Sistema de Monitoreo Oceanográfico para Áreas Marinas Protegidas del Pacífico Suroriental: Una Plataforma Web para la Conservación y Gestión Basada en Evidencia

2026-10-22

Sistema de Monitoreo Oceanográfico para Áreas Marinas Protegidas del Pacífico Suroriental: Una Plataforma Web para la Conservación y Gestión Basada en Evidencia

Andrés García*, **Jaime Letelier**

Departamento de Oceanografía y Medio Ambiente (DOMA), Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) Blanco 839, Valparaíso, Chile

*Autor de correspondencia: andres.garcia@ifop.cl

Resumen

Las áreas marinas protegidas (AMP) del Pacífico Suroriental enfrentan crecientes presiones derivadas del cambio climático, la sobrepesca y la contaminación, requiriendo sistemas de monitoreo continuo y basado en evidencia científica para su gestión efectiva. En este trabajo presentamos una plataforma web integral desarrollada por el Departamento de Oceanografía y Medio Ambiente (DOMA) del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) para el monitoreo oceanográfico de áreas marinas protegidas en Chile, Perú, Ecuador, Colombia y Argentina. La plataforma integra datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM), anomalías térmicas (ATSM), concentración de clorofila-a, oleaje y nivel del mar, procesados mediante un pipeline ETL automatizado que intersecta variables oceanográficas con polígonos geográficos de 147 áreas protegidas. El sistema utiliza una arquitectura de tres capas basada en Flask, PostgreSQL/PostGIS, GeoServer y visualización interactiva con Leaflet/Plotly.js, proporcionando series temporales históricas, análisis de tendencias y alertas tempranas de eventos climáticos extremos (El Niño/La Niña). Construida enteramente con software de código abierto, la plataforma opera en servidores institucionales de IFOP y constituye una herramienta estratégica para la toma de decisiones en conservación marina, investigación oceanográfica y políticas públicas en el Pacífico Suroriental.

Palabras clave: áreas marinas protegidas, monitoreo oceanográfico, teledetección satelital, Pacífico Suroriental, conservación marina, cambio climático, SIG web, Chile.

> **Nota de versión 3.2 (22-oct-2026).** Se elimina el enlace de documentación técnica del Apéndice A; se mantienen la URL del sistema y el contacto. Esta versión reemplaza a la 3.1, que corrigió la cobertura real (147 AMP) y los períodos de las series (TSM, ATSM, nivel del mar y oleaje desde 2002; clorofila-a desde 1997).

Abstract

Marine protected areas (MPAs) in the Southeastern Pacific face increasing pressures from climate change, overfishing, and pollution, requiring continuous, evidence-based monitoring systems for effective management. In this work we present an integrated web platform developed by the Department of Oceanography and Environment (DOMA) of the Institute for Fisheries Development (IFOP) for oceanographic monitoring of marine protected areas across Chile, Peru, Ecuador, Colombia, and Argentina. The platform integrates satellite data on sea surface temperature (SST), thermal anomalies (SSTA), chlorophyll-a concentration, wave height, and sea level, processed through an automated ETL pipeline that intersects oceanographic variables with geographic polygons of 147 protected areas. The system uses a three-tier architecture based on Flask, PostgreSQL/PostGIS, GeoServer, and interactive visualization with Leaflet/Plotly.js, providing historical time series, trend analysis, and early warnings for extreme climate events (El Niño/La Niña). Built entirely with open-source software, the platform runs on IFOP's institutional servers and constitutes a strategic tool for decision-making in marine conservation, oceanographic research, and public policy in the Southeastern Pacific.

Keywords: marine protected areas, oceanographic monitoring, satellite remote sensing, Southeastern Pacific, marine conservation, climate change, web GIS, Chile.

---

1. Introducción

1.1 Las Áreas Marinas Protegidas en el Pacífico Suroriental

El Pacífico Suroriental alberga uno de los sistemas marinos más productivos del planeta: el Sistema de Corriente de Humboldt (SCH), que se extiende desde el sur de Chile (~42°S) hasta Ecuador y sustenta aproximadamente el 10-15% de las capturas pesqueras globales en solo el 1% de la superficie oceánica mundial (Thiel et al., 2007; Chavez et al., 2008). Este ecosistema de surgencia costera, caracterizado por aguas frías ricas en nutrientes, soporta una biodiversidad extraordinaria que incluye más de 70 especies de tiburones, ballenas, lobos marinos, y bancos de anchoveta, jurel y sardina.

Las áreas marinas protegidas (AMP) son herramientas fundamentales para la conservación de este ecosistema único. Los países del Pacífico Suroriental han establecido una red extensa de AMPs bajo el marco del Protocolo para la Conservación y Gestión de las Áreas Marinas y Costeras Protegidas del Pacífico Sudeste (1989), firmado por las Partes Contratantes de la Convención de Lima: Chile, Colombia, Ecuador, Panamá y Perú (CPPS, 1989). Este protocolo reconoce la necesidad de adoptar medidas apropiadas para proteger y preservar áreas representativas de ecosistemas marinos y costeros, así como hábitats críticos para especies en peligro.

1.2 Desafíos para la Conservación Marina

A pesar de los avances en el establecimiento de AMPs, su gestión efectiva enfrenta múltiples desafíos:

1. **Cambio climático**: El calentamiento oceánico, la acidificación y los eventos extremos de El Niño/La Niña alteran las condiciones físico-químicas de los ecosistemas marinos, afectando la distribución de especies y la productividad primaria (IPCC, 2021).
2. **Monitoreo insuficiente**: Muchas AMPs carecen de sistemas de monitoreo continuo que permitan evaluar su estado ecológico, detectar cambios tempranos y medir la efectividad de las medidas de conservación (UNEP, 2023).
3. **Fragmentación institucional**: La gestión de AMPs involucra múltiples agencias gubernamentales, sectores productivos y jurisdicciones, requiriendo herramientas integradas de información para la coordinación y toma de decisiones.
4. **Limitaciones de datos**: La disponibilidad de datos oceanográficos de alta resolución espacial y temporal es limitada en muchas regiones, especialmente en áreas remotas y países

con menor capacidad tecnológica.
5. **Presiones antropogénicas**: La sobrepesca, la contaminación costera, el desarrollo industrial y el tráfico marítimo ejercen presiones crecientes sobre los ecosistemas marinos protegidos.

1.3 La Necesidad de Monitoreo Oceanográfico Basado en Teledetección

La teledetección satelital ha revolucionado el monitoreo de ecosistemas marinos, permitiendo la observación continua de variables oceanográficas a escalas espaciotemporales previamente imposibles (Zainuddin et al., 2017; Robinson et al., 2019). Satélites equipados con sensores térmicos y ópticos proporcionan datos diarios de temperatura superficial del mar, concentración de clorofila-a, anomalías térmicas y nivel del mar, cubriendo vastas extensiones oceánicas con resolución de kilómetros.

