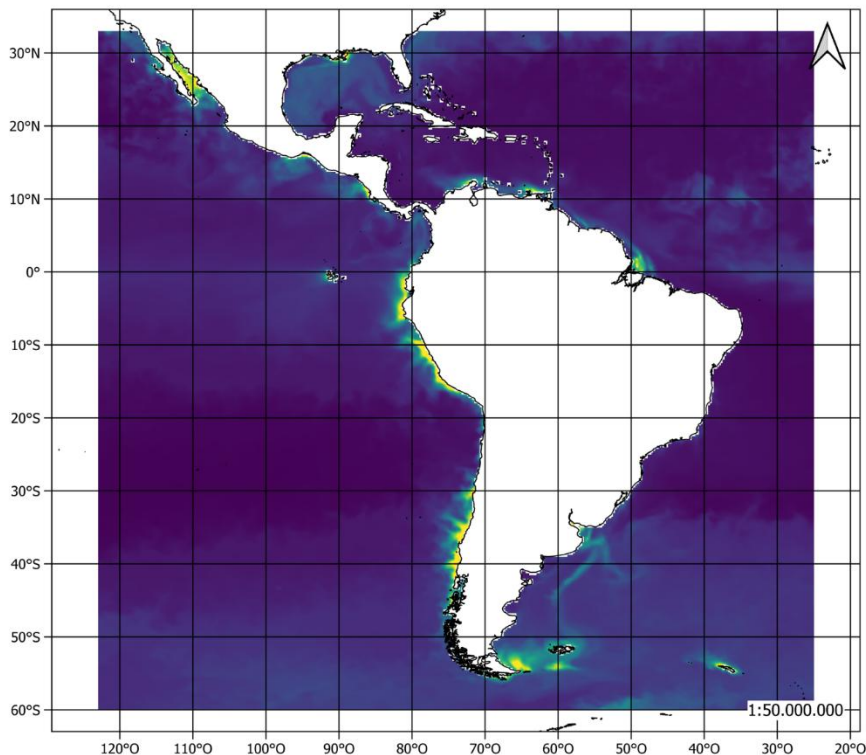


Figura 3. Dominio espacial del producto Clorofila-a (CHL), enero 2024.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Cadena de procesamiento

El sistema de producción del producto de Clorofila-a (CHL) sigue una estructura jerárquica coherente con los sistemas operacionales de color oceánico de CMEMS, GlobColour y ESA OC-CCI. La cadena de procesamiento se apoya en el marco Python para aplicaciones de color oceánico. La cadena transforma observaciones satelitales de nivel 2 (L2) en un campo mensual continuo de nivel 4 (L4), asegurando consistencia intersensorial, estabilidad radiométrica y coherencia bio-óptica (Figura 4).

El flujo completo consta de las siguientes etapas:

1. **Reproyección y control de calidad (QC):** Los archivos de nivel 2 (L2) de MODIS Aqua, VIIRS SNPP, VIIRS NOAA-20 y Sentinel-3 OLCI se someten a un control de calidad uniforme basado en flags oficiales (CLOUD, LAND, HIGLINT, HISATZEN, HILT, CLDICE, NAVWARN, ATMFAIL) y en umbrales bio-ópticos que

descartan valores no físicos en reflectancia remota (R_{rs}) y clorofila (CHL). Posteriormente, las observaciones válidas se proyectan sobre una grilla regular de 0.01° (~ 1 km), generando para cada sensor un producto single-sensor uncollated (L3U). En cada celda se calcula la media de los píxeles válidos y el número total de observaciones contribuyentes (N). Esta etapa homogeniza las distintas geometrías, resoluciones espectrales y densidades de muestreo de cada misión.

