



Universidad Nacional del Comahue
Centro Regional Universitario Bariloche
Departamento de Postgrado – Doctorado en Biología

**Caracterización ambiental del golfo San Matías mediante
sensores remotos y parámetros oceanográficos.
Relación con la distribución y abundancia de los recursos
biológicos de interés pesquero.**

Tesis presentada para optar al título de
Doctor en Biología

Lic. Gabriela Noemí Williams

Director de tesis: Dr. José Luis Esteves
Co-director de tesis: Dra. Maite Narvarte

Lugar de trabajo: Centro Nacional Patagónico
(CENPAT/CONICET)

NOVIEMBRE 2011

PREFACIO

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Biología, de la Universidad Nacional del Comahue y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Centro Nacional Patagónico (Puerto Madryn, Chubut) dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el Instituto de Biología Marina y Pesquera “Almirante Storni” (San Antonio Oeste, Río Negro), dependiente del Ministerio de Economía de la Provincia de Río Negro y de la Universidad Nacional del Comahue, durante el período comprendido entre mayo de 2005 y junio de 2011. Esta tesis ha sido realizada bajo la dirección del Dr. José Luis Esteves, Investigador Principal de CONICET y la codirección de la Dra. Maite Andrea Narvarte, Investigadora Adjunta del IDEPA-CONICET.

Dr. José Luis Esteves
Director

Dra. Maite Andrea Narvarte
Codirector

Lic. Gabriela Noemí Williams
Alumna

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Domingo Antonio Gagliardini por las oportunidades y la confianza brindada al permitirme desarrollar esta tesis doctoral y ser director de mi beca de postgrado del CONICET.

Al Dr. José Luis Esteves por darme la oportunidad de trabajar en oceanografía, por su dirección en esta tesis, atención y optimismo en mi trabajo.

A la Dra. Maite Narvarte por su compromiso y dedicación en esta tesis.

Al equipo de trabajo de Laboratorio de Oceanografía Química y Contaminación de Aguas del CENPAT, muy especialmente a M.Sc. Miriam Solís (CPA- CONICET) por su asesoramiento en los muestreos oceanográficos y por su tiempo dedicado en los análisis de laboratorio.

Al Dr. Raúl González por su apoyo constante en este trabajo, en los proyectos que la respaldaron y por integrarme a su grupo de trabajo en el IBMAS.

A Andrés Rivas por sus comentarios y sugerencias en el análisis de las series temporales de imágenes satelitales.

A Marysol Sapoznik por su valioso trabajo en el procesamiento de imágenes SeaWiFS.

Al Dr. Matías Ocampo-Reinaldo por compartir los datos del capítulo de aplicaciones pesqueras.

Al Lic. Nicolás Pérez de la Torre por su colaboración en el procesamiento de imágenes AVHRR.

A la CONAE por el suministro de imágenes de los satélites NOAA y SeaWiFS.

A la red Antares por la disponibilidad de imágenes MODIS

A mis colegas del Instituto de Biología Marina y Pesquera Alte. Storni:

Paula Zaidman, Alejandra Romero, Elena Guerrero, Soledad Avaca, Lorena Storero, Matias Ocampo-Reinaldo, Guillermo Svendsen, Mariano Soria, Marcela Williams y Roxana Soler, gracias por integrarme al grupo de trabajo, por sus colaboraciones y hacerme sentir “*como en casa*”.

A Eduardo y María Luz por su amistad.

A Abel por su amor, paciencia y respaldo.

A mis padres, Ana Rosario y Eduardo por su apoyo incondicional y por haberme dado la posibilidad de formarme profesionalmente.

INDICE

CONTENIDO

Resumen.....	i
Abstract.....	v
Acrónimos.....	viii
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Aspectos generales de la dinámica de los ecosistemas marinos.....	1
1.2 Metodologías utilizadas en estudios oceanográficos.....	12
1.2.1 Campañas oceanográficas.....	12
1.2.2 Teledetección en el medio marino.....	12
1.2.3 Integración de la información.....	21
1.3 Área de estudio.....	22
1.3.1 Descripción geográfica.....	22
1.3.2 Características físicas.....	22
1.3.3 Aspectos de la biodiversidad de la región.....	25
1.4 Antecedentes de estudios ambientales en el golfo San Matías.....	26
1.5 Motivación.....	33
1.5.1 Objetivos.....	34
1.5.2 Hipótesis de trabajo.....	35
1.5.3 Actividades.....	35
Capítulo 2. Materiales y Métodos	
2.1 Teledetección satelital aplicada al estudio del mar: procesamiento de datos.....	37
2.1.1 Estimación de la TSM a partir de la energía infrarroja térmica emitida por la superficie del mar.....	38
2.1.2 Estimación de la concentración de clorofila- <i>a</i> a partir de la energía visible reflejada por la superficie del mar.....	42
2.1.3 Tipo de datos.....	51
2.1.4 Cadena de Procesamiento para la generación de imágenes de TSM Y clorofila- <i>a</i> a partir de datos AVHRR y SeaWiFS/MODIS de alta resolución.....	51
2.2 Técnica de trabajo en campañas oceanográficas.....	57
2.2.1 Diseño de muestreo.....	57
2.2.2 Técnicas de muestreo de aguas y tratamiento de las muestras a bordo.....	58
2.2.3 Metodología de trabajo en el laboratorio.....	59
2.3. Obtención de datos biológicos pesqueros.....	62
2.3.1 Programa de Observadores Pesqueros (POP).....	62
2.3.2 Procesamiento de las muestras.....	63
2.4 Tratamiento numérico de los datos.....	63
Capítulo 3. Determinación de la variabilidad espacio-temporal de parámetros oceanográficos mediante sensores remotos y campañas oceanográficas.	
Sección 3.1 Variabilidad espacio-temporal de temperatura superficial y clorofila- <i>a</i> determinadas mediante sensoramiento remoto (AVHRR y SeaWiFS).	
3.1.1 Introducción.....	64
3.1.2 Metodología.....	66
3.1.3 Resultados.....	72
Sección 3.2 Análisis de la distribución superficial y vertical de los parámetros físicos y químicos obtenidos en campañas oceanográficas.	
3.2.1 Introducción.....	87
3.2.2 Análisis de los datos.....	88
3.2.3 Resultados.....	92

INDICE

Discusión y conclusiones secciones 3.1 y 3.2.....	128
Sección 3.3 Comparación entre datos de TSM y Cla satelital (AVHRR, SeaWiFS/MODIS) e <i>in-situ</i>	
3.3.1 Introducción.....	137
3.3.2 Metodología.....	139
3.3.3 Resultados.....	146
3.3.4 Discusión.....	154
Capítulo 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías utilizando imágenes satelitales y datos oceanográficos	
4.1 Introducción.....	158
4.2 Metodología.....	162
4.3 Resultados.....	173
4.4 Discusión.....	189
Capítulo 5. Utilización de datos satelitales en aplicaciones biológico-pesqueras	
5.1 Introducción.....	194
5.2 Metodología.....	198
5.3 Resultados.....	200
5.4 Discusión.....	213
Conclusiones.....	219
Referencias.....	223
Apéndice A.....	240
Apéndice B.....	252
Apéndice C.....	259
Apéndice D.....	265
Apéndice E.....	271
Apéndice F. Publicación de respaldo.....	272

RESUMEN

El golfo San Matías (GSM) es una cuenca semicerrada localizada en el norte de la Plataforma Continental Patagónica entre las latitudes de 40° 47' S y 42° 13' S. Presenta un área de aproximadamente 20000 km², siendo el segundo golfo más grande de Argentina. Alrededor del 55% de área total presenta profundidades mayores a 100m, con un máximo de profundidad en el área central de 180 m. La Plataforma Continental en la zona este forma una cuenca abierta con una profundidad media de 70 m en la entrada del golfo.

El GSM es un ecosistema relevante en términos de riqueza de hábitats, disponibilidad de recursos y diversidad biológica, con lo cual una importante extensión de sus costas y aguas constituyen Áreas Naturales Protegidas, siendo la más importante Península Valdés, la cuál ha sido declarada Patrimonio Mundial de la Humanidad por UNESCO. Este ecosistema es la principal fuente de bienes y servicios para las comunidades costeras de la provincia de Río Negro y soporta actividades humanas basadas en la explotación de recursos pesqueros y turismo. El objetivo de esta Tesis fue identificar y caracterizar diferentes escenarios ambientales presentes en el golfo San Matías y su relación con la distribución y abundancia de sus recursos biológicos de interés pesquero.

Este estudio fue llevado a cabo mediante el análisis de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila-*a* de los sensores AVHRR (2000-2008) y SeaWiFS (2000-2006), respectivamente. Las imágenes satelitales AVHRR y SeaWiFS fueron importadas, calibradas, rectificadas, y corregistradas mediante los programas de procesamiento Erdas Imagine y SeaDAS, respectivamente. Se analizaron las variaciones temporales de TSM y clorofila-*a* en áreas de interés y se elaboraron mapas de promedios, desvíos estándar, máximos y mínimos mensuales, anuales y climatológicos de los productos obtenidos.

Un programa de seis campañas oceanográficas estacionales se llevó a cabo entre los años 2007 y 2009 con el objetivo de obtener datos de temperatura, concentración de nutrientes y clorofila-*a* en superficie y profundidad. Las variables oceanográficas fueron representadas mediante el método de interpolación de *krigging* en mapas superficiales y perfiles verticales con el propósito de observar su comportamiento espacial.

La aplicación de análisis de componentes principales y agrupamiento (análisis multivariados) permitió establecer el agrupamiento de las estaciones de muestreo en

función de las condiciones ambientales y la relación entre las variables consideradas (temperatura, profundidad, concentración de nutrientes y clorofila-*a*). La visión sinóptica y el análisis de imágenes satelitales de temperatura y clorofila-*a* (en este caso estimada por el sensor MODIS) obtenidas en las fechas de realización de las campañas fue utilizada para complementar los resultados obtenidos en el análisis de los datos de campo.

Los mapas satelitales de TSM y clorofila-*a* junto con datos de las variables determinadas *in-situ* mostraron dos sectores bien diferenciados en los meses de octubre a marzo. La zona sudeste presentó aguas frías, homogeneidad en la estructura vertical y mayores concentraciones de nutrientes y clorofila-*a*. La zona noroeste presentó temperaturas relativamente cálidas, estratificación en la columna de agua y como consecuencia, menores concentraciones de nutrientes y clorofila-*a*. El ciclo térmico del área noroeste se caracterizó por presentar mayor amplitud con respecto al área sudeste. El ciclo de clorofila-*a* presentó un mínimo en la zona noroeste en verano, característico de aguas que se estratifican en esta estación del año, mientras que en el área sureste el ciclo fue característico de aguas homogéneas (con valores relativamente altos desde la primavera al otoño).

La correspondencia entre las estimaciones satelitales y las mediciones *in-situ* de TSM y clorofila-*a* (MODIS) fue evaluada mediante el cálculo del error relativo (ER) y el error cuadrático medio (RMS). El modelo de regresión lineal tipo II, Standard Major Axis (SMA) fue utilizado para calcular la pendiente y la ordenada al origen de la ecuación lineal que relaciona las estimaciones satelitales y los datos *in-situ*. Los resultados mostraron una alta correlación en el caso de temperatura ($r^2 = 0,84$); mientras que para clorofila-*a*, si bien los coeficientes de correlación obtenidos fueron bajos ($0,26 \leq r^2 \leq 0,34$), hubo correspondencia espacial y temporal. La comparación entre datos de concentración de clorofila-*a* de los sensores SeaWiFS y MODIS mostró una importante correlación entre ambas fuentes de datos ($r^2 = 0,62$), indicando que para el GSM, la serie temporal de clorofila-*a* obtenida mediante el sensor SeaWiFS puede ser continuada con datos del sensor MODIS.

Las series temporales de nueve y seis años de TSM/AVHRR y clorofila-*a*/SeaWiFS proveyeron una visión amplia y detallada de la evolución estacional y de la variabilidad interanual de ambas variables en el GSM. La evolución temporal de la TSM y clorofila-*a* satelital permitió caracterizar al GSM como un ecosistema con un ciclo térmico estacional y de concentración de clorofila-*a* bimodal característicos de aguas templadas.

Asimismo, las imágenes satelitales de TSM y clorofila-*a* permitieron establecer que las dos principales áreas identificadas se encuentran separadas por un frente térmico, en primavera y verano.

El cálculo de gradientes térmicos (GRT) se aplicó a imágenes de TSM del sensor AVHRR, los cuales permitieron localizar y cuantificar el frente y estudiar su variabilidad anual e interanual. Los datos de clorofila-*a* (SeaWiFS) obtenidos en transectas perpendiculares a la dirección del frente, mostraron variaciones espaciales en la zona frontal y en relación a la topografía del fondo.

Desde el punto de vista pesquero el recurso biológico más importante en el GSM es la merluza común (*Merluccius hubbsi*), en este sentido el Sistema de Monitoreo Oceanográfico y Pesquero (SIMPO, 2004-2006) obtuvo datos de actividad de la flota pesquera, un programa de observadores a bordo suministró información biológica y ecológica de las especies de interés comercial, mientras que la Secretaría de Pesca de la provincia de Río Negro proporcionó datos de desembarcos mensuales y capturas por unidad de esfuerzo (CPUE en $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). El SIMPO proveyó datos de posición, velocidad y rumbo de los barcos en tiempo real mediante transmisores satelitales Inmarsat D+. Se utilizaron criterios de velocidad para discriminar los registros de actividad de pesca. Los registros menores a 2,5 nudos y mayores a 4,0 nudos fueron excluidos, ya que no se asociaron a la actividad específica de pesca. Los mapas de actividad de pesca fueron contruidos mediante el cálculo de la densidad de datos de posición filtrados sobre una grilla de $0,01^\circ$. Estos datos fueron superpuestos a mapas de TSM, GRT y clorofila-*a* mostrando que los barcos pesqueros operan en el área del frente térmico desde Noviembre a Marzo, obteniendo las máximas capturas de merluza.

En esta Tesis, información ambiental de alta resolución espacial y temporal, junto con datos de distribución espacial de la flota de arrastre, obtenidos mediante datos satelitales, permite concluir que la estacionalidad del frente térmico es uno de los principales factores que condicionan la pesquería del GSM, indicando la relevancia biológica de esta estructura oceanográfica. Por otro lado, la obtención de datos satelitales e *in-situ* en forma simultánea permitió comparar ambas fuentes de información en el área de estudio.

En síntesis, esta Tesis permitió: (a) determinar la distribución espacio-temporal de las condiciones oceanográficas de superficie en el golfo San Matías, (b) determinar la estructura vertical de la columna de agua a través de datos de campanas oceanográficas y la interrelación con las condiciones de superficie y (c) observar la coincidencia con los

RESUMEN

patrones de distribución de especies de interés pesquero a la luz del sistema de seguimiento satelital de la pesquería regional. Consideramos que es la suma de esta información la que contribuirá de manera superlativa a la implementación de un Plan de Manejo Ecosistémico Pesquero (FMP) para el golfo San Matías.

ABSTRACT

The San Matías Gulf (SMG) is a semi-enclosed basin located in the north of the Patagonian Continental Shelf between 40° 47' S and 42° 13' S and has very singular features. It covers an area of approximately 20,000 km², being the second largest gulf of Argentina. Around 55% of the total area is deeper than 100m, with a maximum depth of 180 m in the central area. The continental shelf on the eastern zone forms an open basin with a mean depth of 70 m at the entrance.

The SMG is a relevant ecosystem in terms of habitat richness, resources availability and biological diversity. An important extension of its coasts and waters constitutes Marine Protected Areas, being the most prominent Península Valdés, which achieved the status of World Heritage from UNESCO. This ecosystem is the main source of goods and services for three coastal communities and it supports human activities based on the exploitation of fishery resources and tourism. The aim of this Thesis was to identify and characterize different environmental features present in SMG and their relationship with the distribution and abundance of biological resources of fishing interest. The study was carried out through the analysis of sea surface temperature (SST) and chlorophyll-*a* images from the sensors AVHRR and SeaWiFS, respectively. These satellite images were imported, calibrated, rectified and co-registered using Erdas Imagine (SST) and SeaDAS (chlorophyll-*a*) software. Annual cycles, spatial distribution of temporal means, the corresponding standard deviations, maximum and minimum values, were analyzed.

Six oceanographic surveys were carried out between 2007 and 2009 in order to obtain *in-situ* data of temperature, nutrients and chlorophyll-*a* at different depths (including surface data). Surface maps and vertical profiles of oceanographic variables were calculated by the *kriging* interpolation method in order to determine their spatial distribution.

Principal component analysis (PCA) and clustering allowed to establish the grouping of stations based on environmental conditions and the relationship between the variables analyzed (temperature, depth, concentration of nutrients and chlorophyll-*a*). The synoptic view of satellite images of SST (AVHRR) and chlorophyll-*a* (MODIS) obtained in the same period as the oceanographic surveys was used to support the results obtained through analysis of field data.

Satellite maps of SST and chlorophyll-*a* (in this case from MODIS sensor), jointly with *in-situ* data showed two distinct sectors between October and March. The southern area presents colder and mixed waters and higher concentrations of nutrients and chlorophyll-*a* while the northern one has warmer temperatures, stratified waters and lower values of nutrients and chlorophyll-*a*. Also, the northern area was characterized by a thermal cycle of higher amplitude. The annual cycle of chlorophyll-*a* showed a minimum in the northern area in summer, typical of waters that are stratified in this season, while in the southern area the cycle was distinctive of mixed water (with relatively high values from spring to autumn).

The correlation between satellite and *in-situ* data of surface temperature and chlorophyll-*a* (MODIS) was evaluated by calculating the relative error (RE) and the root mean square (RMS). Bias, slope and the correlation coefficient (r^2_{SMA}) were calculated following a type II lineal regression model, Standard Major Axis (SMA). A high correlation was obtained for temperature ($r^2 = 0.84$) while for chlorophyll-*a* the correlation coefficients were low ($0.26 \leq r^2 \leq 0.34$), even if spatial and temporal correspondence was observed. The comparison between chlorophyll-*a* data from SeaWiFS and MODIS sensors have shown an important correlation ($r^2 = 0.62$), indicating that, for this Gulf, chlorophyll-*a* time series obtained by SeaWiFS sensor can be continued with data from the MODIS sensor.

The time series of nine and six years of TSM/AVHRR (2000-2008) and chlorophyll-*a*/SeaWiFS (2000-2006) respectively, provided a broad and detailed seasonal pattern and information about the interannual variability in the Gulf. These data allowed to determine that the cycles of SST and chlorophyll-*a*, obtained by remote sensing data, are characteristic of temperate waters and agree with previous studies based on *in-situ* data. Images of SST and chlorophyll-*a* allowed to establish that the identified areas are separated by a thermal front in Spring and Summer.

Calculation of thermal gradients (GRT) was applied to SST/AVHRR images to locate and quantify the thermal front as well as to study their annual and interannual variability. Surface data of chlorophyll-*a* (SeaWiFS) obtained in transects perpendicular to the direction of the front, showed spatial variations in the frontal zone and its relationship to bottom topography.

The common hake (*Merluccius hubbsi*) is the most important fishery in terms of landings and economical revenues in SMG. In this sense, data of the bottom trawl fleet activity for the period 2004-2006 were obtained from two different information sources:

ABSTRACT

hauls locations gathered by a vessel monitoring system (VMS, known as “SiMPO”) and monthly hake landings, effort and yield (CPUE = catch per unit of effort, in Kg. hour⁻¹) obtained from official logbook records of the Fishery Directorate of Rio Negro province. Also, a board observer program provided biological and ecological information of species of commercial interest. The VMS provided real-time data of vessel position, bearing and speed by on board Inmarsat D+ satellite transceivers. Criteria of speed were used to discriminate VMS records during catch activities. Filtered VMS data were compiled in monthly distribution maps of the recorded positions. Fishing activity maps were obtained by calculating the density of the position data on a grid of 0.01°. Satellite monthly maps of SST, GRT and chlorophyll-*a* were obtained for the same period to overlap with the corresponding monthly fishing activity map and to link with CPUE data. The analysis of the spatial-temporal distribution of the fishing fleet in relation to environmental variables showed that fleet concentrates its activities on the borders of the frontal system from December to March, obtaining the highest hake yields.

In this Thesis, environmental information of high temporal and spatial resolution, together with distribution of trawl fleet, both possible from satellite information, allowed us to conclude that the seasonality of the thermal front would be one of the main factors conditioning the fishery of SMG, indicating the biological relevance of this oceanographic structure. On the other hand, the opportunity to obtain satellite and *in-situ* data, simultaneously, made it possible to compare both sources of information in the study area.

This thesis allowed to: (a) determined the spatio-temporal distribution of surface oceanographic conditions in SMG, (b) determined the vertical structure of the water column through oceanographic data, its relationship with surface conditions; and (c) to observe the coincidence with the distribution patterns of species of fishery interest through the satellite tracking system of regional fisheries.

We believe that the integration of this information will contribute in a superlative way to implement a Fisheries Ecosystem Management Plan (FMP) for the San Matías Gulf.

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AOP	Propiedades Ópticas aparentes (<i>Aparent Optical Properties</i>)
ACP	Análisis de componentes principales
ASO	Océano Atlántico Sudoccidental
AVHRR	Advanced very high resolution radiometer
B/O	Buque oceanográfico
CDOM	Materia Orgánica disuelta coloreada (<i>Colored dissolved organic matter</i>)
CEADO	Centro Argentino de Datos Oceanográficos
Cla-sat	Clorofila- <i>a</i> satelital
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
CPUE	Captura por Unidad de Esfuerzo
CTD	Conductividad Temperatura Profundidad (Conductivity Temperature Depht)
CV	Coefficiente de variación
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
EAF	Enfoque Ecosistémico para las pesquerías (<i>Ecosystem Approach to fisheries</i>)
EEM	Espectro Electromagnético
EPTOMS	Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhaced Thematic Mapper plus
FMP	Plan de Manejo Ecosistémico Pesquero (<i>Fisheries Managment Plan</i>)
FPV	Frente Península Valdés
G/C	Guardacostas
GAC	Área de cobertura global (<i>Global Area Coverage</i>)
GCP	Puntos de Control (<i>Ground control points</i>)
GN	Golfo Nuevo
GRT	Gradientes térmicos
GSJ	Golfo San José
GSM	Golfo San Matías
GW	Giga Watts
HamSOM	Hamburg Shelf Ocean Model
HDF	Hierarchical data format
HRPT	High Resolution Picture Transmission
IBMPAS	Instituto de Biología Marina y Pesquera Alte. Storni
INIDEP	Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero
IOCCG	International Ocean Color Coordinating Group
IOP	Propiedades Ópticas Inherentes (<i>Inherent Optical Properties</i>)
ISRO	Indian Space Research Organization
KARI	Korea Aerospace Research Institute
LAC	Área de cobertura local (<i>Local Area Coverage</i>)
MCSST	Multi-Channel Sea Surface Temperature
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSC	Marine Stewardship Council
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Center for Environmental Prediction
ND	Número Digital

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

NIR	Infrarrojo cercano (<i>Near InfraRed</i>)
NLSST	Non Linear Sea Surface Temperature
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRT	Near Real Time
OCTS	Ocean Colour and Temperature Scanner
OSMI	Ocean Scanning Multi-spectral Imager
PARASOL	Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar
PCAN	Plataforma Continental Argentina Norte
POP	Programa de Observadores Pesqueros
PP	Plataforma Patagónica
PV	Península Valdés
RADAR	Radio Detection and Ranging
REM	Radiación Electromagnética
RMS	Raíz cuadrática media (<i>Root Mean Square</i>)
SeaDAS	<i>SeaWiFS Data Analysis System</i>
SeaWiFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor</i>
SFF-RLF	Fondo Pesquero Responsable
SHN	Servicio de Hidrografía Naval
SIG	Sistema de Información Geográfica
SiMPO	Sistema de Monitoreo Pesquero y Oceanográfico
SMA	Standard Major Axis
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TIR	Infrarrojo térmico (<i>Thermal infrared</i>)
TIROS-N	Television Infrared Observation Satellite (number)
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TSM	Temperature Superficial del Mar
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
ups	unidades prácticas de salinidad
USA	United States of America
UTM	Universal Transverse Mercator
VHRR	Very High Resolution Radiometer
VIS	Visible
WWF	World Wide Fund for Nature

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA DINÁMICA DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS

En el ecosistema marino en general, la cadena alimenticia se inicia con los organismos autótrofos que viven en suspensión en el agua y que son denominados en su conjunto “fitoplancton” (phyton=planta y plankton=errante). Estos organismos son productores primarios, es decir, mediante el proceso de fotosíntesis convierten carbono inorgánico (a partir de carbonato ácido de sodio) en carbono orgánico (más comúnmente en la forma de glucosa), en presencia de energía solar y asimilan nutrientes inorgánicos disueltos en el agua. Por lo tanto, la importancia del fitoplancton en los océanos mundiales se debe a su capacidad de fijación de carbono o productividad primaria (Behrenfeld & Falkowski 1997, Behrenfeld *et al.* 2002) cuyo rol es fundamental en los ciclos biogeoquímicos. De este modo, se espera que variaciones en la biomasa fitoplanctónica tengan un impacto significativo en los procesos biológicos, físicos y geoquímicos (Falkowski *et al.* 1998). En particular, y desde el punto de vista económico, el fitoplancton es el sostén principal de las redes alimentarias sobre las cuales se sustentan las pesquerías mundiales. Por lo tanto, modificaciones en su abundancia o en el momento de la floración de las poblaciones fitoplanctónicas, pueden afectar la distribución y abundancia de las poblaciones de peces y en consecuencia a las pesquerías.

La concentración de clorofila-*a* es frecuentemente utilizada como un estimador de la biomasa fitoplanctónica, debido a que es el principal pigmento presente en estos organismos (Gregor & Marsálek, 2004). Sin embargo, es importante tener en cuenta que en las células del fitoplancton la clorofila-*a* se encuentra acompañada por otra cantidad de compuestos orgánicos entre los que se encuentran diversos pigmentos auxiliares. En una muestra de agua la composición de pigmentos puede variar de acuerdo a la estructura de la comunidad fitoplanctónica presente y el estado fisiológico de las células (por ejemplo foto-adaptación y estado nutricional) (IOCCG, 2000). A pesar de estas limitaciones, diversos estudios han utilizado la concentración de clorofila-*a* como un estimador de biomasa (Morel & André, 1991; Lutz *et al.*, 2010). En este sentido Huot *et al.* (2007), mostraron que la concentración de clorofila-*a* fue el mejor estimador de la biomasa fitoplanctónica en estudios de producción primaria en aguas subtropicales y templadas.

El momento de floración del fitoplancton está condicionado principalmente por la disponibilidad de luz, de nutrientes y por la profundidad de la capa de mezcla (Mann &

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Lazier, 1996). En el caso de los nutrientes, se trata de compuestos inorgánicos involucrados funcionalmente en la síntesis de compuestos orgánicos de los organismos vivos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos, etc.). En oceanografía química el término ha sido aplicado preferentemente al nitrógeno, al fósforo y al silicio inorgánico, pero un número mayor de constituyentes del agua de mar, junto con gran número de metales traza esenciales, son también considerados nutrientes (Riley & Skirrow, 1975; Spencer, 1975). El silicio afecta principalmente a aquellos organismos que lo utilizan para formar esqueletos silíceos, incluyendo diatomeas y silicoflagelados (organismos fitoplanctónicos) y radiolarios (organismos zooplanctónicos). El ciclo del silicio es relativamente simple involucrando únicamente formas inorgánicas, que se incorporan en los organismos mencionados anteriormente y al material proveniente de esqueletos de organismos muertos (Valiela, 1995).

En el caso del fósforo, las formas orgánicas de este nutriente son rápidamente hidrolizadas a fósforo inorgánico, el cual vuelve a estar disponible para ser incorporado por el fitoplancton. Como el ciclo es relativamente rápido a través de la cadena alimentaria, su limitación a la producción primaria se restringe a algunos mares y océanos. En los sedimentos una parte puede quedar retenida en forma de fosfato de calcio (Valiela, 1995).

El reciclado de nitrógeno, sin embargo, es un proceso más complejo, ya que el nitrógeno en el mar se presenta en unas siete formas químicas con diferente grado de oxidación, que no son fácilmente convertibles unas en otras, las cuales incluyen nitrógeno molecular disuelto (N_2), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (N_2O_5) y formas iónicas: amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) y un número muy importante de compuestos. El ión nitrato es la forma dominante en condiciones de aerobiosis y una de las formas químicas generalmente incorporada por el fitoplancton, aunque algunas especies pueden utilizar nitrito o amonio. Unas pocas especies pueden incorporar pequeñas moléculas de nitrógeno orgánico, tales como aminoácidos y urea (Lalli & Parsons, 1997). La velocidad de reciclado del nitrógeno puede limitar la producción primaria en aguas oligotróficas durante todo el año y en aguas templadas durante el verano (Valiela, 1995, Lalli & Parsons, 1997). La regeneración de nitrógeno en la columna de agua es el resultado de actividades bacterianas y de la excreción de animales marinos, especialmente la excreción de amonio por el zooplancton.

Eppley & Peterson, (1979) y Mann & Lazier (1996), citan como las fuentes de nutrientes más importantes en el medio marino a:

- la regeneración *in-situ* que opera a través del metabolismo de los seres vivos presentes;
- los aportes que proporciona el fondo oceánico cuando éstos llegan a la superficie a través de diferentes procesos físicos;

CAPITULO 1. INTRODUCCION

- las contribuciones externas desde los ríos y las lluvias. Aunque este mecanismo provee sólo el 1% de los requerimientos (Carreto, 1989), puede ser de fundamental importancia en áreas costeras (Jickells, 1998).

La circulación de los elementos biogénicos desde las zonas profundas de los océanos hacia las capas superficiales iluminadas, junto con la relación entre la profundidad de la capa de mezcla y la profundidad a la cual la tasa de fotosíntesis iguala a la de la respiración, son factores que determinan la velocidad de multiplicación celular del fitoplancton (Sverdrup, 1953). Los factores físicos que generan la mezcla vertical aceleran dicho proceso resultando así importantes agentes reguladores en la producción del fitoplancton (Eppley & Peterson, 1979; Valiela, 1995). En sentido inverso, las pérdidas de nutrientes en la capa eufótica se producen principalmente por el hundimiento de partículas de detrito orgánico o de organismos muertos. En la capa profunda, los nutrientes se regeneran a través de procesos de descomposición del material orgánico particulado provocado por acción microbiana. Dependiendo de la profundidad del lugar, al sedimento llegan las partículas de mayor dimensión. Éstas son remineralizadas en la interfase agua-sedimento y los nutrientes disueltos pasan a la fase líquida por difusión y bioturbación del sedimento. Sólo el 1% de este material se incorpora a la fase sólida como sedimentación neta. El ciclo de nutrientes se completa cuando éstos son nuevamente incorporados en el proceso de fotosíntesis (Figura 1) o mediante quimiosíntesis en ecosistemas particulares localizados en las dorsales centrooceánicas, en torno a fuentes hidrotermales (Millero, 1991).

Uno de los aspectos que se tiene en cuenta en la producción primaria es el origen del nitrógeno utilizado por el fitoplancton. Si éste proviene del reciclado de materia orgánica dentro de la zona eufótica (amonio y urea) se denomina producción regenerada, mientras que si el nitrógeno ingresa a la zona eufótica desde profundidades por debajo de la nutriclina (en forma de nitrato) o bien exportado desde otros ecosistemas (estuarios, aguas subterráneas), se denomina producción nueva (Eppley & Peterson, 1979). La comparación entre nitrógeno regenerado y nitrógeno nuevo (producción nueva y regenerada) es importante porque únicamente el continuo ingreso de nitrógeno nuevo puede determinar la capacidad total del océano para producir una pesquería sostenible (Lalli & Parsons, 1997).

Para que el ecosistema marino sea fértil y productivo deben existir una secuencia de procesos y propiedades. En primer lugar, como ya se ha mencionado, se requiere de una fuente de energía (solar, hidrotermal). Luego está el movimiento del agua, el cual afecta la distribución de los nutrientes inorgánicos que se encuentran en el mar. Las propiedades de la luz, la topografía, la presión y la temperatura, acompañadas por el constante movimiento,

CAPITULO 1. INTRODUCCION

producen condiciones ambientales apropiadas para la propagación de diferentes organismos, cada uno adaptado a ambientes específicos.

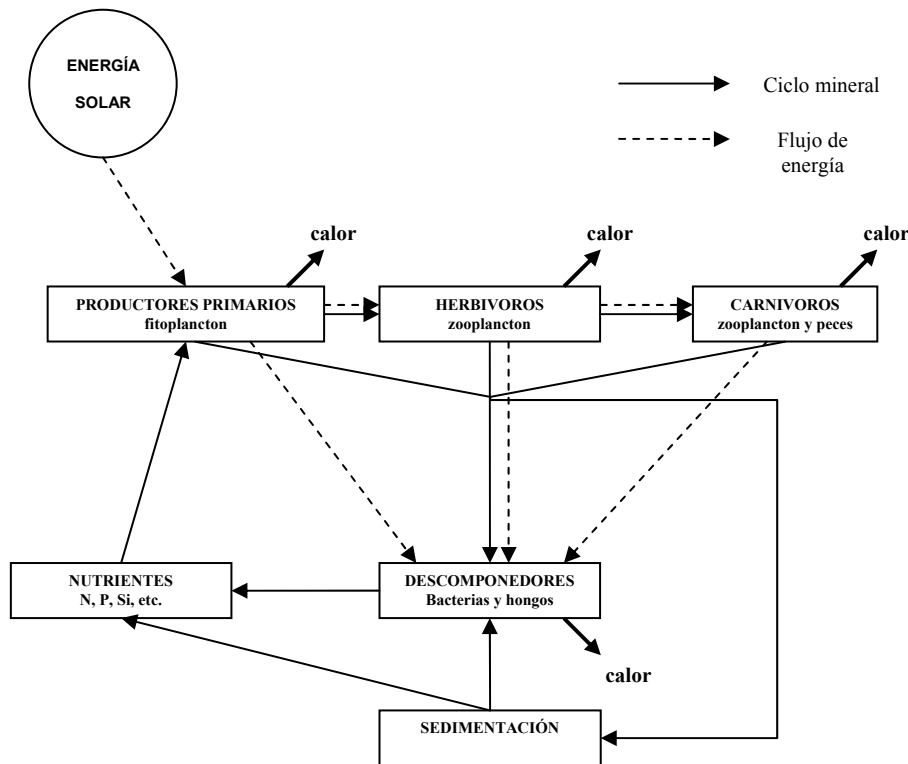


Figura 1: Representación esquemática del ciclo mineral y el flujo de energía en el ecosistema marino (modificado de Lalli & Parsons, 1997).