Referencias clave sobre teledetección marina:

- Zainuddin, M., Saitoh, K., & Saitoh, S. (2017). Satellite remote sensing applications for marine conservation and management. *Oceanography*, 30(4), 156-165.
- Robinson, N.J., et al. (2019). Remote sensing of marine environments: A review of methods and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 613, 1-22.

Para las AMPs del Pacífico Suroriental, la teledetección ofrece ventajas críticas:

- **Cobertura regional**: Permite monitorear simultáneamente múltiples áreas protegidas distribuidas a lo largo de miles de kilómetros de costa.
- **Continuidad temporal**: Proporciona series históricas de décadas, esenciales para detectar tendencias climáticas y evaluar impactos acumulativos.
- **Detección temprana**: Facilita la identificación de eventos extremos (blanqueamiento de corales, floraciones algales nocivas, ondas de calor marinas) que requieren respuestas rápidas.
- **Análisis comparativo**: Permite evaluar diferencias entre áreas protegidas y zonas de referencia, midiendo la efectividad de las medidas de conservación.

1.4 Objetivo de este Trabajo

Este artículo describe la arquitectura, metodología e implementación de un sistema web integral para el monitoreo oceanográfico de áreas marinas protegidas en el Pacífico Suroriental. Los objetivos específicos son:

1. **Documentar** la plataforma como recurso científico-técnico disponible para la comunidad de conservación marina.
2. **Demostrar** la viabilidad de sistemas de monitoreo basados en software de código abierto y datos satelitales gratuitos.
3. **Proveer** un marco de citación (DOI) que permita referenciar el sistema en publicaciones científicas y reportes técnicos.
4. **Establecer** una línea base para futuras mejoras, extensiones y replicaciones del sistema en otras regiones.

---

2. Área de Estudio

2.1 Red de Áreas Marinas Protegidas del Pacífico Suroriental

El sistema monitorea áreas marinas protegidas en cinco países del Pacífico Suroriental, cada uno con marcos legales y categorías de protección específicas:

Chile Chile posee una de las redes de AMPs más extensas de América Latina, incluyendo:

- **Parques Marinos**: Áreas de alta protección con restricciones estrictas de uso (ej: Parque Marino Islas Diego Ramírez, Parque Marino Nazca-Desventuradas).
- **Reservas Marinas**: Zonas de protección de recursos pesqueros y biodiversidad (ej: Reserva Marina Isla Grande de Atacama).
- **Áreas Marinas Costeras Protegidas de Múltiples Usos (AMCP-MU)**: Áreas que combinan conservación con usos sustentables (ej: AMCP Isla Chañaral).
- **Monumentos Naturales**: Protección de formaciones geológicas o hábitats específicos.

Perú El sistema peruano incluye:

- **Reservas Nacionales**: Áreas de conservación de flora y fauna silvestre (ej: Reserva Nacional de Paracas, Reserva Nacional Sistema de Islas, Islotes y Puntas Guaneras).
- **Santuarios Nacionales**: Protección de hábitats de especies amenazadas (ej: Santuario Nacional Manglares de Tumbes).
- **Áreas de Conservación Regional**: Gestión descentralizada por gobiernos regionales.

Ecuador Ecuador cuenta con áreas protegidas de importancia global:

- **Parque Nacional Galápagos**: Patrimonio Natural de la Humanidad (UNESCO), con 133,000 km² de reserva marina.
- **Reserva Marina de Galápagos**: Una de las áreas marinas protegidas más grandes del mundo.
- **Áreas de Conservación y Uso Sustentable**: Zonas costeras con gestión participativa.

Colombia El sistema colombiano incluye:

- **Parques Nacionales Naturales con componente marino** (ej: PNN Gorgona, PNN Uramba Bahía Málaga).
- **Santuarios de Fauna y Flora** (ej: SFF Malpelo, SFF Los Flamencos).
- **Áreas de Manejo Especial**: Zonas con regulaciones específicas de uso.

Argentina Argentina incorpora áreas protegidas con componente marino en la Patagonia austral, conectadas biogeográficamente con el Pacífico Suroriental a través del Paso Drake y la Corriente Circumpolar Antártica:

- **Parques Nacionales Marinos** (ej: Parque Nacional Marino Costero Patagonia Austral).
- **Reservas Naturales** con componentes costero-marinos.
- **Áreas Marinas Protegidas de Biodiversidad**.

Nota sobre inclusión: Aunque Argentina tiene costa atlántica, se incluye en este sistema por su conectividad oceánica con el Pacífico Suroriental vía Paso Drake, compartiendo masas de agua subantárticas y especies migratorias con las AMPs chilenas australes. Esta conexión justifica el monitoreo integrado bajo un marco regional ampliado.

2.2 Características Oceanográficas Regionales

Las áreas monitoreadas se distribuyen a lo largo de gradientes oceanográficos críticos:

- **Zona Norte (Ecuador-Colombia, 0-10°N)**: Influencia de la Corriente Ecuatorial, aguas cálidas tropicales, alta biodiversidad de corales y manglares.
- **Zona Centro-Norte (Perú, 0-18°S)**: Surgencia costera intensa, aguas frías productivas, pesquerías de anchoveta.
- **Zona Centro (Chile norte y centro, 18-42°S)**: Sistema de Corriente de Humboldt, surgencia estacional, alta productividad primaria.
- **Zona Sur (Chile austral, 42-56°S)**: Sistemas de fiordos y canales, influencia de aguas subantárticas, acuicultura salmonera.

- **Zona Insular (Rapa Nui, Juan Fernández)**: Ecosistemas oceánicos únicos, endemismo alto, vulnerabilidad al cambio climático.

2.3 Presiones y Amenazas Identificadas

Las áreas marinas protegidas del Pacífico Suroriental enfrentan presiones específicas según su ubicación:

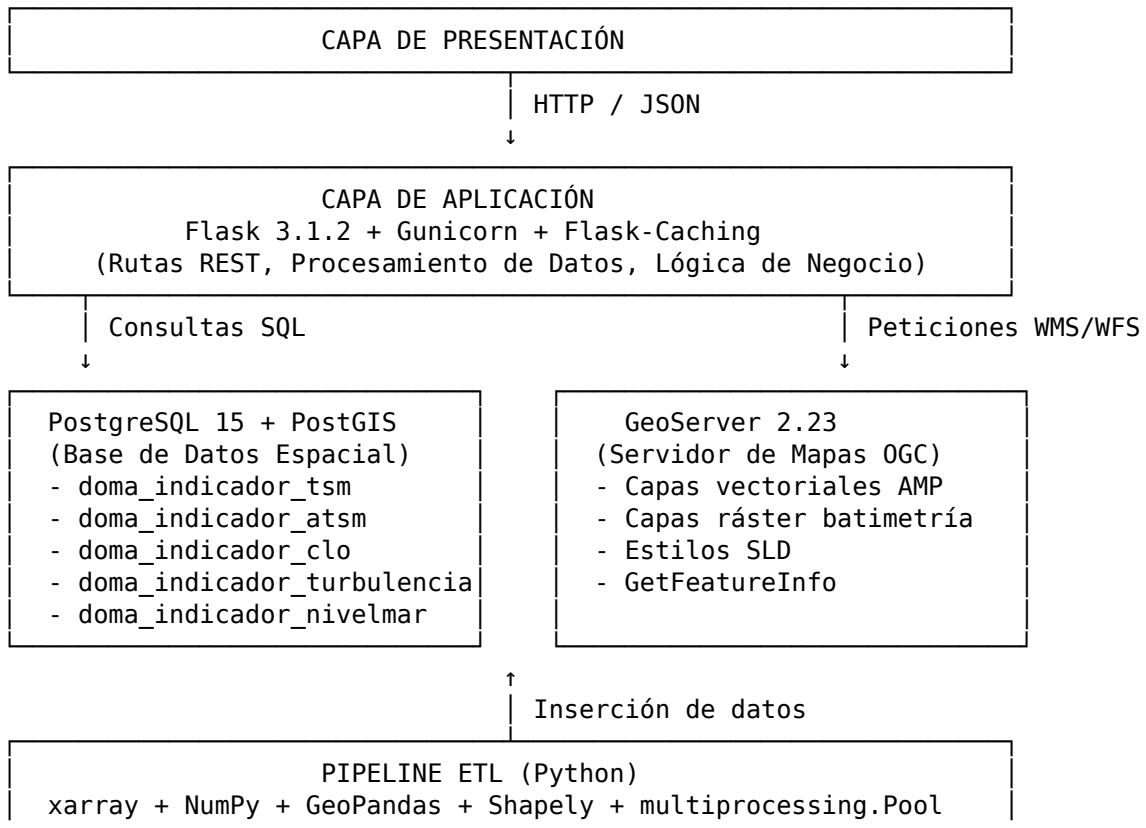
Zona	Presiones Principales	Impactos Observados
Norte tropical	Desarrollo costero, turismo, contaminación	Degradación de corales, pérdida de manglares
Perú-Chile norte	Sobrepesca, industria pesquera, El Niño	Cambios en distribución de especies, mortalidad masiva
Chile centro	Acuicultura, tráfico marítimo, contaminación urbana	Eutrofización, floraciones algales nocivas
Chile sur	Salmonicultura, extracción de algas, cambio climático	Acidificación, pérdida de bosques de algas
Islas oceánicas	Especies invasoras, pesca ilegal, cambio climático	Blanqueamiento de corales, disminución de aves marinas

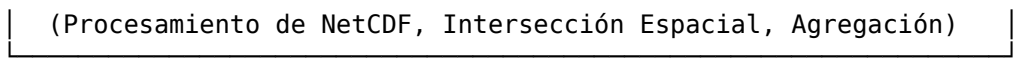
---

3. Arquitectura del Sistema

3.1 Diseño General

El sistema adopta una arquitectura de tres capas con componentes especializados de Sistemas de Información Geográfica (SIG):





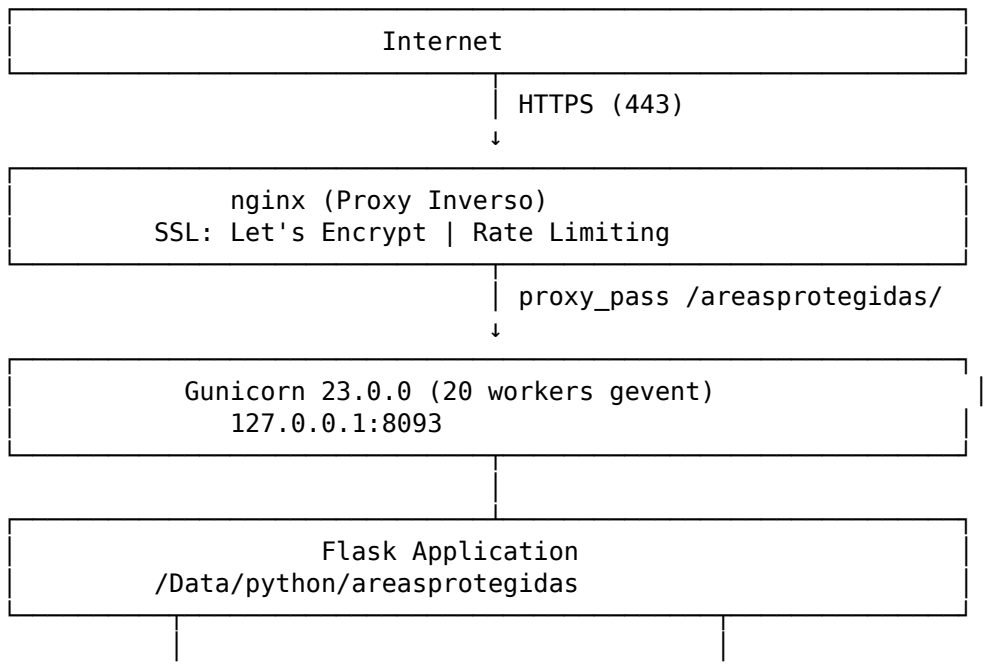
3.2 Stack Tecnológico

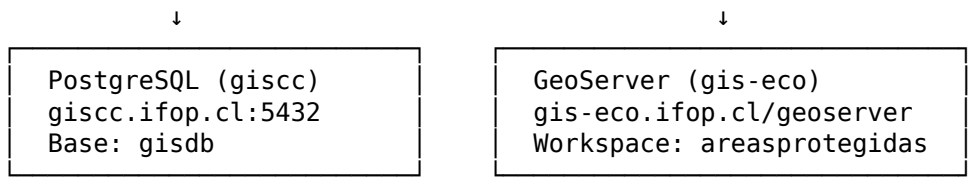
El sistema utiliza exclusivamente software de código abierto, priorizando interoperabilidad, escalabilidad y facilidad de mantenimiento:

Componente	Tecnología	Versión	Propósito
Lenguaje	Python	3.12.4	Desarrollo principal
Framework Web	Flask	3.1.2	Framework web WSGI
Servidor WSGI	Gunicorn	23.0.0	Servidor de producción (20 workers gevent)
Servidor Web	nginx	Estable	Proxy inverso y terminación SSL
Base de Datos	PostgreSQL	15+	Almacenamiento relacional y espacial
Extensión Espacial	PostGIS	3.4+	Geometría y análisis espacial
Servidor de Mapas	GeoServer	2.23+	Publicación de capas OGC (WMS/WFS)
Visualización SIG	Folium + Leaflet	0.20.0 / 1.9.3	Mapas interactivos web
Visualización Gráfica	Plotly.js	6.3.1	Series temporales interactivas
Procesamiento Científico	xarray	2025.10.1	Datos multidimensionales NetCDF
Análisis Espacial	GeoPandas + Shapely	1.1.1 / 2.1.2	Geoprocesamiento vectorial
Computación Numérica	NumPy	2.3.4	Cálculos vectorizados
Conectividad BD	psycopg2	2.9.11	Driver PostgreSQL para Python
SSL/TLS	Let’s Encrypt	—	Certificados HTTPS automáticos