2. **Composición diaria por sensor:** Todos los productos L3U generados en un mismo día se combinan para construir un mosaico diario por sensor (L3C). La composición utiliza el dominio logarítmico ($\log_{10}(\text{CHL})$), lo cual reduce el impacto de errores multiplicativos entre sensores y estabiliza la señal bio-óptica, especialmente en regiones oligotróficas. El resultado es un campo diario radiométricamente consistente para cada misión, acompañado de información de trazabilidad (N_obs diarios) y máscaras de calidad acumuladas mediante OR lógico.
3. **Fusión multisensor:** La etapa de fusión sigue los principios descritos en Garnesson et al. (2019) para GlobColour y en Maritorena et al. (2010) para la fusión espectral GSM. La fusión se realiza exclusivamente sobre $\log_{10}(\text{CHL})$, dado que los algoritmos OC3M (MODIS), OC4v6/OCI (VIIRS) y OC4ME (OLCI) son mutuamente consistentes cuando se comparan en el dominio logarítmico. Para cada celda y día, se promedian los valores aportados por los sensores disponibles, generando un producto diario L3S. En paralelo, se construye un indicador de trazabilidad sensor_source, basado en un bitmask que identifica qué sensores contribuyeron (p. ej., MODIS=1, SNPP=2, N20=4, OLCI=8). Los flags se combinan mediante OR lógico para preservar advertencias radiométricas y atmosféricas a lo largo de toda la cadena.
4. **Composición mensual:** Los productos multisensor L3S diarios se integran mensualmente mediante la mediana del $\log_{10}(\text{CHL})$, técnica que reduce la influencia de valores atípicos y anomalías residuales asociadas a nubes persistentes, errores instrumentales o contaminaciones atmosféricas. El resultado es un campo mensual L3M, acompañado de información de trazabilidad agregada y máscaras de calidad mensuales generadas por OR lógico. Esta etapa produce un campo robusto y estable para análisis ecológicos y climáticos.
5. **Análisis y reconstrucción mensual continua (gap-free field):** Los mosaicos mensuales L3M sirven de entrada a una etapa de análisis que produce un campo L4 mensual sin huecos (gap-free). Este proceso integra métodos deterministas y técnicas avanzadas de aprendizaje profundo, siguiendo un enfoque híbrido:

- Interpolación espacio-temporal óptima: se aplica sobre las anomalías y patrones principales de la clorofila, considerando la coherencia espacial y temporal del campo bio-óptico. Esta etapa reconstruye regiones parcialmente observadas, manteniendo gradientes costeros y estructuras oceánicas de mesoescala.
- Reconstrucción no lineal mediante red neuronal U-Net Hann 2D: el modelo se entrena con series históricas multianuales, incluyendo variables auxiliares como temperatura superficial del mar (SST), batimetría y máscara de observación. La arquitectura U-Net con ventanas Hann reduce artefactos de borde y preserva la continuidad espacial. Esta fase refina la distribución mensual de la clorofila, rellena huecos residuales y mejora la estabilidad en zonas costeras y regiones de alta variabilidad bio-óptica.

El resultado final es un producto L4 mensual, espacialmente continuo y bio-ópticamente coherente, adecuado para aplicaciones climáticas, validación de modelos oceánicos, análisis de productividad, gestión ambiental y monitoreo operativo en zonas costeras y oceánicas de América Latina y el Caribe.