¿Cómo se incorporan los nutrientes a la capa eufótica?

En los ecosistemas acuáticos el ciclo de los elementos biogeoquímicos transcurre en toda la masa de agua, sin embargo el proceso de fotosíntesis ocurre principalmente en la capa superficial iluminada o zona eufótica, por lo tanto la velocidad a la que ocurre el reciclado y el transporte de nutrientes en y hacia la zona eufótica es uno de los factores limitantes que afectarán la producción primaria (Valiela, 1995).

En zonas templadas, particularmente en verano, la columna de agua se encuentra dividida en una capa superficial de mezcla más cálida y de menor densidad y en una capa profunda más fría y densa, que se encuentra separada de la capa superior por una región de rápido cambio de temperatura (termoclina) y de densidad (picnoclina). La capa de mezcla presenta bajas concentraciones de nitrato, mientras que la capa inferior presenta mayores concentraciones y en este caso ambas capas se encuentran separadas por una región de alto gradiente denominada nutriclina (Mann & Lazier, 1996). La mezcla por convección de las aguas superficiales y la turbulencia provocada por los vientos se combinan logrando una

CAPITULO 1. INTRODUCCION

profundización progresiva de la capa de mezcla, particularmente en invierno. Cuando la turbulencia se incrementa en profundidad afecta la zona de alta concentración de nutrientes permitiendo el ascenso de los nutrientes hacia la zona eufótica (Mann & Lazier, 1996).

Diversos mecanismos pueden acelerar la circulación de los nutrientes desde el sedimento a la capa eufótica, entre los que se pueden mencionar remolinos (*eddies*) y turbulencias, corrientes convectivas y advectivas, mezcla ocasionada por vientos y ondas, circulación de mareas, ondas internas, efectos costeros, aporte desde los ríos y surgencias (*upwelling*) (Valiela, 1995; Mann & Lazier, 1996).

En las zonas oceánicas los principales procesos físicos que aceleran el movimiento de nutrientes hacia la zona eufótica son:

Giros oceánicos y remolinos (*eddies*). Los giros ciclónicos están formados por agua que circula en dirección contraria a las agujas del reloj en el Hemisferio Norte y a favor en el Hemisferio Sur. Estos giros divergentes tienden a llevar agua de debajo de la piconclina hacia la superficie; lo que da como resultado en un suministro abundante de nutrientes en la superficie incrementando el potencial productivo de las aguas (Fig. 2a). En el Hemisferio Norte, la circulación del agua a favor de las agujas del reloj genera giros convergentes por que la dirección de la circulación tiende a acumular el agua de la superficie en el centro del giro (Fig. 2b). De esta manera, los giros anticiclónicos tienden a profundizar la piconclina debido a la tendencia convergente de la circulación no permitiendo que los nutrientes de aguas profundas lleguen a la superficie (Lalli & Parsons, 1997).

Los remolinos tienen la misma morfología que los giros, pero son más pequeños (diámetros de cientos de kilómetros), y se desprenden de grandes sistemas de corrientes tales como la corriente de Malvinas (García *et al.*, 2008). Las grandes corrientes tienden a formar meandros y estos remolinos o anillos giratorios se comportan como cuerpos independientes que pueden persistir por varios años. Los remolinos pueden ser ciclónicos o anticiclónicos, de aguas frías y cálidas, respectivamente. Una sección transversal de cada tipo de remolino sería similar a los giros ciclónicos y anticiclónicos mostrados en la Figura 2, pero en menor escala. La alta productividad en un remolino ciclónico puede resultar de un enriquecimiento de nutrientes capturado en el meandro que lo originó (Lalli & Parsons, 1997).

Corrientes convectivas. Estos procesos de mezcla ocurren cuando ciertas condiciones meteorológicas reducen la temperatura superficial o incrementan la evaporación provocando que la capa superior de la columna de agua incremente su densidad. El agua más densa se hunde y produce un vuelco convectivo, de este modo, las celdas convectivas ricas en nutrientes son elevadas a la superficie. La formación de agua por convección profunda ocurre

CAPITULO 1. INTRODUCCION

en regiones con poca estratificación de la densidad, por ejemplo en regiones polares y subpolares (Tomczak, 2000).

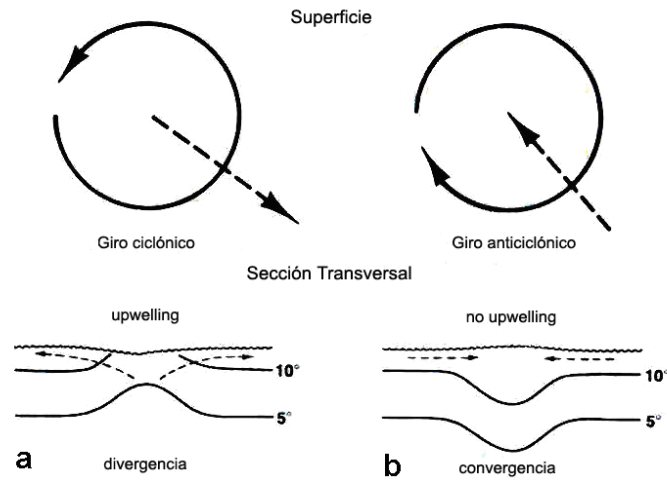


Figura 2: Giros ciclónicos y anticiclónicos en el Hemisferio Norte (adaptado de Lalli & Parsons, 1997).

Corrientes advectivas. Este tipo de corrientes hacen referencia al movimiento horizontal del agua en el cual se transportan propiedades físicas (temperatura y salinidad) y químicas (nutrientes) de un sector a otro. Como ejemplo se puede citar a la corriente de Malvinas cuyas aguas frías transportan nutrientes hacia el norte de la Plataforma Continental Argentina (Piola & Rivas, 1997).

Las olas creadas por la acción mecánica del viento sobre la superficie del mar son una importante fuerza de mezcla en las capas superiores brindando nutrientes a la zona eufótica. Las ondas creadas por el viento y las olas generadas por tormentas locales y distantes causan que el agua superficial sufra movimientos orbitales en el plano vertical, normal a la dirección de propagación de la onda. La mezcla por ondas es más efectiva cuando la longitud de la onda es larga y la pycnoclina se sitúa a poca profundidad y en aguas someras donde el movimiento de las ondas se extiende hasta el fondo (Mann & Lazier, 1996).

Por otro lado los vientos pueden crear la llamada Circulación de Langmuir (Figura 3). Este patrón de circulación es activado cuando los vientos soplan regularmente sobre la superficie del mar en calma. Como resultado, vórtices de varios metros de diámetro giran alrededor de ejes horizontales y producen surgencia (*upwelling*) y convergencia (*downwelling*) del agua (Tomczak, 2000). La escala vertical de esta interacción no es lo suficientemente grande para brindar nutrientes desde aguas profundas, pero alcanza para concentrar plancton e incrementar las interacciones alimenticias resultando en una rápida regeneración de nutrientes (Lalli & Parsons, 1997).

CAPITULO 1. INTRODUCCION

En zonas costeras los procesos que aceleran el movimiento de nutrientes hacia la zona eufótica son:

Las corrientes de mareas. Estas corrientes son causadas por cambios periódicos en la atracción gravitacional de la luna y el sol, creando oscilaciones de frecuencias conocidas. El movimiento del agua produce corrientes significativas, especialmente en aguas costeras de poca profundidad y en canales estrechos. Las corrientes inciden sobre bancos de arena y puntas sumergidas, extendiéndose hasta el sedimento, y de este modo mantienen homogénea el agua transportada. La acción del flujo en puertos, desembocadura de ríos y estuarios provoca cambios en las propiedades químicas y biológicas del ambiente y el potencial nutricional del agua se ve alterado (Lafond & Lafond, 1971).

Las ondas producen el desplazamiento vertical de partículas y son evidentes por cambios verticales repetidos en picnoclinas profundas. Las ondas internas se encuentran entre capas de diferente densidad o dentro de capas donde se presentan diferentes gradientes de densidad. Estos gradientes constituyen una barrera para que los nutrientes asciendan a la superficie. En aguas profundas (> 200 m), las ondas internas que se encuentran cerca del fondo pueden mover el sedimento y también mezclar las aguas (Lalli & Parsons, 1997).

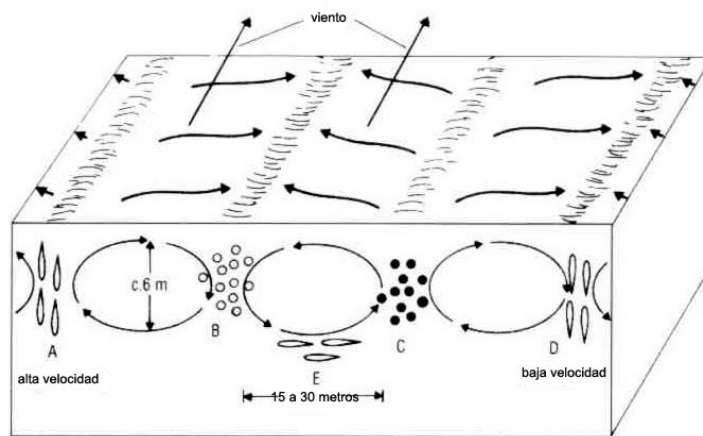


Figura 3: Circulación de Langmuir (adaptado de Lalli & Parsons, 1997).

Las ondas internas producidas por corrientes de mareas, favorecen los procesos de mezcla, provocando el ascenso y descenso de la nutriclina, produciendo un transporte vertical de nutrientes hacia aguas superficiales. Este proceso es de alta frecuencia (doce horas) y sostiene un nivel relativamente constante de producción primaria, el cual puede ser explotado eficientemente por el zooplancton promoviendo el desarrollo de una trama trófica corta (Mann & Lazier, 1996).

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Efectos costeros e islas. Las islas (o también montañas submarinas) y las líneas de costa accidentadas (cabos, bahías, etc.) producen disturbios en la dirección y la velocidad del flujo de agua. Dependiendo de la dirección de la corriente, la orientación relativa de la configuración de la costa y la topografía pueden causar movimientos verticales del agua, turbulencias y remolinos horizontales que ayudan a mantener la superficie del agua enriquecida en nutrientes (Lalli & Parsons, 1997).

La pendiente continental y la plataforma son otras características topográficas que ofrecen una variedad de ambientes para el soporte de la vida marina. De la misma manera, las corrientes de marea o las ondas internas actúan sobre el fondo del mar removiendo el sedimento y de este modo enriquecen la columna de agua (Lalli & Parsons, 1997).

Frentes en la desembocadura de ríos. Los ríos que desembocan en el mar frecuentemente arrastran altas concentraciones de nutrientes derivadas de fuentes naturales o de fertilizantes agrícolas y aguas residuales. Estos nutrientes enriquecen las aguas costeras e incrementan la productividad en su estuario. Por lo tanto las aguas estuarinas son, con frecuencia, altamente productivas porque el flujo del río hacia la superficie del mar provoca que nuevos nutrientes sean traídos de aguas más profundas, surgiendo hacia la superficie (Figura 4). Las aguas profundas son ricas en fosfato y nitrato; el río aporta además de estos nutrientes, concentraciones elevadas de silicato, que se traducen en florecimientos fitoplanctónicos en la boca del río. La posición exacta del florecimiento en la salida del río (o localización del frente) es función de algunos factores, como la cantidad de nutrientes introducidos, la cantidad de sedimento que transporta el río (que a su vez limita la penetración de la luz), la profundidad de la capa de mezcla, el pastoreo por parte del zooplancton, el flujo de agua, las corrientes en el lugar, la amplitud de la marea, etc. Un florecimiento fitoplanctónico, en este caso, puede ser atenuado o incrementado por el clima prevaleciente en el estuario (Lalli & Parsons, 1997).

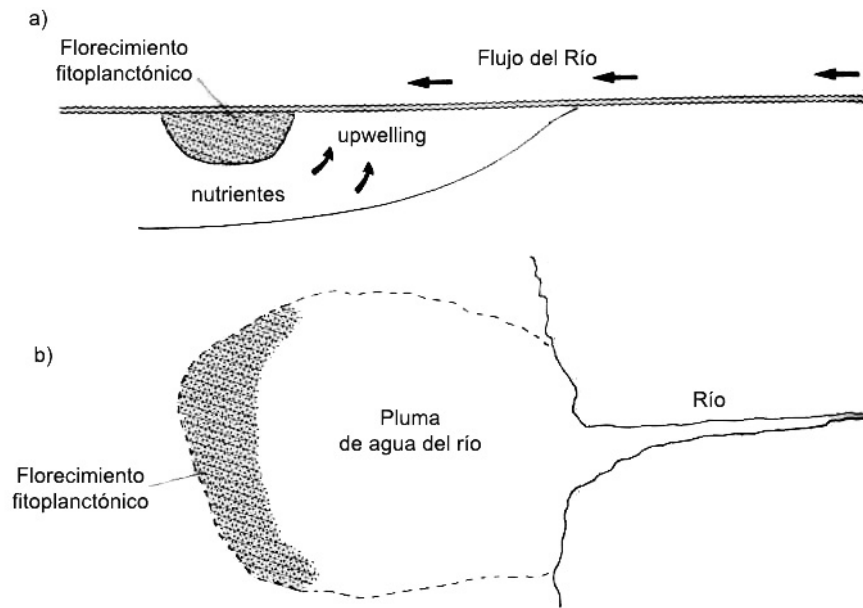


Figura 4. Frente en la desembocadura de un río. Vista en: a) sección transversal b) superficie (adaptado de Lalli & Parsons, 1997).

Aportes de aguas subterráneas. La composición química de los sistemas subterráneos es considerablemente diferente a la de los sistemas acuáticos superficiales. El intercambio de las aguas subterráneas con aguas superficiales puede dar lugar a cambios significativos en la composición de metales sensibles a procesos redox como Fe, Mn, Co y otros (Windom *et al.*, 2000). De este modo las aguas superficiales y subterráneas de un sistema de ríos pueden contribuir significativamente a la productividad del sector costero.

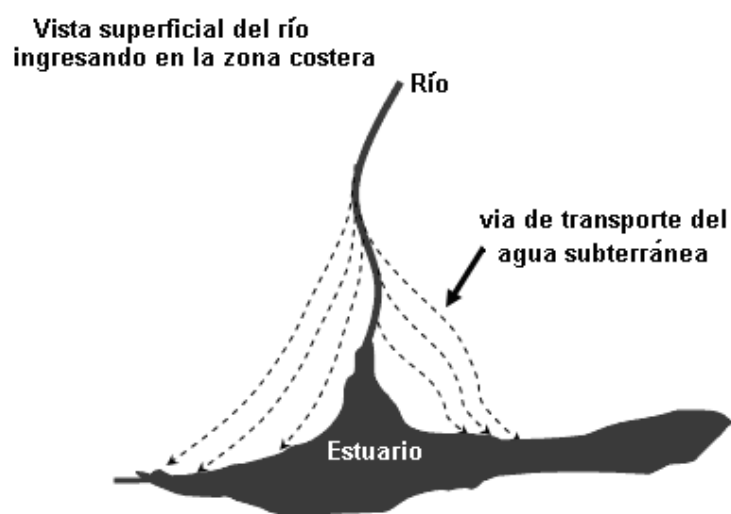


Figura 5. Transporte de aguas subterráneas a aguas costeras (adaptado de Windom *et al.*, 2000)

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Surgencias. De los procesos que involucran el movimiento del agua, uno de los más importantes para la producción orgánica son las surgencias (*upwelling*). Además de que el área de movimiento vertical puede ser geográficamente pequeña, el ascenso de aguas y su efecto en la vida marina pueden extenderse por cientos de millas. La surgencia puede ocurrir en cualquier lugar, pero es más común en las costas ubicadas sobre el lado oeste de los continentes, como por ejemplo en Perú, costa Oeste de Estados Unidos de Norte América, Marruecos y costa Oeste de África. La surgencia puede estar causada por el desplazamiento de aguas superficiales por el viento que sopla desde la costa o por corrientes divergentes. En el ecuador, la surgencia es causada por una divergencia relacionada con el efecto de Coriolis (Mann & Lazier, 1996).

Muchas regiones de surgencia están asociadas con corrientes costeras provocadas por los vientos (Figura 6). Cuando el viento sopla casi paralelo a la costa, las aguas superficiales se alejarán de ésta de acuerdo al transporte de Ekman y las aguas subsuperficiales ascenderán tomando su lugar (Tomczak, 2000). El grado de surgencia depende del ángulo del viento en relación con la configuración de la costa, con su duración, intensidad y estación del año. La surgencia costera es probablemente el medio más efectivo por el cual aguas ricas en nutrientes se elevan a las capas superficiales (Lafond & Lafond, 1971; Valentín, 1996).

Frentes Oceanográficos y de Mareas. Tanto en aguas costeras como oceánicas los frentes pueden ser definidos como el encuentro de dos masas de agua. La circulación en los frentes está asociada generalmente a la diferencia de densidad entre ellas, las cuales generan convergencia en la superficie o en el fondo y mantiene el frente como una zona de transición, similar a una interfase, incluso en presencia de efectos difusivos (Largier, 1993).

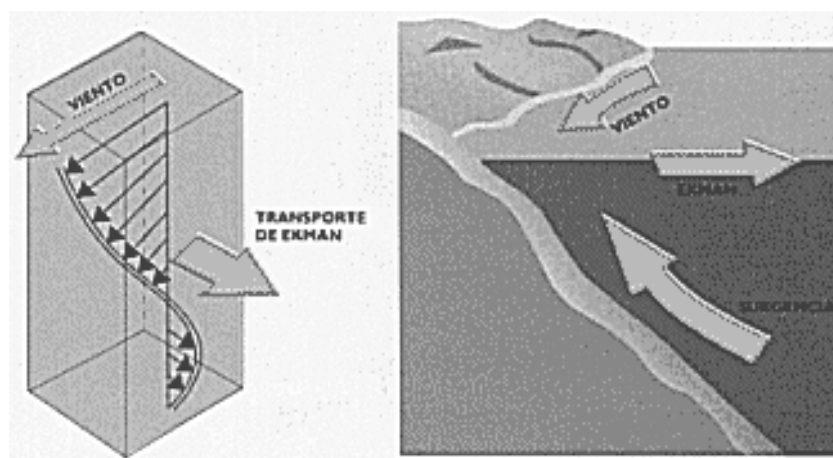


Figura 6: Surgencia costera provocada por el viento (adaptado de Valentín, 1996)

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Los frentes son causados por diversos forzantes tales como mareas, escorrentía continental, viento, calentamiento solar, batimetría, etc. (Mann & Lazier, 1996). Las zonas principalmente afectadas por la alta disipación de energía de mareas inhiben la formación de la termoclina y la estratificación de la columna de agua, separando las zonas de aguas completamente mezcladas de las estratificadas. Simpson y Hunter (1974) definieron que la separación de aguas estratificadas y bien mezcladas está definida por el parámetro $SH=h.u^{-3}$, donde “h” es la profundidad y “u” es la velocidad de la marea. Se ha demostrado que la distribución espacial de este parámetro está en buena relación con regiones de alta disipación mareal y con zonas frontales encontradas en la plataforma patagónica (Tonini, 2010; Paparazzo, 2010).

No hay acuerdo general sobre la clasificación de los frentes, pero una lista parcial de los que se presentan en aguas neríticas puede incluir frentes de marea, de borde (talud), de surgencia, estuarinos, en plumas de ríos y frentes asociados a características geomorfológicas tales como cabos, islas y cañones submarinos. La alta tasa de cambio de parámetros como temperatura, turbidez o clorofila evidencia la localización de los mencionados frentes (Mann & Lazier, 1996).

Los frentes también constituyen zonas de mayor mezcla lateral y vertical, lo que generalmente provoca el incremento de la producción primaria y secundaria (Olson & Backus, 1985). Esta alta biomasa fitoplanctónica incrementa la actividad de los niveles tróficos superiores (Le Fèvre, 1986; Largier, 1993; Mann & Lazier, 1996). Debido a que los frentes son interfases levemente inclinadas entre masas de agua con diferentes propiedades, las aguas ricas en nutrientes pueden moverse hacia arriba. El bombeo de nutrientes debido al debilitamiento o ruptura de la estratificación genera enriquecimiento en la zona eufótica, incrementando la producción primaria en el frente.

En el medio marino los procesos biológicos dependen de las propiedades físicas, las cuales presentan diferentes escalas espacio-temporales (Mann, 1992). Dentro de las diferentes variables físicas que afectan la distribución de los organismos marinos, la temperatura del mar es considerada una de las más relevantes, existiendo una gran variedad de especies asociadas a estructuras y/o condiciones térmicas específicas (Yañez *et al.*, 1995; Perrota *et al.*, 2001). Así, por ejemplo, muchas especies muestran altas densidades en las cercanías de frentes oceánicos y zonas de surgencia (Reddy *et al.*, 1995). La temperatura superficial del mar (TSM) puede ser un indicador de la presencia en superficie de aguas frías provenientes de capas más profundas (Valentín, 1996). En principio constituye un factor relevante en la distribución y concentración de nutrientes, clorofila-*a* y lógicamente, en la distribución y abundancia de los recursos biológicos (Acha *et al.*, 2004).

1.2 METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS

La necesidad de aumentar la capacidad de observación del medio marino para su mejor entendimiento ha impulsado un gran desarrollo instrumental para esta finalidad. Durante los últimos años, el desarrollo de la informática y la microelectrónica ha posibilitado sustituir en alguna medida y sobre todo aumentar la capacidad de observación *in-situ* de las propiedades del océano mediante la utilización de toda clase de instrumentos remolcados, fondeados, o a la deriva.

1.2.1 Campañas oceanográficas

Las campañas oceanográficas son realizadas en embarcaciones que actúan como plataforma científica. Estas permiten obtener muestras físicas, químicas, biológicas o geológicas en agua y sedimentos a diferentes profundidades. Actualmente es posible sumergir sensores y obtener datos de variables físicas y químicas como temperatura, salinidad, presión, pH, oxígeno disuelto en función de la profundidad. Las muestras de agua son conservadas apropiadamente y luego transportadas al laboratorio para someterlas a diferentes análisis; entre otros, concentración de nutrientes y de clorofila-*a*; presencia y cantidad de especies fitoplanctónicas y zooplanctónicas, etc.

1.2.2 Teledetección en el medio marino

El sensoramiento remoto o la teledetección es una técnica que permite adquirir información mediante el análisis de datos colectados por instrumentos que no están en contacto físico con los objetos investigados. Los sensores remotos, generalmente a bordo de aviones o satélites que orbitan la Tierra, miden la energía o radiación electromagnética (REM) que es reflejada o emitida por los objetos. La información obtenida por estos instrumentos es procesada para obtener imágenes satelitales y mapas de productos de interés. En el caso de la oceanografía los productos de mayor interés son mapas de turbidez, temperatura superficial del mar, gradientes térmicos y concentración de clorofila-*a* (Robinson, 2004).

Todos los elementos presentes en la superficie terrestre reflejan y emiten radiación electromagnética (REM), pero cada uno tiene una forma particular de hacerlo que depende de sus características. Debido a ello, la REM emitida o reflejada por elementos distintos transporta generalmente información diferente, aún cuando se considera para todos ellos el proceso de teledetección en la misma región del espectro electromagnético. Además, cambios

CAPITULO 1. INTRODUCCION

en las áreas superficiales bajo análisis generan modificaciones en las intensidades de REM reflejadas o emitidas (Robinson, 2004).

Los sistemas satelitales se definen como el conjunto formado por el sensor y el satélite. El primero realiza la detección de la REM reflejada o emitida por el área de interés, mientras que el satélite es la plataforma que lo transporta. Todos los sistemas son diseñados considerando las variaciones espacio-temporales de la REM proveniente de las superficies que se quieren analizar (por ejemplo océanos, nubes, bosques, etc.).

La generación de imágenes de “color del mar” mediante información satelital se basa en la teledetección de la REM solar reflejada por el material en suspensión existente en la capa superior del agua (IOCCG, 2000). Esta reflexión se produce en las regiones visible (VIS) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético (EEM), las cuales se agrupan comúnmente bajo la denominación de región óptica (Figura 7). Las imágenes de temperatura superficial del mar (TSM) se obtienen a partir de la teledetección de la REM emitida por la superficie del agua debido a su temperatura, la que presenta un máximo de intensidad en la región infrarroja térmica (TIR) del EEM (Figura 8). En ambos casos, la teledetección es "pasiva", debido a que la fuente de energía para el sensoramiento remoto no es generada por el sistema satelital, como sucede en los sistemas de radar que operan en las regiones de las microondas del EEM (Caimi, 1979).

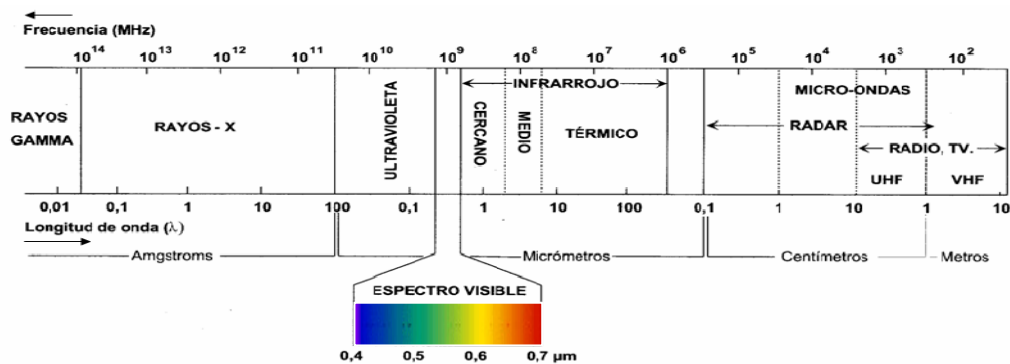


Figura 7. Representación del espectro de radiación electromagnética (EEM) y las distintas regiones en que se puede subdividir o clasificar. La porción de la región visible del espectro (del 0,4 a los 0,7 μm) se encuentra ampliada.

Los sistemas satelitales tienen la capacidad de detectar la energía reflejada o emitida por la superficie observada. A su vez, debido al tipo de REM sensada, se deduce que las imágenes de “color del mar” solamente pueden obtenerse utilizando información adquirida durante el día cuando está presente la fuente de REM: el sol. Para el caso de las imágenes de TSM es

CAPITULO 1. INTRODUCCION

posible obtener imágenes también durante la noche, debido a que la emisión térmica de energía por parte de la superficie del mar es continua.

Finalmente, debe destacarse que mientras que un sistema satelital está constituido por la combinación satélite-sensor, un sistema de teledetección involucra no solamente al sistema satelital, sino también a la fuente de REM, la superficie que se quiere sensar, el sistema de procesamiento de la información y los datos de apoyo de campo obtenidos sobre el área sensada a fin de validar y complementar las observaciones efectuadas mediante la teledetección (Robinson, 2004).

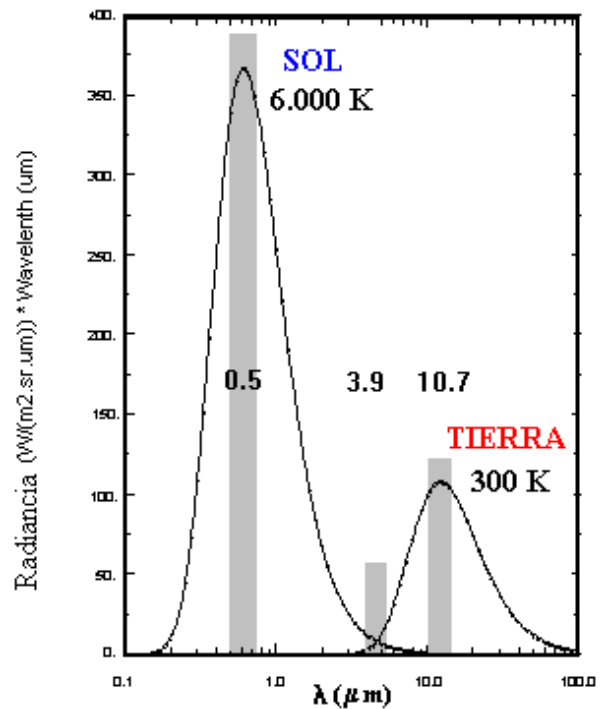
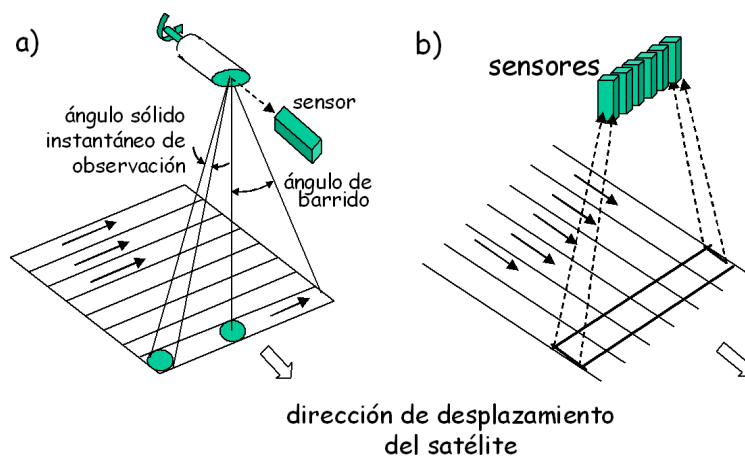


Figura 8: espectros de energía electromagnética (REM) emitidos por el Sol y la Tierra.

Sensores utilizados y sus características

Existen dos tipos de sensores, los tipo “barredores” o “*whiskbroom*” (Figura 9a) y los tipo “cepillo” o “*pushbroom*” (Figura 9b). Los sensores tipo “barredor” van obteniendo una serie de elementos cuadrados de la imagen contiguos a lo ancho de la pasada mediante un espejo que oscila o que rota y barre la superficie en forma perpendicular a la dirección de desplazamiento del satélite. Cuando los espejos vuelven a barrer la superficie, el satélite se ha movido y genera otra secuencia que se suma a la anterior. Así va generando un mosaico de elementos que corresponde a una franja de la superficie de la Tierra definida por la pasada del satélite y el ángulo máximo de visión del sensor (franja de barrido).



CAPITULO 1. INTRODUCCION

Figura 9. Dos tipos de sensores que forman imagen: a) el sensor tipo “barredor” (“*whiskbroom*”) tiene un espejo que realiza un movimiento circular generando un barrido perpendicular al desplazamiento del satélite, b) el sensor tipo “cepillo” (o “*pushbroom*”) tiene una o varias líneas de sensores que “recorren” la superficie en forma paralela al recorrido del satélite (adaptado de Rees, 2001).

Los sensores tipo “cepillo” (Figura 9b) tienen varias líneas de sensores que recorren cada franja de la superficie en forma paralela a la dirección de desplazamiento del satélite. Para cada elemento de la imagen, o sea para cada fracción de la superficie, el sensor almacena un conjunto de valores de radiancias que corresponde al número de bandas espectrales en las que opera (resolución espectral) (Rees, 2001). El sensor detecta la REM proveniente del área observada y la transforma en una señal eléctrica continua. Luego esta señal continua es digitalizada, o sea muestreada a intervalos de tiempos regulares de forma tal que la representación digital reproduzca lo mejor posible la señal continua original (Figura 10).

Un aspecto de singular importancia en el diseño de un sistema satelital es su resolución, la que puede ser definida como la habilidad de registrar información de detalle, discriminándola. Esta resolución está determinada por las características espaciales, temporales, espectrales, y radiométricas con las que se construye el sistema satelital (Rees, 2001).

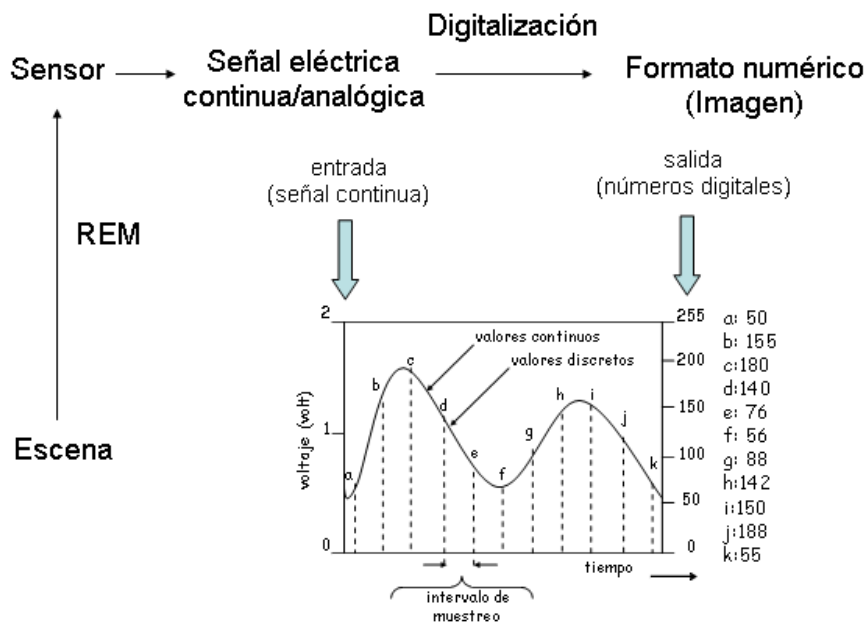


Figura 10. Esquema que muestra la secuencia desde la medición de la REM de la escena observada por el sensor hasta el proceso de digitalización de la señal continua que mide el sensor a valores discretos de números digitales (ND) (adaptado de Rees, 2001).

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Características espaciales: resolución espacial y ancho de barrido.

La resolución espacial se define como el tamaño del menor objeto que puede ser distinguido sobre una imagen, es decir, el nivel de detalle que nos ofrece. De modo general se refiere al tamaño del píxel y se expresa en unidades de longitud sobre el terreno. Entonces, cuanto menor sea el tamaño del píxel en la imagen generada por el sensor, mayor será la resolución espacial del sistema. No obstante, como cada píxel representa también la unidad de memoria a ocupar en disco rígido al realizar el procesamiento, cuanto menor sea el tamaño del píxel, mayor será el tamaño final en megabytes de la imagen si se mantiene constante la franja de barrido. En otras palabras, el ancho de la franja de barrido no es independiente de las dimensiones del píxel. Por ello, a menor tamaño de píxel (mayor resolución espacial), menor es también el ancho de la franja de barrido, y en definitiva el área total cubierta por una imagen. Así, por ejemplo, un sistema LANDSAT que posee un tamaño de píxel de 30 m cubre un área de 180 x 180 km, mientras que el NOAA, con un tamaño de píxel de 1100 m, cubre un área de aproximadamente 2700 x 2700 km (Robinson, 2004).

