

Manual de Usuario Monitoreo de Costas

Temperatura superficial del Mar (TSM)

Documento Técnico

Junio 2026

Tabla de contenidos

1. Resumen ejecutivo.....	4
2. Introducción	5
3. Especificaciones del producto.....	7
3.1 Información general	7
3.2 Descripción del producto.....	8
3.3 Formato del producto	9
4. Resumen metodológico	14
4.1 Sistema de producción y procesado	14
4.2 Filtros e indicadores de calidad	15
4.3 Información de la grilla.....	15
4.4 Cadena de procesamiento	16
5. Limitaciones.....	20
6. Control y evaluación de calidad.....	21
6.1 Marco general de validación	21
6.1.1 Métricas de desempeño.....	22
6.1.2 Control interno de calidad	23
6.2 Evaluación de cobertura y consistencia	24
7. Referencias	26

Acceso y licencia

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

Licencia: GHR SST Protocol Free and Open data.

Citación recomendada:

- **Manual de usuario:** CopernicusLAC Chile (2025). Manual de Usuario Monitoreo de Costas: Análisis mensual de Temperatura Superficial del Mar (0.02°) 2024 Nivel 4 para América Latina y el Caribe Versión 1.0). <https://www.copernicuslac-chile.eu>
- **Datos:** CopernicusLAC Chile (2025). Temperatura Superficial del Mar (0.02°) 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 de Temperatura Superficial del Mar (TSM/SST) generado por CopernicusLAC Chile para el Servicio de Monitoreo de Costas, a partir de observaciones nocturnas multifuente de sensores remotos, validadas con datos *in situ* para el año 2024.

El producto cubre la región de América Latina y el Caribe (33°N, -60°S, -123°O, -25°E), con una resolución espacial de 0,02° (~2 km en el ecuador) y resolución temporal mensual. Corresponde a un nivel de procesamiento 4 (L4): una variable continua en el espacio, sin píxeles vacíos, obtenida mediante interpolación óptima y reconstrucción basada en aprendizaje profundo.

La SST es reconocida por el Sistema Mundial de Observación del Clima (GCOS) como Variable Climática Esencial (ECV), dado su rol en la regulación del intercambio de calor entre el océano y la atmósfera. El producto está orientado a la investigación climática y oceanográfica, la validación de modelos, la caracterización térmica costera, la gestión pesquera, la alerta temprana ante eventos extremos (ENOS, ciclones tropicales, blanqueamiento de corales) y el diseño de políticas de adaptación costera en la región.

2. Introducción

La Temperatura Superficial del Mar (SST) desempeña un papel central en la regulación de los flujos de calor sensible, calor latente y momentum entre el océano y la atmósfera, procesos que determinan en gran medida el balance energético global y la dinámica de la circulación atmosférica de baja troposfera. Variaciones anómalas de la SST, como las asociadas al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), modulan la posición de la Zona de Convergencia Intertropical, la intensidad de los vientos alisios y los patrones de precipitación a escala regional y global, con impactos directos sobre la agricultura, la disponibilidad hídrica y la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

Desde el punto de vista oceanográfico, la SST constituye un trazador de procesos dinámicos de primer orden, tales como surgencias costeras, frentes térmicos y remolinos de mesoescala, que sostienen la productividad primaria y estructuran la distribución de especies marinas. En el dominio de América Latina y el Caribe, sistemas como la corriente de Humboldt y el frente Brasil-Malvinas dependen de gradientes térmicos superficiales cuya caracterización precisa resulta indispensable para la gestión pesquera y la conservación de ecosistemas costeros.

Asimismo, registros satelitales homogéneos y libres de sesgo instrumental, como el que documenta este producto, constituyen un insumo crítico para la detección de tendencias de calentamiento oceánico, la validación y asimilación de datos en modelos numéricos acoplados océano-atmósfera, y la evaluación de riesgos asociados a la intensificación de ciclones tropicales y al blanqueamiento de arrecifes coralinos (Embury et al., 2024).

Para la región de América Latina y el Caribe, la disponibilidad de un producto de SST de alta resolución espacial y continuidad temporal reviste una relevancia particular, dada la escasa densidad histórica de observaciones *in situ* y la alta vulnerabilidad climática de sus zonas costeras. Los sistemas de surgencia costera como el del Pacífico suroriental, sostienen una de

las pesquerías más productivas del planeta. La dinámica de estos recursos está fuertemente condicionada por las anomalías de SST vinculadas al ENOS: los episodios cálidos (El Niño) se asocian con una reducción temporal de la productividad primaria y de las capturas, mientras que los episodios fríos (La Niña) tienden a favorecer condiciones más productivas.