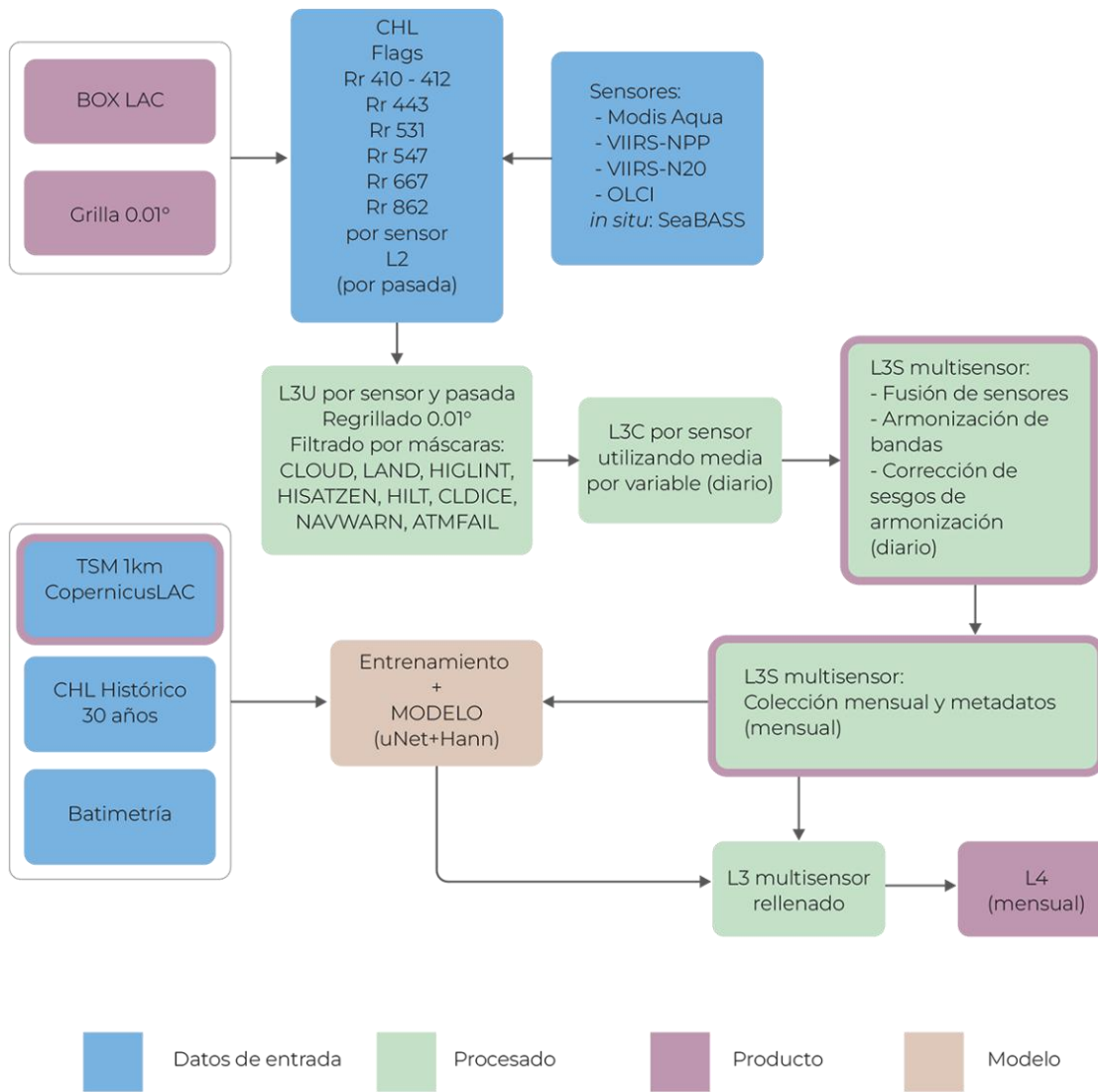


Figura 4. Cadena de procesamiento del producto Clorofila-a (CHL).

Fuente: Elaboración propia.

5. Limitaciones

Las principales limitaciones conocidas del producto de Concentración de Clorofila (CHL) L4 de CopernicusLAC Chile son inherentes a las características técnicas de los sensores utilizados, al dominio geográfico definido y a los procesos de reconstrucción y relleno espacial aplicados para garantizar la continuidad del campo (gap-free). Su conocimiento es fundamental para una correcta interpretación y uso del producto, especialmente en aplicaciones que requieran precisión en regiones de alta latitud, zonas de aguas continentales o en períodos con cobertura nubosa persistente. Las principales limitaciones identificadas son las siguientes:

- **Cobertura:** No se incluye el área polar debido a las limitaciones de los satélites y la geometría de la órbita de los sensores.
- **Condiciones atmosféricas:** Las nubes y otras condiciones atmosféricas pueden afectar la calidad de los datos. Sin embargo, las banderas de calidad permiten identificar y filtrar estos valores.
- **Errores en el relleno:** Aunque se aplica un relleno basado en interpolación espacial y temporal, pueden existir pequeñas imprecisiones en áreas sin datos.
- **Representatividad:** El producto no es representativo de aguas continentales o zonas glaciares.
- **Errores del sensor:** VIIRS SNPP presenta drift radiométrico mitigado en la fusión.

6. Control y evaluación de calidad

Este capítulo describe el marco metodológico de validación y los procedimientos de control de calidad aplicados al producto de Clorofila-a (CHL) CopernicusLAC Chile. Se organiza en tres componentes: el marco general de validación, incluyendo métricas de desempeño y control interno de calidad, y la evaluación de cobertura y consistencia espacial. El conjunto de indicadores presentados permite al usuario evaluar la fiabilidad del producto para sus aplicaciones específicas en el dominio de América Latina y el Caribe.