Características temporales: resolución temporal y hora de observación.

La resolución temporal refiere a la frecuencia de cobertura que proporciona el sistema, a la periodicidad con que éste adquiere datos de la misma porción de la superficie terrestre. Esta característica es función tanto de la órbita del satélite (altura, velocidad, inclinación) como del diseño del sensor, principalmente en lo que se refiere al ángulo de observación y de apertura. Tanto la resolución temporal como la hora de pasada dependerán del tipo de evento a ser monitoreado. Para el caso de observaciones sobre el medio marino, la resolución temporal debe ser mucho mayor que para observaciones terrestres ya que los cambios en la superficie del mar pueden producirse en cuestión de horas, mientras que en el medio terrestre éstos suceden en escalas temporales que varían de días (cambios en la vegetación) a años (cambios geológicos).

Características espectrales: cantidad de canales, ancho y banda espectral

La teledetección no se produce para un valor particular de longitud de onda de la REM, sino en una pequeña franja, denominada “canal” o “banda”. La banda espectral refiere a la zona del EEM en donde se localiza el canal (por ejemplo visible, infrarrojo cercano, etc.), mientras que el ancho da cuenta del rango del espectro que es abarcado por el mismo. La resolución espectral de un sistema involucra así las tres características, indicándose la cantidad de canales, la zona del espectro en donde localizan y el ancho de los mismos. Así, un

CAPITULO 1. INTRODUCCION

sensor que realiza observaciones multiespectrales observa la misma área simultáneamente en varias partes del EEM. Un sensor, será más sensible espectralmente mientras más bandas posea y mientras más estrechas sean éstas, lo que permite una mejor separación y clasificación de los elementos observados. Sin embargo, también será mucho menor la cantidad de REM a detectar, y por ello más complicado el diseño y construcción del sensor, lo que representa un límite para el ancho mínimo de la banda. Además, debe tenerse en cuenta que cada banda constituye de por sí una imagen, por lo que una gran cantidad de bandas en un sensor implican un volumen de datos mucho mayor para el procesamiento.

Características radiométricas: rango dinámico y resolución radiométrica.

La resolución radiométrica de un sistema satelital queda determinada por el rango dinámico (valor máximo de energía que es capaz de recibir un sensor sin saturarse) y por la sensibilidad radiométrica (capacidad del sensor para discriminar diferencias en la intensidad de la radiación medida). Cuanto más fina es la resolución radiométrica del sensor, mayor es su capacidad para detectar pequeñas diferencias en la energía reflejada o emitida. Técnicamente es una medida de cuántos niveles de grises se miden entre el valor que corresponde a negro y el que corresponde a blanco. La resolución radiométrica se mide en bits, que es la unidad más pequeña de información que utiliza una computadora. Un *bit*, término originado de las palabras dígito binario o “*binary digit*” en inglés, puede tomar un valor 0 ó 1, por lo que la combinación 2^n (con n igual al número de *bits*) indica los niveles de REM o de grises que puede diferenciar un sensor. La resolución puede variar entre 6 bits, lo que da como resultado un rango de 64 valores de grises posibles (26), y hasta 12 bits lo que da 4096 valores diferentes (212). La intensidad de cada píxel en el mapa final desplegado en la pantalla de una computadora puede relacionarse al valor de radiancia en cada una de las bandas espectrales del sensor (Rees, 2001).

De este modo, resulta claro que las distintas características que definen un sistema satelital se encuentran relacionadas entre sí. Además, considerando que el volumen de información digital que representa una imagen debe poder ser manejado de modo estándar por una computadora convencional, debe destacarse que en general el hecho de incrementar un tipo de resolución al diseñar un sistema satelital conlleva la consideración de una resolución menor en algún otro tipo, o de un área de cobertura menor del sistema.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Sensores que miden la radiación infrarroja

El sensor **AVHRR** (Advanced Very High Resolution Radiometer) es transportado desde sus inicios a bordo de los satélites meteorológicos NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration o Administración Nacional de Oceanografía y Atmósfera de los Estados Unidos de Norte América). Los satélites NOAA forman parte del programa "Advanced Television Infrared Observation Satellite" TIROS-N, cuyo prototipo fue lanzado en octubre de 1978. Al igual que los demás satélites, los meteorológicos se identifican secuencialmente con una letra antes de su lanzamiento (NOAA-J, NOAA-K), y con un número cuando están en órbita (NOAA-14, NOAA-15). Actualmente están operativos los satélites NOAA-12 (lanzado en 1991), NOAA-14 (lanzado a finales de 1994), NOAA-15 (lanzado en mayo de 1998), NOAA-16 (lanzado en septiembre de 2000), NOAA-17 (lanzado en junio de 2002), NOAA-18 (lanzado en mayo de 2005) y NOAA-19 (lanzado en febrero de 2009). La serie NOAA finaliza con este satélite, que será reemplazada con otra llamada NPOESS (National Polar Operational Environmental Satellite System), en la que participa tanto la NASA (National Aeronautics and Space Administration), como la NOAA y el Departamento de Defensa de Estados Unidos de Norteamérica. La política de operación de los satélites NOAA establece que haya por lo menos dos satélites operativos: uno de ellos cruza el Ecuador a las 7:30 a.m. hora local, y el otro lo hace a las 1:40 p.m. hora local. Por convenio, los satélites impares cubren las órbitas diurnas y los pares las nocturnas. De esta forma se asegura la continua cobertura de toda la Tierra.

Con el NOAA-K (NOAA-15 luego de su lanzamiento) se dio comienzo a una nueva serie de satélites, los cuales presentan cambios y mejoras tecnológicas en la instrumentación respecto a los anteriores. Esta serie, denominada KLM, incluye además los satélites NOAA-L (16) y NOAA-M (17), que se caracterizan por la presencia de instrumentos de microondas que permiten el trabajo en zonas nubosas, en las cuales los instrumentos que operan en las zonas visible e infrarroja tienen problemas de operación.

Los satélites NOAA llevan a bordo una serie de sensores para el estudio de los océanos, la tierra, la columna de la atmósfera y el espacio exterior. De todos ellos, sin duda el más conocido es el AVHRR. El AVHRR es probablemente el sensor más utilizado, tanto en estudios científicos como en aplicaciones operacionales oceanográficas y pesqueras. Estos sensores tienen un ancho de barrido de 2700 Km y 5 bandas espectrales en las regiones ópticas e infrarrojo térmico cercano, medio y lejano; todas ellas con 1100 m de resolución espacial. Los primeros estudios realizados en el Atlántico Sudoccidental (Legeckis, 1978; Legeckis & Gordon, 1982), se realizaron con datos del VHRR, un predecesor del AVHRR. La

CAPITULO 1. INTRODUCCION

mayor dificultad en el uso de esa información consistió en la imposibilidad de obtener series temporales de imágenes relativamente largas y continuas. Este problema quedó resuelto a partir del lanzamiento del AVHRR y la inauguración en Buenos Aires y Córdoba de una estación receptora de datos satelitales por parte del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), respectivamente. Esto último ha permitido un archivo continuo de datos en la región sur de Sudamérica desde 1984 en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y desde 1998 en la CONAE.

Los satélites LANDSAT **TM** (Thematic Mapper) y **ETM+** (Enhanced Thematic Mapper plus) fueron lanzados el 1° de marzo de 1984 y 15 de abril de 1999, respectivamente. Estos satélites tienen órbitas heliosincrónicas con 8 días de diferencia. Los sensores de estos satélites (TM y ETM+) poseen un ancho de barrido de aproximadamente 185 Km y 7 bandas espectrales en las regiones ópticas e infrarrojo térmico cercano, medio y lejano, todas ellas con 30 m de resolución espacial, excepto el canal térmico del sensor TM con 120 m y el del ETM+ con 60 m (Robinson, 2004). El sensor ETM+ posee además un canal pancromático con una resolución de 15 m. La ubicación de las bandas espectrales de estos sensores fueron seleccionadas para aplicaciones terrestres, sin embargo la inclusión del canal 1 en la región del azul-verde y del canal térmico hicieron que ambos sensores sean muy útiles para el estudio de aguas oceánicas y costeras (Kim & Linebaugh, 1985; Gagliardini & Rivas, 2004). De todos modos es necesario tener en cuenta que debido a que estos sensores poseen un solo canal en el infrarrojo térmico, es complicado realizar correcciones atmosféricas para obtener la temperatura superficial del mar real (TSM), con lo cual sólo es posible obtener la temperatura superficial de brillo. Es decir a partir de la energía emitida por un cuerpo negro, es posible obtener dicha temperatura aplicando la Ley de Planck (Caimi, 1979). Si bien estos valores no están corregidos atmosféricamente, proveen una clara idea de las variaciones espaciales y temporales, especialmente si se asume que los efectos atmosféricos son los mismos para toda el área de estudio.

Sensores que miden el “color del mar”

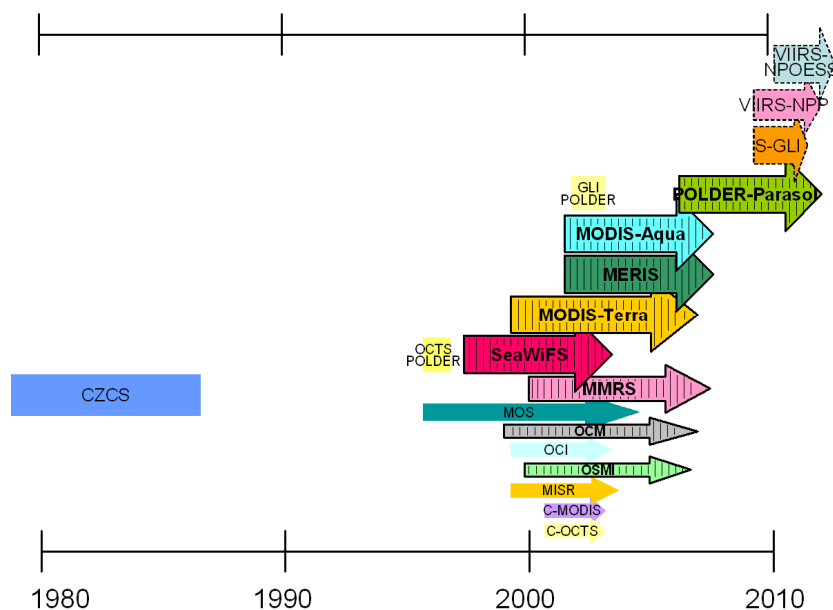
El objetivo del sensoramiento del “color del mar” es obtener información cuantitativa sobre el tipo de sustancias presentes en el agua y de la concentración de clorofila-*a*, a partir de la variación de la forma espectral y la magnitud de la señal que proviene del agua en la región visible y del infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético (EEM) (IOCCG, 2000). Los sistemas de sensoramiento remoto del color del mar utilizan sensores con un campo de visión angular reducido y son capaces de monitorear el flujo de energía que llega al sensor en

CAPITULO 1. INTRODUCCION

varias longitudes de onda en la región del visible (entre 0,4 y 0,7 μm) e infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,3 μm) del EEM (Figura 7).

El uso de la información satelital de *color del mar* presenta ciertas limitaciones. Entre ellas pueden mencionarse: i) la dificultad para estimar la concentración de la clorofila-*a* en aguas costeras debido a la presencia de sedimentos y materia orgánica disuelta coloreada que también modifican las propiedades ópticas del agua; ii) la presencia de nubes que limita adicionalmente el uso de este tipo de información, en especial en altas latitudes; iii) la exactitud de los valores calculados mediante la aplicación de algoritmos empíricos desarrollados a partir de una gran base global de datos bio-ópticos, en la cual las aguas del hemisferio sur se encuentran muy poco representadas (Dogliotti *et al.*, 2009). A pesar de las limitaciones e incertidumbres mencionadas, las estimaciones satelitales proveen una información invaluable ya que éstas pueden compararse con valores medidos en el campo y luego ser utilizados en modelos integrados con el fin de monitorear los ecosistemas marinos y profundizar el conocimiento sobre su evolución en el tiempo e inferir tendencias.

El primer sensor capaz de observar el *color del mar* desde el espacio fue el Coastal Zone Color Scanner (CZCS), lanzado por la NASA en 1978 a bordo del satélite Nimbus 7. Esta misión fue diseñada como prueba y funcionó hasta 1986 (Gordon *et al.*, 1980; Hovis *et al.*, 1980; Feldman *et al.*, 1989). Pero casi una década tuvo que pasar hasta que una nueva serie de sensores, más sofisticados, fuera puesta en órbita. En la Figura 11 se representan los satélites que han sido lanzados, que se encuentran actualmente en órbita, así como los que serán lanzados en un futuro cercano.



CAPITULO 1. INTRODUCCION

Figura 11. Misiones satelitales que miden el *color del mar* en el pasado, que se encuentran en órbita (rayadas) y que serán lanzadas en el futuro (en línea punteada). Los nombres completos de los sensores están en la lista de acrónimos.

En la Tabla 1 figuran los sensores que miden el *color del mar* que se encuentran actualmente en órbita y algunas de sus características, tales como el satélite donde se encuentran, la fecha de lanzamiento, la franja de barrido y la resolución espacial y espectral.

Tabla 1. Sensores que miden el *color* del mar que se encuentran actualmente en órbita (obtenido de <http://www.ioccg.org/sensors/current.html>).

Sensor	Agencia	Satélite	Fecha lanzamiento	Franja barrido (Km)	Resolución (m)	Nro. de bandas
PARASOL	CNES (Francia)	Serie Myriade	18 dic. 2004	2100	6000	9
MODIS-Aqua	NASA (USA)	Aqua (EOS-PM1)	4 mayo 2002	2330	1000	36
MERIS	ESA (Europa)	ENVISAT (Europa)	1 marzo 2002	1150	300/1200	15
MMRS	CONAE (Argentina)	SAC-C (Argentina)	21 nov. 2000	360	175	5
MODIS-Terra	NASA (USA)	Aqua (EOS-AM1)	18 dic. 1999	2330	1000	36
OSMI	KARI (Corea)	KOMPSAT (Corea)	20 dic. 1999	800	850	6
OCM	ISRO (India)	IRS-P4 (India)	26 mayo 1999	1420	350	8
SeaWiFS	NASA (USA)	OrbView-2 (USA)	1 agosto 1997	2806	1100	8

1.2.3 Integración de la información

En la actualidad es importante poder integrar la información provista por campañas oceanográficas y por la teledetección complementando las ventajas presentes en cada una de estas metodologías de trabajo. Las campañas oceanográficas tienen la ventaja de ser observaciones directas, usualmente a diferentes profundidades y permiten la obtención de gran diversidad de datos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo corresponden a puntos específicos, muchas veces separados por grandes distancias y en tiempos diferentes, perdiendo detalles entre observaciones. En consecuencia, los resultados son difíciles de extrapolar en las proximidades de los sitios observados en un momento específico. Además las campañas oceanográficas son económicamente costosas y muchas veces es difícil mantener un programa de ejecución sistemático en el tiempo.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Los datos satelitales tienen numerosas ventajas, entre las cuales se pueden mencionar: a) cubren un área (determinada por el ancho de barrido), b) cada valor obtenido es el promedio de un área más pequeña (que depende de la resolución espacial del sensor), c) todos los datos del área sensada son obtenidos en forma quasi-simultánea, d) el proceso de observación es repetitivo (definido por el tiempo de revisita del satélite), e) es posible obtener series temporales de varios años de extensión (Gagliardini & Rivas, 2004). Como desventajas, se obtiene información sólo de la superficie del mar. Son menos exactos porque son tomados desde grandes alturas (~800 Km) con la atmósfera interponiéndose entre el sensor y la superficie del mar.

La complementariedad de la información satelital con la de campañas de investigación que provean datos puntuales y a diferentes profundidades de las mismas variables, junto con la determinación de perfiles de temperatura, conductividad, clorofila-*a*, mediciones de concentración de nutrientes, productividad primaria, parámetros fotosintéticos, intensidad de luz y datos de composición fitoplanctónica, permite realizar un diagnóstico adecuado de algunos procesos biogeoquímicos que se desarrollan en el ámbito oceánico.

1.3 AREA DE ESTUDIO

1.3.1 Descripción geográfica

El golfo San Matías (GSM) constituye el mayor de los denominados golfos norpatagónicos. Esta región se encuentra ubicada sobre la costa atlántica de Sud-América, en la región nororiental de la Patagonia Argentina entre las latitudes de 40° 42' y 42° 41' S (Figura 10a) y comprende además, a los golfos San José (GSJ) y Nuevo (GN). El GSM es el que presenta mayor conexión con la plataforma exterior. El GSJ es más pequeño y de menor profundidad (~40m) y se halla conectado al GSM por una boca estrecha (~6,4 Km), de unos 30 m de profundidad. Las profundidades máximas del GSM y GN, del orden de los 180 Km, exceden a las de la plataforma continental adyacente (Figura 12). (SHN, 1999)

1.3.2 Características físicas

Masas de agua

La plataforma exterior adyacente al GSM (Plataforma Patagónica) se halla ocupada por aguas subantárticas originadas en el extremo norte del Pasaje de Drake y de la Corriente de Malvinas que han sido modificadas por dilución con aguas de menor salinidad que penetran por el Estrecho de Magallanes y el Estrecho de Le Maire (Guerrero & Piola, 1997; Bianchi *et al.*, 2005). El análisis de las condiciones de las masas de agua del GSM y el forzante atmosférico para el área permitió concluir que la presencia de un máximo relativo de salinidad

CAPITULO 1. INTRODUCCION

en el sector norte del GSM se debe al exceso local de la evaporación (Scasso & Piola, 1988). Este exceso de evaporación sobre la precipitación en el interior del Golfo (100 cm.año^{-1}) duplica los valores calculados para la plataforma adyacente debido a la mayor temperatura del agua superficial del Golfo.

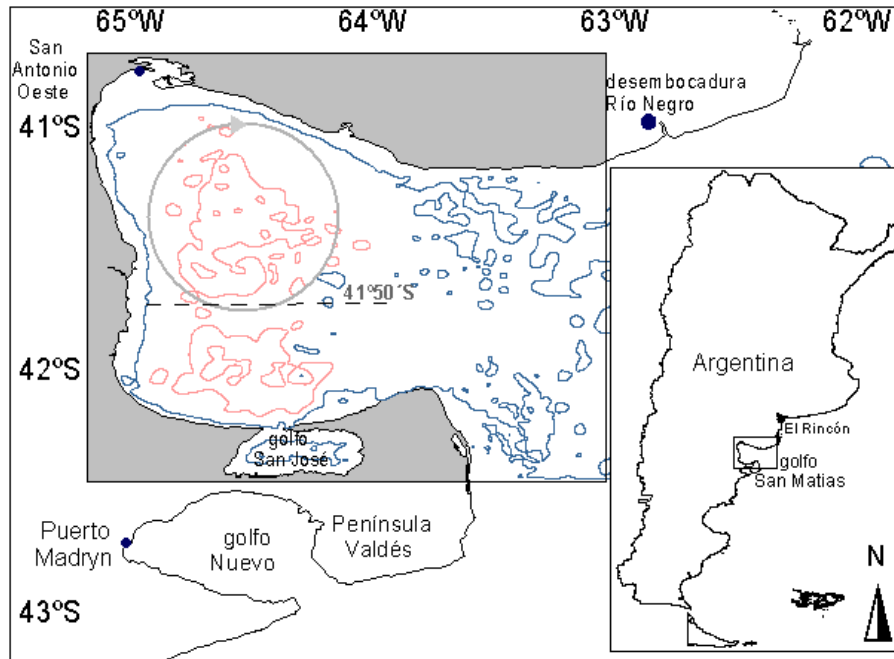


Figura 12. a) Área de estudio y batimetría de los golfos San Matías y San José (Fuente: Carta Náutica H214, SHN, 1999). La línea azul indica la isobata de 50m y la roja la de 150m. El círculo gris y la línea punteada indican la circulación y el frente térmico inferidos por Scasso & Piola (1988).

Mareas

La Plataforma Patagónica (PP) es una región de importante actividad mareal y constituye uno de los regímenes de marea más energéticos del mundo (Glorioso & Flather, 1997). La onda de marea presenta una variabilidad espacial considerable, tanto en fase como en amplitud. Esta última decrece exponencialmente de sur a norte y de este a oeste y su rango de valores está entre 8,5 m en Punta Loyola ($51^{\circ} 36'S$) a menos de 0,3 m en la costa sur de Uruguay (SHN, 2010). Las dimensiones de la PP son muy favorables para la resonancia de marea semidiurna pues su ancho es comparable a un cuarto de su longitud de onda (Piola & Rivas, 1997).

Los resultados de un modelo barotrópico permitieron concluir que la parte interna de la región patagónica es ampliamente dominada por componentes armónicos semidiurnos mientras que la variabilidad del nivel del mar en el océano abierto tiene contribuciones igualmente significativas tanto de componentes diurnas como semidiurnas (Glorioso &

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Flather, 1995; 1997). Asimismo fue posible observar una dominancia de las componentes semidiurnas en la porción sur de la plataforma, particularmente sobre regiones menos profundas. Las corrientes de marea asociadas con las componentes diurnas son más débiles a excepción de regiones de la plataforma externa y talud (Palma *et al.*, 2004b). El balance de energía indica un total de disipación de 110 GW ($1\text{GW}=10^9\text{Watts}$) al sur de 40°S (Palma *et al.*, 2004a). Según estos autores, la componente M2 (marea semidiurna lunar) es la más importante para la región de la Plataforma Argentina y la componente M4 (amplitud de onda lunar con un periodo de 6 hs) puede ser importante alcanzando valores de 0,1 m en la mayoría de los golfos y bahías en la costa patagónica. El resultado del cálculo de disipación de energía en el dominio de estudio fue algo mayor, alcanzando los 228 GW (Simionato *et al.*, 2004).

Flujos en la superficie del océano

La región de estudio está básicamente dominada por dos centros anticiclónicos subtropicales de alta presión, uno en el Océano Pacífico y otro en el Atlántico, cuya ubicación media se encuentra en las proximidades del paralelo 30°S . La ubicación e intensidad de los centros fluctúa en el transcurso del año, moviéndose más al norte e intensificándose durante el invierno (Piccolo, 1998). En ciertas ocasiones, durante ese mismo período, el centro anticiclónico del Atlántico Sur se reactiva por la llegada de anticiclones fríos migratorios que se originan en la región subantártica y se estacionan al sur de Brasil y Uruguay. La característica más sobresaliente en la climatología de la PP es la presencia de intensos vientos del oeste durante todo el año con magnitudes que varían entre 1 y $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Hoffmann *et al.*, 1997). En promedio, la intensidad del viento se reduce hacia el norte de 41°S y la dirección presenta variaciones estacionales significativas, asociadas al desplazamiento mencionado del anticiclón del Atlántico Sur (Höflich, 1984). En la actualidad existen diversas fuentes que representan la climatología de vientos sobre área de estudio y no es posible aún definir cuál de estas climatologías representa mejor las condiciones anuales y medias de la región.

El campo de temperatura de la Plataforma Continental Argentina es influido por el flujo de calor atmosférico. La variabilidad anual es mayor que la de otras escalas temporales y el comportamiento dentro de la Plataforma puede ser aproximado como un valor medio más una señal cosenoidal de frecuencia anual (Rivas & Langer, 1996). La media anual de flujo de calor se estimó en $38 (\pm 5)\text{ W}/\text{m}^2$, con máximos a mediados de diciembre ($189\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) y mínimos a mediados de junio ($-113\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) (Rivas, 1994). En la zona del GSM fue donde se manifestaron las mayores temperaturas y amplitudes térmicas del Mar Epicontinental Argentino (Krepper & Bianchi, 1982).

1.3.3 Aspectos de la biodiversidad de la región

Desde el punto de vista de la biodiversidad, el golfo San Matías presenta una rica composición de especies, ya que en estas latitudes del Mar Argentino se verifica la existencia de la zona de transición entre dos provincias biogeográficas: la Argentina y la Magallánica (Scarabino, 1977; Menni & López, 1984). Por ello, en aguas del GSM es frecuente la presencia de especies comunes a estos dos grandes complejos faunísticos. Esta riqueza de organismos determina también una variada composición de especies en las capturas determinando la existencia de un complejo pesquero de carácter multiespecífico. La principal especie explotada en el GSM es la merluza *Merluccius hubbsi* que constituye, en promedio, aproximadamente el 80% de las capturas anuales desembarcadas en el puerto de San Antonio Oeste (González *et al.*, 2004). *M. hubbsi* es una especie pelágico-demersal distribuida en el Océano Atlántico Sudoccidental, desde el sur de Brasil (23 °S) hasta el borde de la Plataforma Argentino-Patagónica (54°S). La abundancia de esta especie es significativa en el golfo San Matías y ha originado el desarrollo de flotas pesqueras de pequeña y mediana escala dedicadas exclusivamente a su explotación. Estudios poblacionales y de biología pesquera han determinado la identidad y unicidad de este efectivo pesquero (Pérez Comas, 1990; Di Giácomo & Perier, 1993). Actualmente rigen dos zonas de veda, una situada al SW del Golfo, debido a la presencia y abundancia relativa de diferentes grupos de temprana edad (reclutas y juveniles) y otra, ubicada al norte del Golfo, donde entre octubre y noviembre se concentran grandes cardúmenes de reproductores de esa especie (González *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2010, Ocampo Reinaldo, 2010). Estas concentraciones de juveniles y reproductores serían una manifestación biológica de procesos físicos y químicos que se estarían produciendo en las zonas mencionadas. Durante la historia de la pesquería se ha instrumentado una serie de medidas de manejo destinadas a optimizar el aprovechamiento del recurso (González *et al.*, 2004; 2007), para lo cual ha sido y sigue siendo fundamental el conocimiento de la hidrodinámica del ecosistema.

Además de la merluza, diferentes especies de bivalvos sostienen pesquerías artesanales en el GSM (Narvarte *et al.*, 2007). Entre ellas, la vieira tehuelche (*Aequipecten tehuelchus*) (Orensanz *et al.*, 1991; Ciocco *et al.*, 2006), el mejillón (*Mytilus edulis*), la cholga (*Aulacomya atra*), la almeja panopea (*Panopea abbreviata*) (Morsan & Ciocco, 2004), que se caracterizan por formar bancos costeros en determinadas zonas del Golfo. Por tratarse de especies de aguas templadas, el desove ocurre principalmente en los meses de primavera-verano. Los reclutamientos irregulares de estas especies han determinado la existencia de

pesquerías por pulsos (Ciocco *et al.*, 2006; Narvarte *et al.*, 2007). En el caso de la vieira tehuelche, si bien los reclutamientos sobre los fondos naturales son variables e impredecibles, los ensayos de captación de larvas sobre colectores han demostrado que existe una disponibilidad de larvas de mayor regularidad, sugiriendo que los factores que afectan el reclutamiento obedecerían a otras causas (ausencia de sustratos para la fijación y/o mortalidad temprana de larvas asentadas) (Narvarte, 2001; Narvarte & Pascual, 2003). Esta característica también podría ocurrir en las otras especies mencionadas, las cuales poseen también larvas pelágicas y de las que se han identificado reclutamientos recurrentes en la zona noroeste del Golfo. La repetición de asentamientos larvarios en algunas zonas obedecería asimismo a procesos físicos y químicos.

Recientemente se estudió la conexión existente entre el GSJ y el GSM (Amoroso *et al.*, 2010) con el fin de determinar la conectividad y variación espacial de varios atributos poblacionales del principal recurso pesquero del GSJ: la vieira tehuelche (Ciocco *et al.*, 2006; Orenzanz *et al.*, 2006).

La explotación (tanto comercial como artesanal) de los recursos pesqueros del golfo San Matías es una de las actividades más importantes en la región y ha captado la atención y el apoyo económico de organizaciones internacionales vinculadas a la conservación y el cuidado del ambiente, como por ejemplo, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés), el *Marine Stewardship Conseil* (MSC) y el Fondo Pesquero Responsable (SFF-RLF) (Jones *et al.*, 2004).

Asimismo, es de importancia mencionar que las costas del sector sur del GSM pertenecen al Área Natural Protegida de Península Valdés. Esta área natural ha sido declarada Patrimonio Natural Mundial por la UNESCO en 1999 (UNESCO, 1999).

1.4 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS AMBIENTALES EN EL GOLFO SAN MATÍAS

Una importante cantidad de estudios sobre las características oceanográficas y bioecológicas del GSM ha sido obtenida en las últimas tres décadas, lo que ha permitido contar con información sobre la circulación general del Golfo y de los recursos biológicos aprovechables desde el punto de vista económico.

Circulación en el golfo San Matías. Las mediciones directas de corrientes en el GSM son escasas y con una frecuencia de medición que es insuficiente para un análisis a escala de circulación regional. Sin embargo se puede citar que en los años 1987-1988 una línea de correntómetros y termógrafos fue fondeada en el sector noroeste del Golfo (41°2,9'S y

CAPITULO 1. INTRODUCCION

064°50,6'W) obteniendo mediciones de corrientes horizontales a 25, 65 y 105 metros de profundidad. Las observaciones indicaron velocidades medias de 14 cm.s^{-1} en la dirección NNO a 25 metros de profundidad, de 3 cm.s^{-1} con dirección NO a 65 metros y de $1,7 \text{ cm.s}^{-1}$ con dirección NO a 105 metros (Framiñan *et al.*, 1991). Por otro lado el análisis de mediciones de corrientes obtenidas a lo largo de cinco meses durante el año 2006, permitió determinar que en Punta Colorada y Las Grutas las corrientes tienen una orientación N-NO a S-SE, con valores máximos de 66 y 79 cm.s^{-1} ; mientras que en San Antonio Este la dirección fue NE a SO con máximos de 50 cm.s^{-1} . Las elipses de marea calculadas para la componente $M2$ mostraron una amplitud de $18,8 \text{ cm.s}^{-1}$ en Punta Colorada, de $28,2 \text{ cm.s}^{-1}$ en Las Grutas y de $60,4 \text{ cm.s}^{-1}$ en SAE. Las corrientes de marea representaron más del 70% de la varianza en cada estación y estuvieron dominadas por las componentes semidiurnas mientras que la componente $M4$ representó un 5% de la $M2$ en las estaciones analizadas (Moreira *et al.*, 2009).

El análisis de datos de perfiles de conductividad, temperatura, profundidad (CTD), vientos mensuales medios en estaciones costeras, datos de descarga de ríos y análisis de la distribución espacial de la salinidad permitió definir en la Plataforma Continental Argentina adyacente al área de estudio un máximo de salinidad (33,7-34,2 ups) originado en el GSM (Lucas *et al.*, 2005). En el período otoño-invierno, se observó que las aguas del GSM se extendieron hacia el norte y que hubo una reducción de las aguas de la Plataforma Continental hacia la costa. En el período de primavera-verano se observó que las aguas del GSM mostraron menor influencia sobre la Plataforma y hubo una mayor influencia de las aguas de la Plataforma Continental en las áreas costeras (Lucas *et al.*, 2005). En el golfo San Matías la geometría de la boca restringe el intercambio con el mar abierto (Rivas & Beier, 1990), sin embargo la media anual de los flujos superficiales de sal y calor es distinto de cero. El intercambio horizontal de calor y sal para balancear el forzante atmosférico depende de la salinidad, la temperatura, los flujos atmosféricos y de los procesos de advección horizontal a través de la boca (Rivas & Beier, 1990). Mientras el flujo superficial de calor cambia el sentido a lo largo del año, produciendo incremento o descenso de la temperatura en diferentes épocas, el flujo de agua dulce es siempre hacia la atmósfera dado que la evaporación supera a la precipitación (Scasso & Piola, 1988). Estas características del flujo atmosférico y la limitada renovación de las aguas producen una mayor amplitud térmica anual en el GSM que en el mar abierto (Krepper & Bianchi, 1982; Scasso & Piola, 1988) y máximos relativos de salinidad en su interior (Brandhorst & Castello, 1971; Carreto *et al.*, 1974; Scasso & Piola, 1988).

CAPITULO 1. INTRODUCCION

La primera aproximación de la circulación general media del GSM se realizó suponiendo equilibrio geostrófico y definiendo la topografía de la termoclina de acuerdo a la profundidad de la isoterma de 14°C (Piola & Scasso, 1988). En las inmediaciones de 41°50`S durante gran parte del año se observó un frente termohalino orientado aproximadamente en dirección E-W. Al norte de 41°40`S se determinó una circulación cerrada con sentido ciclónico y un radio del orden de 35 Km (Figura 12). Esta región está asociada a la de mayor temperatura y salinidad observada al norte de la estructura frontal. En el sudeste aparece un segundo giro ciclónico aparentemente separado del descrito anteriormente por una región en la que la termoclina alcanza profundidades máximas a los 80 m. Este giro está asociado a las aguas relativamente frías que ocupan la región sur del frente (Piola & Scasso, 1988). En el sector sudoeste del GSM la profundidad de la isoterma de 14°C no se determinó debido a la falta de observaciones (Piola & Scasso, 1988).

Debido a la complejidad de la circulación en los golfos norpatagónicos, ha sido difícil y costoso el relevamiento de datos con una aceptable resolución espacial y temporal. Esto motivó que comenzaran a implementarse modelos numéricos de la dinámica existente con el fin de contar con una herramienta de conocimiento y predicción de la circulación.

El primer modelo numérico aplicado a la región del GSM fue el modelo oceánico Bryan-Cox (Bryan, 1969; Cox, 1984). Los resultados de este modelo barotrópico muestran que existen dos sistemas de circulación dentro del GSM forzados por los vientos predominantes del Oeste (Akaprahamyan, 1991). Uno de ellos está compuesto por un giro antihorario al SO del Golfo y otro en sentido horario, cercano a la boca del mismo, que realiza el intercambio de agua con la plataforma adyacente. El agua ingresaría de esta manera por el sur y saldría por el norte (Figura 13). Los experimentos con vientos estacionales muestran que el intercambio del Golfo con la plataforma es más intenso en invierno-otoño que en primavera-verano (Tonini, 2010). Aunque los campos de temperatura y salinidad refuerzan la circulación inducida por el viento, este patrón no parece modificarse significativamente. En el intercambio descrito el Golfo recibiría agua más fría y menos salina por el sur y exportaría agua más cálida y salina por el norte. Debe recalarse, sin embargo, que la única simulación realizada corresponde a una situación de invierno, donde la columna de agua se halla bien mezclada (Akaprahamyan, 1991).