En el Caribe, las anomalías positivas y persistentes de SST constituyen el principal predictor de eventos de blanqueamiento masivo de corales, con implicancias directas para la biodiversidad arrecifal y las economías locales dependientes del turismo y la pesca artesanal. Asimismo, el monitoreo de la SST en el golfo de México y la cuenca caribeña resulta crítico para la evaluación del potencial de intensificación de ciclones tropicales, dado que temperaturas superficiales por sobre 26 °C constituyen una condición necesaria para su desarrollo.

En este contexto, un producto L4 gap-free, homogéneo y validado localmente, como el descrito en este manual, entrega una base de información robusta para la investigación oceanográfica regional, la gestión pesquera, la alerta temprana ante eventos climáticos extremos y el diseño de políticas de adaptación costera en América Latina y el Caribe.

3. Especificaciones del producto

Las especificaciones técnicas del producto de Temperatura Superficial del Mar (SST/TSM) del Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile, están 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, climático y de gestión ambiental costera.

3.1 Información general

La presente subsección reúne los parámetros técnicos que definen el producto de Temperatura Superficial del Mar (TSM/SST) generado por el Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile. Esta información permite al usuario conocer las características operativas esenciales del producto antes de su descarga y uso en estudios de climatología oceánica, validación de modelos o caracterización térmica costera. La Tabla 1 resume los atributos generales del producto, incluyendo nombre, versión, sensores fuente (SLSTR/Sentinel-3A y 3B, VIIRS/JPSS y NOAA-20, AVHRR/Metop-B y Metop-C), resolución espacial ($0,02^\circ$, ~ 2 km), resolución temporal mensual, formato de distribución (NetCDF4 y ZARR), nivel de procesamiento (L4, gap-free), estándar de metadatos (GHRSSST GDS 2.1, 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 Temperatura Superficial del Mar (TSM).

ID Producto	2024-L4_SST-monthly-GHRSSST_v0.1
Resolución espacial	$0,02^\circ$ (~ 2 km en la línea del ecuador)
Resolución temporal	Mensual
Variable	Temperatura Superficial del Mar Nocturna

Formato (estándar)	NetCDF4, ZARR (GHR SST GDS 2.1)
Cobertura geográfica	33° norte, -60° sur, -123° oeste y -25° este
Cobertura temporal	2024

Fuente: Elaboración propia.

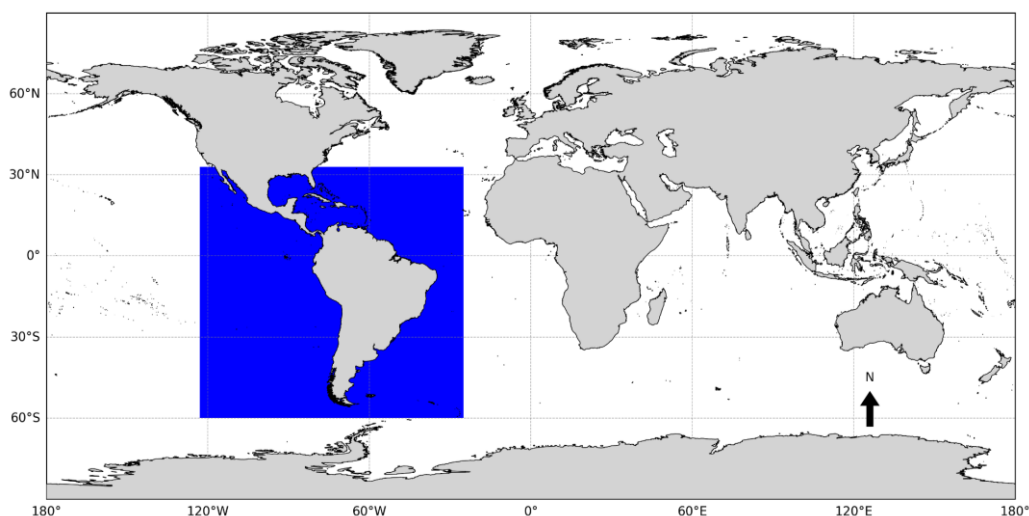


Figura 1. Dominio espacial (azul) del producto Temperatura Superficial del Mar.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Descripción del producto

El conjunto de datos de Temperatura Superficial del Mar para América Latina y el Caribe, elaborado por el Servicio de Monitoreo de Costas de CopernicusLAC Chile, ofrece productos mensuales en nivel 4 de procesamiento (L4), generados a partir de observaciones satelitales de nivel 2 (L2P) adecuadas para el estándar GHR SST (sigla para Grupo de Temperatura Superficial de Mar de Alta Resolución en inglés, Group for High Resolution Sea Surface Temperature) (GHR SST International Project Office, 2025), de los siguientes sensores y plataformas: SLSTR (Sentinel-3A y Sentinel-3B), VIIRS (JPPS y NOAA-20) y AVHRR (Metop-B y Metop-C).