6.1 Marco general de validación

La validación del producto de Clorofila-a (CHL) CopernicusLAC Chile se realizó siguiendo el marco metodológico del Ocean Colour Thematic Assembly Center (OCTAC) descrito en CMEMS-OC-QUID-009-107to134 (Vittorio, et al., 2024), las recomendaciones del International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG) en Protocol Series de 2022, y considerando la disponibilidad real de datos *in situ* en el dominio LAC durante el período de evaluación. La comparación con radiometría óptica *in situ* siguió los protocolos de validación de Zibordi et al. (2019).

La validación se desarrolló con datos *in situ* y productos satelitales externos para asegurar la calidad del producto. La combinación de ambas fuentes es recomendada como una herramienta complementaria válida cuando las observaciones *in situ* son escasas (CMEMS, 2024). Enfoques complementarios:

1. **Validación con observaciones *in situ* (SeaBASS):** Disponibles principalmente en el Caribe para el intervalo temporal analizado. Las mediciones *in situ* de CHL (HPLC y fluorometría) se utilizaron como referencia absoluta para evaluar:
 - Sesgo logarítmico,
 - Dispersión robusta (RMAD),
 - RMSLE,
 - Error relativo (MAPE),
 - Correlación Pearson en escala log10.

Este procedimiento sigue la práctica estándar dada la distribución lognormal de la clorofila y su sensibilidad regional (oligotrófico, mesotrófico, eutrófico).

Para garantizar la compatibilidad metodológica, solo se emplean mediciones *in situ* coincidentes en la capa superficial (≤ 5 m) y sometidas a control de calidad individual. Las comparaciones se realizan interpolando bilinealmente el campo mensual del producto (L3M/L4) hacia la ubicación y fecha de cada medición de SeaBASS.

2. **Validación basada en un producto operacional externo (modelo-modelo):**

Para regiones donde no existían datos *in situ* coincidentes, se adoptó un procedimiento de validación por consistencia, utilizando como referencia externa el producto:

Global Ocean Colour Plankton MY L4 monthly observations ID:
OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_108

Este producto es uno de los conjuntos de datos globales más estables y robustos disponibles, combinando:

- CHL mensual L4,
- Desviación estándar mensual (CHL_error),
- Número de observaciones (CHL_count), proveniente de la fusión multianual OC-CCI.

El uso de este dataset permite evaluar la coherencia espacial del producto CopernicusLAC Chile, analizar gradientes costeros y oceánicos, verificar estabilidad regional, e identificar anomalías sistemáticas o artefactos en la reconstrucción L4.

El proceso incorpora además indicadores internos de calidad derivados del procesamiento (banderas L2, bitmask multisensor, número de observaciones válidas) y metadatos que documentan la versión del algoritmo, la fusión multisensor y la trazabilidad del dataset.

El sistema de calidad integra tres componentes:

1. **Control radiométrico:** Comparación directa frente a mediciones *in situ* de SeaBASS (HPLC/fluorimetría), con análisis de sesgo, dispersión y error relativo logarítmico. Este control evalúa la consistencia espectral de OLCI, MODIS y VIIRS después de la fusión.
2. **Control espacial:** Análisis de coherencia bio-óptica en zonas clave: costa y plataforma continental, zonas oceánicas oligotróficas del Atlántico Sur y Pacífico, y regiones estuarinas (Plata, Orinoco, Amazonas).
3. **Control temporal:** Monitoreo de la estabilidad intermensual del producto, detección de discontinuidades, análisis de tendencias artificiales y consistencia con series climatológicas.

6.2 Métricas de desempeño

Las métricas de desempeño cuantifican la concordancia entre el producto de Clorofila-a (CHL) CopernicusLAC Chile y las observaciones de referencia, tanto *in situ* (SeaBASS) como de productos satelitales externos (OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_MY_009_108). Dado que la concentración de clorofila presenta una distribución lognormal característica de variables bio-ópticas, las métricas se calculan en escala logarítmica ($\log_{10}$) para garantizar una evaluación estadísticamente apropiada y comparable con estándares internacionales OC-TAC/IOCCG. La Tabla 8 presenta los resultados de sesgo logarítmico (BIAS), desviación estándar (STD), raíz del error cuadrático medio logarítmico (RMSLE), error porcentual absoluto medio (MAPE) y coeficiente de correlación de Pearson (r) en escala $\log_{10}$, obtenidos durante el período de evaluación sobre el dominio LAC. Estos indicadores permiten identificar tendencias sistemáticas en el estimador, cuantificar la dispersión del error y verificar la correlación con las mediciones de referencia independientes.