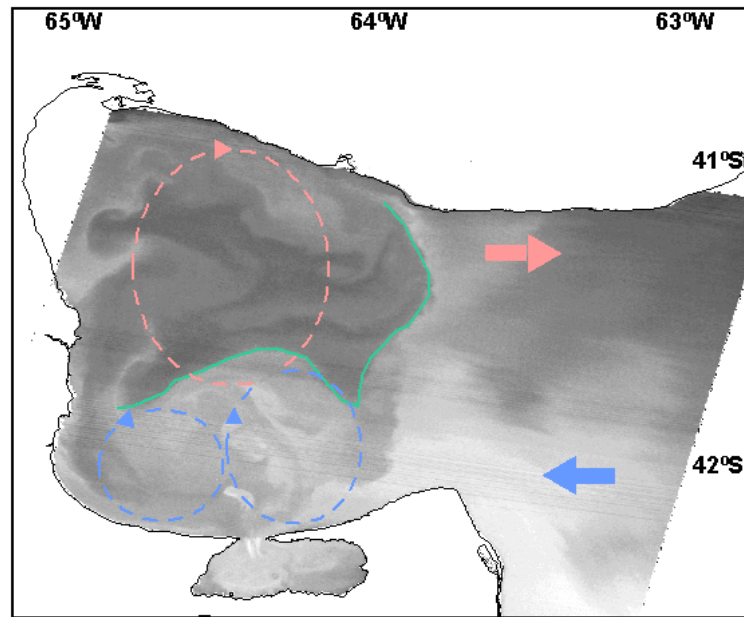


Figura 13. Área de estudio e imagen Landsat ETM+ de temperatura de brillo (8 de Marzo de 2004, órbita 227, cuadro 87) mostrando los sectores al norte (temperatura cálidas: sectores oscuros) y al sur (temperaturas frías: sectores claros) de 41°50'S identificados en trabajos previos. Las líneas punteadas y las flechas sugieren la circulación estimada y la temperatura relativa (rojo: cálido; azul: frío) respectivamente (Scasso & Piola, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004; Tonini, 2010), la línea verde indica la ubicación del frente del GSM.

En la zona norte de la Patagonia Argentina se aplicó un modelo numérico barotrópico bidimensional de aguas poco profundas (Glorioso & Simpson, 1984) que mostró, a partir de la distribución del parámetro de Simpson-Hunter, la ubicación de dos zonas frontales en la región, una en cercanías de Península Valdés y otra cercana a Bahía Blanca. La disipación de la energía de marea por efecto de la fricción de fondo se halla altamente concentrada al nordeste de Península Valdés (es decir en el sector sudeste del GSM). Los resultados también mostraron una depresión neta de la elevación al nordeste de la península donde la dinámica es controlada por el balance entre la aceleración centrífuga y el gradiente de presión barotrópico. El modelo representó, aunque con muy poca resolución, dos giros de recirculación en las corrientes residuales eulerianas al norte de PV.

El modelo HamSOM (*Hamburg Shelf Ocean Model*, Backhaus, 1985) fue empleado para estudiar la propagación y energía de las mareas en los golfos norpatagónicos (Moreira, 2009). El modelo es tridimensional barotrópico, utiliza coordenadas cartesianas y se resuelve mediante el método de diferencias finitas. Los resultados indicaron un régimen de mareas en la Plataforma Patagónica esencialmente semidiurno y dominado por la componente principal M2. La marea se propaga a lo largo de la Plataforma Patagónica como una onda de Kelvin e ingresa a los golfos desde el sur, con una importante amplificación en el interior de los

CAPITULO 1. INTRODUCCION

mismos. La amplitud alcanza valores mayores a tres metros en la porción occidental de los GSM y GSJ, y en el GN supera los 1,8 m. Las simulaciones captaron adecuadamente la intensidad y dirección de las corrientes y mostraron que son máximas en las bocas de los golfos (duplican o triplican las del interior). En el GSM las elipses de marea indicaron un aumento a lo largo de la costa en dirección noroeste, alcanzando en San Antonio Este valores mayores a $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La disipación de energía por fricción de fondo en la región de los golfos es de 15 GW, que representa un 17% del total de la Plataforma Patagónica. El flujo de energía proviene del sur, viaja paralelo a la costa, ingresa por el sur al GSM y sale por la parte norte de la boca, no así en los otros golfos donde los flujos de energía se ven restringidos al acceso.

Finalmente, la circulación oceánica de los golfos norpatagónicos fue analizada mediante una exploración sistemática de los procesos físicos que la controlan, mediante el empleo de un modelo numérico tridimensional de alta resolución (Tonini, 2010). El resultado más importante que surgió de ese trabajo fue que el forzante de mareas contribuye significativamente a la circulación residual en escalas submareales, tanto en un modelo homogéneo como estratificado. Los resultados del modelo homogéneo mostraron que la interacción no-lineal entre la onda de marea y la topografía de fondo conduce a la formación de diversos patrones robustos de circulación residual: giros de cuenca, vórtices batimétricos y cuadrípolos costeros. Con la excepción de los meses de invierno, cuando los vientos son más intensos, la respuesta del océano barotrópico está completamente dominada por la circulación ciclónica residual inducida por la marea. Se requiere un viento de gran intensidad y dirección adecuada para romper este patrón. Los resultados del modelo estratificado también mostraron una profunda influencia de la marea en modelar el ciclo anual de circulación dentro del golfo San Matías. La circulación general está dominada por un intenso giro ciclónico (compuesto por dos giros de recirculación) durante el verano y dos giros menores anticiclónicos en la costa sudoeste y al Norte de Península Valdés. El incremento de la circulación ciclónica entre octubre y febrero es producido por la interacción de la marea con la estratificación (generada por los flujos de calor) en presencia de topografía variable. Como resultado de esta circulación cerrada, en verano el Golfo se halla prácticamente aislado de la plataforma externa. De marzo a setiembre con la erosión de la estratificación, el subgiro norte decae y gradualmente reduce su tamaño hasta ser absorbido por el subgiro sur. Simultáneamente el sector oeste del Golfo es ocupado por un giro anticiclónico. La inclusión del forzante de viento no modifica sustancialmente la estructura e intensidad de los giros de verano pero intensifica tanto los giros anticiclónicos como ciclónicos durante el otoño-invierno. Aunque fue inicializado con densidad constante en la horizontal, el modelo es además capaz de

CAPITULO 1. INTRODUCCION

capturar la estructura e intensidad observada de los principales frentes térmicos en la plataforma externa y dentro del golfo San Matías.

La alta disipación mareal y mezcla vertical producida por la intensa interacción de la marea con la topografía submarina, hace que la zona de los golfos norpatagónicos sea propensa a la producción de frentes marinos, los cuales tienen una gran implicancia en el ecosistema del lugar (Acha *et al.*, 2004). Siendo zonas que favorecen la producción primaria y secundaria, es claro que están también directamente relacionados a las áreas principales de explotación pesquera.

En la zona de estudio y plataforma adyacente se han identificado varios frentes, mediante sensores remotos y observaciones directas. El cálculo de disipación de energía de marea relacionado a la fricción de fondo y al parámetro de estratificación permitió identificar al Nordeste de PV sistemas frontales con máximos de disipación de $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Glorioso & Simpson, 1994). Imágenes satelitales recientes de temperatura superficial muestran un gran contraste en verano entre aguas más frías cercanas a la PV y las aguas más cálidas de la plataforma.

En los últimos años el análisis de frentes se ha profundizado utilizando la teledetección, es decir infiriendo patrones a partir de imágenes satelitales obtenidas de sensores remotos. La estacionalidad de la distribución superficial de temperatura y del ciclo térmico del GSM fue estudiada mediante el análisis de imágenes de temperatura superficial de brillo de los sensores TM y ETM+ (Gagliardini & Rivas, 2004), corroborando la hipótesis de dos áreas con características térmicas diferentes en el GSM (Carreto *et al.*, 1974) (Figura 11). Estas mismas imágenes han sido utilizadas para estudiar el GSJ y su interacción con el GSM, detectando también un frente térmico meridional en el interior del GSJ (Amoroso, 2004; Amoroso *et al.*, 2010). Se ha determinado que la alta concentración de nutrientes (Charpy *et al.*, 1980) y la productividad del GSJ, es comparable a la producida en zonas de surgencia (*upwelling*) (Charpy *et al.*, 1978) y pueden atribuirse a la penetración de aguas ricas en nutrientes de la plataforma adyacente (Carreto *et al.*, 1974).

Recursos biológicos y características químicas.

Las campañas oceanográficas realizadas en el año 1971 (SAO I, II y III) permitieron lograr un conocimiento amplio de las principales variables oceanográficas que regulan o limitan la producción primaria en el golfo San Matías (Carreto *et al.*, 1974; Verona *et al.*, 1974). Estos trabajos constituyeron los primeros estudios de la taxocenosis fitoplanctónica junto con la evaluación de la concentración y distribución de nutrientes y pigmentos fotosintéticos. La

CAPITULO 1. INTRODUCCION

conclusión más importante de estos trabajos fue que durante la primavera, el golfo San Matías presenta dos masas de agua netamente diferenciadas por su temperatura, salinidad y concentración de nutrientes, pudiéndose identificar las denominadas aguas propias del Golfo (zona norte) de las aguas de origen externo, que ingresan por la zona sur (Carreto *et al.*, 1974).

En la plataforma externa al GSM los patrones espaciales e hidrográficos de las comunidades de mesozooplankton en el área frontal de Península Valdés fueron investigados en el año 1995 y 1998 (Sabatini & Martos, 2002). Los resultados mostraron que los patrones de abundancia de mesozooplankton estuvieron ligados a la heterogeneidad ambiental que presentó el sistema frontal, existiendo marcadas diferencias en la composición y estructura de las comunidades a lo largo del frente. Estas parecen estar relacionadas a las diferencias físicas al Norte y al Sur del sistema frontal (Sabatini & Martos, 2002).

En relación al fitoplancton también fue posible detectar altas concentraciones de clorofila-*a* en cercanías del frente de Península Valdés (FPV), utilizando observaciones del sensor remoto SeaWiFS (Romero *et al.*, 2006). Asociado a la formación de frentes, también se ha detectado la presencia de las denominadas “mareas rojas”; en el caso particular del frente de Valdés, registrándose diferentes grados de toxicidad por el dinoflagelado *Alexandrium tamarense* (Carreto *et al.* 1986). Este fenómeno mundial (Le Fèvre, 1986; Anderson, 1997; Pitcher *et al.*, 1998), ha sido detectado en otras ocasiones en los golfos norpatagónicos y en la zona costera patagónica (Esteves *et al.*, 1992; Sastre *et al.*, 1997; Sastre *et al.*, 2001; Santinelli *et al.*, 2002).

En el marco del proyecto “Evaluación de la biomasa desovante de anchoíta (*Engraulis anchoita*) en el Golfo San Matías” se logró describir la ubicación geográfica de huevos y larvas de peces durante los meses de noviembre de 1992 y septiembre de 1993, e identificar una mayor concentración de ictioplancton al norte del Golfo (Mercado *et al.*, 1993). El análisis de la composición, abundancia y variación estacional del zooplancton para las cuatro estaciones del período abril/74 – febrero/75 mostró que la biomasa promedio de todo el Golfo alcanza niveles máximos en otoño y primavera y mínimos en verano e invierno (Ramírez, 1996).

La estructura y la distribución fitoplanctónica fueron analizadas para los meses de noviembre de 1992, setiembre de 1993 y marzo de 1994 identificando 96 taxa pertenecientes principalmente a grupos de diatomeas, dinoflagelados y silicoflagelados (Sastre *et al.*, 1997).

CAPITULO 1. INTRODUCCION

En campañas oceanográficas realizadas por el B/O ‘El Austral’ se analizaron las variaciones estacionales y espaciales de temperatura, nutrientes y clorofila-*a* en conjunto con imágenes de temperatura de brillo de los sensores TM/ETM+ (Williams, 2004).

Finalmente, en esta región se han encontrado evidencias de la relación entre esta dinámica y las estrategias reproductivas de las dos especies importantes de la zona (anchoíta, *Engraulis anchoita* y merluza común, *Merluccius hubbsi*), debido a que tanto las zonas de cría como de desove se encuentran cerca de ese lugar (Bakun & Parrish, 1991). También grandes concentraciones de la vieira (*Zygochlamys patagonica*) se encuentran relacionadas con el frente de Península Valdés (Orensanz *et al.*, 1991; Ciocco *et al.*, 2006).

En síntesis, todo los trabajos descriptos previamente concluyen que las aguas del GSM pueden ser divididas en dos áreas netamente diferenciadas por sus características físicas, químicas y biológicas, y relacionadas entre sí por una zona de transición que las separa.

1.5 MOTIVACIÓN

El ecosistema del golfo San Matías es la principal fuente de bienes y servicios para las comunidades costeras de Sierra Grande, Las Grutas y San Antonio Oeste y soporta actividades humanas basadas en la explotación de recursos pesqueros y turismo. Una importante extensión de sus costas y aguas constituyen Áreas Naturales Protegidas, siendo la más llamativa Península Valdés la cual ha sido declarada Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO en 1999. Un ecosistema de tales características demanda un manejo especial.

El Enfoque Ecosistémico para las pesquerías (EAF, *Ecosystem Approach to Fisheries*, en inglés) es un marco de manejo que puede ser concretado mediante la implementación de planes ecosistémicos de manejo pesquero (FMP, *Fisheries Managment Plan*, en inglés). Este objetivo, en el contexto del EAF, requiere la integración de objetivos biológicos, ecológicos, económicos, sociales e institucionales. Se requiere un conocimiento integral de la biología y ecología de los recursos pesqueros, las condiciones ambientales donde viven y la estructura y funcionamiento del ecosistema.

Para elaborar el Plan de Manejo Ecosistémico de las pesquerías del Golfo se necesita obtener información sobre características especiales como distribución y abundancia de especies clave, uso de hábitat y estructura de las redes tróficas. Uno de los objetivos principales, entonces, es identificar patrones de distribución de especies en relación a fenómenos ambientales y oceanográficos.

En particular, en esta tesis las preguntas a responder, son las siguientes:

1 ¿Cuáles son los procesos oceanográficos que caracterizan a este Golfo? La localización de frentes oceánicos, giros, surgencias, que aportan nutrientes a la superficie y contribuyen al incremento de la concentración de clorofila-*a* se pondrán en evidencia mediante imágenes satelitales. La información obtenida será confirmada mediante campañas oceanográficas.

2 ¿Cuál es la relación entre la variabilidad espacio-temporal de los parámetros físicos (temperatura) y químicos (nutrientes y clorofila-*a*), y los recursos pesqueros? Se responderá mediante el análisis de mediciones de temperatura, nutrientes, clorofila-*a*, análisis de imágenes satelitales y estimadores e indicadores de abundancia de recursos pesqueros.

3. ¿Existe consistencia entre la información de temperatura y clorofila-*a* satelital y aquellas obtenidas en las campañas oceanográficas? Se responderá mediante análisis de correlación entre ambas fuentes de datos.

4 ¿Cuáles son las áreas de importancia para la producción pesquera del Golfo? Estas áreas se identificarán sobre la base del conocimiento previo y a partir de nueva información obtenida mediante información satelital ambiental y pesquera y campañas oceanográficas.

1.5.1 Objetivos

En función de las preguntas planteadas, el objetivo principal de esta tesis es identificar áreas del golfo San Matías con características ambientales particulares (en relación a su temperatura, nutrientes y clorofila-*a*) de importancia para el desarrollo de las pesquerías, con el fin de contribuir a una gestión adecuada de las mismas.

Los objetivos particulares son los siguientes:

1. Procesar, analizar y aplicar imágenes satelitales en la estimación de la temperatura superficial del mar y concentración de clorofila-*a*, para comprender la distribución superficial de parámetros oceanográficos en el golfo San Matías.

2. Analizar las variaciones espacio-temporales de datos físicos y químicos en superficie y profundidad tomados en campañas con el fin de caracterizar ambientalmente el Golfo.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

3. Interrelacionar las estimaciones satelitales de TSM y clorofila-*a* y datos de campañas oceanográficas, que permitan identificar áreas con comportamientos particulares desde el punto de vista ambiental.

4. Comparar datos de temperatura y clorofila-*a* obtenidos mediante imágenes satelitales con mediciones realizadas en campañas oceanográficas con el objetivo de evaluar el grado de consistencia entre ambos tipos de información.

5. Caracterizar los principales procesos oceanográficos identificados en el GSM y determinar en qué medida la distribución del fitoplancton en superficie está relacionada con estos procesos.

6. Analizar la interacción entre variables oceanográficas (temperatura, clorofila-*a* y nutrientes) y la presencia, distribución y abundancia de los principales recursos pesqueros del golfo San Matías.

1.5.2 Hipótesis de trabajo

A partir de los objetivos planteados se desprende que las hipótesis a evaluar son:

1. El golfo San Matías presenta áreas con características ambientales físicas, químicas y biológicas particulares.

2. La información satelital de temperatura y clorofila-*a* es consistente con los datos de las mismas variables obtenidos en campañas oceanográficas.

3. La distribución en superficie de fitoplancton (estimado como concentración de clorofila-*a*) presenta relación con el frente térmico existente en el golfo San Matías.

4. La distribución y abundancia de los principales recursos pesqueros del golfo San Matías se encuentra asociada con los principales patrones espacio-temporales de temperatura y clorofila-*a* identificados en el GSM.

1.5.3 Actividades

La estrategia de investigación estuvo enfocada en tomar ventajas de herramientas tecnológicas, principalmente sensores remotos, basadas en servicios provistos por satélites, complementados por información obtenida en campañas oceanográficas y pesqueras, para mejorar el conocimiento del ambiente y la dinámica de la flota pesquera en el GSM.

Los estudios realizados estuvieron basados en las siguientes actividades:

a. Construcción de series temporales de imágenes satelitales de los sensores AVHRR, SeaWiFS y MODIS empleadas en el contexto de estudios ambientales para identificar y caracterizar los fenómenos oceanográficos más importantes.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

b. Un programa de campañas oceanográficas para obtener información ambiental *in-situ* (temperatura, nutrientes, clorofila-*a*).

c. Un registro de las actividades de los barcos pesqueros desde un Sistema de Monitoreo Oceanográficos y Pesquero a partir de los servicios del satélite Inmarsat D+.

d. Un programa de observadores a bordo suministró información biológica y ecológica de las especies objetivo de las pesquerías.

En el Capítulo 2 se presentarán las metodologías generales del procesamiento de imágenes satelitales, del muestreo de las campañas oceanográficas y las técnicas analíticas para la determinación de concentración nutrientes y clorofila-*a* en las campañas oceanográficas. En el Capítulo 3 se presentarán los resultados obtenidos de las series temporales de temperatura y concentración de clorofila-*a* a partir de imágenes satelitales, las distribuciones superficiales y verticales de los parámetros obtenidos en las campañas y la comparación entre los productos de TSM y Cla-sat (clorofila-*a*) satelitales y los correspondientes valores obtenidos en campañas oceanográficas. En el Capítulo 4 se presenta la caracterización del frente del GSM desde el punto de vista superficial y vertical mediante datos satelitales y de campañas oceanográficas históricas y recientes. En el Capítulo 5, se analiza la aplicación de los datos ambientales obtenidos mediante sensoramiento remoto, a los principales recursos de interés pesquero que se explotan en el GSM. Por último se establecen las consideraciones finales y conclusiones y se señala la importancia del uso de la información satelital en forma conjunta con datos oceanográficos y biológicos.

Parte de los resultados aquí presentados forman parte del siguiente trabajo publicado:

Williams, G. N., Sapoznik, M., Ocampo-Reinaldo, M. Solís, M. Narvarte, M., González, R., Esteves, J.L; Gagliardini, D.A., 2010: Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and in-situ data in San Matias Gulf, Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. 31(17-18): 4531-4542. Print ISSN: 0143-1161 Online ISSN: 1366-5901. Taylor & Francis Ltd.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos del sensoramiento remoto de la radiación infrarroja térmica y la reflectancia en la región visible del EEM, y las cadenas de procesamiento que permitieron obtener los productos temperatura y concentración de clorofila-*a* de la capa superficial del mar utilizados en esta tesis. Las características de los sensores utilizados se describieron en el Capítulo 1. En una segunda parte de este capítulo se presentan el diseño de las campañas de muestro en el área de estudio, las metodologías desarrolladas en el campo, los análisis de las muestras en el laboratorio y la obtención de datos biológico-pesqueros.

2.1 Teledetección satelital aplicada al estudio del mar: procesamiento de datos

En el presente trabajo se utilizaron datos de los sensores AVHRR, SeaWiFS y MODIS-AQUA. Los datos AVHRR y SeaWiFS correspondientes a los períodos 2000-2008 y 2000-2006 fueron provistos por la CONAE. Los datos MODIS-Aqua fueron suministrados por CONAE para fechas particulares y la serie temporal 2004-2009 fue descargada desde la página web de Antares (http://www.iafe.uba.ar/tele/Antares_argentina/data/index.htm). Las características de estos sensores se resumen en la Tabla 2.1.1.

Los conceptos físicos y unidades de medidas implicados en el proceso de teledetección de la superficie del mar se explican en detalle en el Apéndice A.

Tabla 2.1.1: Características de los sensores utilizados en la determinación de las características ambientales del golfo San Matías.

Sensor	Satélite	Fecha lanzamiento	Franja barrido (km)	R. espacial (m)	R. temporal	# bandas	R. radio-métrica (bits)
TM/ETM	Landsat (USA)	1° de marzo de 1984/15 de Abril de 1999	185	30 (visible 120/60 (térmico))	16 días	7/8	8
AVHRR	NOAA (USA)	4 mayo 2002	2700	1100	12 hs	5	10
SeaWiFS	OrbView-2 (USA)	1 agosto 1997	2806	1100	24 hs	8	10
MODIS-Aqua	Aqua (EOS-PM1)	4 mayo 2002	2330	1000	24 hs	36	12

2.1.1 Estimación de la TSM a partir de la energía infrarroja térmica emitida por la superficie del mar.

Las imágenes de TSM se obtienen a partir de la energía emitida por los cuerpos en la región del infrarrojo térmico del EEM. El proceso de teledetección se lleva a cabo en dos ventanas atmosféricas en donde la absorción de la energía por parte de la atmósfera es mínima: 3-5 μm y 8-14 μm . Los sensores a bordo de satélites usan normalmente las ventanas entre 3-4 μm y entre 10,5-12,5 μm . La absorción y reemisión de la REM por parte de la

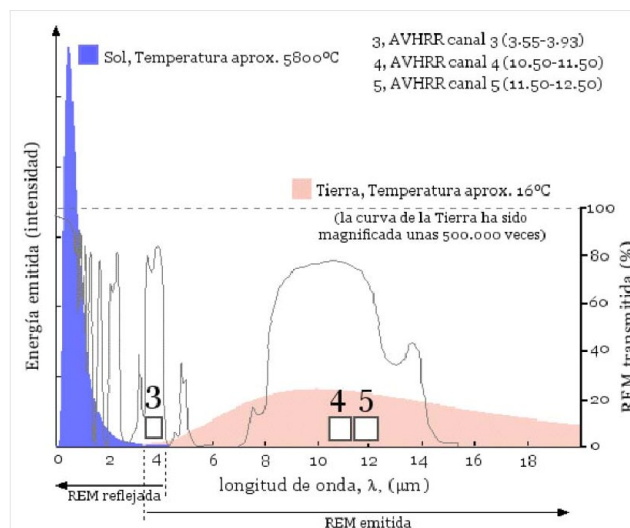


Figura 2.1.1. Espectros de REM emitidos por el sol y la tierra. Se indica la transmitancia atmosférica de la REM y la ubicación de las bandas IR (3, 4 y 5) del sensor AVHRR.

atmósfera está dada principalmente por el vapor de agua, y en menor medida por el dióxido de carbono, y el ozono (aunque este último solo en las longitudes de onda de 10,5 a 12,5 μm). Además, en la ventana atmosférica ubicada entre los 3 y 4 μm (canal 3) se produce tanto reflexión de la REM solar como emisión de REM infrarroja por parte de los elementos presentes en la superficie terrestre (Figura 2.1.1). De esta manera la reflectancia de la REM solar contamina en cierto grado la teledetección en el canal 3 durante las horas del día, y solo puede considerarse esta ventana a los fines de la generación de imágenes de TSM cuando la teledetección se realiza durante la noche.

Relación entre la energía medida por el sensor y la temperatura: Radiación de cuerpo negro.

Un cuerpo negro perfecto es un material ideal que absorbe completamente toda la radiación incidente sobre él. Es decir, no permite ninguna transmisión o reflexión, pero emite la energía que ha absorbido a la máxima tasa posible para cada longitud de onda del EEM. Sin embargo, todos los cuerpos constituyen fuentes térmicas y emiten REM. Entre estos cuerpos se encuentran los mares y los océanos y la detección de la REM emitida es la que permite obtener imágenes de TSM.

En relación con la teoría de radiación de cuerpo negro tres leyes deben mencionarse,

las cuales describen la relación de la REM térmica emitida por los cuerpos con la temperatura y la longitud de onda y resultan útiles para comprender la relación entre la energía emitida y la temperatura de los cuerpos.

La ley de Planck de cuerpo negro, que describe la distribución de la energía emitida por un cuerpo negro en el espectro electromagnético:

$$E_{\lambda} = \frac{C}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_2/\lambda*T) - 1}$$

donde,
 E_{λ} = Energía total emitida por longitud de onda (W.m⁻²)
 λ = Longitud de onda (μm)
 T= temperatura (°K)
 C_1 = Primer constante de Planck, 3,74 10⁻⁶W²m
 C_2 = Segunda constante de Planck, 1,44 10⁻² m.K

La ley de Stefan-Boltzmann, indica que la emisión de energía es mayor para cada longitud de onda a medida que aumenta la temperatura de cuerpo.

$$E_B = \sigma.T^4$$

donde,
 E_B = Energía total emitida (W.m⁻²).
 σ = constante de Stefan-Boltzmann: 5,67 10⁻⁸W⁻²mK⁻⁴.
 T= Temperatura (°K)

La ley de Wien del desplazamiento establece que la emisión máxima de energía por parte de un cuerpo se desplaza hacia longitudes de onda menores a medida que la temperatura del cuerpo aumenta (Figura 2.1.4). De modo resumido la ley puede expresarse en la forma,

$$\lambda_{max} = \frac{2898.\mu.^{\circ}K}{T}$$

donde,
 λ_{max} = Longitud de onda en la cual se produce el máximo de energía emitida (μm)
 T= Temperatura (°K)

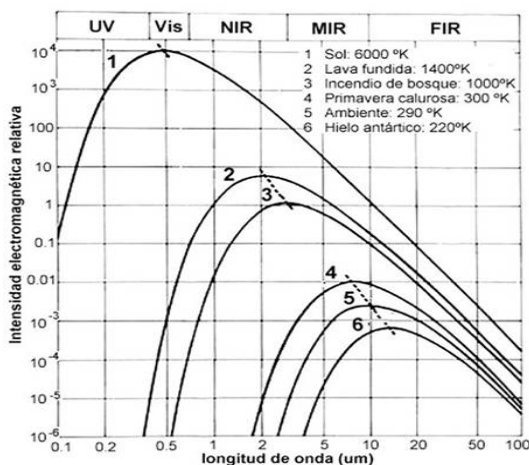


Figura 2.1.2. Temperaturas de distintos cuerpos e intensidad de la energía emitida de acuerdo con la ley de Wien (de <http://rst.gsfc.nasa.gov/Homepage/Homepage>

Aproximando la superficie del mar a un cuerpo negro, podemos analizar entonces en que parte del EEM ocurre la mayor emisión de energía (Figura 2.1.2). Así, considerando una temperatura superficial de 220°K (-53°C), obtenemos que la emisión máxima ocurre alrededor de los 10,50 μm. Si en cambio consideramos una temperatura de 290°K (17°C), la emisión máxima se produce alrededor de los 9 μm.

Así, las tres leyes constituyen

herramientas útiles para estimar las temperaturas de los cuerpos. La inversión de la ley de Planck, en particular, permite obtener la temperatura a partir de la energía infrarroja térmica emitida por la superficie del mar. Una vez derivada a partir de esta ley, la temperatura se denomina “temperatura de brillo”, y debe efectuarse una corrección por los efectos atmosféricos previamente indicados a fin de obtener una estimación de la verdadera TSM.

Cantidad de energía emitida por los cuerpos: emisividad y temperatura.

La mayoría de las sustancias no alcanzan la tasa máxima de emisión de energía correspondiente a un cuerpo negro. Así, a fin de comparar la energía real emitida por las sustancias y la energía teórica para una dada temperatura, se define el concepto de emisividad, que es simplemente la relación entre la REM emitida por el objeto y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad depende de factores tales como la constante dieléctrica del objeto, la rugosidad de su superficie, la temperatura, la longitud de onda, etc., y varía entre 0 y 1, donde el valor 1 corresponde a la emisividad de un cuerpo negro perfecto. La emisividad varía también con la longitud de onda para cada sustancia en particular.

El otro factor que determina la cantidad de energía emitida por un cuerpo es, como se mencionó, la temperatura. Aunque la temperatura de un cuerpo es una sola, el estado térmico particular del cuerpo puede ser definido por dos temperaturas: la temperatura interna ó cinética, debido al movimiento de los átomos que lo componen (es la que medimos cuando insertamos un termómetro), y la temperatura externa o radiante, medida de acuerdo a la radiación emitida por el objeto (es la que se detecta por medio del sensor AVHRR). Bajo condiciones de equilibrio termodinámico, como las que se consideran en la radiación de cuerpo negro, ambas temperaturas son iguales. En otras palabras, la energía emitida será proporcional a la temperatura del cuerpo emisor, y la temperatura derivada a partir de la energía emitida será igual a la temperatura del cuerpo. De todas formas, aún para cuerpos que se encuentran en equilibrio

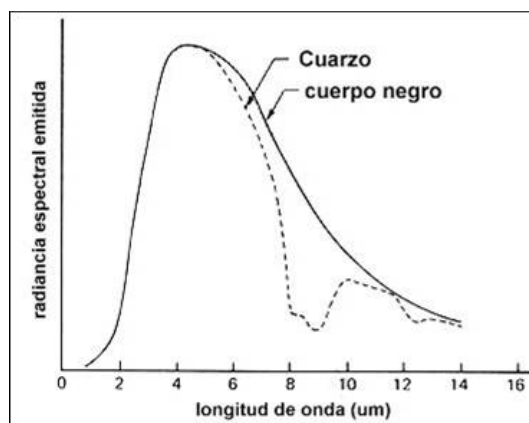


Figura 2.1.3: Diferencias en la energía emitida por dos cuerpos en equilibrio térmico, con distintas emisividades (de <http://rst.gsfc.nasa.gov/Homepage/Homepage.html>)

termodinámico, la energía que emite cada uno y que es detectada por el sensor será diferente si las emisividades de ambos cuerpos son distintas (Figura 2.1.3).

Para la obtención de imágenes de temperatura superficial del mar (TSM), se asume que la emisividad del mar es constante e igual a 1 y que los efectos atmosféricos, aunque deben ser corregidos para una correcta estimación de la TSM, no modifican el hecho de que la cantidad de energía recibida por el sensor variará fundamentalmente con las fluctuaciones en la temperatura superficial del mar de acuerdo con la ley de Planck.

Algoritmos de TSM

Las temperaturas de brillo no brindan la temperatura de la superficie del mar debido a que parte de la energía emitida por el agua es absorbida por la atmósfera antes de alcanzar el sensor. La consideración de la atmósfera se realiza observando la misma superficie en dos rangos cercanos del EEM, debido a la dependencia de los efectos atmosféricos con respecto a la longitud de onda. Este procedimiento recibe el nombre de "técnica multicanal" (Anding & Kauth, 1970; Prabhakara *et al.*, 1974; McMillin & Crosby, 1984; Price, 1983), en alusión al uso de varios canales o bandas del sensor para efectuar las correcciones. La técnica multicanal se aplica a los datos obtenidos por el sensor AVHRR, en donde las bandas 3 (5-3,93 μm), 4 (10,50-11,50 μm) y 5 (11,50-12,50 μm) se utilizan para la generación de imágenes de TSM. Los algoritmos de TSM consisten en fórmulas de regresión que involucran comparaciones empíricas de TSM medida mediante boyas (Figura 2.1.4), con una combinación de mediciones AVHRR en distintas bandas espectrales (Bernstein, 1982; McMillin & Crosby, 1984; Walton, 1988; McClain *et al.*, 1995). Los algoritmos de TSM así generados son de naturaleza global, es decir que pueden ser aplicados para obtener imágenes de TSM en cualquier región del océano, y no son dependientes del tiempo.

Actualmente, existen dos tipos de algoritmos multicanal, los denominados *MCSST* (*multi channel sea surface temperature*), y los *NLSST* (*non linear sea surface temperature*), la diferencia más importante entre ambos es que los algoritmos *NLSST* incluyen un valor de temperatura estimado "*a priori*" para el área de análisis. Este valor puede surgir de mediciones previas efectuadas en la zona de estudio, valores medios conocidos, etc.

Debido a que el ancho de barrido del sistema NOAA-AVHRR es de 2700 Km la cantidad de atmósfera atravesada es muy diferente entre los píxeles cercanos al nadir y los píxeles extremos, por lo que no es posible considerar un único camino recorrido para

toda la energía que llega al sensor. Por lo tanto, para la obtención de mapas de TSM se debe tener en cuenta la posición del satélite con respecto de la superficie terrestre (geometría de observación, Figura 2.1.6). En los algoritmos de TSM, la corrección de este problema se efectúa mediante el valor del ángulo cenital del sensor (θ_s). La consideración de θ_s no solo permite contemplar las diferencias en la cantidad de atmósfera atravesada por la energía recibida de distintos píxeles, sino que también contempla el efecto de curvatura de la tierra, que se traduce en una diferencia creciente entre los ángulos de barrido y cenital del sensor a medida que nos alejamos del píxel central (nadir). La experiencia en la generación de imágenes de TSM indica que la señal del sensor se degrada mucho para valores de θ_s superiores a 53° , por lo cual los píxeles con valores superiores a 53° son en general descartados para la generación de la imagen de TSM.