Estos archivos fueron procesados bajo el estándar del GHR SST, “GHR SST Data Processing Specification” (GDS 2.1) (Piollé et al., 2022). Para lograr la continuidad espacial del producto, se utilizó una metodología basada en U-Net (Zhao et al., 2025) con contexto histórico (1981 a 2022) y variables auxiliares (velocidad de viento y batimetría), con prechequeo/armonización de insumos, entrenamiento robusto, inferencia en mosaico y análisis de importancia por canal. Como resultado, los productos de nivel 4 (L4) proporcionan medidas de SST de alta resolución (0.02°), corregida por sesgo y libre de variabilidad diurna.

3.3 Formato del producto

El producto de SST se distribuye en formato NetCDF4 y ZARR, bajo las convenciones Climate and Forecast Metadata (CF-1.7) (Eaton et al., 2017), Attribute Convention for Data Discovery (ACDD-1.3) (ESIP Federation Metadata Committee, 2015) y Group for High Resolution SST (GHR SST GDS-2.1), 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
title	Monthly L4 Sea Surface Temperature Analysis, 2024
summary	Gap-free monthly SST analysis (L4) built from L3S monthly composites
institution	Coastal Monitoring / RDAC CopernicusLAC Chile
project	CopernicusLAC Chile
processing_level	L4
processing_mode	delayed
license	GHRSSST protocol: free and open
id	2024-l4_sst-monthly-ghrsst_v0.1.nc
product_version	v0.1
uuid	801414c1-ecf3-4213-b7de-2228e681dcb5
date_created	2025-10-29T17:54:16Z
time_coverage_start / end	2024-01-01 → 2024-12-31
geospatial_lat_min / max	-60 / 33
geospatial_lon_min / max	-123 / -25
geospatial_bounds	POLYGON((-123, -60, -25, 33))
spatial_resolution	0.02° (~2 km)
temporal_resolution	Monthly
instrument / platform	SLSTR / Sentinel-3A
source	L3S monthly multi-sensor composites fused into gap-free L4 analysis (SLSTR reference).
keywords	EARTH SCIENCE > OCEANS > OCEAN TEMPERATURE > SEA SURFACE TEMPERATURE

publisher_name / email / url	CopernicusLAC Chile / info@copernicuslac-chile.eu / https://www.copernicuslac-chile.eu
metadata_link	https://www.copernicuslac-chile.eu/
references	GHR SST GDS-2.1; CF-1.7; ACDD-1.3
file_quality_level	3
acknowledgment	Please acknowledge Copernicus LAC Chile; this product follows GHR SST GDS-2.1 protocols.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Variables principales.

Variable	Nombre estándar (CF)	Descripción	Unidad	Tipo
analysed_sst	sea_surface_foundation_temperature	Temperatura superficial del mar analizada (campo completo L4, sin espacios, libre de ciclo diurno).	K	int16
analysis_error	sea_surface_foundation_temperature_standard_error	Error estándar de la temperatura analizada. Estimación de incertidumbre (1σ).	K	int16
sea_ice_fraction	sea_ice_area_fraction	Fracción de celda cubierta por hielo marino (0 a 1).	-	int16
mask	-	Máscara binaria: 0 = océano, 1 = tierra, 2 = hielo.	-	byte
sses_bias	-	Sesgo estimado por sensor (Sensor Specific Error Statistics).	K	Int8

sses_standard_deviation	-	Desviación estándar asociada a cada pixel de SST (error aleatorio).	K	int16
sum_sst	-	Suma acumulada de SST para promedios mensuales.	K	float32
sum_square_sst	-	Suma de cuadrados de SST, usada para cálculo de varianzas.	K	float32
sst_dtime	-	Diferencia temporal (segundos) respecto a la hora de referencia UTC (00:00).	s	Int32
wind_speed	wind_speed	Velocidad del viento superficial usada como variable auxiliar en la interpolación y relleno (fundamental en el cálculo del sesgo por efecto diurno).	m s ⁻¹	float32

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Máscaras y valores de relleno.

Bandera	Descripción
1	Agua (océano abierto)
2	Tierra
8	Agua con hielo

Fuente: Elaboración propia.

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.