3.3 Arquitectura de Despliegue

El sistema está desplegado en el servidor institucional **giscc.ifop.cl** (IP 200.73.3.132), operando en el puerto 8093 bajo proxy inverso de nginx:





3.4 Componentes Principales

3.4.1 Aplicación Flask La aplicación Flask implementa una arquitectura modular basada en Blueprints:

```python
# app/__init__.py
import os
from flask import Flask
from flask_caching import Cache

cache = Cache()

def create_app():
    app = Flask(__name__)
    app.config['SECRET_KEY'] = os.environ.get('FLASK_SECRET_KEY', 'dev-key-not-for-production')
    app.config['CACHE_TYPE'] = 'SimpleCache'
    app.config['CACHE_DEFAULT_TIMEOUT'] = 3600  # 1 hora
    cache.init_app(app)

    from app.routes import main
    app.register_blueprint(main)
    return app
```

Características clave:

- **Caching de páginas**: Reducción de tiempo de carga de 10-15s a 1-3s mediante Flask-Caching.
- **Dispatcher Middleware**: Soporte para despliegue en subruta `/areasprotegidas` detrás de nginx.
- **Manejo de errores**: Respuestas HTTP apropiadas (500) con mensajes de error detallados en logs.
- **Blueprint principal** (`main`): Organiza rutas de visualización, APIs de datos y endpoints administrativos.

3.4.2 GeoServer y Servicios OGC GeoServer proporciona los servicios de mapas estandarizados OGC:

Servicios WMS (Web Map Service):

- Publicación de capas vectoriales de áreas protegidas por país.
- Estilos SLD (Styled Layer Descriptor) personalizados por país.
- Soporte para filtros CQL (Common Query Language) para selección de áreas marinas (`pct_mar > 0.3`).
- Capas ráster de batimetría y anomalías térmicas.

Servicios WFS (Web Feature Service):

- Acceso a geometrías vectoriales en formato GeoJSON.
- Consultas espaciales y de atributos.
- Proyección EPSG:4326 (WGS84) para compatibilidad web.

Capas configuradas:

Capa	País	Color	Filtro CQL
areasprotegidas:areasprotegidaschile	Chile	#356EF2 (azul)	pct_mar > 0.3
areasprotegidas:areasprotegidasperu	Perú	#F2AD35 (naranja)	pct_mar > 0.3
areasprotegidas:areasprotegidasecuador	Ecuador	#00A639 (verde)	pct_mar > 0.3
areasprotegidas:areasprotegidascolombia	Colombia	#f5ca0a (amarillo)	pct_mar > 0.3
areasprotegidas:areasprotegidasargentina	Argentina	#87CEEB (celeste)	pct_mar > 0.3
areasprotegidas:centroides	Todos	#2c3e50 (texto)	—

3.4.3 Base de Datos PostgreSQL/PostGIS La base de datos almacena indicadores oceanográficos agregados espacial y temporalmente:

Esquema de tablas de indicadores:

```
CREATE TABLE doma_indicador_tsm (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    zona VARCHAR(50) NOT NULL,          -- Nombre del AMP
    fecha DATE NOT NULL,                -- Fecha de observación
    num_puntos INTEGER,                 -- Píxeles dentro del polígono
    min_temp DOUBLE PRECISION,          -- Temperatura mínima
    max_temp DOUBLE PRECISION,          -- Temperatura máxima
    mean_temp DOUBLE PRECISION,         -- Temperatura media
    sum_temp DOUBLE PRECISION,          -- Suma de valores
    UNIQUE(zona, fecha)                 -- Evita duplicados
);

CREATE INDEX idx_tsm_zona_fecha ON doma_indicador_tsm(zona, fecha);
```

Tablas operativas:

Tabla	Variable	Unidad	Descripción
doma_indicador_tsm	TSM	°C	Temperatura Superficial del Mar
doma_indicador_atsm	ATSM	°C	Anomalía de TSM (desviación de media histórica)
doma_indicador_clo	Clorofila-a	mg/m³	Concentración de clorofila (productividad)
doma_indicador_turbulencia	Oleaje (Hs)	m	Altura significante de oleaje (proxy de energía cinética superficial)
doma_indicador_nivelmar	Nivel del Mar	m	Variación de nivel del mar (altimetría)
doma_indicador_nino34	ONI/Niño 3.4	°C	Anomalía de TSM en región Niño 3.4 (promedio mensual usado como proxy de ONI trimestral)

3.4.4 Frontend Interactivo El frontend combina mapas interactivos con visualizaciones gráficas:

Mapa base (Folium/Leaflet):

- Capa base Esri WorldStreetMap.
- Controles de medición de distancias y áreas.
- Posición del cursor con coordenadas en tiempo real.
- Zoom suave (zoomDelta=0.15, zoomSnap=0.15).

Popups interactivos:

- Click en área protegida despliega información (nombre, país, designación, área en km²).
- Botón "Ver Gráfico" para análisis de series temporales.
- Integración con GetFeatureInfo de GeoServer para consultas espaciales.

Gráficos científicos (Plotly.js):

- Series temporales de TSM, ATSM, Clorofila-a.
- Bandas de rango histórico (min-max).
- Líneas de tendencia por regresión lineal.
- Anotaciones de eventos ENSO (El Niño/La Niña).
- Estilo de publicación científica (colores profesionales, tipografía Inter).

---

4. Metodología

4.1 Pipeline de Procesamiento de Datos (ETL)

El sistema implementa un pipeline ETL (Extract-Transform-Load) automatizado para procesar datos satelitales en formato NetCDF y poblar la base de datos de indicadores:

```
[Archivos NetCDF diarios]
         ↓
[Detección de archivos faltantes]
         ↓
[Procesamiento multiproceso (multiprocessing.Pool)]
    ↓         ↓         ↓
[Archivo 1] [Archivo 2] [Archivo N]
    ↓         ↓         ↓
[xarray: lectura de variable]
    ↓
[Extracción de grilla Lat/Lon]
    ↓
[Shapely: bounds del polígono AMP]
    ↓
[NumPy: máscara de píxeles dentro del polígono]
    ↓
[Cálculo de estadísticas: min, max, mean, sum]
    ↓         ↓         ↓
[Agregación de resultados]
         ↓
[Inserción masiva en PostgreSQL (execute_batch)]
         ↓
[ON CONFLICT (zona, fecha) DO NOTHING]
         ↓
[Reporte por correo electrónico]
```

4.1.1 Script de Procesamiento Principal El script `00_procesos_tsm_atsm_clo_v4.py` implementa el procesamiento multigeográfico y multiproceso:

Características técnicas:

1. **Carga multigeográfica**: Lee dinámicamente GeoJSON de Ecuador, Perú, Chile, Colombia y Argentina, transformando sistemas de coordenadas a EPSG:4326.
2. **Filtrado marítimo estricto**: Excluye polígonos terrestres procesando únicamente áreas con `pct_mar > 0.3` (mínimo 30% de superficie marina).
3. **Mapeo de fechas en disco**: Escanea nombres de archivos NetCDF basándose en formato de fecha de 8 dígitos (YYYYMMDD).