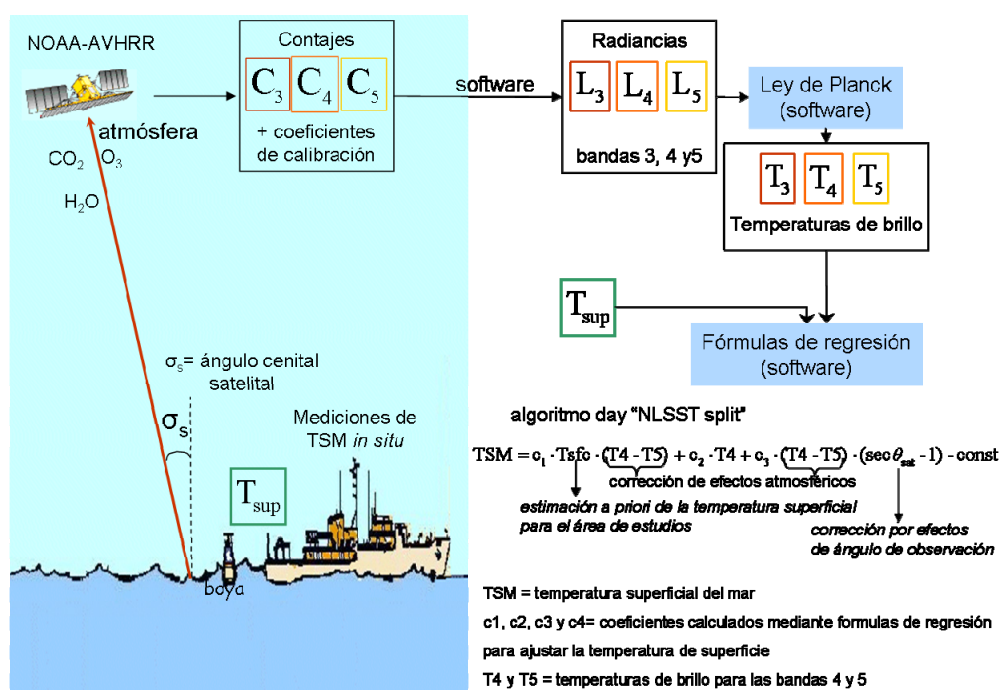


Figura 2.1.4: Esquema que muestra las etapas involucradas en la generación de un algoritmo para la estimación de la TSM a partir de datos AVHRR.

2.1.2 Estimación de la concentración de clorofila-a a partir de la energía visible reflejada por la superficie del mar

El objetivo del sensoramiento del *color del mar* es obtener información cuantitativa sobre el tipo de sustancias presentes en el agua y de su concentración, a partir de la variación de la forma espectral y la magnitud de la señal que proviene del agua en la región visible del EEM (IOCCG, 2000). Los sistemas de sensoramiento remoto del

color del mar utilizan, como se mencionó anteriormente, sensores con un campo de visión angular reducido y son capaces de monitorear el flujo de energía que llega al sensor en varias longitudes de onda en la región del visible (entre 0,4 y 0,7 μm) e infrarrojo cercano (NIR) (entre 0,7 y 1,3 μm) del EEM.

Los sensores a bordo de satélites detectan la radiación que llega al tope de la atmósfera. Considerando que el mar es lo suficientemente profundo como para que la contribución del fondo no sea detectable por el sensor, se puede decir que la radiación total que llega al sensor ((1) en la Figura 2.1.5) se encuentra influenciada por la contribución de:

- la REM que es dispersada por la atmósfera (2)
- la REM que es reflejada de la superficie del agua (3)
- la REM que emerge de la capa superficial del agua (4)

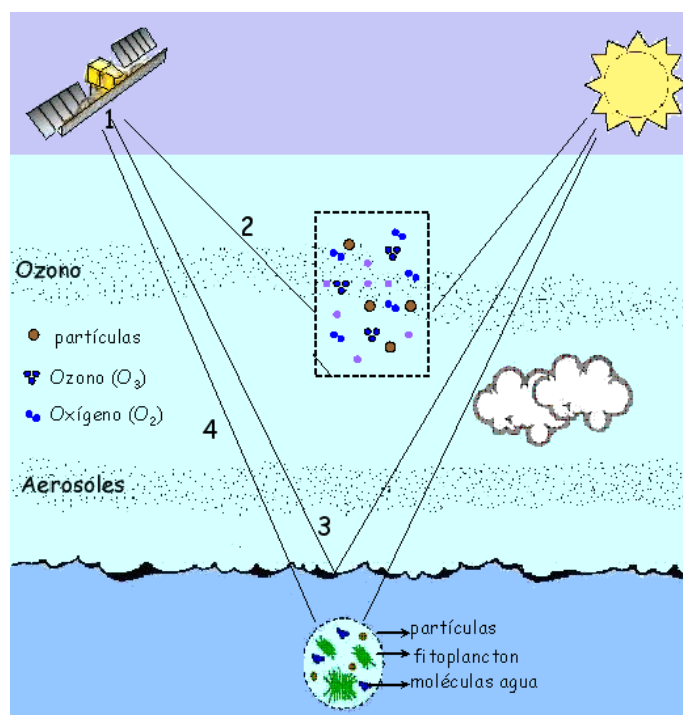


Figura 2.1.5. Diagrama mostrando los caminos que recorre la luz que llega al sensor (1); (2) la REM que interactúa con los componentes de la atmósfera (partículas tales como los aerosoles y moléculas tales como el ozono y el oxígeno); (3) la REM directa que se refleja especularmente en la superficie del agua; y (4) la REM que emerge del agua y llega al sensor luego de interactuar con las sustancias presentes en el cuerpo de agua (tales como agua, fitoplancton, partículas, etc.).

El proceso de corrección atmosférica elimina los componentes (2) y (3), que son considerados como ruido en este contexto y son generados por la dispersión producida tanto por las moléculas del aire como por las partículas (aerosoles). La radiación que emerge de la capa superficial del mar, la componente (4) en la Figura 2.1.5, es la única que contiene información sobre las sustancias presentes en el agua. Las características

espectrales de la radiancia que emerge del agua (que llamaremos radiancia marina de aquí en más) dependen de la absorción y dispersión de la REM visible de los distintos componentes que se encuentren en el agua (Ej.: materia orgánica disuelta y material particulado en suspensión, incluyendo las células vivas del fitoplancton, sedimento inorgánico y detrito particulado).

Como se mencionó anteriormente el sensor a bordo del satélite observa tanto la Tierra como la atmósfera. Dependiendo de la longitud de onda, entre un 80 y un 100% de la radiancia que recibe el sensor (radiancia al tope de la atmósfera o total – L_t) proviene de la interacción de la REM con la atmósfera o la superficie del mar sin haber interactuado nunca con la capa superficial del mar (Kirk, 1994). Los efectos dispersivos de la atmósfera y de la superficie del mar deben ser modelados y eliminados de la radiancia total medida por el sensor para poder obtener la información que proviene del agua y de su contenido.

Al atravesar la atmósfera, la REM interactúa con moléculas de aire y partículas de aerosol y como resultado de dicha interacción parte de la REM es absorbida y dispersada. La absorción es un proceso en el cual la energía radiante se transforma en calor o en enlaces químicos y es removida del campo de la radiación. El efecto de absorción se minimiza ubicando los canales de los sensores en las “ventanas atmosféricas” (ver Apéndice A), de este modo la absorción debida a la presencia de gases interviene sólo como un término de corrección. La dispersión (ver Apéndice A) es un proceso en el que ocurre un cambio en la dirección de propagación del fotón y no hay transformación pero sí un cambio en la distribución espacial de la energía.

Relación entre la energía medida por el sensor y el color del mar.

La radiancia total que llega al sensor al tope de la atmósfera ($L_t(\lambda)$) también puede expresarse en forma equivalente como la reflectancia al tope de la atmósfera o total ($\rho_t(\lambda)$)

$$\rho_t(\lambda) = \frac{\pi L_t(\lambda)}{F_s(\lambda)\mu_s} \quad (2.2.1)$$

donde la L_t es la radiancia medida por el sensor ((1) en la Figura 2.1.7, F_s es la irradiancia solar extraterrestre y μ_s es el coseno del ángulo solar cenital (θ_s). La reflectancia total, a una determinada longitud de onda λ , puede escribirse como la suma de varias componentes.

$$\rho_t(\lambda) = \rho_{path}(\lambda) + \rho_{sup}(\lambda) + t_d \rho_w(\lambda) \quad (2.2.2)$$

donde $\rho_{path}(\lambda)$ es la reflectancia que aporta la atmósfera por dispersión ((2) en la Figura 2.1.7), $\rho_{sup}(\lambda)$ es la componente de la radiación que proviene de la reflexión en la superficie ((3) en la Figura 2.1.7), t_d es la transmitancia difusa y $\rho_w(\lambda)$ es la que proviene del cuerpo de agua propiamente dicho ((4) en la Figura 2.1.7). Esta es la reflectancia que se quiere conocer ya que contiene información sobre las sustancias presentes en el agua.

La ecuación 2.2.2 ha sido analizada en mayor detalle (Gordon & Wang, 1994a), con el objetivo de subdividir sus componentes en contribuciones que corresponden a distintos procesos físicos, en los cuáles no se entrará en detalle en este trabajo. El objetivo final de estos análisis es obtener la ρ_w (reflectancia marina), con lo cual se han desarrollado métodos que permiten calcular las contribuciones de los procesos físicos implicados; por ejemplo la contribución de la dispersión por Rayleigh y las transmitancia directa y difusa pueden calcularse en forma precisa (Gordon *et al.*, 1988; Gordon & Wang, 1992; Wang, 1999; Yang & Gordon, 1997). La contribución de la espuma puede estimarse a partir de la velocidad del viento en superficie (Gordon & Wang, 1994b; Frouin *et al.*, 1996; Moore *et al.*, 2000). La contaminación por reflexión especular es generalmente evitada, tal como ocurre con el sensor SeaWiFS que puede ser inclinado $\pm 20^\circ$ con ese fin, o eliminado de otra manera, como es el caso del sensor MODIS que no posee dicho mecanismo. Para remover el efecto de los aerosoles generalmente se utilizan bandas espectrales para las cuales los valores de ρ_w son conocidos y que permiten estimar la contribución de los aerosoles en dichas bandas. Para esto se necesitan por lo menos dos bandas, una para estimar la magnitud de la contribución de los aerosoles y la segunda para saber cómo varía ésta con la longitud de onda.

El algoritmo que se utiliza para la corrección atmosférica de los sensores SeaWiFS y MODIS se basa en el método propuesto por Gordon & Wang (1994a) y otras correcciones adicionales (Morel & Gentili, 1991, 1993 y 1996; Wang *et al.*, 2001; Patt *et al.*, 2003). Gordon & Wang (1994a) propusieron un método que se basa en dos suposiciones fundamentales: (1) conocida como del píxel negro o “*black-pixel assumption*”, supone que la reflectancia que emerge del agua o marina en la región infrarroja cercana (NIR) del EEM es nula ($\rho_w(\text{NIR})=0$) y lo que mide el sensor en esta región del espectro al tope de la atmósfera es radiancia dispersada por la atmósfera, por

lo que se puede estimar la contribución de los aerosoles en el NIR (es decir, los términos $\rho_a(\text{NIR}) + \rho_{ra}(\text{NIR})$); y (2) que la contribución de los aerosoles puede extrapolarse a la región del VIS a partir de la radiación medida en dos regiones o bandas ubicadas en el NIR. Para corregir el efecto de la atmósfera en las imágenes SeaWiFS se utilizan las bandas cuya longitud de onda central se encuentra en los 765 nm y 865 nm, mientras que para las imágenes MODIS se utilizan las bandas centradas en los 748 nm y 869 nm. Los valores de reflectancia en estas dos bandas son utilizados para seleccionar un modelo de aerosol de una serie de modelos predefinidos. Se utilizan tablas que fueron generadas a partir de simulaciones utilizando la ecuación de transferencia radiativa. A partir del modelo de aerosol seleccionado se extrapola y estima la contribución de los aerosoles en las bandas ubicadas en la región del VIS, lo que permite remover dicho término y calcular la reflectancia que emerge del agua o reflectancia marina (ρ_w) en dichas bandas. Se utilizan tres modelos de aerosoles, el oceánico y el troposférico fueron desarrollados por Shettle & Fenn (1979). Y un tercero costero por Gordon & Wang (1994a), para distintos valores de humedad relativa (50%, 70%, 90% y 99%), lo que resulta en un total de 12 modelos posibles.

El algoritmo utilizado en este trabajo para la corrección atmosférica de los sistemas mencionados y que fue brevemente descrito en el párrafo anterior tiene sus limitaciones: 1) la primera es la no validez de la suposición de reflectancia nula en la región del NIR. Esto ocurre en aguas turbias (sedimentos que dispersan mucho la luz en el NIR), con alta concentración de clorofila-*a* o en aguas muy someras donde el fondo influye en la reflectancia que emerge del agua, situaciones generalmente encontradas en aguas costeras; y 2) otra posible causa de error en la corrección atmosférica es la presencia de aerosoles que absorben la radiación ya que éstos no son contemplados en los modelos predefinidos que utiliza el algoritmo. Estos aerosoles suelen estar concentrados en la zona costera (aerosoles urbanos) o tener su origen en eventos esporádicos tales como las tormentas de polvo.

Algoritmos bioópticos

Suponiendo que la contribución de la atmósfera a la señal que mide el sensor pudiera ser correctamente estimada, queda interpretar la reflectancia que emerge del agua o marina en términos de las propiedades ópticas de la capa superficial. La señal que emerge del agua proviene de la luz del sol que llega al cuerpo del agua y que es absorbida y dispersada por las moléculas mismas del agua y por el material en suspensión o disuelto presente. En aguas claras y someras una parte significativa de la

señal que proviene del sol puede llegar al fondo, ser reflejada y llegar finalmente al sensor (Figura 2.1.6).

La información que proveen los sensores satelitales que miden el color del mar proviene de la primera profundidad óptica, definida por Gordon & McCluney (1975) como la profundidad de la capa de la cual proviene el 90% de la radiación que sale del cuerpo de agua, o la profundidad a la cual la radiancia superficial es reducida en un 37% ($1/e$). Es por esto que la concentración de las sustancias estimada a través del uso de sensores remotos se limita a esta capa superficial del cuerpo de agua, de donde proviene dicha señal. Esta profundidad puede variar desde unos pocos milímetros en aguas muy turbias a unos cuantos metros en aguas muy claras. Además del agua misma, las principales sustancias que modifican las propiedades ópticas del agua pueden clasificarse, con fines prácticos, en tres grupos:

- el fitoplancton, que incluye a las algas unicelulares y a otros organismos microscópicos. Por conveniencia a este grupo se lo llama “fitoplancton” ya que las algas son el componente que tiene mayor influencia en las propiedades ópticas.
- las materia orgánica disuelta coloreada (CDOM o sustancia amarilla), un grupo de sustancias orgánicas disueltas compuestas por ácidos fúlvicos y húmicos que pueden tener origen local, provenir de la degradación de células fitoplanctónicas u otras partículas orgánicas, o de una fuente externa, tal como la descarga de ríos que atraviesan suelos ricos en materia orgánica.
- el material particulado en suspensión que puede tener origen orgánico (no pigmentado) o inorgánico. El primero está compuesto por bacterias, virus, coloides, detrito orgánico y partículas de mayor tamaño, tales como organismos del zooplancton. Y el segundo está formado por sedimentos inorgánicos producidos principalmente por erosión de las rocas.

Los procesos que influyen y modifican la reflectancia espectral de los cuerpos de agua naturales (i.e. su color) son la absorción y dispersión producidas por las sustancias presentes en el agua. Estas son llamadas propiedades ópticas inherentes (IOP, Preisendorfer, 1961), ya que no dependen de la distribución angular del campo de luz incidente sino sólo del tipo y concentración de sustancias presentes en el medio. Por otro lado las propiedades ópticas aparentes (AOP), tales como la radiancia, la reflectancia y la reflectancia teledetectada, dependen de la geometría de iluminación así como de la naturaleza y cantidad de las sustancias presentes en el medio. Otra propiedad

óptica inherente es el coeficiente de atenuación (c) que es la suma de los coeficientes de absorción (a) y dispersión (b) (todos ellos con unidades de m^{-1}),

$$c = a + b \quad (2.2.3)$$

A su vez, la dispersión puede dividirse en una dispersión hacia delante (b_f) y otra hacia atrás o retrodispersión (b_b)

$$b = b_f + b_b \quad (2.2.4)$$

Existen varios caminos posibles para obtener información sobre la concentración de las sustancias ópticamente activas presentes en el agua a partir de la radiancia sensada remotamente.

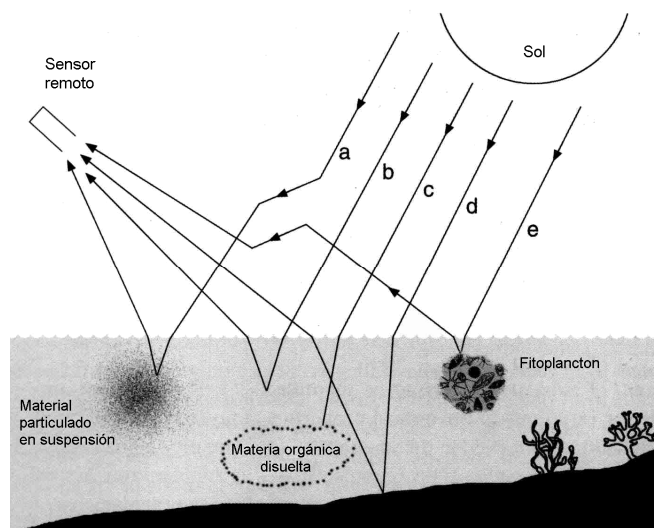


Figura 2.1.6. Procesos que influyen en la luz que emerge del agua (adaptado de IOCCG, 2000). a) dispersión hacia arriba debido al material particulado en suspensión; b) dispersión hacia arriba debido a las moléculas de agua; c) absorción debido a la materia orgánica disuelta (o sustancia amarilla); d) reflexión del fondo; y e) dispersión hacia arriba debido al fitoplancton.

Uno de ellos está representado por los modelos de inversión que permiten obtener información cuantitativa del tipo y concentración de las sustancias presentes a partir de la variación espectral y de la magnitud de la señal que proviene del agua. Los algoritmos empíricos se obtienen mediante una regresión estadística entre radiancias o reflectancias en ciertas longitudes de onda y la concentración de componentes específicos como el fitoplancton y sedimentos en suspensión medida *in-situ*. Los algoritmos empíricos que se utilizan para estimar la concentración de clorofila-*a* aprovechan o hacen uso de las propiedades ópticas del principal y más abundante pigmento fotosintético, la clorofila-*a*, lo que resulta en una mayor absorción (o menor

reflectancia) en la región azul del espectro. La tendencia observada es que a medida que aumenta la concentración de fitoplancton (clorofila-*a*), la reflectancia disminuye en la región del azul (400 nm) y aumenta en la región del verde (515-600 nm) (Figura 2.1.7). De esta manera, los algoritmos utilizan la diferencia o el cociente de las reflectancias medidas en estas dos longitudes de onda y los relacionan con la concentración de clorofila (*Cla*-sat). La ventaja de utilizar el cociente entre dos bandas es que se compensa parcialmente la influencia de otras sustancias que puedan estar presentes en el agua y también se disminuyen algunos de los efectos producidos por la atmósfera y que no fueron completamente eliminados con la corrección atmosférica.

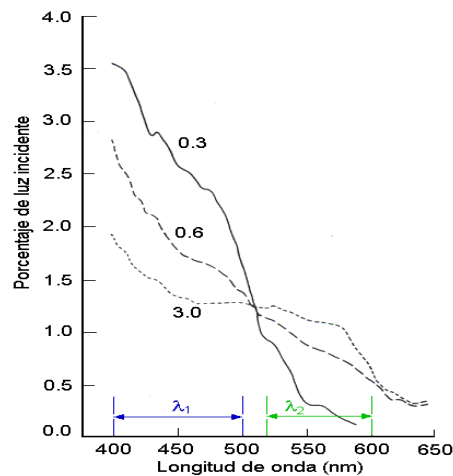


Figura 2.1.7 Dependencia de la reflectancia en función del contenido de fitoplancton (adaptado de Kirk, 1994). La concentración de clorofila, en mg m^{-3} , está indicada sobre cada una de las curvas. También está indicado el rango de longitudes de onda donde se encuentran las bandas que se utilizan en los algoritmos empíricos, en la región del azul (λ_1) y en el verde (λ_2).

Los algoritmos empíricos se obtienen a partir de mediciones de campo de la concentración de clorofila-*a* y de la radiancia o reflectancia teledetectada (R_{RS}) mediante una regresión del logaritmo de clorofila-*a* y el logaritmo del cociente de las reflectancias en el azul (λ_1) y el verde (λ_2), o $R_{\lambda_1}^{\lambda_2} = R_{RS}(\lambda_1)/R_{RS}(\lambda_2)$. Las longitudes de onda (λ_1 y λ_2) dependen del sensor a utilizar. Así, la forma funcional de los algoritmos empíricos es

$$\log_{10} Cla = a_0 + a_1 R^1 + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4 + \dots + a_n R^n$$

donde R es el \log_{10} de $R_{\lambda_1}^{\lambda_2}$. Los coeficientes a_i se obtienen del ajuste los datos a una ecuación polinómica (Figura 2.1.8).

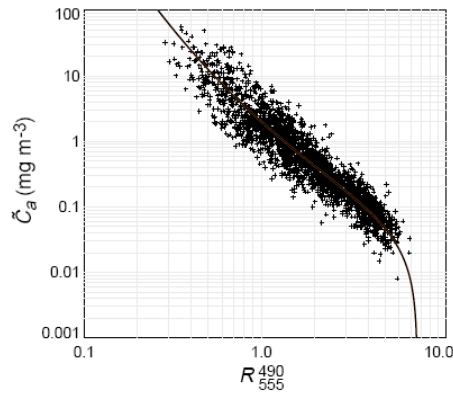


Figura 2.1.8 Gráfico de dispersión en escala logarítmica de valores medidos de C_a (\hat{C}_a) y del cociente de reflectancias medidas en las bandas 490 y 555 (R_{555}^{490}). Los datos provienen de una gran base de datos (N=2804) a partir de la cual se generó el algoritmo OC2 versión 4 (curva negra en el gráfico). (Gráfico modificado de O'Reilly *et al.*, 2000).

Para valores de clorofila-*a* menores a $0,6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ el cociente R_{555}^{443} (en el caso del SeaWiFS) o R_{550}^{443} (en el caso del MODIS) resulta muy útil. Pero a mayores concentraciones la señal que sale del agua en la región azul del EEM es muy pequeña, por lo que se utilizan las reflectancias en longitudes de onda más altas, R_{555}^{490} o R_{555}^{510} para el SeaWiFS y R_{550}^{448} para el MODIS. Hay algoritmos que tienen en cuenta esto y utilizan el valor máximo de los cocientes previamente mencionados. La ventaja que tienen los algoritmos empíricos es que son simples, fáciles de derivar, implementar y probar. Pero debido a su naturaleza, generalmente tienen una validez regional y son muy sensibles a cambios en la composición de las sustancias que se encuentren en el agua (Ej. cambios diarios y estacionales).

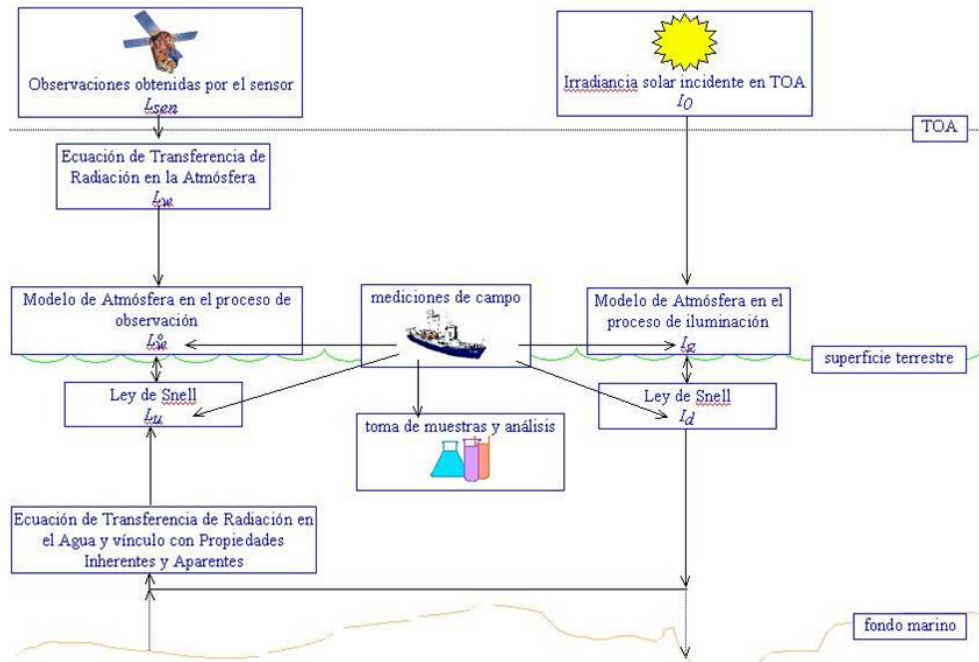


Figura 2.1.9. Esquema que muestra las etapas involucradas en la generación de un algoritmo para la estimación de la clorofila-a a partir de datos SeaWiFS y MODIS.

2.1.3 Tipo de datos

Las imágenes provenientes de los sensores AVHRR, SeaWiFS y MODIS tienen una resolución espacial de 1,1 km (nominal) y el ancho de la pasada es de 2700 y 2801 km, respectivamente (ver Apéndice A). A este tipo de datos se los llama LAC (*Local Area Coverage*) o HRPT (*High Resolution Picture Transmission*), dependiendo de cómo haya sido obtenida la imagen. La capacidad de almacenar información a bordo del satélite generalmente es limitada. Por lo tanto sólo se guarda información de algunas zonas previamente elegidas; éste tipo de imágenes son las LAC, mientras que las HRPT son obtenidas regionalmente desde las antenas de recepción. La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) tiene antenas receptoras de las imágenes AVHRR, SeaWiFS y MODIS en La Falda, Córdoba.

2.1.4 Cadena de Procesamiento para la generación de imágenes de TSM Y clorofila-a a partir de datos AVHRR y SeaWiFS/MODIS de alta resolución

Los sensores AVHRR, SeaWiFS y MODIS reciben radiación del espectro electromagnético en función de la ubicación de los canales espectrales presentes en cada uno. Los sensores AVHRR y SeaWiFS tienen la capacidad de discriminar la energía en 1024 (2^{10}) niveles distintos y el sensor MODIS en 4096 (2^{12}). Los niveles así obtenidos se denominan “contajes” ó “digital numbers” y no representan ninguna magnitud física,

sin embargo, los programas (softwares) de procesamiento permiten aplicar los coeficientes de calibración al importar los datos de los sensores al formato específico del software, de modo que los valores de los píxeles tengan unidades de radiancias (térmico) y/o reflectancias (visible). Una vez obtenidas las radiancias y reflectancias a partir de los coeficientes de calibración, es posible aplicar los algoritmos específicos sobre cada píxel de la imagen, para obtener imágenes de temperatura superficial del mar o concentración de clorofila-*a*.

La obtención de un mapa final de un producto geofísico, en este caso TSM (°C) y concentración de clorofila-*a* (mg m⁻³), implica aplicar una serie de procesamientos a la imagen original que llega a la antena receptora. A través de esta cadena de procesamiento se van obteniendo archivos o imágenes con un nivel de procesamiento cada vez mayor.

Las cadenas de procesamiento aplicadas tanto a las imágenes AVHRR y SeaWiFS/MODIS involucran las siguientes etapas:

1. Conversión de los datos crudos al formato específico del programa de procesamiento.
2. Eliminar del análisis los píxeles tierra, proceso que en general se denomina como "máscara", y que consiste en asignar un valor igual a todos los píxeles tierra, por ejemplo el cero.
3. Identificar y eliminar del análisis los píxeles correspondientes a nubes. Esto también constituye en definitiva una máscara, pero un análisis detallado se requiere en primera instancia para determinar si un píxel es "nube" o no, por ello el proceso se denomina generalmente "filtro" de nubes.
4. Transformar la imagen original, que tiene un sistema de coordenadas propio de archivo, a una imagen con un sistema de coordenadas definido (lat-long, Mercator, etc.), de modo que las imágenes puedan ser utilizadas con datos biológicos y oceanográficos mediante un sistema de información geográfica (SIG). Este proceso se denomina "corrección geométrica" de la imagen, y se realiza mediante un conjunto de puntos de control (GCP, "ground control points"), que el sensor adquiere en coordenadas lat-long cada cierta cantidad de píxeles en el mismo momento en que toma los datos de la imagen.
5. Convertir los valores de radiancia (energía por unidad de área) a valores de temperatura de brillo para las bandas térmicas 3, 4 y 5 del sensor AVHRR y de reflectancia para las bandas ópticas de los sensores SeaWiFS y MODIS (calibración

radiométrica).

6. Aplicar un algoritmo de TSM o clorofila-*a* sobre los valores de temperaturas de brillo y reflectancia, respectivamente para obtener las imágenes correspondientes.

El orden de las etapas 4 y 5 puede cambiar. En el caso de SeaWiFS/MODIS primero se aplica el algoritmos de clorofila-*a* y luego de realiza la corrección geométrica.

Las imágenes AVHRR fueron procesadas mediante el programa ERDAS Imagine 8.7. La Figura 2.1.10 muestra la secuencia de procesamiento. Las letras “A”, “B”, y “C” indican los modelos que fueron desarrollados mediante el módulo de pseudo-programación "Model Maker" del software ERDAS. El proceso 2 ocurre dentro del modelo “A”, los procesos 4 a 7 se realizan dentro del modelo “B”, mientras que los procesos 8 a 10 tienen lugar en el modelo “C”.

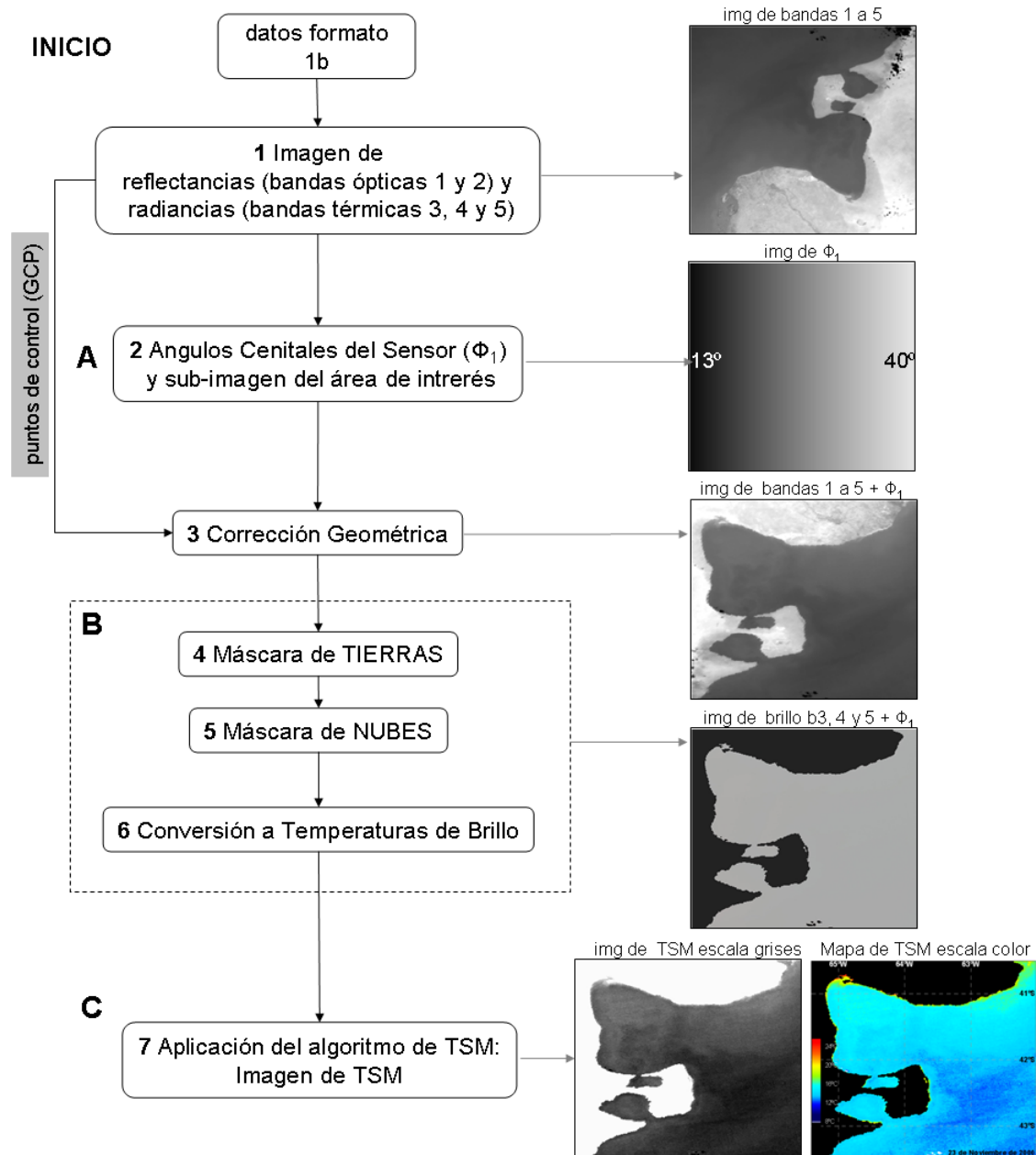


Figura 2.1.10. Metodología para la generación de imágenes de TSM a partir de datos AVHRR de alta resolución. Las imágenes de la derecha ejemplifican los distintos productos intermedios del procesamiento (adaptado de Bava, 2004).

El procesamiento de las imágenes SeaWiFS y MODIS se realizó mediante el programa de distribución libre llamado SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System). La Figura 2.1.11 muestra la serie de procesamientos que se realizan a las imágenes SeaWiFS y MODIS.