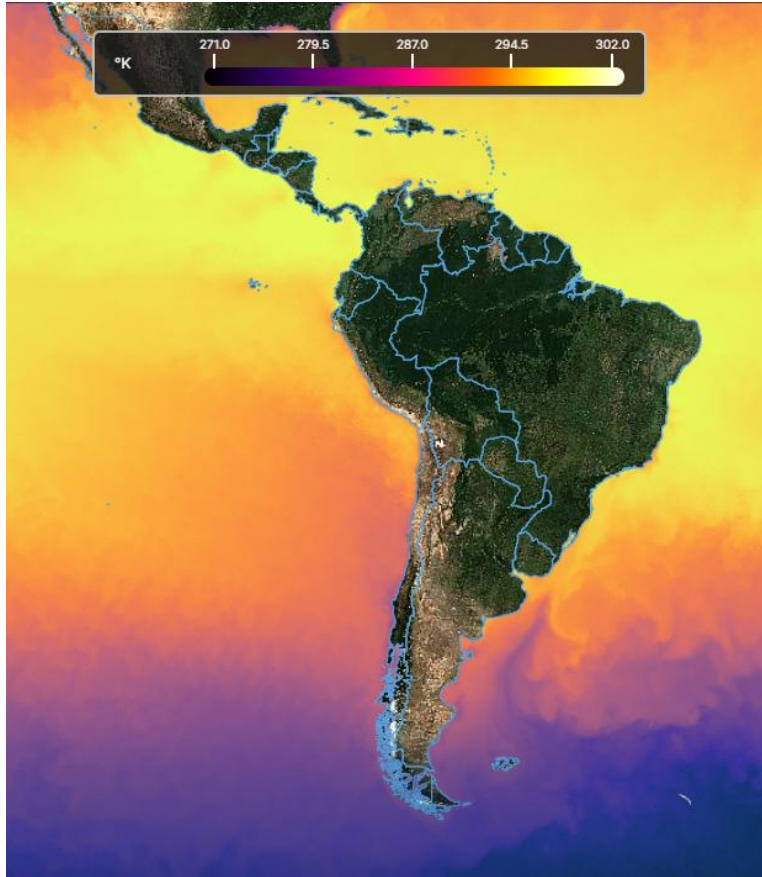


Figura 2. Despliegue del producto Temperatura Superficial del Mar (SST), enero 2024.

Fuente: Elaboración propia.

4. Resumen metodológico

4.1 Sistema de producción y procesado

El sistema de producción del producto SST de CopernicusLAC Chile se basa en la estructura jerárquica definida por el estándar GHRSSST GDS 2.1, que establece la transición progresiva desde las observaciones en geometría de sensor (nivel 2, L2P) hasta los campos analizados con cobertura completa (nivel 4, L4). El sensor SLSTR (Sentinel-3 A/B) (EUMETSAT, 2025) se adopta como referencia radiométrica absoluta para la corrección y armonización de todos los sensores. La integración se realiza aplicando:

- Intercalibración temporal por sensor.
- Corrección de sesgo con SLSTR como referencia.
- Enmascaramiento de nubes y hielo.
- Reproyección a una malla común de 0.02°.
- Relleno espacio-temporal mediante un modelo híbrido.

Tabla 6. Fuentes de datos satelitales.

Plataforma		Producto	Sensor	Nivel	Proveedor
Suomi-NPP	NPP	L2P	VIIRS	L2P	OSISAF
NOAA-20	JPSS-1	L2P	VIIRS	L2P	ACSPPO
Metop	- A - B	L2P	AVHRR	L2P	IFREMER
Sentinel-3	- 3A - 3B	WST	SLSTR	L2P	EUMETSAT

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Filtros e indicadores de calidad

El proceso de filtrado aplicado en el producto responde a un protocolo técnico estricto diseñado para maximizar la integridad radiométrica y la coherencia espacial de las observaciones satelitales. El procedimiento combina los criterios obligatorios del estándar GHR SST GDS 2.1 con umbrales de control específicos definidos para las condiciones oceánicas de América Latina y el Caribe.

La depuración se inicia con la restricción a observaciones nocturnas (`day_night_flag = night`), lo que elimina la influencia del calentamiento diurno en la capa superficial y reduce la dispersión asociada a la variabilidad radiativa. A continuación, se aplica un filtro de calidad GHR SST manteniendo únicamente los píxeles con `quality_level` ≥ 4 , equivalentes a mediciones con error radiométrico y angular dentro de los márgenes instrumentales certificados. Se descartan, además, registros con diferencias temporales superiores a 900 s respecto al tiempo nominal (`sst_dtime`), garantizando coherencia temporal entre observaciones.

4.3 Información de la grilla

Todos los productos y niveles se interpolan a una malla regular de 0.02° , 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).