Tabla 8. Métricas de desempeño.

Métrica	Descripción	Fórmula	Unidad
Sesgo (BIAS)	Diferencia media entre CHL satelital e <i>in situ</i> en $\log_{10}$.	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log_{10}(CHL_{sat,i}) - \log_{10}(CHL_{insitu,i}))$	mg m^{-3}
Desviación estándar (STD)	Dispersión de las diferencias respecto al sesgo promedio.	$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - BIAS)^2}$ Donde $D_i = \log_{10}(CHL_{sat,i}) - \log_{10}(CHL_{insitu,i})$	mg m^{-3}
RMSLE (Root Mean Square Log Error)	Error cuadrático medio en espacio logarítmico.	$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i)^2}$ Donde $D_i = \log_{10}(CHL_{sat,i}) - \log_{10}(CHL_{insitu,i})$	mg m^{-3}
MAPE (Error porcentual absoluto)	Magnitud del error relativo.	$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{CHL_{sat,i} - CHL_{insitu,i}}{CHL_{insitu,i}} \right $	%
r (Pearson)	Correlación lineal en escala logarítmica.	$r = \frac{S_i(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{S_i(x_i - \bar{x})^2 S_i(y_i - \bar{y})^2}}$ Donde $x_i = \log_{10}(CHL_{sat,i})$, y $y_i = \log_{10}(CHL_{insitu,i})$	-

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Control interno de calidad

Cada archivo NetCDF incluye metadatos que documentan el flujo de procesamiento (history), la trazabilidad de las fuentes (source, collation_input), las fechas de creación y modificación del dataset (date_created, date_modified) y la caracterización espacial y temporal del dominio (geospatial_* y time_coverage_*). Estos elementos permiten verificar la consistencia del producto y asegurar la reproducibilidad del procedimiento multisensor utilizado.

Durante el procesamiento se aplican controles internos destinados a garantizar la consistencia del producto mensual. Estos controles incluyen:

- **Verificación básica de integridad del archivo NetCDF: comprobando** la coherencia de sus dimensiones, variables y metadatos generales.
- **Control de coherencia espacial:** evaluado mediante la inspección de gradientes bio-ópticos, la detección de valores anómalos y la aplicación de las máscaras de calidad heredadas de los datos L2 (L2 flags).
- **Control de rango físico:** aplicando límites plausibles de clorofila para aguas oceánicas y costeras ($0.001\text{--}100\text{ mg m}^{-3}$) y descartando valores no físicos asociados a fallos de corrección atmosférica o condiciones de observación inválidas.
- **Auditoría temporal:** mediante la evaluación de la estabilidad intermensual del producto y su comparación con climatologías y promedios multianuales derivados de OC-CCI y GlobColour, con el fin de detectar discontinuidades no físicas en la serie.
- **Control post-relleno (solo L4):** contrastando el campo reconstruido con el mosaico L3M original y verificando la preservación de gradientes bio-ópticos en zonas costeras y regiones de surgencia, así como la ausencia de artefactos asociados al proceso de reconstrucción.

6.3 Evaluación de cobertura y consistencia

El producto mensual presenta cobertura espacial mejorada en regiones afectadas por nubosidad persistente o geometrías desfavorables, gracias al esquema de fusión logarítmica multisensor y a los mecanismos de reconstrucción aplicados en L4.

A escala regional, el producto muestra una alta coherencia espacial respecto a estructuras bio-ópticas conocidas del dominio LAC, tales como los giros subtropicales, los sistemas de surgencia del Pacífico Suroriental, las plumas fluviales del Amazonas y Orinoco, así como zonas altamente productivas en el Caribe occidental y el Atlántico suroccidental. La

distribución espacial resultante es consistente con climatologías históricas de OC-CCI y GlobColour y con la señal observada en productos CMEMS L4.