4. **Paralelismo inteligente**: Utiliza `multiprocessing.Pool` con hasta 50 workers concurrentes para distribuir el procesamiento espacial de archivos.
5. **Procesamiento vectorizado**: Extrae matrices de datos usando xarray y calcula estadísticas con operaciones NumPy ultrarrápidas.
6. **Reporte automático**: Envía correos SMTP con resumen de registros insertados y alertas de errores.

Nota: El siguiente código es **pseudocódigo simplificado con fines ilustrativos**. La implementación real utiliza `rasterio.features.geometry_mask()` para la intersección ráster-vector y `multiprocessing.Pool` para paralelización.

Código simplificado del procesamiento espacial:

```
def procesar_archivo_netcdf(filepath, geometrias_amp):
    """
    Procesa un archivo NetCDF y calcula estadísticas para cada AMP.
    """
    # Leer datos con xarray
    ds = xr.open_dataset(filepath)
    variable = ds['sst']  # o 'anomaly', 'chlorophyll', etc.

    resultados = []
    for amp in geometrias_amp:
        # Obtener bounds del polígono
        minx, miny, maxx, maxy = amp.bounds

        # Seleccionar subgrid espacial
        subgrid = variable.sel(
            latitude=slice(maxy, miny),
            longitude=slice(minx, maxx)
        )

        # Crear máscara de píxeles dentro del polígono
        mask = shapely.contains(amp, subgrid.geometry)
        valores = subgrid.values[mask]

        # Calcular estadísticas
        if len(valores) > 0:
            resultados.append({
                'zona': amp.properties['nombre'],
                'fecha': fecha_archivo,
                'num_puntos': len(valores),
                'min_temp': np.nanmin(valores),
                'max_temp': np.nanmax(valores),
                'mean_temp': np.nanmean(valores),
                'sum_temp': np.nansum(valores)
            })

    return resultados

# Procesamiento paralelo
with multiprocessing.Pool(processes=50) as pool:
    all_results = pool.starmap(
        procesar_archivo_netcdf,
        [(filepath, geometrias) for filepath in archivos_faltantes]
    )
```

```
# Inserción masiva en PostgreSQL
execute_batch(cursor, insert_query, all_results, page_size=1000)
```

4.2 Fuentes de Datos Satelitales

El sistema integra múltiples fuentes de datos satelitales y productos de reanálisis:

Variable	Fuente	Producto	Resolución Espacial	Resolución Temporal
TSM	NASA JPL	MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1 (campoanalysed_sst)	0.01° (~1 km)	Diaria
ATSM	NASA JPL	MUR-JPL-L4-GLOB-v4.1 (camposst_anomaly)	0.01° (~1 km)	Diaria
Clorofila-a	CMEMS	OC-CCI v5.0 (gap-free, multi-sensor)	4 km	Diaria
Oleaje (Hs)	CMEMS	WAVE_GLO_WAV_SW	0.083° (~9 km)	3-horaria
Nivel del Mar	CMEMS DUACS	SEALEVEL_GLO_PHY	0.125° (~14 km)	Diaria
ONI	NOAA CPC	Oceanic Niño Index	Regional	Mensual

4.3 Cálculo de Indicadores Oceanográficos

4.3.1 Temperatura Superficial del Mar (TSM) La TSM se calcula como el promedio espacial ponderado de píxeles satelitales dentro del polígono del área marina protegida:

$$TSM_{zona,fecha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} TSM_{pixel_i}$$

donde N es el número de píxeles dentro del polígono y TSM_{pixel_i} es el valor de temperatura del píxel i.

4.3.2 Anomalía de TSM (ATSM) La anomalía térmica se calcula como la desviación de la TSM respecto a la climatología histórica (media 1991-2020):

$$ATSM_{zona,fecha} = TSM_{zona,fecha} - TSM_{climatologia,zona,mese}$$

Valores positivos indican calentamiento anómalo, valores negativos indican enfriamiento.

4.3.3 Concentración de Clorofila-a La clorofila-a es un proxy de productividad primaria y biomasa fitoplanctónica:

$$Chl\text{-}a_{zona,fecha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Chl\text{-}a_{pixel_i}$$

Unidades: mg/m³ (miligramos de clorofila por metro cúbico de agua).

4.3.4 Análisis de Tendencias El sistema calcula tendencias lineales mediante regresión por mínimos cuadrados:

$$y = mx + b$$

donde x es el timestamp numérico de la fecha, y es el valor oceanográfico, m es la pendiente (tendencia) y b es la intersección. La pendiente se expresa en unidades por década para facilitar la interpretación.

4.4 Detección de Eventos ENSO

El sistema integra el Índice Oceánico de El Niño (ONI) de NOAA CPC para detectar y anotar eventos de El Niño y La Niña en las series temporales:

Clasificación de eventos ENSO según NOAA CPC:

- **El Niño muy débil**: ONI entre +0.3°C y +0.4°C
- **El Niño débil**: ONI entre +0.5°C y < +1.0°C
- **El Niño moderado**: ONI entre +1.0°C y < +1.5°C
- **El Niño fuerte**: ONI entre +1.5°C y < +2.0°C
- **El Niño muy fuerte**: ONI ≥ +2.0°C
- **La Niña muy débil**: ONI entre -0.3°C y -0.4°C
- **La Niña débil**: ONI entre -0.5°C y > -1.0°C
- **La Niña moderada**: ONI entre -1.0°C y > -1.5°C
- **La Niña fuerte**: ONI ≤ -1.5°C

Las regiones de eventos ENSO se visualizan como bandas sombreadas en los gráficos (rojo para El Niño, azul para La Niña), facilitando la identificación visual de impactos climáticos en las áreas protegidas.

4.5 Control de Calidad de Datos

El sistema implementa múltiples capas de control de calidad:

1. **Validación de rangos físicos**: Verificación de que los valores estén dentro de rangos físicamente plausibles:
   - TSM: -2°C a 35°C
   - Clorofila-a: 0.01 a 50 mg/m³
   - Nivel del mar: -2 a +2 m
2. **Detección de valores atípicos**: Identificación de anomalías espurias usando desviaciones estándar móviles (±3σ).
3. **Verificación de cobertura**: Monitoreo del número de píxeles válidos por área y fecha. Áreas con <10 píxeles se marcan como cobertura insuficiente.
4. **Comparación multi-sensor**: Validación cruzada con fuentes auxiliares (ERA5, boyas costeras) para detección de anomalías en el producto MUR.
5. **Filtrado terrestre**: Exclusión de píxeles sobre tierra usando máscaras de porcentaje marino (`pct_mar > 0.3`).