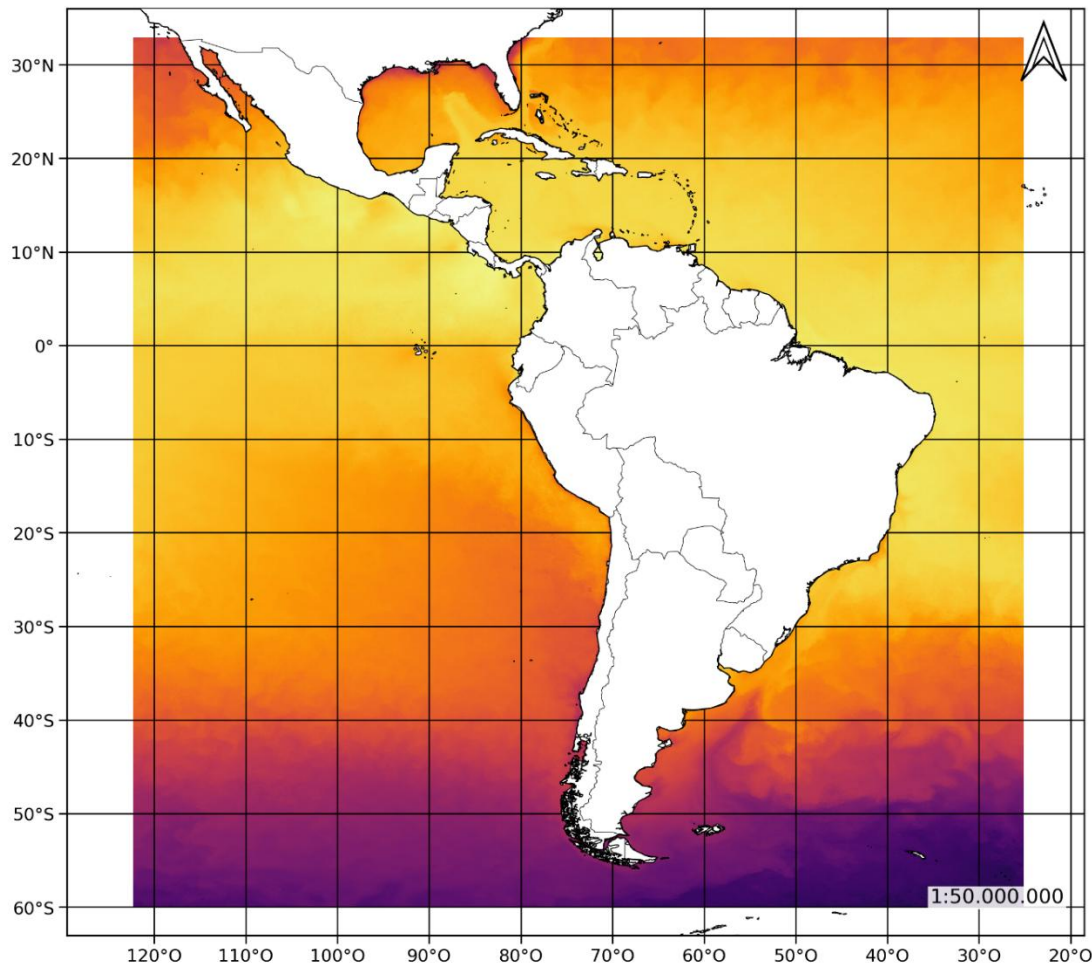


Figura 3. Dominio espacial del producto Temperatura Superficial del Mar (SST), enero 2024.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Cadena de procesamiento

El procesamiento se organiza en cinco etapas principales, desde los productos L2P hasta el campo mensual L4, garantizando consistencia radiométrica y continuidad espacial (Figura 4).

1. **Ingesta y filtrado de datos (L2P):** Los archivos L2P se descargan automáticamente desde la plataforma correspondiente, verificando integridad mediante checksum y metadatos de tiempo, órbita y sensor:

- Selección de observaciones nocturnas ($\text{day_night_flag} = \text{night}$),
- $\text{quality_level} \geq 4$ y $\text{sst_dtime} \leq 900$ s, - Exclusión de píxeles con banderas cloud, glint, fire, ice, invalid, land, - Rango físico $-2\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{SST} \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Eliminación de gradientes térmicos $> 4\text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ y errores SSES $> 0.8\text{ K}$,
- Restricción angular: en SLSTR se descartan observaciones con ángulos $> 50^{\circ}$, y en VIIRS/AVHRR se aplica $\text{DQF} < 3$.

El resultado es un conjunto L2P depurado y físicamente consistente.