En áreas costeras de alta dinámica, como Chile central, Caribe colombiano y el litoral sudeste de Brasil, el producto reproduce adecuadamente gradientes y patrones de variabilidad espacial, manteniendo coherencia con observaciones *in situ* disponibles y con otros productos satelitales de referencia. Estas comparaciones confirman que la fusión multisensor y el análisis L4 preservan adecuadamente la estructura espacial del campo bio-óptico, sin introducción significativa de artefactos ni suavizado excesivo en zonas de alta variabilidad.

7. Referencias

Copernicus Data Space Ecosystem. (2025). *Data Space Browser*.
<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). (2024). *Ocean Colour Product Quality Assessment Report (PQAR) – CHL products v6.0*.
https://dast.data.compute.cci2.ecmwf.int/documents/satellite-ocean-colour/v6.0/WP2-FDDP-2022-04_C3S2-Lot3_PQAR-of-v6.0-OceanColour-product_v1.1_FINAL.pdf

Eaton, B., Gregory, J., Drach, B., Taylor, K., Hankin, S., Caron, J., Signell, R., Bentley, P., Rappa, G., Höck, H., Pamment, A., Jukes, M., & Raspaud, M. (2017). CF-1.7: *Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions*. <https://cfconventions.org/Data/cf-conventions/cf-conventions-1.7/cf-conventions.html>

ESIP Federation Metadata Committee. (2015). Attribute Convention for Data Discovery 1.3 (ACDD-1.3). https://wiki.esipfed.org/Attribute_Convention_for_Data_Discovery_1-3
EUMETSAT. (2025).

EUMETSAT Data Store. <https://data.eumetsat.int/search>

Garnesson, P., Mangin, A., Fanton d'Andon, O., Demaria, J., & Bretagnon, M. (2019). The CMEMS GlobColour chlorophyll a product based on satellite observation: multi-sensor merging and flagging strategies. *Ocean Science*, 15, 819–830. <https://doi.org/10.5194/os-15-819-2019>

Hernandez, F., Smith, G., Baetens, K., Cossarini, G., Garcia-Hermosa, I., Drévilon, M., Maksymczuk, J., Melet, A., Régnier, Ch. & Schuckmann, K. (2018). Measuring performances, skill and accuracy in operational oceanography: New challenges and approaches. In E. Chassignet, A. Pascual, J. Tintoré, & J. Verron (Eds.), *New frontiers in operational oceanography* (pp. 759–796). GODAE OceanView.
<https://doi.org/10.17125/gov2018.ch29>

International Ocean Colour Coordinating Group. (n.d.). *IOCCG reports*.
<https://ioccg.org/what-we-do/ioccg-publications/ioccg-reports/>

International Ocean Colour Coordinating Group. (2019). *Uncertainties in ocean colour remote sensing* (F. Mélin, Ed.; IOCCG Report Series No. 18).
<https://doi.org/10.25607/OBP696>

International Ocean Colour Coordinating Group. (2022). Aquatic primary productivity field protocols for satellite validation and model synthesis (IOCCG Protocol Series).
<https://doi.org/10.25607/OBP-1835>

Maritorena, S., Fanton, O., Mangin, A., & Siegel, D. (2010). Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1791–1804. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.002>

NASA Earthdata. (2025). *Earthdata Search Portal*. <https://search.earthdata.nasa.gov/>

O'Reilly, J. E., & Werdell, P. J. (2019). Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*, 229, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>

Brando, V. E., Santoleri, R., Colella, S., Volpe, G., Di Cicco, A., Sammartino, M., González Vilas, L., Lapucci, C., Böhm, E., Zoffoli, M. L., Cesarini, C., Forneris, V., La Padula, F., Mangin, A., Jutard, Q., Bretagnon, M., Bryère, P., Demaria, J., Calton, B., ... Lebreton, C. (2024). Overview of Operational Global and Regional Ocean Colour Essential Ocean Variables Within the Copernicus Marine Service. *Remote Sensing*, 16(23), 4588. <https://doi.org/10.3390/rs16234588>

Zibordi, G., Voss, K. J., Johnson, B., & Mueller, J. L. (2019). Protocols for satellite ocean colour data validation: In situ optical radiometry. *In IOCCG ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation. International Ocean Colour Coordinating Group*. <https://doi.org/10.25607/OBP-691>