---

5. Resultados

5.1 Cobertura del Sistema

El sistema monitorea actualmente 147 áreas marinas protegidas distribuidas en cinco países:

País	Número de AMPs	Área Marina (km²)	Categorías Principales
Chile	41	1,477,748	Parques Marinos, Reservas Marinas, AMCP-MU
Perú	31	68,307	Reservas Nacionales, Santuarios
Ecuador	17	211,400	Parque Nacional Galápagos, Reservas
Colombia	20	307,325	Parques Nacionales, Santuarios
Argentina	38	215,600	Parques Nacionales Marinos, Reservas (conectividad Pacífico-Atlántico)
Total	**147**	**2,280,380**	—

Fuente de datos: Polígonos GeoJSON obtenidos de bases oficiales nacionales (SNASPE Chile, SERNANP Perú, MAE Ecuador, Parques Nacionales Naturales Colombia, APN Argentina), filtrados por `pct_mar > 0.3` y estandarizados bajo proyección EPSG:4326. Fecha de corte: 22 de octubre de 2026. Los conteos y las superficies se calcularon directamente desde los atributos de las capas WFS publicadas en GeoServer (`ha` y `km²`), considerando únicamente los polígonos visibles en la plataforma.

Nota sobre cobertura espacial: Con resolución de 1-5 km/píxel, las AMP de mayor extensión cuentan con cobertura adecuada (>10 píxeles válidos por fecha). Las áreas pequeñas (<10 km²) pueden tener cobertura limitada y sus indicadores deben interpretarse con precaución.

5.2 Series Temporales Disponibles

El sistema mantiene series temporales históricas para todas las áreas protegidas:

Variable	Período	Resolución	Actualización
TSM	2002-presente	Diaria	Diaria (07:00 UTC)
ATSM	2002-presente	Diaria	Diaria (07:00 UTC)
Clorofila-a	1997-presente	Diaria/Mensual	Diaria (07:00 UTC)
Nivel del Mar	2002-presente	Diaria	Diaria (07:00 UTC)
Oleaje (Hs)	2002-presente	Diaria	Diaria (07:00 UTC)
ONI	1950-presente	Mensual	Mensual

5.3 Visualización Interactiva

La plataforma web proporciona acceso público a través de: **https://giscc.ifop.cl/areasprotegidas/**

Funcionalidades principales:

1. **Mapa interactivo**: Visualización de todas las áreas protegidas con capas toggleables por país.
2. **Popups informativos**: Click en cualquier área muestra nombre, designación, área en km².
3. **Gráficos de series temporales**: Un clic sobre el área abre un panel con cinco gráficos interactivos (TSM, ATSM, clorofila-a, nivel del mar y oleaje).
4. **Análisis de tendencias**: Líneas de regresión calculadas en tiempo real.
5. **Anotaciones ENSO**: Bandas coloreadas indican períodos de El Niño/La Niña.
6. **Bandas de rango histórico**: Áreas sombreadas muestran variabilidad histórica (min-max).

5.4 Indicadores en Tiempo Real

Al momento de escribir este artículo (octubre de 2026), el último ONI disponible corresponde a agosto de 2026 (+2.16 °C), lo que clasifica el evento como **El Niño Muy Fuerte**. Durante su desarrollo se observaron los siguientes patrones:

- **TSM**: Anomalías positivas (+0.8°C a +1.8°C) en la zona norte y centro de Chile, consistentes con El Niño.
- **Clorofila-a**: Reducción de productividad primaria en zonas de surgencia, especialmente en Perú y norte de Chile.
- **Eventos extremos**: Detección de ondas de calor marinas en áreas protegidas de la zona centro-norte.

5.5 Tendencias Climáticas Observadas

El análisis de series históricas revela tendencias significativas en áreas protegidas del Pacífico Suroriental:

- **Calentamiento oceánico**: Tendencia positiva de +0.15°C a +0.25°C por década en la mayoría de las áreas, consistente con calentamiento global (IPCC, 2021).
- **Cambios en productividad**: Tendencias mixtas en clorofila-a, con disminuciones en zonas de surgencia y aumentos en zonas de afloramiento costero.
- **Aumento del nivel del mar**: Tendencia positiva de +3 a +4 mm/año, alineada con observaciones globales actualizadas (IPCC, 2021, Cap. 9).
- **Incremento de eventos extremos**: Mayor frecuencia e intensidad de eventos de El Niño en las últimas tres décadas.

5.6 Casos de Estudio Destacados

5.6.1 Parque Nacional Galápagos (Ecuador) El Parque Nacional Galápagos (133,000 km²) muestra alta sensibilidad a eventos ENSO. Los siguientes datos provienen del sistema AreasProtegidas/SAPO-ENOSCC:

- **El Niño 2015-2016**: Anomalías de TSM de +3.5°C registradas en la base de datos del sistema, asociadas a blanqueamiento masivo de corales reportado en literatura (Glynn et al., 2017).
- **La Niña 2020-2022**: Recuperación de productividad primaria, aumento de clorofila-a en 40% según series temporales del sistema.
- **Tendencia de calentamiento**: +0.23 °C por década para el período 2002-2026, calculado mediante regresión lineal de la serie TSM almacenada en `doma_indicador_tsm`.

5.6.2 Reserva Marina Isla Grande de Atacama (Chile) Esta reserva en el norte de Chile (2,300 km²) muestra impactos de El Niño en la surgencia costera. Datos extraídos del sistema:

- **Reducción de surgencia**: Disminución de 15% en productividad primaria durante El Niño (comparación de medias clorofila-a 2015 vs climatología).
- **Cambios en distribución de especies**: Migración de especies demersales hacia aguas más profundas (observaciones de cruceros IFOP, no incluidas en este sistema).
- **Tendencia de clorofila**: -0.08 mg/m³ por década desde 1997, calculado de serie `doma_indicador_clo`.

5.6.3 Parque Marino Nazca-Desventuradas (Chile) El parque marino más grande de Chile (300,000 km²) muestra resiliencia relativa. Indicadores del sistema:

- **Menor impacto de El Niño**: Anomalías de TSM moderadas (+1.2°C vs +2.5°C en costa continental), según datos de `doma_indicador_atsm`.
- **Productividad estable**: Clorofila-a sin tendencia significativa (pendiente < 0.01 mg/m³/década), sugiriendo estabilidad ecológica.
- **Biodiversidad mantenida**: Sin reportes de mortalidad masiva durante eventos extremos (monitoreo independiente de SUBPESCA).