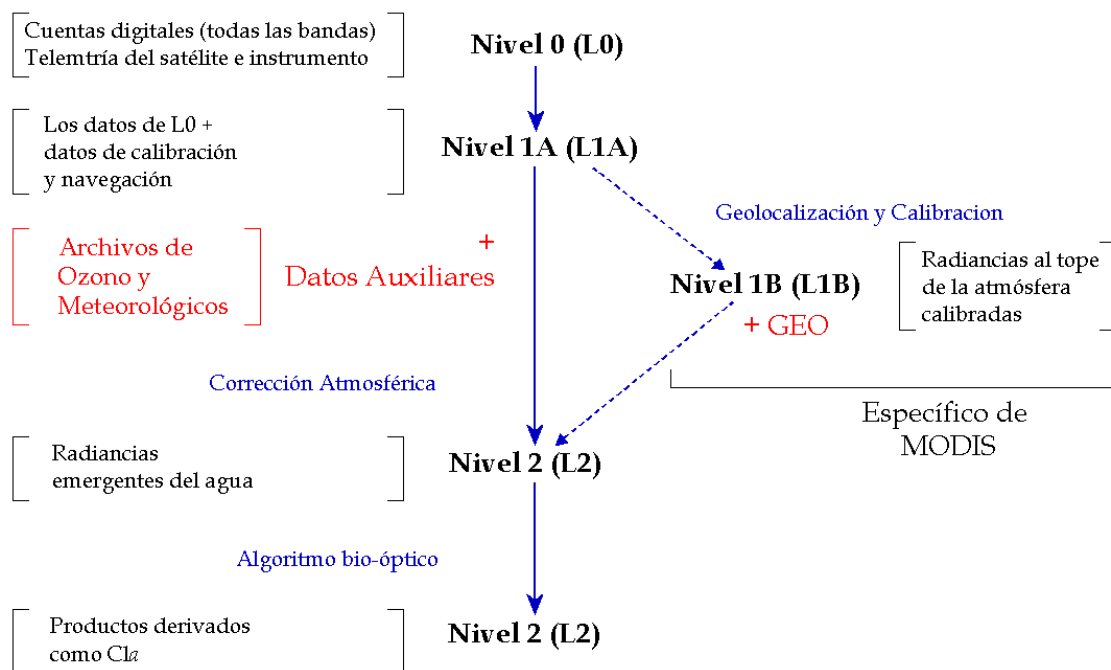


Figura 2.1.11. Cadena de procesamiento de las imágenes SeaWiFS y MODIS (adaptado de Dogliotti, 2006). En la parte central se encuentran el nivel de procesamiento, entre corchetes Figura la descripción de la imagen en cada nivel, en azul el proceso que se aplica y en rojo los datos auxiliares que se necesitan. Estos últimos pueden obtenerse de otros satélites (Datos auxiliares) o a partir de otro procesamiento de la misma imagen (archivos GEO en el caso de las imágenes MODIS).

Las imágenes SeaWiFS y MODIS generalmente son distribuidas, ya sea por la CONAE (www.conae.gov.ar) o por la NASA (oceancolor.gsfc.nasa.org), en los niveles 1A o 2 (Figura 2.1.11, ver detalle y explicación en el Apéndice A). La corrección atmosférica utiliza datos auxiliares que comprenden la concentración de ozono presente en la atmósfera y los datos meteorológicos, tales como la dirección meridional y zonal del viento, su velocidad, la presión atmosférica y la humedad relativa. Para procesar las imágenes puede utilizarse esta información proveniente de una base de datos climatológica o en tiempo casi real (NRT o Near Real Time). Los datos de ozono son obtenidos del sensor EPTOMS (Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer). Estos consisten en mapas diarios globales del total de ozono en la columna en las partes iluminadas del globo actualizados cada 4 horas. Los datos meteorológicos son provistos por el National Center for Environmental Prediction (NCEP). Los dos tipos de datos se encuentran en formato HDF y pueden ser obtenidos a través de la página del Ocean Color Group (OCG) (<ftp://oceans.gsfc.nasa.gov/METOOZ/>). Utilizando el programa msl12 (del programa SeaDAS) junto con los datos auxiliares se procesa la imagen nivel 1A (en el caso de SeaWiFS) o 1B junto con el archivo GEO (para las MODIS) con el fin de obtener la imagen nivel 2 con el producto geofísico deseado (por ejemplo

CAPITULO 2- MATERIALES Y MÉTODOS

concentración de clorofila-*a*). En este procesamiento se enmascara tanto la tierra como las nubes ya que los píxeles así identificados no poseen información útil para el estudio del mar. También se obtienen una serie de indicadores de calidad o *flags* para cada píxel (Tabla 2.1.2). A diferencia de las máscaras utilizadas por el programa (como el de la tierra, nube/hielo, etc.) que excluyen los datos previamente al procesamiento y obtención de los productos, los controles de calidad denotan la condición del píxel analizado y es procesado al nivel 2 pero con un indicador de condición dudosa del mismo (Robinson *et al.* 2003)

Una vez obtenidas las imágenes de TSM y clorofila-*a* se procede a asignar una escala de colores a los distintos valores para obtener los mapas correspondientes.

Tabla 2.1.2 Listado de los indicadores de calidad o *flags* que utiliza el programa SeaDAS.

Bit	Nombre	Descripción
01	ATMFAIL	Falla en la corrección atmosférica
02	LAND	Píxel sobre tierra
03	BADANC	Datos auxiliares de baja calidad
04	HIGLINT	Alta reflexión especular (sunglint)
05	HILT	Radiación medida muy alta o saturada
06	HISATZEN	Angulo cenital del observación (sensor) alto
07	COASTZ	Píxel en aguas someras
08	NEGLW	Radiancia emergente negativa
09	STRAYLIGHT	Probable contaminación por píxel brillante
10	CLDICE	Probable contaminación por nube o hielo
11	COCCOLITH	Detección de Cocolitofóridos
12	TURBIDW	Detección de aguas turbias
13	HISOLZEN	Angulo cenital solar alto
14	HITAU	Densidad óptica de aerosoles alta
15	LOWLW	Radiancia emergente muy baja (sombra por nube)
16	CHLFAIL	Falla en el algoritmo para obtener el producto
17	NAVWARN	Calidad de la navegación reducida
18	ABSAER	Probable presencia de aerosoles que absorben
19	TRICHO	Probable contaminación por <i>Trichodesmiun</i>
20	MAXAERITER	Iteraciones para corregir aerosoles superó el valor máximo
21	MODGLINT	Contaminación moderada por reflexión especular
22	CHLWARN	Calidad del producto derivado reducida
23	ATMWARN	Corrección atmosférica dudosa
24	DARKPIXEL	Radiancias negativas luego de la corrección por Rayleigh
25	SEAICE	Probable contaminación por hielo marino
26	NAVFAIL	Mala navegación
27	FILTER	Píxel rechazado a partir de un filtro realizado por el usuario
28	SSTWARN	Calidad del producto SST (Sea Surface Temperature) reducida
29	SSTFAIL	Calidad de l producto SST mala
30	HIPOL	Alto grado de polarización (para MODIS)
31	SPARE	Libre o no utilizado
32	OCEAN	Píxel que no está en la tierra ni está contaminado por nubes

2.2 Técnica de trabajo en campañas oceanográficas

2.2.1 Diseño de muestreo

El relevamiento espacio-temporal del área del golfo San Matías se realizó mediante el registro de temperatura en la columna de agua y la obtención de muestras de agua en 6 campañas oceanográficas realizadas a bordo de los guardacostas de Prefectura Naval Argentina “Río Paraná” y “La Plata” (Tabla 2.2.1). El diseño de muestreo se realizó sobre la base de estudios previos (Carreto, 1974; Piola & Scasso, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004; Williams 2004) y comprendió entre 17 y 26 estaciones (Figura 2.2.1).

Tabla 2.2.1. Campañas realizadas en el Golfo San Matías donde se obtuvieron datos de temperatura y clorofila-*a*.

Campaña	Período	Estación	Número de datos en superficie
GSM-I-07	23-27 Junio 2007	otoño	25
GSM-II-02	17-19 Octubre 2007	primavera	18
GSM-III-08	20-23 Febrero 2008	verano	26
GSM-IV-08	19-21 Junio 2008	otoño	25
GMS-V-08	27-30 Noviembre 2008	primavera	23
GMS-VI-08	2-3 Octubre 2009	primavera	17

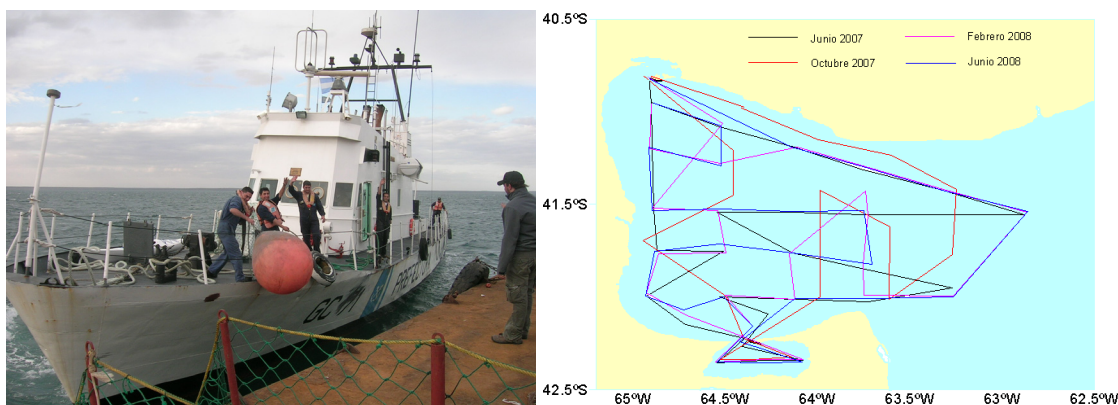


Figura 2.2.1. a) Embarcación utilizada como plataforma científica. b) Transectas realizadas por los Guardacostas de Prefectura Naval Argentina durante las campañas SANMA entre el 2007 y 2008.

2.2.2 Técnicas de muestreo de aguas y tratamiento de las muestras a bordo

Las mediciones de presión, temperatura y conductividad se realizaron en la columna de agua con una sonda multiparamétrica YSI 6600v2 (Figura 2.2.2). La toma de muestras para los análisis químicos (determinación de nutrientes y clorofila-*a*) se realizó con ayuda de un balde en superficie y de botellas tipo van Dorn a profundidad media (por encima de la termoclina) y en el fondo (80-150 m). La botellas van Dorn son recipientes de plástico de 2.5L de capacidad (Figura 2.2.3): están provista de un tapón cónico en cada extremo y fueron descendidas por medio de un cable oceanográfico



Figura 2.2.2: Sonda multiparamétrica

con ambos tapones en la posición abierta (conectados por un cabo entre sí) de modo de permitir la libre circulación de agua a través de ella durante el descenso. Cuando la botella ha llegado a la profundidad establecida, un mensajero de bronce es lanzado desde el barco. Este mensajero que se desliza a través del cable oceanográfico, sirve para desconectar las válvulas, las cuales tapan los extremos de la botella, cerrándola.

Transcurrido el tiempo necesario para que la botella se haya cerrado, se comienza el izado de la misma. Una vez situada a la altura de la plataforma del buque, se saca el mensajero que se encuentra en la parte superior y se retira del cable oceanográfico para ser llevada a su soporte cuidando de que el transporte se efectúe manteniéndola vertical. Luego se envasan las muestras de agua en sus correspondientes frascos. Las muestras se utilizan para efectuar análisis de componentes como salinidad, concentración de nutrientes y clorofila-*a*.



Figura 2.2.3: Botella van Dorn.

Las muestras de agua para la determinación de nutrientes fueron almacenadas por duplicado en frascos de policarbonato de 100 ml con tapa sellada y conservadas en freezer a -18 °C.

Las muestras para la determinación de clorofila-*a* fueron conservadas durante no más de 15 minutos en botellas de un litro en oscuridad luego de tomar la muestra desde la botella van Dorn. Este volumen fue filtrado mediante filtros tipo GF/F de 47 mm de

diámetro y 0,45 μm de poro utilizando una bomba de vacío. Una vez finalizado el proceso el filtro se pliega sobre si mismo, se lo envuelve en papel aluminio y se lo almacena en bolsas tipo *ziplock* en freezer a -20°C hasta el momento del análisis en laboratorio.

El procedimiento de muestreo en el golfo San Matías para la obtención de las muestras utilizadas en el presente trabajo se observa en el diagrama de la Figura 2.2.4.

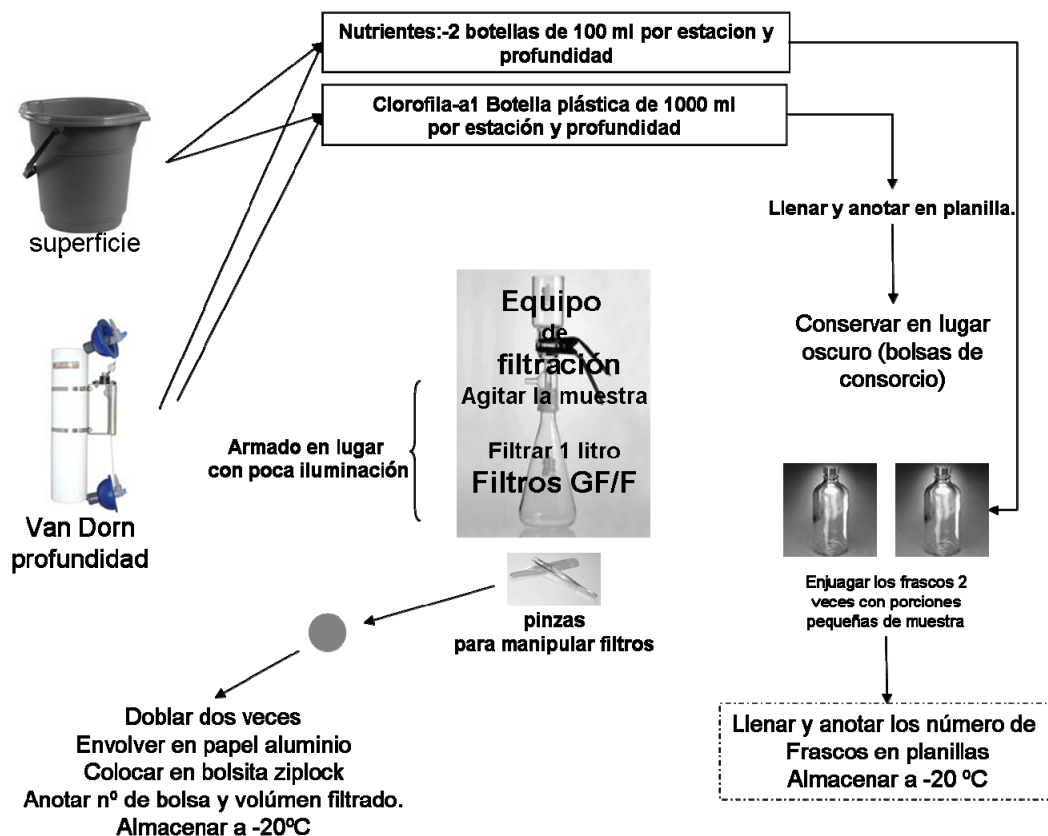


Figura 2.2.4: Protocolo para el tratamiento de las muestras de agua a bordo de la embarcación.

2.2.3 Metodología de trabajo en el laboratorio

Los análisis químicos para la determinación de concentración de nutrientes y clorofila-*a* en las muestras de agua se llevaron a cabo en el Laboratorio de Oceanografía y Contaminación de Aguas del CENPAT. A continuación se describen las técnicas y equipamiento utilizado para dichas determinaciones:

Nutrientes

Las muestras de agua para la determinación de nutrientes fueron descongeladas en laboratorio previo al análisis. El equipo utilizado para determinar las concentraciones de

cada nutriente, fue un autoanalizador de flujo segmentado SKALAR (SAN^{plus}SYSTEM II), con cuatro canales para análisis simultáneos de nitratos+nitritos, amonio, fosfato y silicatos.

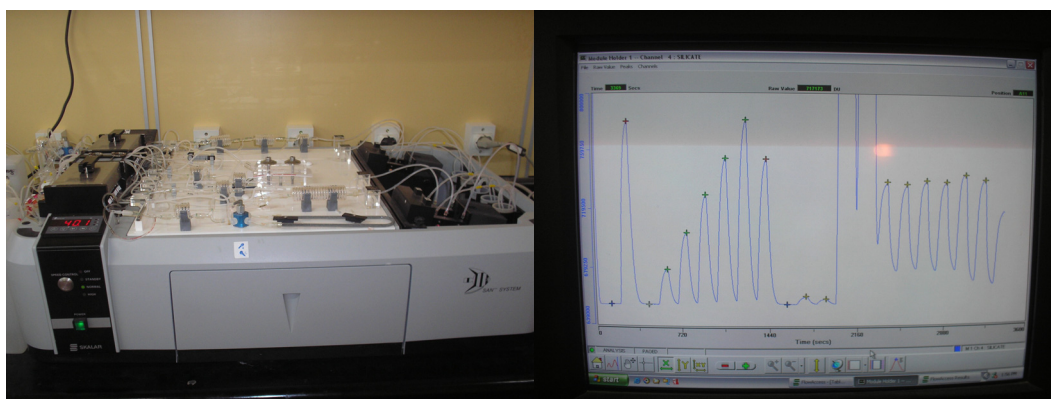


Figura 2.2.5: a) Autoanalizador Skalar (modulo de análisis químico) b) Resultados de las determinaciones en pantalla.

Los principios químicos en los que se fundamenta el funcionamiento del autoanalizador de nutrientes, se describen a continuación:

Análisis de nitrato+nitrito. La determinación de nitrato y nitrito se basa en el método de reducción por cadmio; la muestra se mantiene a pH 8,2 mediante una sustancia buffer y traspasa una columna que contiene gránulos de cobre y cadmio, donde el nitrato es reducido a nitrito. El nitrito (el presente y el producido por reducción del nitrato) es disociado con sulfanilamida y asociado con N-1-Naftiletildiamina para formar un compuesto azoico altamente coloreado que se mide a espectrofotométricamente a 540 nm. El rango de detección de esta técnica es de 2-100 ppb /0.1-40 ppm N (por predilución del dializador) (Skalar Analytical V.B. 2005a).

Análisis de Fosfato. La siguiente reacción es utilizada en la determinación de Fosfato: heptamolibdato de amonio y potasio-antimonio-(III)-óxido-tartrato reaccionan en un medio ácido con soluciones diluidas de fosfato para formar un complejo antimonio-fosfo-molibdato. El compuesto se reduce a un complejo de color azul mediante ácido L(+)-ascórbico que se mide espectrofotométricamente a 880 nm. El rango de detección en este caso es de 2-100 ppb P /0.1-40 ppm P (por predilución del dializador) (Skalar Analytical V.B. 2005b).

Análisis de Silicato. El procedimiento automático que permite la determinación de silicato se basa en la siguiente reacción: la muestra es acidificada y mezclada con una solución de heptamolibdato de amonio para formar ácido silicomolíbico. El ácido silicomolíbico se reduce con ácido L(+)-ascórbico a un colorante azul, el cuál se mide

a 810 nm. Se agrega ácido oxálico para evitar la interferencia de fosfato. El rango de detección de esta técnica es de 2-100 ppb Si ppb /0.1-40 ppm Si (por predilución del dializador) (Skalar Analytical V.B., 2005a).

Clorofila-a

Las determinación de la concentración de clorofila-*a* está basada en la técnica de Strickland & Parsons (1972). En laboratorio cada filtro obtenido a bordo se colocó en un tubo de centrifuga de 15 ml, se agregaron 10 ml de acetona al 90%, se taparon y se agitaron con vórtex. Se colocaron los tubos en heladera (4°C), en completa oscuridad alrededor de 24 horas para que los pigmentos sean extraídos durante este tiempo. Una vez completado el tiempo se sacaron los tubos de heladera y hasta que tomaron temperatura ambiente en oscuridad. El contenido de cada tubo se centrifugó a temperatura ambiente por 10 minutos. Para medir la fluorescencia de las muestras se utilizó un Fluorómetro Turner® (Figura 2.2.6). Suponiendo que la presencia de feopigmentos en las muestras la fluorescencia de cada muestra se midió en la puerta adecuada (R_a), habiendo previamente llevado a “cero” con acetona al 90%, luego se agregaron 2 gotas de HCl al 5 % v/v en el tubo de lectura y se volvió a medir la fluorescencia (R_d) aproximadamente 30 segundos después.

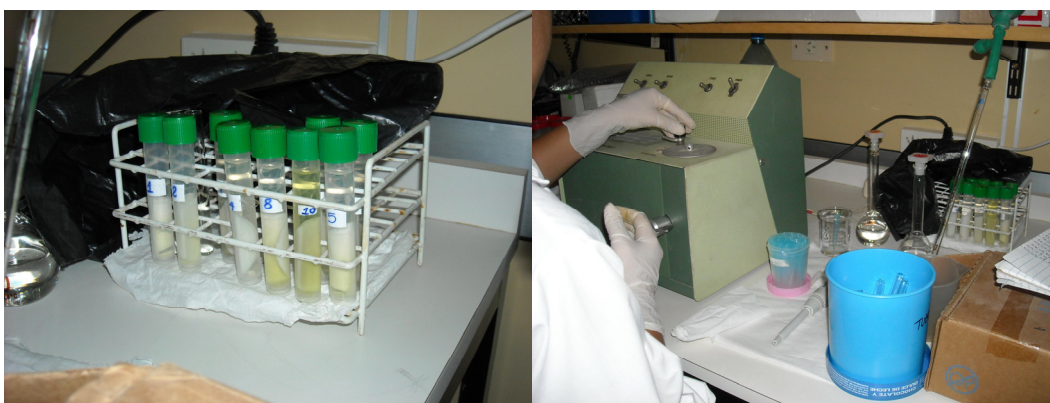


Figura 2.2.6. a) extractos de clorofila-*a*. b) Fluorómetro Turner®.

La concentración de clorofila-*a* y de feopigmentos se calculó de acuerdo a

$$\text{Clorofila- } a(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}) = Fd \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot (R_a - R_d) \cdot \frac{v}{V}$$

$$\text{Feopigmentos } (\text{mg}\cdot^{-3}) = Fd \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot (\alpha R_d - R_a) \cdot \frac{v}{V}$$

Donde:

Fd = Factor para la puerta en que se ha realizado la lectura. En este caso:

$$Fd_{\text{puerta 1}} = 6,667$$

$$Fd_{\text{puerta3}} = 2,174$$

$$Fd_{\text{puerta10}} = 0,799$$

α = Relación Ra/Rd para la clorofila con que se ha realizado la calibración. (En este caso $\alpha = 1,4$ y $\alpha/(\alpha-1) = 3,5$ - En Parsons *et al.*, (1984) trabajan con $\alpha = 2,2$ y $\alpha/(\alpha-1) = 1,83$)

Ra = lectura de la muestra antes de la acidificación.

Rd = lectura de la muestra luego de la acidificación.

v = volúmen de extracto de acetona al 90 %, en ml

V = volúmen de muestra de agua de mar filtrado (en ml, para nuestro caso).

En el texto de la tesis a la concentración de clorofila-a determinadas en el laboratorio de la indicará como “*in-situ*”. Si bien no es una verdadera medición *in-situ*, se la referencia de este modo para ser consistente con diversas publicaciones internacionales (Fuentes-Yaco *et al.*, 2005) Tilstone *et al.*, 2011; Werdel *et al.*, 2009).

2.3 Obtención de datos biológicos pesqueros.

La flota industrial del GSM está formada por buques relativamente pequeños (entre 20 y 36 m de eslora y 400 a 800 HP), de entre 15 y 30 años de antigüedad y no poseen tecnología de avanzada para la búsqueda de cardúmenes, excepto navegadores computarizados guiados por sistemas de GPS. El Sistema de Monitoreo Pesquero y Oceanográfico (SiMPO) suministró, mediante transmisiones realizadas cada 96 minutos, información de la posición, rumbo y velocidad instantánea de cada buque de la flota industrial, a través del sistema Inmarsat D+ (González *et al.* 2004b, González com. pers.) correspondiente al período enero 2004 a diciembre 2006.

Los datos de muestreos cuasi-mensuales fueron obtenidos a bordo por personal del Programa de Observadores Pesqueros (POP), a partir de capturas comerciales (2004 a 2006) siguiendo los protocolos que se describirán a continuación.

2.3.1. Programa de Observadores Pesqueros (POP)

Se utilizó información obtenida por el POP del IBMPAS desde 2004 a 2006. En el caso de la flota de arrastre, la información consistió en datos de los lances de pesca (posición, profundidad, duración del lance), capturas por especie, estimaciones del descarte en peso y número y muestreos de distribuciones de tallas de las capturas de merluza y otras especies relevantes en cuanto a su abundancia. La información provista fue cuasi-mensual e incluyó datos obtenidos a partir de submuestras de merluza separadas a bordo (ver 2.3.2 Procesamiento de muestras).

2.3.2 Procesamiento de las muestras

En el caso de merluza, se tomó una muestra aleatoria de al menos 400 ejemplares (o el total si se hubieran capturado menos), los cuales fueron medidos al centímetro inferior y se registró el sexo. De cada muestra se obtuvo una submuestra de ejemplares para ser procesados en laboratorio, separando uno de cada cinco individuos de cada sexo y para cada intervalo de tallas de un centímetro. Las submuestras se analizaron en el laboratorio del IBMAS, donde se registró la talla al centímetro inferior, el sexo, peso del ejemplar, de las gónadas y del hígado al gramo inferior de todos los ejemplares.

2.4 Tratamiento numérico de los datos

El tratamiento estadístico particular de los datos satelitales y de campo se detallara en los capítulos correspondientes a su análisis. En el caso de los datos satelitales se presentaran las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los mapas estadísticos (medias, desvíos estándar, máximos, mínimos) en el capítulo 3 sección 1. Los datos de campo serán analizados mediante el método de interpolación de *krigging* y técnicas multivariadas en el capítulo 3 sección 2. Los análisis de correlación entre datos de temperatura y clorofila-*a* satelitales y de campo se presentarán en el capítulo 3 sección 3. En el capítulo 4 se detallará la metodología utilizada para la identificación de frentes oceanográficos en imágenes satelitales y finalmente en el capítulo 5 se explicará el tratamiento y la correlación entre datos ambientales y pesqueros.

3.1 Variabilidad espacio-temporal de temperatura superficial y clorofila-*a* determinadas mediante sensoramiento remoto (AVHRR y SeaWiFS).

3.1.1 Introducción

La temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila-*a* de la capa superficial del mar obtenida a partir de sensores satelitales constituyen parámetros oceanográficos ampliamente utilizados para analizar la dinámica del océano (Robinson, 1994; IOCCG, 2000), particularmente para caracterizar los procesos físicos y químicos que ocurren en la superficie del mar. La TSM también es utilizada como condición de borde para modelos meteorológicos, como un factor central en estudios de flujo océano-atmósfera y como un indicador del clima y sus variaciones. El producto clorofila-*a* (Cla-sat) es utilizado en modelos ecológico-pesqueros, modelos de estimación de producción primaria (IOCCG, 2009; Lutz *et al.*, 2010) y de los ciclos biogeoquímicos, particularmente el ciclo del carbono, orientado a estimar la tasa de fijación de CO₂ en relación al calentamiento global.

Los registros de TSM mediante imágenes obtenidas a partir del sistema satelital NOAA-AVHRR se vienen realizando desde hace más de 20 años en forma ininterrumpida mientras que los registros de Cla-sat comenzaron en el año 1978 con el sensor *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) y se interrumpieron en 1986 (Gordon *et al.*, 1980; Hovis *et al.*, 1980; Feldman *et al.*, 1989). Una década después se pusieron en órbita sensores más sofisticados, siendo operacionales al momento los sensores SeaWiFS, MODIS y MERIS (*MEdium Resolution Imaging Spectrometer*), entre otros.

Los registros de TSM y Cla-sat mediante sensores remotos permiten cubrir extensas zonas del océano en una sola imagen, proveyendo así una vista cuantitativa de la capa superficial del mar. La cobertura nubosa es la principal limitación de este tipo de datos, ya que la presencia de nubes no permite la teledetección en las regiones óptica e infrarroja del espectro electromagnético (Kelly, 1985; McClain *et al.*, 1995). Una solución a este problema consiste en efectuar un ensamble de varias imágenes consecutivas en el tiempo, lo que permite incrementar la disponibilidad de imágenes a expensas de la pérdida de resolución temporal que significa considerar imágenes semanales o mensuales en lugar de las imágenes diarias originales (NASA/NOAA 1995).

En el Atlántico Sudoccidental (ASO) se ha estimado el ciclo anual de TSM utilizando cuatro años de datos AVHRR (julio 1984-julio 1988), con una integración de la información de TSM cada cinco días (Podestá *et al.*, 1991). También se han utilizado series de imágenes de similar extensión con fines descriptivos, pero su análisis se ha centrado principalmente en

la zona de confluencia de las corrientes de Malvinas y Brasil (Olson *et al.*, 1988; Provost *et al.*, 1992; Goñi *et al.*, 1996; Bianchi & Garzoli, 1997). La posibilidad de contar con una serie de imágenes AVHRR de 11 años de extensión (1987-1998), permitió describir la climatología de la TSM en el ASO generando imágenes de esta variable a fin de determinar las condiciones medias, máximas y mínimas de la TSM (Bava, 2004).

En el GSM los primeros trabajos que involucraron la utilización de información satelital fueron llevados a cabo mediante el análisis de imágenes Landsat TM/ETM+ correspondientes al período 1997-2003 (Gagliardini & Rivas, 2004). El canal térmico de los sensores TM/ETM+ permitió obtener una distribución detallada de la temperatura superficial de brillo, e identificar la existencia de frentes térmicos y realizar el posterior análisis de su variabilidad a lo largo del año. Asimismo, fue posible observar la influencia, mediante información de los canales térmicos y ópticos, del agua que ingresa desde la plataforma continental por el sector sudeste del Golfo y la interacción con la dinámica de las aguas del GSJ (Amoroso & Gagliardini, 2010). Los resultados obtenidos mediante esta información de alta resolución espacial (60-120 m), contribuyeron a corroborar las características ambientales inferidas mediante datos de campañas oceanográficas (Carreto *et al.*, 1974; Piola & Scasso, 1988). Los ciclos térmicos de las áreas norte ($41^{\circ} 11' S$; $064^{\circ} 28' W$) y sur ($42^{\circ} 4' S$; $064^{\circ} 17' W$) del Golfo, fueron calculados mediante valores mensuales de TSM del sensor AVHRR promediados en el periodo 1987-1998 (datos de Pathfinder de 9 Km (0.08°) de resolución espacial) y datos de temperatura de brillo obtenidos por el sensor ETM+ para las mismas áreas (Gagliardini & Rivas, 2004). Según lo esperado, los valores de TSM obtenidos por el sensor AVHRR fueron siempre mayores a los calculados por el sensor ETM+ debido a que las características del último no permiten realizar correcciones atmosféricas.

Los primeros estudios que utilizaron información satelital de color del mar en el ASO se llevaron a cabo utilizando imágenes SeaWiFS de área de cobertura global (GAC) en la región comprendida entre $40^{\circ}56'S$ y $070^{\circ} 55'W$ a lo largo de seis años de información (1998-2003) (Rivas *et al.*, 2006; Dogliotti, 2007). Estos estudios abarcaron el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la concentración de Cla-sat, y permitieron caracterizar el ciclo anual del promedio climatológico de la Cla-sat, encontrando un comportamiento diferencial de esta variable en los sectores norte y sur de la Plataforma Continental Patagónica. Del mismo modo, se encontró que las posiciones de los frentes y los máximos de Cla-sat están asociadas y fueron relativamente estables debido a la influencia de la topografía del fondo (Romero, 2008).

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de la variabilidad espacio-temporal de la TSM y Cla-sat estimados mediante sensores remotos en la región del GSM (comprendida entre los 40°30' - 42°30' S y 062° - 065° 12'W (Figura 3.1.1) a partir de 9 y 7 años de información de temperatura superficial (enero 2000-diciembre 2008) y color del mar (enero 2000-diciembre 2006) con 1,1 km de resolución espacial de los sensores AVHRR y SeaWiFS.

Este es el primer trabajo que analiza en forma simultánea la variabilidad espacio-temporal de TSM y Cla-sat con una serie relativamente extensa (9 y 7 años, respectivamente) de información de alta resolución espacial y temporal. El objetivo fue proveer una descripción detallada de la evolución espacial y temporal de TSM y Cla-sat en el GSM e identificar áreas con comportamientos particulares desde el punto de vista de la productividad biológica.

3.1.2 Metodología

Imágenes AVHRR y SeaWiFS correspondientes al período 2000-2008 y 2000-2006, respectivamente fueron solicitadas a la CONAE. Ambos sensores proveyeron información de área de cobertura local (LAC) y resolución semidiaria y diaria, respectivamente. La serie temporal de los sensores AVHRR y SeaWiFS (LAC) se encuentra disponible en CONAE a partir del año 1998 (<http://catalogos.conae.gov.ar/Orbview/default3.asp>). En esta tesis se utilizaron las imágenes obtenidas desde el año 2000, ya que es a partir de ese año que ha habido una continuidad diaria en la serie temporal. Las imágenes en formato 11b (AVHRR) y 11A (SeaWiFS) fueron procesadas con los programas ERDAS Imagine v8.7 y SeaDAS, respectivamente, según se explicó en el Capítulo 2. Los productos TSM y Cla-sat fueron calculados mediante los algoritmos MCSST (McLain, 1985) y OC4v4 (O'Reilly *et al.*, 2000), respectivamente. Las imágenes fueron rectificadas y georreferenciadas a un sistema de referencia esférico lat-long WGS84 con una resolución de 0,01° x 0,01° (1,1 km x 1,1 km) en el nadir. A partir de las imágenes originales que cubren toda el área de la plataforma patagónica, se extrajo la región comprendida entre los 40°30' - 42°45' S y 063°00' - 065° 12'W (Fig. 3.1.1). Las imágenes fueron examinadas y se

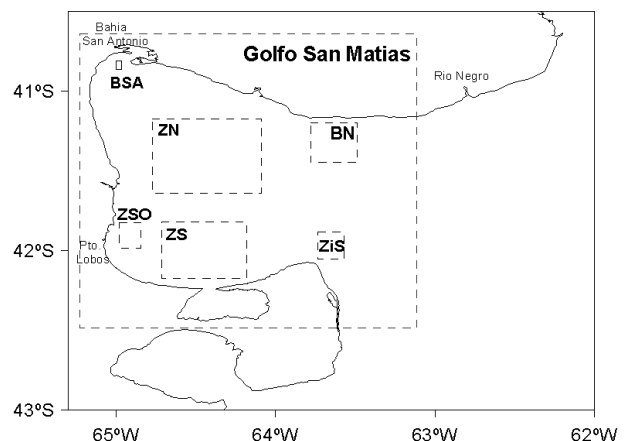


Figura 3.1.1: área de estudio (GSM) y ventanas de extracción de valores medios espaciales. ZN: zona norte, ZS: zona sur, BN: boca norte, ZiS: zona ingreso sur, ZSO: zona sudoeste, BSA: salida de la bahía de San Antonio.

seleccionaron aquéllas que tuvieran por lo menos un 80% del área de estudio sin nubes. Los píxeles correspondientes a la tierra y a las nubes fueron enmascarados, asignándoles un valor de 0 a nubes y 32 y -1 en el caso de tierra para las imágenes de TSM y Cla-sat respectivamente, no siendo tenidos en cuenta en los cálculos posteriores.