2. **Reproyección y generación (L3U):** Las observaciones válidas se remuestran sobre una malla regular de 0.02° ($\sim 2\text{ km}$) mediante interpolación bilineal. Cada sensor genera su propio producto L3U (single-sensor, uncollated) sin fusión ni promediado, únicamente reproyectado y filtrado.
3. **Composición temporal (L3C):** Los mosaicos L3U diarios de cada sensor se combinan en composiciones L3C (collated) mediante promedio ponderado por calidad. El resultado es un campo mensual por sensor, radiométricamente estable.
4. **Fusión multisensor (L3S, referencia SLSTR):** Los productos L3C de todos los sensores se armonizan sobre la misma malla espacial utilizando SLSTR como sensor de referencia radiométrica. Para cada sensor se calcula el sesgo medio mensual respecto a SLSTR y se aplica la corrección. Posteriormente, se realiza la fusión multisensor (L3S) mediante promedio ponderado inverso a la varianza. De este modo se obtiene un mosaico homogéneo, con coherencia radiométrica y sin discontinuidades intersensoriales.
5. **Análisis y reconstrucción (L4, gap-free field):** Los mosaicos L3S se integran con los resultados de un modelo híbrido que combina:

- Interpolación espacio-temporal óptima determinista, aplicada sobre las anomalías de SST derivadas de los mosaicos L3S. Esta etapa genera un campo continuo inicial ponderando cada observación por su incertidumbre (*sses_standard_deviation*) y su distancia espacial, preservando la coherencia térmica regional.
- Reconstrucción no lineal basada en red neuronal U-Net Hann 2D, entrenada con series históricas multianuales y variables auxiliares (viento superficial, batimetría y máscara de observación). Esta fase refina la estructura térmica del campo, rellena los huecos residuales y mantiene la continuidad espacial en zonas costeras o con alta variabilidad.

El resultado final es el campo *analysed_sst*, acompañado de su estimación de incertidumbre *analysis_error*.

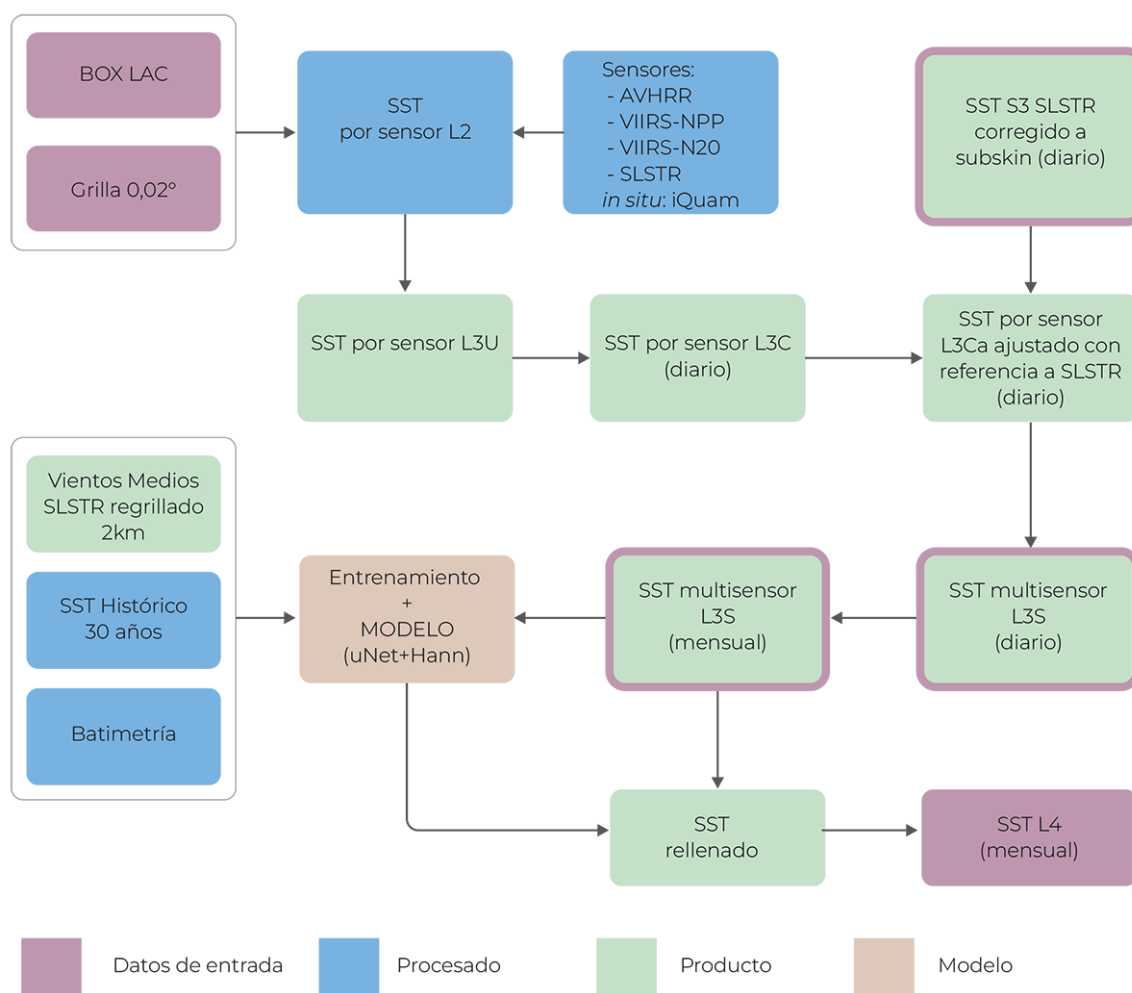


Figura 4. Cadena de procesamiento del producto Temperatura Superficial del Mar (SST).