---

6. Discusión

6.1 Importancia Estratégica del Sistema

El sistema de monitoreo de áreas marinas protegidas representa un avance significativo en la capacidad de conservación marina del Pacífico Suroriental. Sus principales fortalezas incluyen:

1. **Cobertura regional integrada**: Monitoreo simultáneo de cinco países con metodologías estandarizadas, facilitando análisis comparativos y coordinación binacional/multinacional.
2. **Continuidad operacional**: Dos décadas de datos históricos continuos (TSM, ATSM, nivel del mar y oleaje desde 2002; clorofila-a desde 1997), permitiendo análisis de tendencias climáticas multidecadales.
3. **Alta resolución espacial**: Uso de productos satelitales de 1-5 km de resolución, apropiados para áreas protegidas de diferentes tamaños.
4. **Automatización completa**: Pipeline ETL que procesa diariamente cientos de archivos NetCDF sin intervención manual.
5. **Acceso abierto**: Plataforma web pública sin restricciones de acceso, democratizando la información científica.
6. **Bajo costo operacional**: Basado enteramente en software de código abierto y datos satelitales gratuitos (CMEMS, NASA, NOAA).

6.2 Comparación con Sistemas Internacionales

Tabla de comparación:

Característica	Sistema IFOP	NOAA MPA (USA)	IMOS (Australia)	EMODnet (UE)
Cobertura geográfica	Pacífico SE	USA	Australia	Europa
Número de AMPs	147	~1,000	~60	~3,500
Resolución espacial	1-5 km	Variable	1-10 km	Variable
Variables monitoreadas	5	10+	15+	20+
Series temporales	24+ años	30+ años	20+ años	15+ años
Acceso público	Sí	Parcial	Sí	Sí
Código abierto	Sí	Parcial	Sí	Parcial
Actualización	Diaria	Variable	Diaria	Variable

6.3 Limitaciones y Desafíos Actuales

El sistema presenta limitaciones que constituyen oportunidades de mejora:

1. **Validación in situ**: No se realiza comparación sistemática con datos de campañas oceanográficas (cruceros, boyas, CTD), limitando la validación de productos satelitales.
2. **Variables biológicas limitadas**: Actualmente solo monitorea clorofila-a como proxy de productividad primaria. No incluye indicadores de biodiversidad, abundancia de especies, o estado de hábitats bentónicos.
3. **Resolución temporal de clorofila**: El producto OC-CCI v5.0 es diario (gap-free, multisensor), pero su resolución de 4 km limita la capacidad de detectar procesos costeros de pequeña escala en zonas de fiordos y canales.
4. **Falta de alertas automáticas**: No existen mecanismos de notificación automática cuando indicadores superan umbrales críticos (ej: TSM > +2°C por 5 días consecutivos).
5. **Análisis espacial limitado**: No calcula gradientes espaciales dentro de las áreas protegidas (ej: zonas núcleo vs zonas de amortiguamiento).
6. **Integración con sistemas de gestión**: No se conecta con bases de datos de gestión de AMPs (ej: planes de manejo, registros de visitantes, infracciones).
7. **Análisis de efectividad**: No evalúa la efectividad de las AMPs comparando tendencias dentro vs fuera de los polígonos protegidos.

8. **Downscaling costero**: La resolución de 1-5 km es insuficiente para áreas protegidas pequeñas (<10 km²) o zonas de fiordos y canales.

6.4 Aplicaciones para la Gestión y Políticas Públicas

El sistema tiene múltiples aplicaciones prácticas para la gestión de áreas marinas protegidas:

1. **Reportes de estado**: Generación automática de reportes periódicos sobre condiciones oceanográficas de cada área protegida.
2. **Evaluación de impactos**: Identificación de áreas afectadas por eventos extremos (El Niño, ondas de calor marinas) para priorizar respuestas de gestión.
3. **Diseño de redes de AMPs**: Análisis de conectividad oceanográfica entre áreas protegidas para optimizar el diseño de redes ecológicas.
4. **Monitoreo de compromisos internacionales**: Seguimiento de metas de conservación (ODS 14, CBD, Protocolo de Lima) mediante indicadores cuantitativos.
5. **Investigación científica**: Provisión de datos estandarizados para estudios de cambio climático, ecología marina y conservación.
6. **Educación y divulgación**: Herramienta educativa para universidades, escuelas y público general sobre la importancia de las áreas marinas protegidas.

6.5 Trabajo Futuro

Las siguientes mejoras están identificadas como prioritarias:

1. **Integración de datos in situ**: Incorporación de datos de boyas oceanográficas, cruceros CTDO y estaciones costeras para validación de productos satelitales.
2. **Alertas automáticas**: Sistema de notificaciones push y correo electrónico cuando indicadores superan umbrales predefinidos.
3. **Análisis de efectividad**: Comparación de tendencias oceanográficas dentro vs fuera de áreas protegidas para evaluar efectividad de conservación.
4. **Variables biológicas adicionales**: Integración de productos de biodiversidad (OBIS), hábitats bentónicos y calidad de agua.
5. **API REST pública**: Exposición de endpoints estandarizados para acceso programático a datos de indicadores.
6. **Downscaling dinámico**: Implementación de modelos regionales de alta resolución para zonas costeras complejas.
7. **Integración con sistemas de gestión**: Conexión con bases de datos de planes de manejo, permisos y actividades humanas.
8. **Análisis predictivo**: Modelos de machine learning para predicción de condiciones futuras basadas en tendencias históricas y escenarios climáticos.
9. **Colaboración regional**: Extensión del sistema a Panamá y otros países del Pacífico Suroriental bajo el marco del CPPS.
10. **Conexión a repositorios internacionales**: Publicación de datos en GBIF, OBIS y PANGAEA para maximizar impacto científico.

---

7. Conclusiones

El sistema de monitoreo oceanográfico para áreas marinas protegidas del Pacífico Suroriental se ha consolidado como una herramienta estratégica para la conservación marina regional, integrando datos satelitales de múltiples fuentes en una plataforma web accesible, robusta y de bajo costo operacional. El sistema monitorea 147 áreas protegidas en cinco países, proporcionando series temporales históricas de 24 años para TSM, anomalías térmicas, nivel del mar y oleaje, y de 29 años para clorofila-a.

La plataforma, construida enteramente con software de código abierto (Flask, PostgreSQL/PostGIS, GeoServer, xarray, Plotly.js), demuestra la viabilidad de sistemas de monitoreo basados en tecnología accesible y datos satelitales gratuitos. Su arquitectura automatizada (pipeline ETL multiproceso) permite el procesamiento diario de cientos de archivos NetCDF sin intervención manual, asegurando continuidad operacional y actualización oportuna.

Las aplicaciones del sistema son múltiples: desde la generación de reportes de estado para gestores de áreas protegidas, hasta el análisis de tendencias climáticas para investigación científica, pasando por la evaluación de compromisos internacionales de conservación (ODS 14, CBD). Los casos de estudio presentados (Galápagos, Isla Grande de Atacama, Nazca-Desventuradas) ilustran la capacidad del sistema para detectar impactos de eventos extremos y tendencias de largo plazo.