A fin de minimizar la presencia de valores de TSM contaminados por nubes se generó una nueva base de imágenes (Figura 3.1.2) integrando imágenes correspondientes a cinco días consecutivos, tomando en cada píxel el valor más alto registrado durante esos cinco días (Podestá *et al.*, 1991). Esto se debe a que la presencia de nubes que no son bien detectadas por el filtro utilizado (Capítulo 2) disminuyen el valor de la radiación electromagnética (REM) recibida por el sensor y por lo tanto el valor de TSM derivado de estas mediciones. De esta manera, para períodos cortos de tiempo, no se realiza un promedio de todas las imágenes sino que se considera el mayor valor como el más aproximado a la REM infrarroja térmica emitida por la superficie del agua (Bava, 2004). En el caso de Cla-sat se promediaron las imágenes correspondientes al mismo mes (Figura 3.1.3). Las imágenes resultantes para cada variable se denominaron $TSM_{5d}(2000-2008)$ y $Cla-sat_{men}(2000-2006)$. El estudio de la variabilidad espacial y temporal se realizó mediante el cálculo de los promedios mensuales de la TSM y Cla-sat.

Los cálculos realizados para determinar los índices estadísticos generales (media, desvío estándar, máximos, mínimos, etc.) de las series temporales de TSM y Cla-sat que definen la climatología del área del GSM son descriptos a continuación.

Cálculo de imágenes de TSM y Cla-sat promedio mensuales. Se calcularon imágenes medias mensuales de TSM y Cla-sat para cada año de las series temporales. En el caso particular de TSM los promedios mensuales se calcularon a partir de las imágenes máximas de cinco días. Las series de imágenes resultantes se denominaron $TSM_{men}(2000-2008)$ y $Cla-sat_{men}(2000-2006)$ respectivamente (Figura 3.1.2 y 3.1.3, respectivamente). Luego cada mes fue promediado a lo largo de los nueve y siete años analizados para ambos parámetros, obteniéndose una imagen promedio mensual climatológica para cada mes y su correspondiente desvío estándar. En todos los casos, los algoritmos generados consideraron la exclusión de los píxeles nublados para el proceso de cálculo.

El promedio de los valores registrados mensualmente en cada punto de las imágenes se calculó según la siguiente expresión:

$$V_{sat}(x_j) = \frac{1}{N} \sum_{i,j} V_{sat}(x_j, t_i) \quad (\text{Ecuación 3.1.1})$$

Del mismo modo, el desvío estándar (DS) de los valores registrados se calculó según:

$$DS(V_{sat0}(x_j)) = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (V_{sat}(x_j, t_i) - V_{sat}(x_j))^2}{N}} \quad (\text{Ecuación 3.1.2})$$

donde:

V_{sat0} : TSM o *Cl*-sat media

$V_{sat}(x_j, t_i)$: TSM o *Cl*-sat del píxeles *j* en la imagen *i*

N: número de imágenes

$DS(V_{0sat}(x_j))$: desvío estándar de TSM o *Cl*-sat

Tabla 3.1.1: Número de imágenes máximas de TSM cada 5 días por mes y año con menos del 20% de cobertura nubosa.

AVHRR (máxima de 5 días)	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	total	imágenes posibles	%
Enero	2	5	5	5	4	6	1	5	5	38	54	70,37
Febrero	2	6	6	5	4	4	3	3	6	39	54	72,22
Marzo	2	6	5	4	5	3	2	4	6	37	54	68,52
Abril	4	5	5	4	2	2	1	3	5	31	54	57,41
Mayo	0	3	2	1	0	3	0	4	3	16	54	29,63
Junio	0	3	1	3	0	2	5	6	3	23	54	42,59
Julio	0	3	3	0	4	4	4	2	4	24	54	44,44
Agosto	3	2	2	2	3	0	4	2	4	22	54	40,74
Septiembre	1	4	2	3	2	5	4	2	4	27	54	50,00
Octubre	2	4	2	1	3	3	1	4	5	25	54	46,30
Noviembre	4	5	4	5	2	4	6	5	3	38	54	70,37
Diciembre	5	6	5	4	4	4	6	6	2	40	54	74,07
totales										360	648	55,56

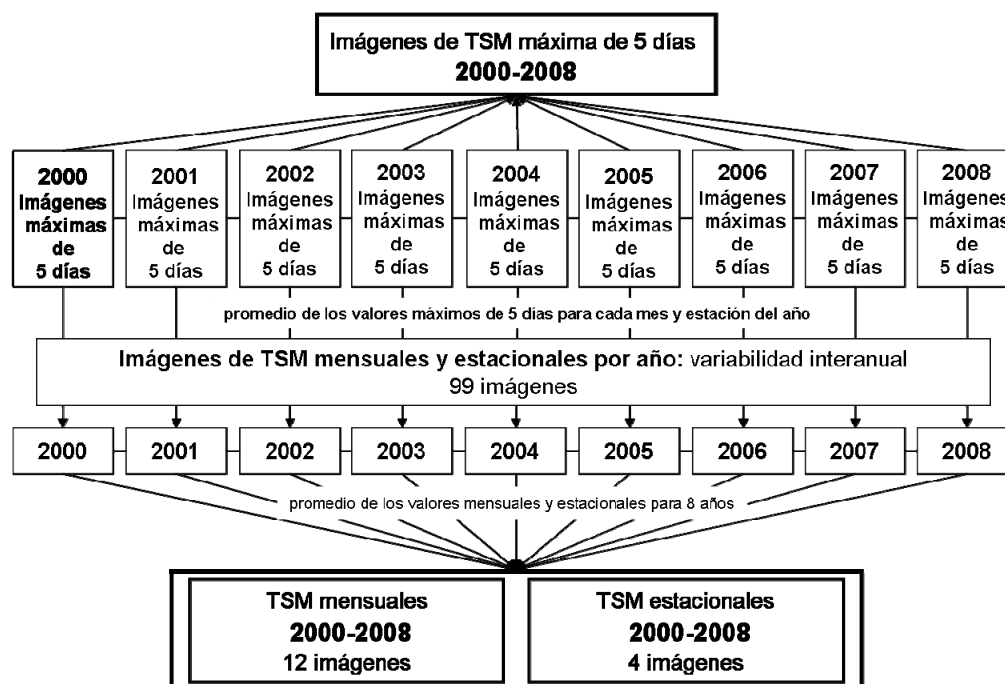


Figura 3.1.2: Cadena de procesamiento realizada a las imágenes AVHRR de la serie temporal 2000-2008.

Tabla 3.1.2: Número de imágenes diarias de *Cla-sat* por mes y año con menos del 20% de cobertura nubosa.

SeaWiFS	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	total	Imágenes posibles	%
Enero	8	4	18	10	11	13	13	77	217	35,48
Febrero	5	12	7	13	13	4	9	63	196	32,14
Marzo	3	11	6	5	7	3	6	41	217	18,89
Abril	4	8	5	0	2	4	10	33	210	15,71
Mayo	3	4	1	4	3	1	2	18	217	8,29
Junio	1	2	1	3	2	0	1	10	210	4,76
Julio	2	2	1	1	0	3	4	13	217	5,99
Agosto	4	3	2	0	2	1	4	16	217	7,37
Septiembre	6	7	7	4	9	9	4	46	210	21,90
Octubre	13	3	8	8	6	5	9	52	217	23,96
Noviembre	10	10	10	10	15	6	6	67	210	31,90
Diciembre	12	11	7	16	19	3	6	74	217	34,10
totales								510	2555	19,96

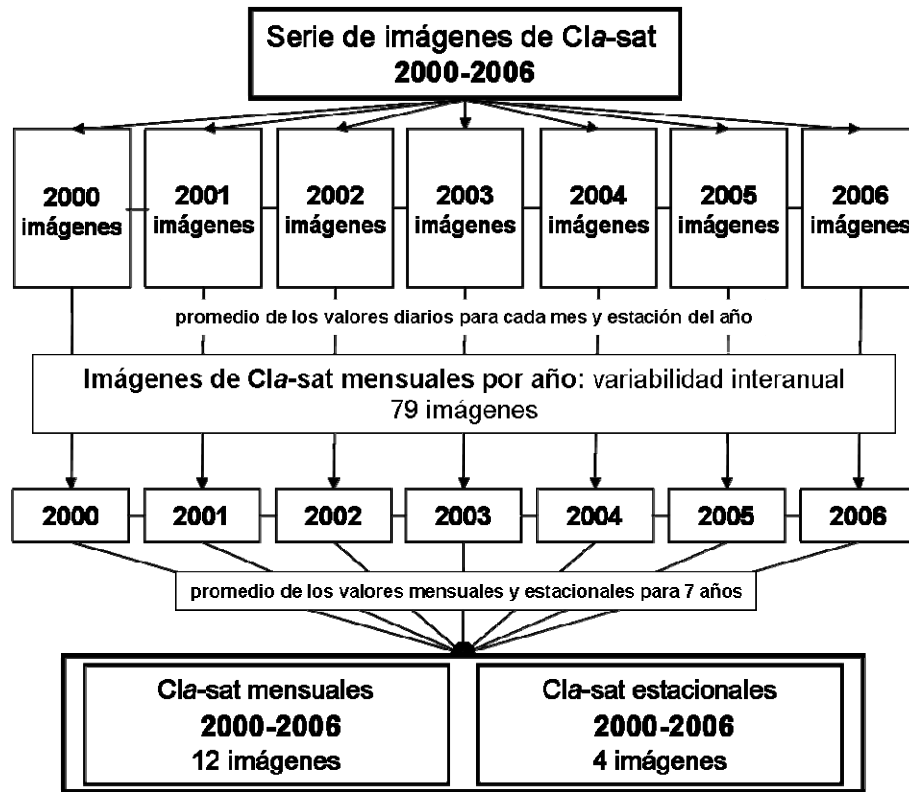


Figura 3.1.3: Cadena de procesamiento realizada a las imágenes SeaWiFS de la serie temporal 2000-2006.

Se obtuvieron 99 y 79 imágenes mensuales de TSM y Cla-sat respectivamente, sobre un total posible de 108 y 84, ya que particularmente en los meses de invierno (mayo a agosto) no fue posible obtener imágenes debido a la alta cobertura nubosa (Tablas 3.3.1 y 3.1.2).

Determinación de la TSM y Cla-sat máximas y mínimas medias anuales absolutas de las series temporales. Los valores de TSM y Cla-sat máxima y mínima anuales se obtuvieron para cada posición del GSM a partir de los valores de las series mensuales anuales TSM_{men} (2000-08) y $Cla-sat_{men}$ (2000-06), generándose imágenes de máximas y mínimas.

Promedio espacial. El valor medio y el valor del desvío estándar (DS) de la TSM y Cla-sat sobre el área del GSM ($40^{\circ} 40'S-42^{\circ} 45'S$ y $063^{\circ} 07'W-065^{\circ} 14'W$) se calcularon según las siguientes ecuaciones:

$$V_{sat}(t_i) = \frac{1}{N} \sum_j V_{sat}(x_j, y_i) \quad \text{(Ecuación 3.1.3)}$$

$$DS(V_{sat}(t_i)) = \sqrt{\frac{\sum_j (V_{sat}(x_j, t_i) - V_{sat}(t_i))^2}{N}} \quad \text{(Ecuación 3.1.4)}$$

donde:

$V_{sat}(t_i)$: TSM o *Cla-sat* media espacial

$V_{sat}(x_j, t_i)$: TSM o *Cla-sat* del pixel j en la imagen i

N : número de pixeles válidos en el área del GSM.

$DS(V_{sat}(t_i))$: desvío estándar de TSM o *Cla-sat*.

Determinación del ciclo anual de la TSM media en el área del GSM. El ciclo anual de TSM fue calculado utilizando un modelo de ciclo térmico semianual (Wyrтки, 1965; Beron-Vera & Ripa, 2000; Rivas, 2010):

$$TSM(x, t) = TSM_0(x) + T_1(x) \cos[w(t - t_0)] + T_2 \cos 2[w(t - t_{00})] \quad (\text{Ecuación 3.1.5})$$

donde,

t_0 : fase del armónico anual

t_{00} : fase del armónico semianual

TSM_0 : temperatura media

T_1 : amplitud armónico anual

T_2 : amplitud armónico semianual

w : frecuencia del ciclo térmico

Este modelo tiene las ventajas de que los datos son implícitamente una función del tiempo; no necesitan ser observados en intervalos regulares de tiempo y los parámetros t_0 , t_{00} , T_1 y T_2 son estimados mediante una regresión múltiple de cuadrados mínimos.

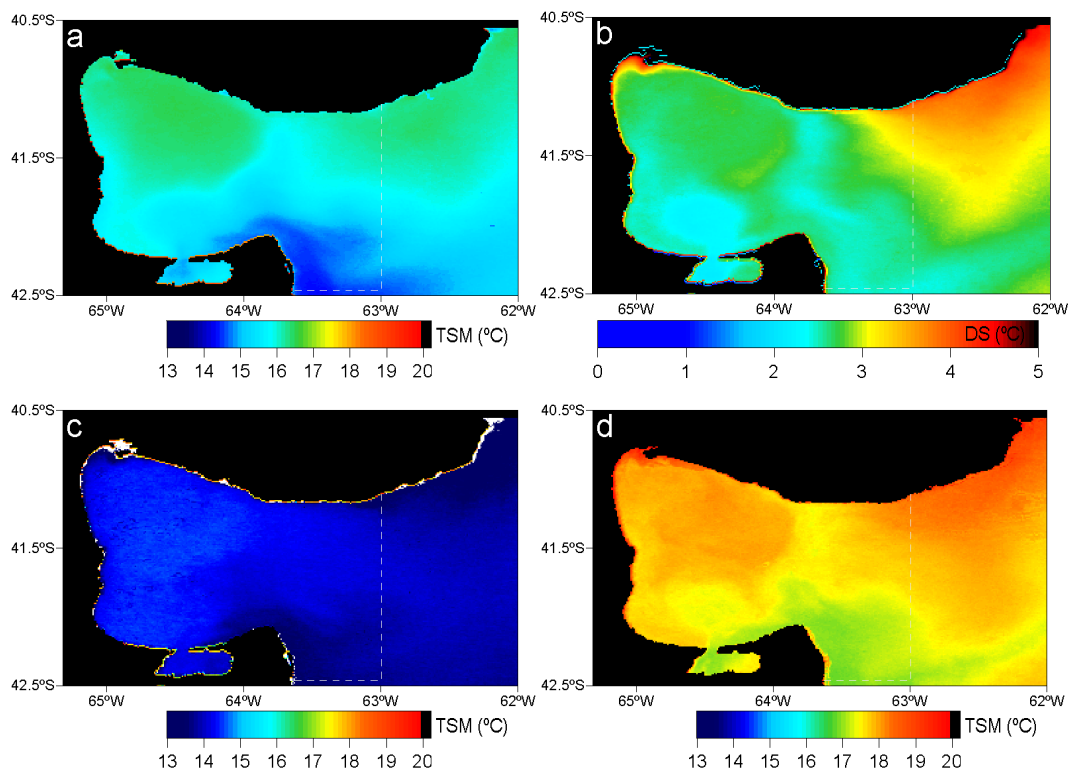
Los datos utilizados correspondieron a la serie mensual $TSM_{men}(2000-2008)$ considerando los promedios espaciales de cada imagen correspondiente al área del GSM ($40^\circ 40'-42^\circ 29'S$ y $063^\circ 07'-065^\circ 14'W$, Figura 3.1.1).

Determinación del ciclo anual de Cla-sat media en el área del GSM: Se describió mediante la serie mensual $Cla-sat_{men}(2000-2006)$ considerando los promedios espaciales de cada imagen correspondiente al área del GSM (Figura 3.1.1). Los meses de ocurrencia de las TSM y *Cla-sat* máximas y mínimas anuales en el área del GSM fueron determinados para cada año y para las imágenes climatológicas mensuales de TSM y *Cla-sat*.

Para analizar el grado de significancia estadística de las diferencias de TSM y *Cla-sat* entre las áreas y años analizados se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis (Sokal y Rohlf, 1995), ya que en el caso de TSM los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad, y en el caso de *Cla-sat*, si bien los datos fueron ajustados a la distribución normal, no se cumplió con el supuesto de homocedacia (Apéndice D).

3.1.3 Resultados

Distribuciones espaciales de TSM_{men} y Cla-sat_{men} superficial. El mapa medio de TSM correspondiente al período enero 2000-diciembre 2008 (Figura 3.1.4a) muestra la influencia de aguas de menor temperatura que ingresan por la zona sur de la boca, provenientes de la plataforma continental y la presencia de aguas cálidas ubicadas en la zona noroeste del Golfo. Mediante la serie mensual anual de imágenes de TSM (99 medias mensuales) se identificaron los mínimos y los máximos valores absolutos medios de TSM (Figura 3.1.4 c y d), así como el mes y el píxel en el que fueron registrados (Figura 3.1.4 e y f). Estos mapas muestran que el GSM puede ser separado en dos regiones con respecto a la distribución de la TSM media: el área noroeste donde ocurren los máximos valores medios de TSM (17,0°C) y mayor desvío estándar (3,0°C) y el área sudeste donde se registraron los mínimos valores medios y un menor desvío estándar (2,0°C). Durante los 9 años analizados se observó que en el Golfo la máxima temperatura se alcanzó en el mes de febrero (20,0-22,0°C), a excepción del área alrededor de Península Valdés (PV) y oeste del golfo San José (Figura 3.1.4f) en donde las máximas temperaturas fueron registradas en el mes de marzo (18,0-20,0°C).



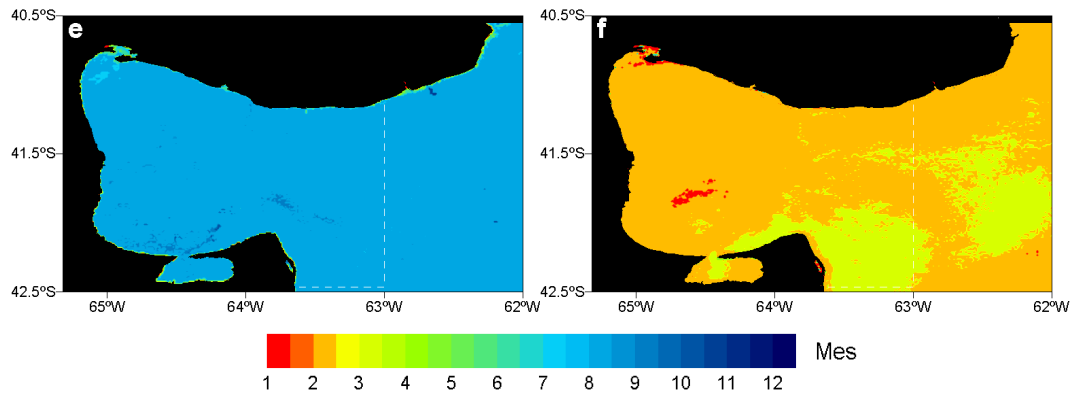
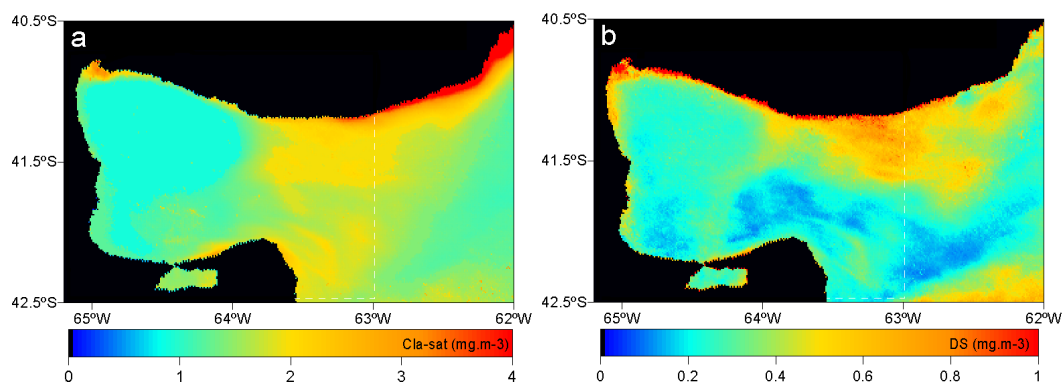


Figura 3.1.4: Temperatura Superficial del mar: (a) Media, (b) Desvío Estándar, (c) Mínimo, (d) Máximo, (e) mes de ocurrencia de mínimas TSM (f) mes de ocurrencia de máximas TSM. La línea punteada indica el área sobre la cuál se realizaron los cálculos espaciales.

El mapa de concentración media de Cla-sat correspondiente al período enero 2000-diciembre 2006 (Figura 3.1.5a) muestra que la zona interna (noroeste) del Golfo estuvo caracterizada por concentraciones medias menores a $1,0 \text{ mg.m}^{-3}$, mientras que la zona de la boca, la costa externa norte (próxima al río Negro) y próxima a la bahía de San Antonio registraron las máximas concentraciones medias de clorofila-*a* ($\geq 2,0 \text{ mg.m}^{-3}$). Estos valores deben ser tomados con precaución porque podrían estar sobreestimados por la presencia de sedimentos aportados por el río Negro o suspendidos por la dinámica de las aguas y su interacción con la topografía del fondo (Podestá, 1997).

Los valores medios mínimos fueron registrados en la zona sudoeste y noroeste (Figura 3.1.5c), mientras que los valores medios máximos fueron registrados en la costa oeste del Golfo (particularmente en la bahía de SAO), zona norte de la boca y costa nordeste (externa al Golfo) y área sur del Golfo (Figura 3.1.5d).



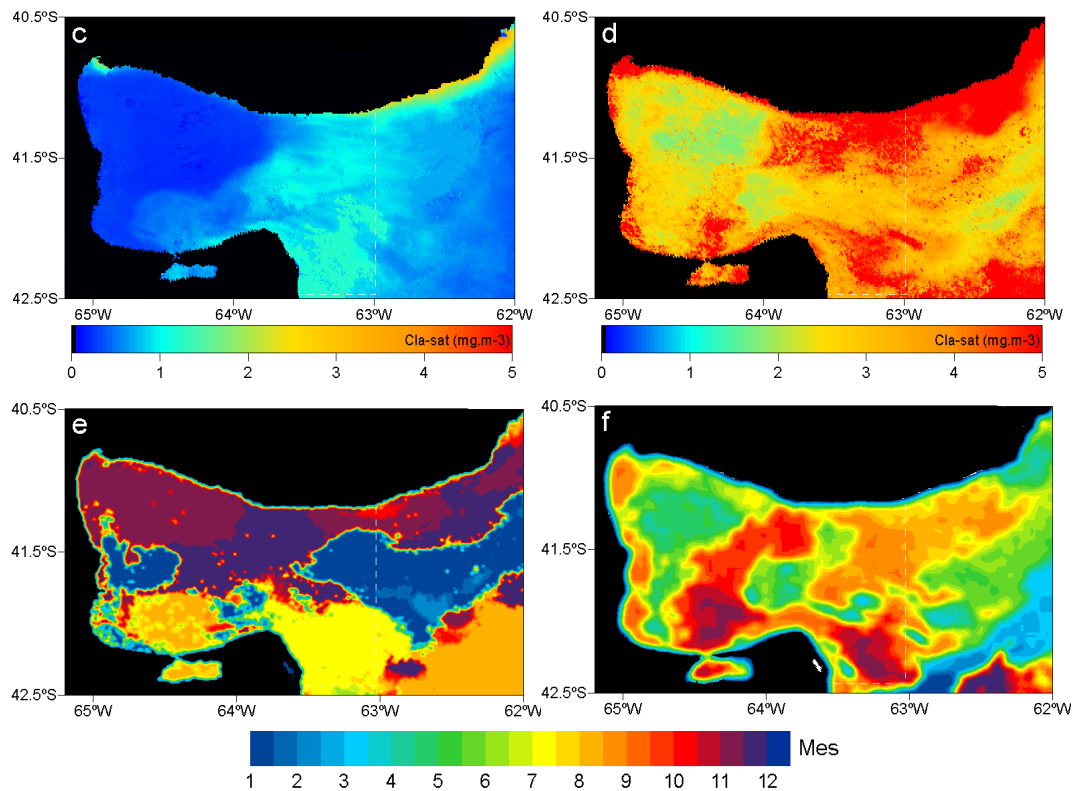


Figura 3.1.5: Cla-sat: a) Media, b) Desvío Estándar, c) Mínimo, d) Máximo, e) mes de ocurrencia de concentraciones mínimas, f) mes de ocurrencia de concentraciones máximas. La línea punteada indica el área sobre la cuál se realizaron los cálculos espaciales.

Durante los 7 años analizados, el mes de ocurrencia de máximas concentraciones de Cla-sat fue variable (Figura 3.1.15f); en la costa oeste se produjo en primavera (septiembre); en la zona central (desde la zona norte de la boca hacia el sur del Golfo) y alrededor de Península Valdés entre los meses septiembre y noviembre mientras que en la zona central norte y centro de la boca los máximos se registraron entre abril y mayo.

Distribución espacio-temporal de la TSM y concentración de clorofila-a. Los mapas mensuales climatológicos de TSM y Cla-sat de los periodos 2000-2008 y 2000-2006 respectivamente (Figuras 3.1.6 y 3.1.7) mostraron que las áreas noroeste y sudeste tienen diferente comportamiento a lo largo del ciclo anual. En verano (enero a marzo) se observó que la zona noroeste presento aguas de mayor temperatura; el sector norte de la boca, la zona sur del Golfo y la zona costera presentaron temperaturas intermedias mientras que el sector sur de la boca presentó aguas de menor temperatura. En invierno (julio a septiembre) se observaron aguas frías alrededor de Península Valdés con temperaturas similares a las aguas de la plataforma continental. A comienzos de primavera (octubre) se observó que toda el área del Golfo tuvo características uniformes, mientras que a fines de primavera (diciembre) se comenzaron a diferenciar las temperaturas de las zonas norte y sur. En los mapas mensuales climatológicos (Figura 3.1.6) pudo verse que la distribución superficial de temperatura fue

más uniforme en invierno que en verano; sin embargo, en el mes de octubre (mes con temperatura más uniforme), se apreció la influencia de las aguas frías de plataforma en el norte de Península Valdés.

En los mapas de promedios mensuales climatológicos de TSM también fue posible distinguir zonas costeras con características particulares: el área de influencia de la bahía de San Antonio en la cual se registraron máximas temperaturas medias en verano y mínimas en invierno; y el área sudoeste (ZSO, área próxima a la localidad de Puerto Lobos en los 42°W de latitud sobre la costa) de temperaturas intermedias a las áreas noroeste y sur (18,0°C).

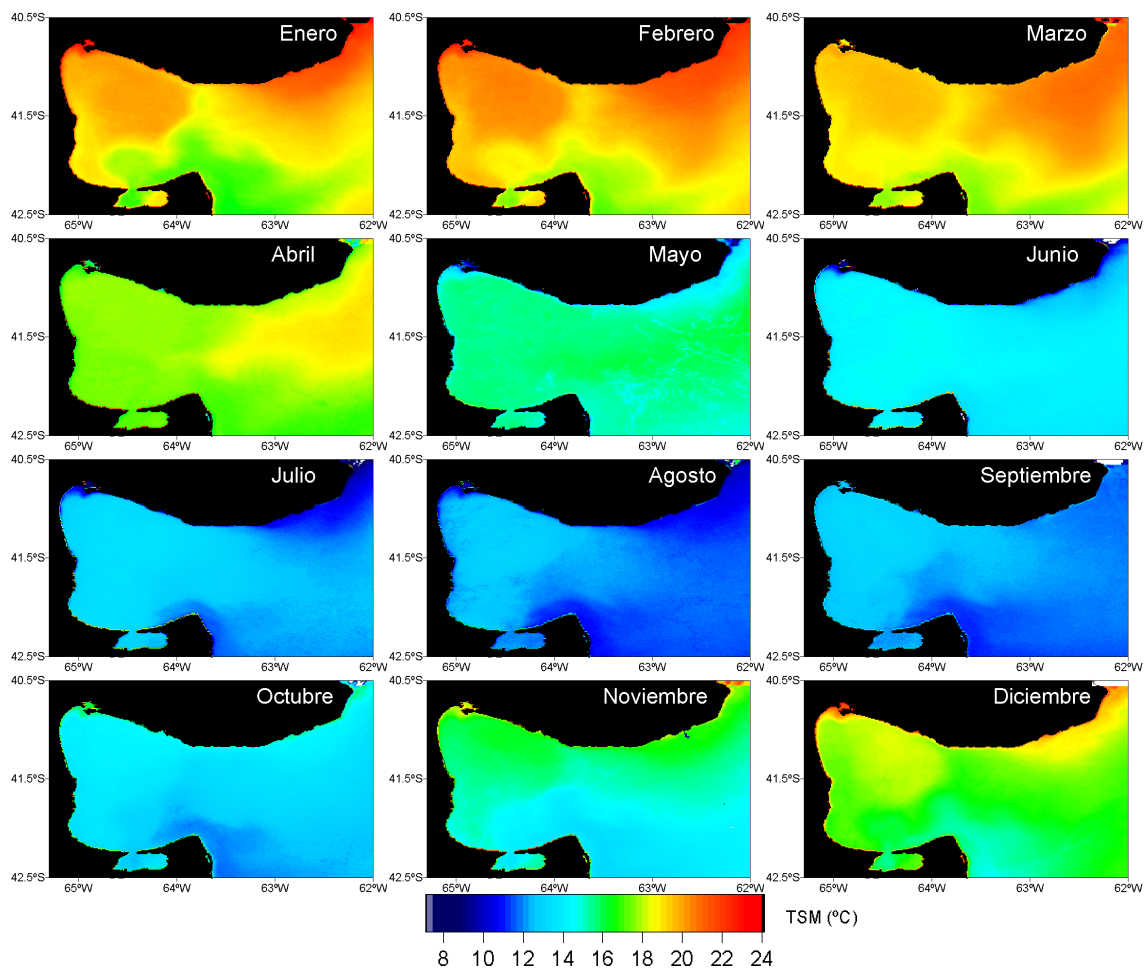


Figura 3.1.6. Promedios climatológicos mensuales de TSM (°C) obtenidos a partir de las medias mensuales de datos AVHRR para el periodo enero 2000-diciembre 2008.

El análisis de la distribución espacial de los promedios mensuales climatológicos de *Clasat* permitió distinguir que entre marzo y septiembre la zona interna del Golfo presentó una distribución de la concentración de clorofila-*a* relativamente uniforme y de menor concentración que el área de transición entre la boca del Golfo y la plataforma continental adyacente (a lo largo y al este de de 063° 30'W). Entre los meses de noviembre y febrero se

observó que la zona interna se dividió en dos regiones que también presentaron ligeras diferencias en la concentración de clorofila-*a* (aproximadamente $0,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el área norte y $1,0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el sur) (Figura 3.1.7).

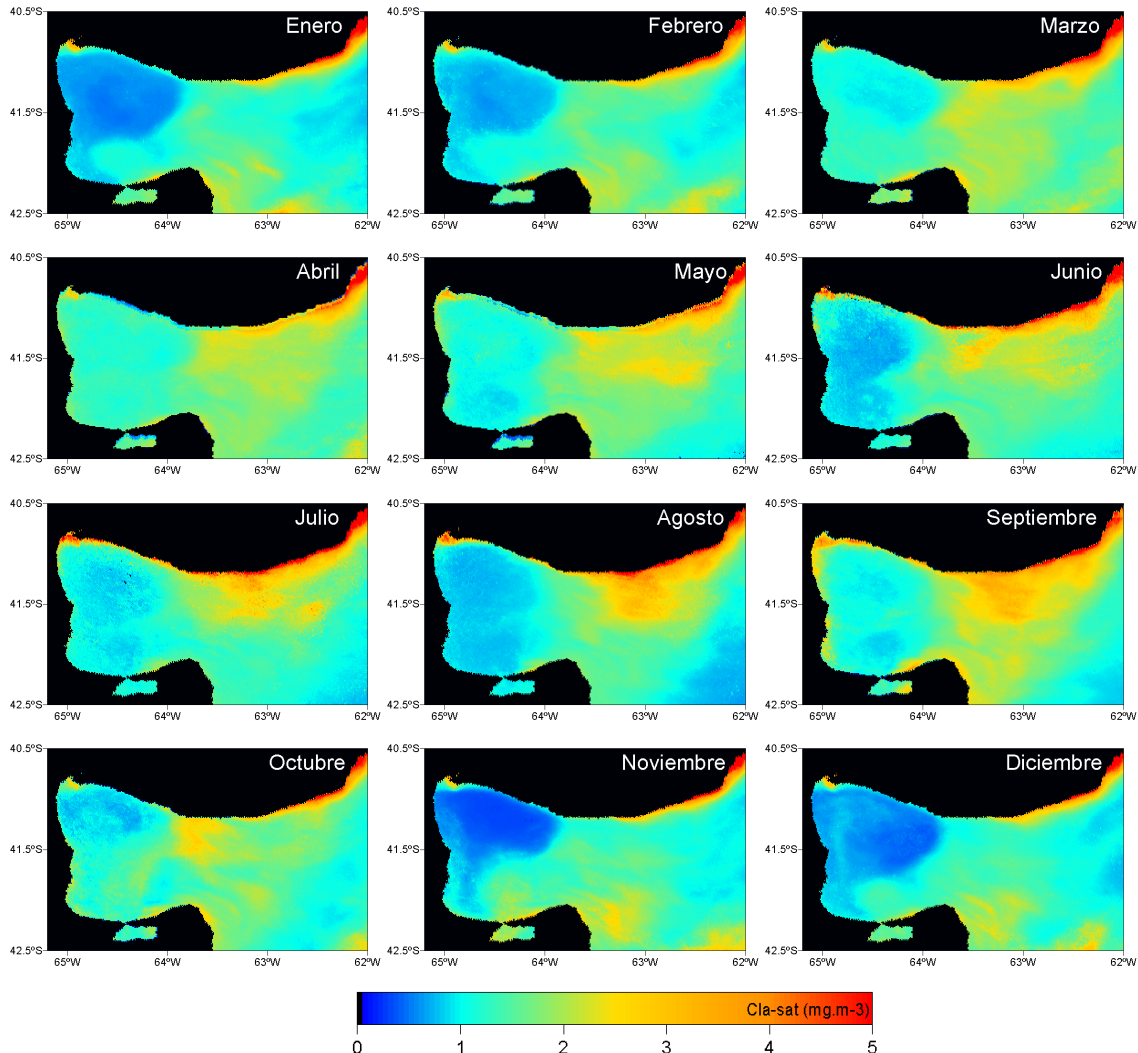


Figura 3.1.7. Promedios climatológicos mensuales de Cla-sat (mg m^{-3}) obtenidos a partir de las medias mensuales de datos SeaWiFS para el periodo enero 2000-diciembre 2006.