Fuente: Elaboración propia.

El producto final representa la temperatura fundacional mensual (foundation SST), libre de efectos diurnos y adecuada para estudios climáticos, validaciones de modelos y aplicaciones operativas.

5. Limitaciones

Las principales limitaciones conocidas del producto de Temperatura Superficial del Mar (SST) L4 de CopernicusLAC Chile. Estas limitaciones 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.

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 Temperatura Superficial del Mar (SST) L4 CopernicusLAC Chile. Se organiza en tres componentes: el marco general de validación siguiendo las directrices GHRSSST/SST-TAC, incluyendo métricas de desempeño y control interno de calidad, y la evaluación de cobertura y consistencia espacial del campo analizado sobre el dominio de América Latina y el Caribe.

6.1 Marco general de validación

El proceso de validación del producto SST CopernicusLAC Chile sigue las directrices establecidas por el grupo GHRSSST y las prácticas del SST Thematic Assembly Center (TAC) de Copernicus.

El procedimiento utiliza mediciones *in situ* de boyas provenientes del conjunto iQuam v2 (NOAA STAR) (NOAA/NESDIS/STAR, 2025) como referencia independiente. Se consideran únicamente observaciones nocturnas, con el fin de mantener coherencia con la política de filtrado aplicada a los datos satelitales.

El control de calidad del producto se basa en la validación estadística del campo `analysed_sst` y su variable asociada de incertidumbre `analysis_error`. La comparación se realiza interpolando bilinealmente el campo de SST del producto (L4) a la posición y tiempo de la observación *in situ*. Para cada coincidencia (matchup), se calcula la diferencia producto – observación y se obtienen las estadísticas de sesgo (BIAS), desviación estándar (STD) y raíz del error cuadrático medio (RMSE).

El sistema, también incorpora indicadores de calidad internos (sses_bias, sses_standard_deviation, mask) y metadatos globales que documentan el nivel de validación (file_quality_level >4).

El proceso de calidad integra tres componentes:

1. **Control radiométrico:** verificación del sesgo y la dispersión frente a observaciones *in situ* (iQuam v2).
2. **Control espacial:** análisis de coherencia térmica regional y gradientes costeros.
3. **Control temporal:** consistencia intermensual de la SST analizada y estabilidad de la serie.

El proceso incorpora, los indicadores internos de calidad derivados del procesamiento multisensor: las variables sses_bias y sses_standard_deviation, que caracterizan el sesgo y la dispersión estimada para cada píxel del campo analizado, y la variable mask, que identifica regiones de tierra, hielo o calidad insuficiente. El metadato file_quality_level ≥ 4 certifica que el archivo cumple los criterios de calidad definidos por el estándar GHR SST GDS 2.1. Estos indicadores internos complementan la validación estadística externa y permiten al usuario evaluar la fiabilidad local del producto antes de su aplicación.

6.1.1 Métricas de desempeño

Las métricas de desempeño cuantifican la concordancia entre el producto de Temperatura Superficial del Mar (SST) L4 CopernicusLAC Chile y las observaciones *in situ* de boyas del conjunto iQuam v2 (NOAA STAR). La comparación se realiza sobre observaciones nocturnas coincidentes (matchups), interpolando bilinealmente el campo analizado (analysed_sst) a la posición y tiempo de cada medición de referencia. La Tabla 8 presenta los estadísticos de sesgo medio (BIAS), desviación estándar (STD) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtenidos

durante el período de evaluación 2024 sobre el dominio de América Latina y el Caribe. Estos indicadores permiten caracterizar la tendencia sistemática del producto respecto a las mediciones de referencia, cuantificar la dispersión aleatoria del error y evaluar el desempeño global del campo analizado conforme a los estándares del grupo GHRSSST.

Tabla 8. Métricas de desempeño.