Las perspectivas de mejora incluyen la integración de datos in situ, el desarrollo de alertas automáticas, el análisis de efectividad de conservación, y la extensión de la cobertura a otros países del Pacífico Suroriental. Estas líneas de desarrollo fortalecerán aún más el rol del sistema como herramienta de ciencia, monitoreo y apoyo a la toma de decisiones en el contexto del cambio climático global.

La documentación del sistema mediante este artículo, junto con la asignación de un DOI, permite su citación formal en la literatura científica y establece una línea base para su desarrollo futuro y replicación en otras regiones del mundo.

Referencias

Chavez, F.P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 95-105. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012

Church, J.A., & White, N.J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), 585-602. https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1

CPPS (1989). Protocolo para la Conservación y Gestión de las Áreas Marinas y Costeras Protegidas del Pacífico Sudeste. Comisión Permanente del Pacífico Sur, Quito, Ecuador.

Fox-Kemper, B., Kozyr, D., Spillman, C.M., et al. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Cap. 9). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011

Thiel, M., Macaya, E.C., Acuña, E., Arntz, W.E., Bastias, H., Brokordt, K., Camus, P.A., Castilla, J.C., Castro, L.R., Cortés, M., Dumont, C.P., Escribano, R., Fernández, M., Gajardo, E., Gaymer, C.F., Gómez, I., González, A.E., González, H.E., Haye, P.A., Illanes, J.E., Iriarte, J.L., Lancellotti, D.A., Luna-Jorquera, G., Luxoro, C., Manríquez, P.H., Marín, V., Muñoz, P., Navarrete, S.A., Pérez, E., Poulin, E., Sellanes, J., Sepúlveda, H.H., Stotz, W., Tala, F., Thomas, A., Vargas, C.A., Vásquez, J.A., & Vega, J.M.A. (2007). The Humboldt Current System of northern and central Chile: Oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 45, 195-344. https://doi.org/10.1201/9781420050943.ch6

UNEP (2023). Marine Protected Areas and Climate Change: Adaptation and Mitigation Strategies. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Glynn, P.W., Fong, P., & Baker, A.C. (2017). Coral bleaching and mortality in the Galápagos Islands during the 2015-2016 El Niño. *Coral Reefs*, 36, 973-986. https://doi.org/10.1007/s00338-017-1578-y

Zainuddin, M., Saitoh, K., & Saitoh, S. (2017). Satellite remote sensing applications for marine conservation and management. *Oceanography*, 30(4), 156-165.

Robinson, N.J., et al. (2019). Remote sensing of marine environments: A review of methods and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 613, 1-22.

Apéndice A: Acceso al Sistema

- **URL de acceso:** https://giscc.ifop.cl/areasprotegidas/
- **Contacto:** andres.garcia@ifop.cl

Apéndice B: Especificaciones Técnicas del Pipeline ETL

B.1 Script Principal de Procesamiento

```python
#!/usr/bin/env python3
"""
00_procesos_tsm_atsm_clo_v4.py
Pipeline ETL para procesamiento de datos satelitales NetCDF
y cálculo de indicadores oceanográficos para áreas marinas protegidas.
"""

import xarray as xr
import numpy as np
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import shape
import multiprocessing as mp
import psycopg2
from psycopg2.extras import execute_batch
import smtplib
from email.mime.text import MIMEText

# Configuración
DATABASE_CONFIG = {
    "database": os.environ.get('DB_NAME', DB_NAME),
    "user": os.environ.get('DB_USER', DB_USER),
    "password": os.environ.get('DB_PASSWORD',DB_PASSWORD),
    "host": os.environ.get('DB_HOST', DB_HOST),
    "port": os.environ.get('DB_PORT', DB_PORT),
}

def procesar_archivo(filepath, geometrias_amp):
    """Procesa un archivo NetCDF y calcula estadísticas para cada AMP."""
    try:
        ds = xr.open_dataset(filepath)
        variable = ds['sst']  # o 'anomaly', 'chlorophyll'

        resultados = []
        for amp in geometrias_amp:
            minx, miny, maxx, maxy = amp.geometry.bounds
            subgrid = variable.sel(
                latitude=slice(maxy, miny),
                longitude=slice(minx, maxx)
            )
```

```
            mask = shapely.contains(amp.geometry, subgrid.geometry)
            valores = subgrid.values[mask]

            if len(valores) > 10:  # mínimo 10 píxeles
                resultados.append({
                    'zona': amp.properties['nombre'],
                    'fecha': extraer_fecha(filepath),
                    'num_puntos': len(valores),
                    'min_temp': float(np.nanmin(valores)),
                    'max_temp': float(np.nanmax(valores)),
                    'mean_temp': float(np.nanmean(valores)),
                    'sum_temp': float(np.nansum(valores))
                })

        return resultados

    except Exception as e:
        print(f"Error procesando {filepath}: {e}")
        return []

def main():
    # Cargar geometría de áreas protegidas
    gdf = gpd.read_file('areasprotegidas.geojson')
    gdf_mar = gdf[gdf['pct_mar'] > 0.3]  # filtrar áreas marinas

    # Detectar archivos faltantes
    archivos_disponibles = listar_archivos_netcdf('/data/satellite/')
    archivos_procesados = consultar_archivos_procesados(DATABASE_CONFIG)
    archivos_faltantes = set(archivos_disponibles) - set(archivos_procesados)

    # Procesamiento paralelo
    with mp.Pool(processes=50) as pool:
        all_results = pool.starmap(
            procesar_archivo,
            [(filepath, gdf_mar) for filepath in archivos_faltantes]
        )

    # Aplanar resultados
    flat_results = [item for sublist in all_results for item in sublist]

    # Inserción masiva en PostgreSQL
    conn = psycopg2.connect(**DATABASE_CONFIG)
    cursor = conn.cursor()

    insert_query = """
        INSERT INTO doma_indicador_tsm
        (zona, fecha, num_puntos, min_temp, max_temp, mean_temp, sum_temp)
        VALUES (%(zona)s, %(fecha)s, %(num_puntos)s, %(min_temp)s,
                %(max_temp)s, %(mean_temp)s, %(sum_temp)s)
        ON CONFLICT (zona, fecha) DO NOTHING
    """

    execute_batch(cursor, insert_query, flat_results, page_size=1000)
    conn.commit()
```

```
    cursor.close()
    conn.close()

    # Enviar reporte por correo
    enviar_reporte(len(flat_results), len(archivos_faltantes))

if __name__ == '__main__':
    main()
```

B.2 Rendimiento del Pipeline

Parámetro	Valor
Archivos procesados por ejecución	50-200
Tiempo de procesamiento por archivo	2-5 segundos
Workers paralelos	50
Tiempo total de ejecución	15-30 minutos
Registros insertados por ejecución	5,000-20,000
Uso de CPU	80-95% (50 cores)
Uso de memoria	8-12 GB

Cita sugerida:

García, A. & Letelier, J. (2026). Sistema de Monitoreo Oceanográfico para Áreas Marinas Protegidas del Pacífico Suroriental (v3.2). *Zenodo*. DOI: 10.5281/zenodo.21722923