Métrica	Descripción	Fórmula	Unidad
Sesgo (BIAS)	Promedio de las diferencias entre SST producto e <i>in situ</i> .	$BIAS = SST_{sat} - SST_{insitu}$	K
Desviación estándar (STD)	Variabilidad de las diferencias respecto al sesgo medio.	$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - BIAS)^2}$	K
RMSE	Error cuadrático medio total.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i)^2}$	K
R (Pearson)	Correlación lineal entre SST satelital e <i>in situ</i> .	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (SST_{sat,i} - \overline{SST_{sat}}) (SST_{insitu,i} - \overline{SST_{insitu}})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SST_{sat,i} - \overline{SST_{sat}})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SST_{insitu,i} - \overline{SST_{insitu}})^2}}$	-

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Control interno de calidad

Cada archivo NetCDF incluye metadatos que documentan:

- **file_quality_level:** 4 (análisis validado, conforme GHRSSST).
- **history y processing_date:** registran el flujo completo de procesamiento.
- **uuid:** identificador único del dataset.

Durante el procesamiento se aplican controles automáticos:

- **Verificación de integridad:** comprobación de hashes MD5 y estructura NetCDF.
- **Control de coherencia espacial:** eliminación de gradientes $> 4 \text{ K/km}$.
- **Control de rango físico:** validación de límites térmicos (271 °K a 309 °K , o -2 °C a 35 °C).
- **Auditoría temporal:** detección de discontinuidades en la serie mensual.
- **Verificación post-relleno:** comparación del campo L4 frente a climatologías históricas y análisis de distribución de errores.

Los resultados del control post-relleno se contrastan con climatologías históricas de largo plazo derivadas del conjunto ESA CCI SST (1981–2022) y del producto NCEI OISST v2.1, lo que permite detectar anomalías sistemáticas o artefactos no físicos introducidos por el modelo de reconstrucción U-Net. En zonas costeras y regiones de alta variabilidad térmica se aplican umbrales más estrictos de consistencia con climatologías locales, a fin de preservar la integridad de las estructuras termodinámicas regionales en el campo analizado final.

6.2 Evaluación de cobertura y consistencia

El producto L4 presenta cobertura espacial continua en todo el dominio LAC gracias al modelo híbrido, con coherencia térmica superior al 95%. Las zonas costeras y de surgencia (ej. Pacífico sur, Caribe colombiano) mantienen desviaciones locales inferiores a $\pm 0.6 \text{ °K}$.

A escala regional, el campo de SST L4 exhibe alta coherencia espacial respecto a las estructuras termodinámicas conocidas del dominio LAC. El sistema de surgencia del Pacífico Suroriental, asociado al frente de Humboldt, reproduce adecuadamente los gradientes meridionales de temperatura y la variabilidad interanual vinculada a eventos ENSO. El frente Brasil-Malvinas, una de las fronteras oceánicas más dinámicas del Atlántico Sur. En la cuenca del Caribe, el

producto preserva la estructura de la corriente caribeña y los giros anticiclónicos del golfo de México, con desviaciones respecto a la referencia externa inferiores a $\pm 0,4$ °K en promedio mensual. La evaluación de consistencia temporal confirma la estabilidad intermensual del producto durante el período de análisis 2024, sin discontinuidades no físicas detectadas en la serie. Las comparaciones con las mediciones *in situ* del conjunto iQuam v2 en áreas costeras, incluyendo estaciones de Chile central, Colombia y el Atlántico suroccidental de Brasil, muestran sesgo (BIAS) dentro del rango $\pm 0,3$ °K y RMSE inferior a $0,6$ °K, consistente con los estándares de calidad del sistema GHR SST. En regiones con cobertura de nubes persistentes, el modelo híbrido de reconstrucción U-Net mantiene la coherencia espacial sin introducir suavizado excesivo, preservando los gradientes costeros relevantes para la gestión ambiental regional.

7. Referencias

GHRSSST International Project Office. (2025). *Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST)*. <https://www.ghrsst.org/>

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>

Embury, O., Merchant, C. J., Good, S. A., Rayner, N. A., Hoyer, J. L., Atkinson, C., Block, T., Alerskans, E., Pearson, K. J., Worsfold, M., McCarroll, N., & Donlon, C. (2024). Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1980 for climate applications. *Scientific Data*, 11, Article 326. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03147-w>

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>

NOAA/NESDIS/STAR. (2025). *In situ Sea Surface Temperature Quality Monitor (iQuam)*. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/sst/iquam/>

Piollé, J.-F., Armstrong, E., Li, W.-H., Corlett, G., & GHRSSST Science Team. (2022). *The Recommended GHRSSST Data Specification (GDS) 2.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6984989>

Zhao, E., Goh, E., Yepremyan, A., Wang, J., & Wilson, B. (2025). Multi-satellite U-Net for high-resolution sea surface temperature reconstruction. *EGUsphere* [Preprint].

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4847>