Las áreas identificadas en el interior del Golfo no tienen un límite preciso y definido, sin embargo se pueden distinguir las áreas al norte (ZN) y al sur (ZS) del paralelo $41^{\circ} 50' \text{ S}$. (Figura 3.1.1). La zona noroeste se encuentra rodeada por las costas norte y oeste, y se caracteriza por presentar profundidades mayores a 100m, lo cual determina que se encuentre relativamente aislada de la plataforma adyacente por la diferencia de profundidad con la plataforma ($\sim 70 \text{ m}$). Esta región presentó concentraciones de clorofila-*a* relativamente constantes entre los meses de marzo a octubre y similares a las del área sur, mientras que entre noviembre y febrero presentó los valores más bajos registrados en todo el Golfo ($0,33\text{-}0,68 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

En la zona sur se observó un leve aumento de la *Cla*-sat en octubre, alcanzando máximas concentraciones en noviembre ($\sim 3,0 \text{ mg m}^{-3}$) y una disminución hacia diciembre. En el mes de marzo aumentó nuevamente la *Cla*-sat, sin embargo alcanzó menor intensidad que en primavera ($\sim 1,4 \text{ mg m}^{-3}$).

Del mismo modo que en los mapas de TSM fue posible distinguir el área de influencia de la bahía de San Antonio caracterizada por altas concentraciones de *Cla*-sat ($\geq 2,5 \text{ mg.m}^{-3}$) a lo largo del ciclo anual y el área próxima a la localidad de Puerto Lobos (ZSO, Figura 3.1.1) con menor influencia de las aguas provenientes de la plataforma.

En la boca del Golfo se pudieron distinguir los sectores norte y sur (ZiN y ZiS, Figura 3.1.1) que entre marzo y septiembre presentaron mayores concentraciones de clorofila-*a* que el interior del Golfo. El sector norte de la boca (ZiN) se caracterizó por presentar concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* en invierno (mayo a agosto $\sim 3,5 \text{ mg.m}^{-3}$). En este caso resulta difícil determinar si la misma se debe a un real aumento de la clorofila-*a* (generada por un aporte local de nutrientes) o a la presencia de sedimentos en suspensión y/o materia orgánica disuelta que podría influir sobre la señal que recibe el sensor. Estos máximos podrían deberse a la resuspensión de sedimentos, originada por una combinación entre las menores profundidades de la boca del Golfo y la acción de mezcla producida por el viento y las mareas (Podestá, 1997), además de la influencia del río Negro en esa zona. Sin embargo entre noviembre y febrero en toda la zona de la boca se registraron concentraciones relativamente más bajas ($2,0 \text{ mg.m}^{-3}$).

Los valores medios mensuales de TSM mostraron una relación inversa con la concentración de *Cla*-sat: el área noroeste mostró los máximos valores y variabilidad de TSM ($17,0 \pm 2,8^\circ\text{C}$) y menores concentraciones de *Cla*-sat ($< 1,0 \text{ mg.m}^{-3}$) mientras que en el sector sur, el ingreso al Golfo y la plataforma continental registraron los mínimos valores y desviación estándar de TSM ($15 \pm 2^\circ\text{C}$) y altas concentraciones relativas de *Cla*-sat.

Los patrones estacionales de TSM de las áreas identificadas mostraron un comportamiento similar (Figura 3.1.8), a excepción del ciclo térmico de la bahía de SAO que se diferenció claramente por presentar máxima amplitud y cambio de fase. Las mínimas temperaturas ocurrieron en primavera (septiembre-octubre) y coincidieron con altas concentraciones de *Cla*-sat. Desde el mes de noviembre la temperatura comenzó a incrementarse, registrando valores máximos ($\sim 19,0^\circ\text{C}$) durante el verano (diciembre a febrero) y mínimas concentraciones de clorofila-*a*. La temperatura disminuyó desde el otoño al invierno (julio-agosto), registrando el mínimo ($\sim 12,0^\circ\text{C}$) en primavera (septiembre).

Análisis del ciclo anual medio de la TSM₍₂₀₀₀₋₂₀₀₈₎ y Cla-sat (2000-2006). Los resultados del análisis de la distribución espacio-temporal de TSM y Cla-sat permitieron distinguir sectores con comportamientos particulares. Los principales sectores identificados fueron el área noroeste (ZN), el área sur (ZS), el área sur de la boca (ZiS) y el área norte de la boca (ZiN) y sectores costeros como la zona externa a la bahía de San Antonio (BSA) y el sector sudoeste del Golfo (ZSO) (Figura 3.1.1).

El comportamiento temporal de los valores mensuales de TSM y Cla-sat fue obtenido mediante el cálculo de los valores espaciales medios de ambas variables para toda el área del GSM y los sectores definidos en la Figura 3.1.1.

Los datos mensuales de TSM climatológicos mostraron un claro ciclo estacional. Los meses de diciembre a marzo correspondieron a la estación cálida. El ajuste de los datos al modelo de ciclo térmico semianual (Ecuación 3.1.5) explicó más del 99% de la varianza. La amplitud del armónico semianual fue mucho menor a la amplitud del armónico anual, lo que indica que el tercer término de la Ecuación 3.1.5 puede ser despreciado. Esto último fue confirmado al calcular el ajuste de los datos al modelo anual ($TSM(x,t) = TSM_0(x) + T_1(x)\cos[w(t - t_0)]$) que explicó nuevamente, más del 99% de la varianza a pesar de la desestimación del armónico semianual. En este caso, el cambio de fase (t_0) indicó el momento del año de máxima temperatura.

Tabla 3.1.3: Parámetros de los modelos de ciclo térmico semi-anual para el promedio climatológico 2000-2008 para cada una de las zonas de interés en el GSM (en base a valores mensuales).

Área	T ₀	T ₁	w	t ₀	T ₂	t ₀₀	r ² _{semianual}	r ² _{anual}	min	max	área (km)	Long central	Lat central
GSM	15,91	3,56	0,52	2,13	0,10	6,44	0,9975	0,9966	12,48	19,62	28344,25	64° 17 23 W	41° 33 54 S
ZN	16,00	3,70	0,52	1,99	0,47	7,49	0,9991	0,9913	12,59	20,07	3840,54	64° 25 49 W	41° 23 06 S
ZS	15,15	3,18	0,52	2,38	0,22	7,67	0,9986	0,9963	12,15	18,45	2244,25	64° 27 39 W	41° 57 37 S
ZiS	14,81	3,42	0,52	2,58	0,03	4,74	0,9988	0,9988	11,53	18,13	349,69	63° 39 19 W	41° 57 53 S
ZiN	15,74	3,60	0,52	2,16	0,09	6,51	0,9969	0,9969	12,35	19,41	1122,88	63° 36 52 W	41° 22 53 S
BSA	16,16	5,52	0,52	1,29	0,36	8,25	0,9992	0,9970	11,14	21,77	29,04	64° 59 06 W	40° 50 06 S
ZSO	15,74	3,42	0,52	2,13	0,30	7,48	0,9987	0,9951	12,43	19,41	271,04	64° 53 25 W	41° 53 60 S

Durante el período de estudio los valores de TSM climatológicos (Figura 3.1.8) estuvieron entre los 12,26 - 19,38 °C; 12,70 - 20,09°C; 12,16 - 18,48°C; 11,47 - 18,16 °C y 12,07 - 19,24 °C para el área del Golfo, las zonas norte, sur, ingreso sur y norte de la boca,

respectivamente. La zona norte del Golfo y la boca presentaron las temperaturas medias más cálidas (20,09 y 19,24 °C) y mayor amplitud (3,70 y 3,60 °C). La zona de ingreso presentó la menor temperatura mínima y media (11,47 y 14,81 °C) y la zona sur presentó la menor amplitud térmica (3,18 °C) (Figura 3.1.4 a y b).

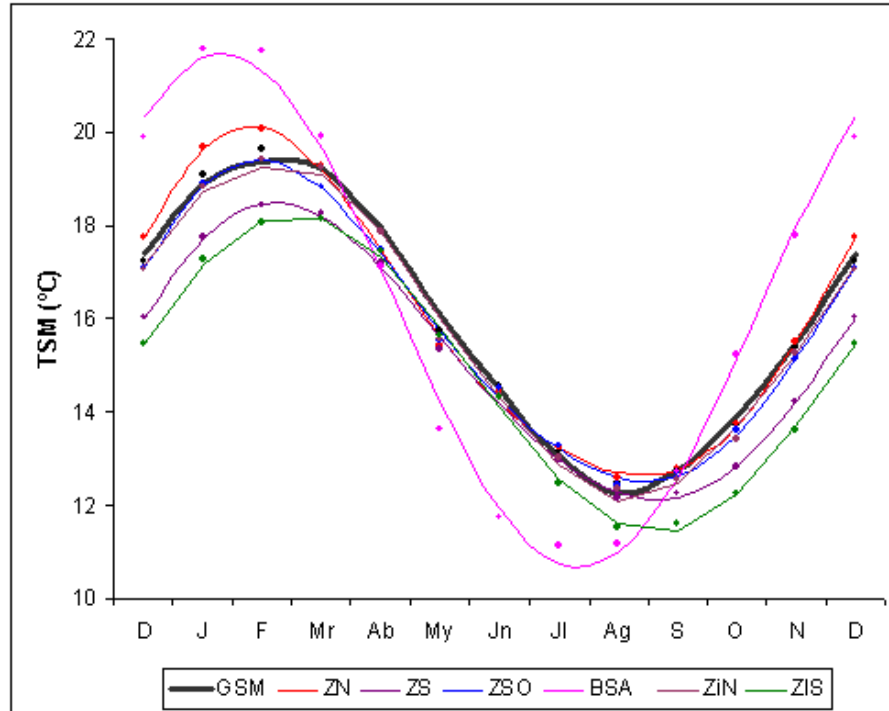


Figura 3.1.8: a-Ciclo anual de: GSM: área del Golfo, ZN: zona norte, ZS: zona sur, ZSO: zona sudoeste, BN: boca norte, ZIS: zona ingreso sur. Se muestran los valores mensuales (puntos) y el modelo ajustado (líneas).

La evolución de la concentración de Cla-sat mensual climatológica en el área total del Golfo y en las diferentes áreas identificadas se muestra en la Figura 3.1.9. El tamaño y la ubicación de las ventanas de las cuales se extrajo el valor medio espacial fue el mismo que el definido para los ciclos anuales de TSM.

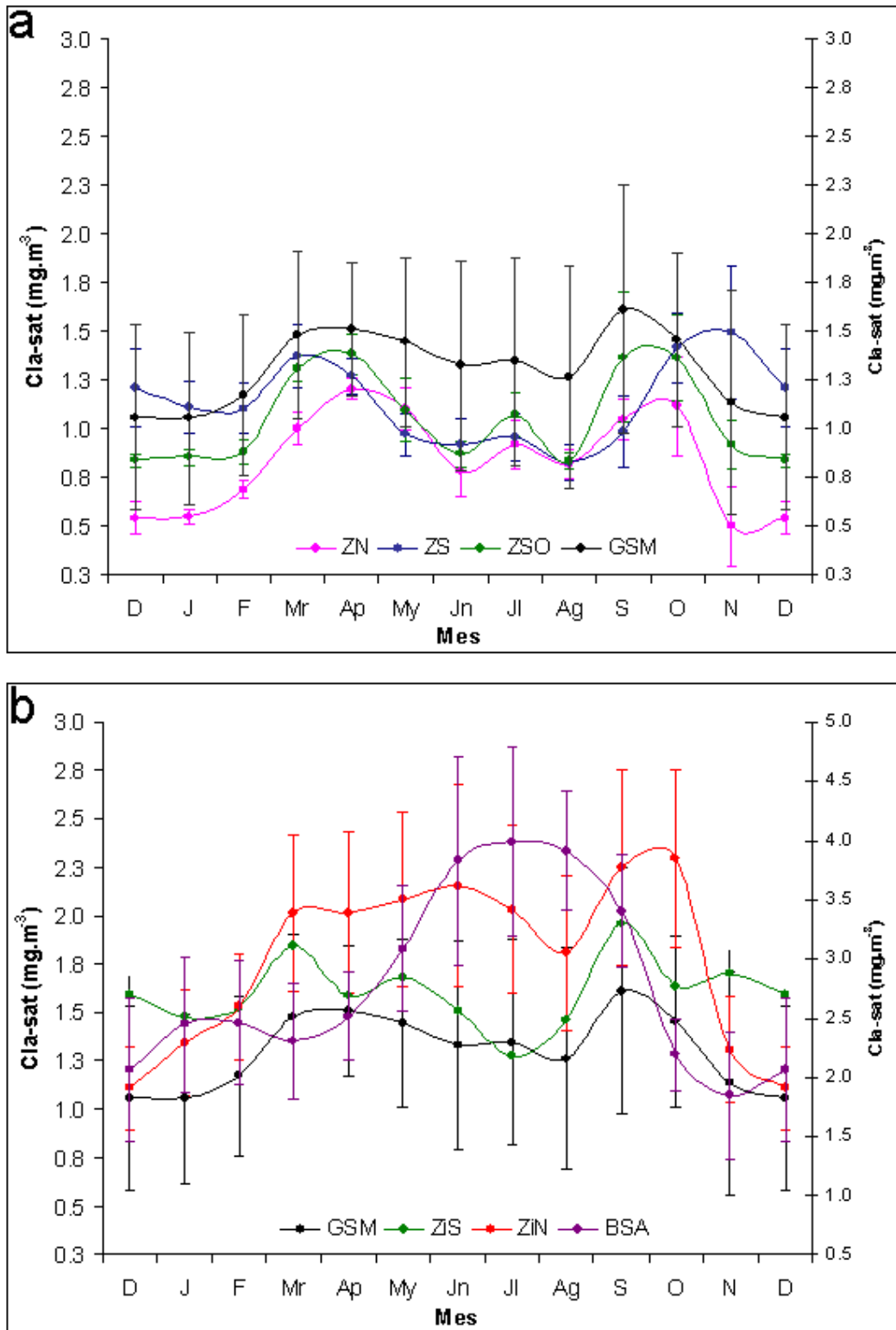


Figura 3.1.9. Serie de tiempo del promedio climatológico mensual de la *Cla-sat* satelital (SeaWiFS) en ventanas ubicadas en los sectores norte (ZN), sur (ZS), sur de la boca (ZiS), norte de la boca (ZiN), sudoeste (ZSO) y exterior de la bahía de San Antonio (BSA). Notar la diferencia en la escala de concentración de *Cla-sat* para el ciclo de BSA. Las barras verticales indican el desvío estándar (DS).

Tabla 3.1.4: Estadísticos descriptivos del ciclo de concentración de Cla-sat anual para el promedio climatológico 2000-2006 para cada una de las zonas de interés en el GSM (en base a valores mensuales).

Área	Media	Max	Min	DS	Mes max	Mes min
ZN	0,86	1,21	0,50	0,25	Abril	Noviembre a Febrero
ZS	1,14	1,49	0,83	0,21	Noviembre	Agosto
ZiS	1,60	1,96	1,27	0,18	Septiembre	Julio
ZiN	1,83	2,29	1,11	0,40	Septiembre	Diciembre
BSA	2.83	3.99	1.84	0.77	Julio	Noviembre
ZSO	1.07	1.39	0.84	0.23	Abril	Agosto
GSM	1,32	1,61	1,05	0,19	Septiembre	Enero

El análisis de la Figura 3.1.9b muestra que los sectores norte y sur de la boca presentaron concentraciones relativamente mayores al promedio del área total del Golfo y a las áreas internas norte y sur. Las áreas internas del Golfo presentaron concentraciones relativamente menores a la media del Golfo. Los análisis estadísticos indicaron que las diferencias entre los valores medios climatológicos de los sectores norte y sur de la boca (ZiS y ZiN) no fueron estadísticamente significantes. Los mismos resultados se observaron entre las áreas sur y sudoeste del GSM (ZSO y ZS). Estas áreas (boca: ZiS y ZiN y sur: ZS y ZSO) se diferenciaron significativamente entre sí y del resto de las áreas. Asimismo, los valores medios climatológicos del área del GSM no se diferenciaron significativamente de las ZS y ZSO (Kruskall-Wallis, $gl= 6$, $p<0.05$, $n=88$, Apéndice D). De estos análisis se infiere que el sector somero de la boca (ZiS y ZiN) es el que presenta una mayor contribución en la concentración de Cla-sat con respecto al promedio espacial calculado para toda el área del Golfo.

La persistencia de bajas concentraciones de clorofila-*a* a lo largo del año fue observada en las áreas internas sur y norte. El área norte presentó concentraciones mínimas ($\sim 0,5 \text{ mg.m}^{-3}$) entre noviembre y febrero (verano) y relativamente mayores ($0,8 - 1,2 \text{ mg.m}^{-3}$) entre abril y octubre (principalmente en los meses de invierno). La zona sur presentó, en general concentraciones similares a la zona noroeste ($0,80 \text{ mg.m}^{-3}$), entre los meses de mayo y septiembre. Sin embargo, a diferencia de la zona norte las concentraciones máximas relativas (entre $1,2-1,5 \text{ mg.m}^{-3}$) ocurrieron en primavera-verano (entre noviembre y marzo) con valores máximos relativos en noviembre y marzo ($1,5$ y $1,2 \text{ mg.m}^{-3}$, respectivamente). Los sectores de la boca se caracterizaron por presentar las mayores concentraciones de todas las áreas consideradas. En particular, el sector norte presentó concentraciones menores ($1,11 - 1,53 \text{ mg.m}^{-3}$) entre noviembre y febrero y relativamente mayores entre marzo y agosto ($1,81 - 2,15 \text{ mg.m}^{-3}$). El sector sur, en cambio, presentó mínimas concentraciones ($1,27 - 1,51 \text{ mg.m}^{-3}$) entre junio y agosto y mayores entre septiembre y marzo ($1,48 - 1,96 \text{ mg.m}^{-3}$).

En cuanto a las zonas costeras el área de influencia de la bahía de San Antonio presentó concentraciones mayores a $2,0 \text{ mg.m}^{-3}$, con un marcado ciclo anual con concentraciones mínimas entre los meses de noviembre a marzo y máximas entre abril y octubre.

El sector sudoeste del Golfo se caracterizó por presentar valores máximos en otoño y primavera ($\sim 1,4 \text{ mg.m}^{-3}$) y mínimos en invierno y verano ($\sim 0,9 \text{ mg.m}^{-3}$), con características intermedias entre las áreas noroeste y sudeste.

Las características de la variabilidad estacional del fitoplancton en toda el área del GSM pueden sintetizarse en: concentraciones medias entre $1,05$ y $1,61 \text{ mg.m}^{-3}$ con valores mínimos entre noviembre y febrero y máximos relativos en septiembre y de menor magnitud entre marzo y abril.

Variabilidad interanual de TSM. El análisis del promedio espacial climatológico de TSM que abarca toda el área interna del GSM (Figura 3.1.1), presentó un ciclo anual característico de aguas templadas con valores mínimos en invierno ($12,0 \text{ }^\circ\text{C}$, julio) y máximos en verano ($20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, febrero) (Tabla 3.1.5).

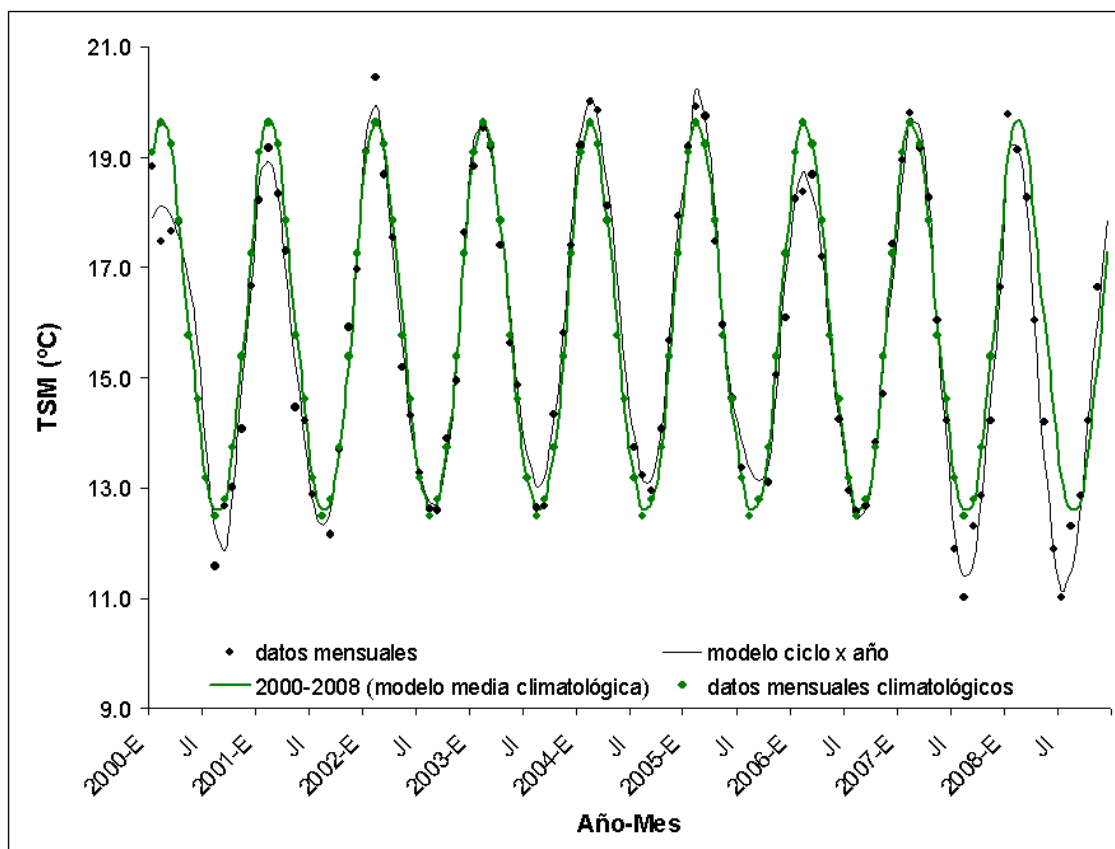


Figura 3.1.10: valores medios mensuales, valores medios climatológicos correspondientes al periodo 2000-2008 y los respectivos modelos de ajuste a un modelo de ciclo térmico anual.

Tabla 3.1.5: Parámetros de los modelos de ciclo térmico **anual** para cada año de la serie temporal 2000-2007 en el GSM (sobre medias).

Año	T₀	T₁	w	t₀	r²_{anual}	Min.	Max.	DS
2000	15,52	3,09	0,52	2,58	0,93	11,57	18,82	2,70
2001	15,48	3,30	0,52	1,93	0,99	12,16	19,16	2,48
2002	15,85	3,61	0,52	2,02	0,99	12,59	20,43	2,71
2003	16,20	3,31	0,52	2,05	0,99	12,64	19,53	2,46
2004	16,47	3,51	0,52	2,24	0,99	12,95	20,00	2,85
2005	16,11	3,49	0,52	2,33	0,99	12,78	19,90	2,65
2006	15,53	3,15	0,52	2,12	0,99	12,57	18,66	2,46
2007	15,44	4,18	0,52	2,29	0,99	11,00	19,78	3,11
2008	15,12	4,05	0,52	1,34	0,99	11,00	19,77	3,05
Periodo 2000-2008	15,91	3,56	0,52	2,14	0,99	12,48	19,62	2,64

Al analizar los ciclos térmicos por año (Tabla 3.1.4) se observó que el año 2006 presentó la menor amplitud térmica (3,15 °C), mientras que el año 2007 registró la máxima amplitud (4,18 °C) y el menor registro de TSM (11,00°C). Los años 2003 a 2005 presentaron el mayor valor medio (>16,00 °C) y el 2008 el menor (15,12 °C), mientras que el año 2002 presentó el mayor registro de temperatura (20,43°C). Las máximas temperaturas del ciclo térmico se mantuvieron estables entre la primera y segunda semana de febrero. A pesar de las diferencias observadas el análisis estadístico de los datos mostró que estas no fueron estadísticamente significantes (Kruskal-Wallis, gl= 8, p>0.05 n=99, Apéndice D).

Variabilidad interanual de Cla-sat. El análisis del promedio espacial climatológico de concentración de clorofila-*a* que abarca toda el área interna del GSM (Figura 3.1.1) muestra que el Golfo presentó concentraciones relativamente altas entre marzo y septiembre-octubre, con máximos registrados en estos meses. Las concentraciones mínimas se registraron en general, entre noviembre y febrero.

Al analizar los ciclos anuales de concentración de clorofila-*a* se observó que hay una gran variabilidad en los meses en que ocurre el florecimiento de otoño, mientras que el florecimiento de primavera se mantiene constante entre los meses de septiembre-octubre. El año 2004 presentó un ciclo con un comportamiento diferente, en general menores concentraciones con respecto al resto de los años a excepción del mes de noviembre que presentó concentraciones medias mensuales inusualmente altas (en el orden de 2,2 mg.m⁻³). El año 2002 presentó máximas concentraciones con respecto a los 7 años analizados, con valores medios mensuales de 2,18 y 2,32 mg.m⁻³ en otoño y primavera respectivamente, seguido del año 2000 con florecimientos de 1,81 y 1,84 mg.m⁻³ en las mismas estaciones del año.

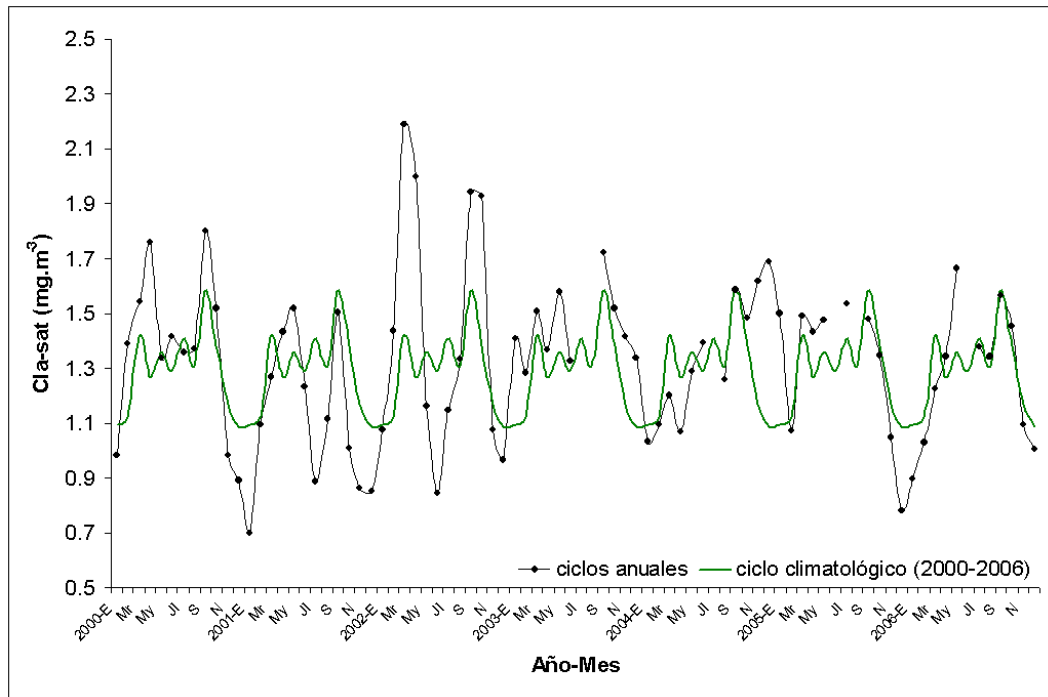


Figura 3.1.11: Valores medios mensuales por año y valores medios climatológicos correspondientes al período 2000-2006.

El mes en donde se produce la máxima concentración de clorofila-*a* en el GSM tuvo gran variabilidad espacial y temporal ocurriendo entre el mes de septiembre y diciembre o entre marzo y julio, en cada una de las localidades seleccionadas (Tabla 3.1.5, zonas sur, norte, norte y sur de la boca, salida de bahía de San Antonio y zona suroeste).

El análisis de cada área en particular mostró que la zona norte presentó los máximos en otoño (marzo a mayo) en los años 2000 a 2003 y 2006, mientras que en 2004 y 2005 se registraron en primavera (diciembre y septiembre respectivamente). La zona sur presentó los máximos en primavera en los años 2001 y 2004 y en enero en el año 2003. En los años 2002, 2005 y 2006 las máximas concentraciones fueron registradas en otoño. En la zona sudoeste las concentraciones máximas ocurrieron en primavera, mientras que en la zona externa de la bahía de SA se registraron entre mayo y agosto. En la zona sur de la boca los máximos fueron registrados principalmente en primavera (a excepción de los años 2002 a 2004), mientras que en la zona norte de la boca ocurrieron en otoño e invierno, excepto para los años 2002 y 2003, cuyos máximos se registraron en primavera. Los mapas mensuales de distribución de Cla-sat de las temporadas septiembre a marzo correspondientes a la serie temporal analizada se muestran en el Apéndice B.

CAPITULO 3. Sec. 1: Variabilidad espacio-temporal de temperatura y clorofila-*a* satelitales

Tabla 3.1.5: a) Estación y mes del año con máximas concentraciones de clorofila-*a* en diferentes localidades del golfo San Matías. La letra y el color indican la estación del año (O: otoño (naranja), I: invierno (azul), P: primavera (verde), V: verano (rojo)). El número indica el mes del año (Enero a Diciembre: 1 a 12).

Año	ZN	ZS	BSA	ZSO	ZiS	ZiN	GSM
2000	0-4	0-4	I-7	P-10	P-9	I-6	P-9
2001	0-5	P-10	I-8	P-9	P-9	0-5	0-5
2002	0-3	0-3	P-9	P-9	0-3	P-10	0-3
2003	0-4	V-1	0-5	P-9	P-11	P-9	P-9
2004	P-12	P-11	0-5	P-11	I-6	I-6	V-12
2005	P-9	0-3	I-7	I-8	V-1	0-5	I-7
2006	0-5	0-4	I-8	0-5	P-12	0-5	0-5

b) Concentraciones máximas de clorofila-*a* en diferentes localidades del golfo San Matías. La letra y el color indican la estación del año (O: otoño (naranja), I: invierno (azul), P: primavera (verde), V: verano (rojo)) de igual manera que en a.

Año	ZN	ZS	BSA	ZSO	ZiS	ZiN	GSM
2000	1.49	1.43	5.41	2.48	3.58	3.08	1.80
2001	1.23	1.18	4.51	1.25	1.76	2.31	1.52
2002	1.85	2.18	4.04	2.87	2.44	2.95	2.19
2003	1.34	2.16	3.93	2.42	2.43	2.86	1.72
2004	1.49	3.38	4.72	2.86	1.77	2.64	1.69
2005	1.43	1.58	3.80	1.90	1.71	2.68	1.54
2006	1.20	1.29	4.17	2.05	2.33	3.14	1.67

Las concentraciones máximas de clorofila-*a* para cada año en cada área se muestran en la Figura 3.1.12. Las máximas concentraciones se registraron, en general, en la bahía San Antonio (BSA). La boca del Golfo (norte y sur) es un área con concentraciones relativamente altas, la zona sur presentó concentraciones máximas intermedias, mientras que en la zona norte se observaron concentraciones menores.

En cuanto a la variabilidad entre años se observó que los años 2000 y 2002 exhibieron mayores concentraciones medias en toda el área del GSM, mientras que en el año 2001 se registraron las mínimas concentraciones medias. Sin embargo, los análisis estadísticos mostraron que las diferencias mencionadas entre los años analizados no fueron estadísticamente significativas (Kruskall-Wallis, $gl= 6$, $p>0.05$ $n= 78$, Apéndice D).

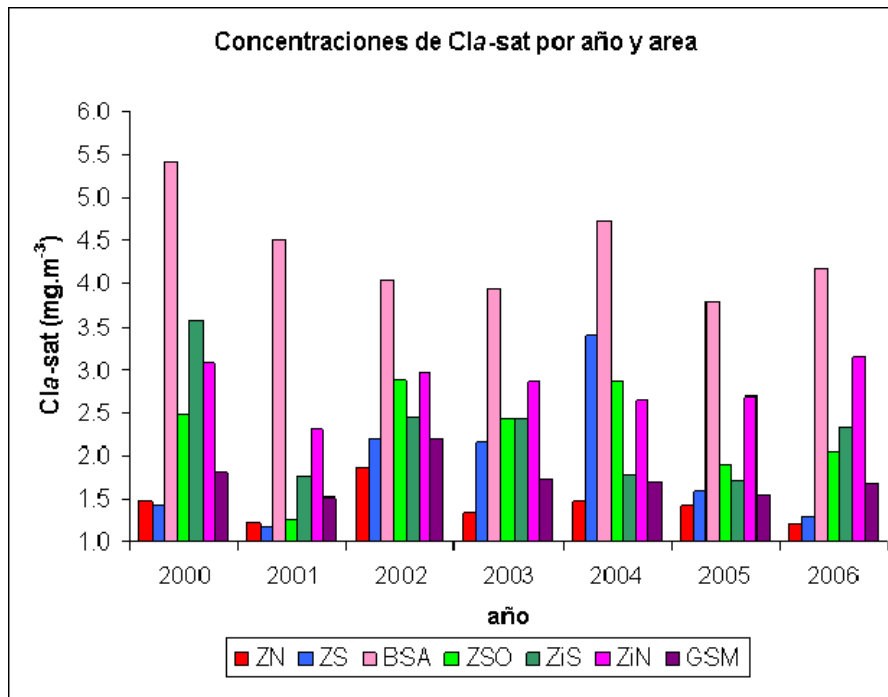


Figura 3.1.12: Concentraciones máximas de clorofila-*a* por año de la serie temporal (ZN: zona norte, ZS: zona sur; ZiS: zona ingreso sur; ZiN: zona ingreso norte; BSA: Bahía San Antonio; GSM: Golfo San Matías).

3.2 Análisis de la distribución superficial y vertical de los parámetros físicos y químicos obtenidos en campañas oceanográficas.

3.2.1 Introducción

La utilización de imágenes de TSM y *Cla-sat* en el GSM ha permitido estudiar la variabilidad espacio-temporal de estas variables. Como ya se ha mencionado (Capítulo 2), la ventaja más importante de utilizar información satelital es su alta resolución temporal y la posibilidad de obtener información en forma prácticamente simultánea de toda el área de estudio. De este modo es posible estudiar procesos físicos (identificación de frentes térmicos) y biológicos (ocurrencia de florecimientos fitoplanctónicos) que tienen lugar a escalas espaciales y temporales difíciles de abarcar mediante cruceros oceanográficos. Por su parte, los cruceros oceanográficos tienen la ventaja de realizar mediciones tanto en la superficie como en la columna de agua. En particular, las mediciones de temperatura y clorofila-*a in-situ* son necesarias para la calibración de los datos obtenidos mediante sensores remotos, ya sea mediante el desarrollo de algoritmos regionales o la simple comparación entre los datos obtenidos mediante ambas fuentes de datos.

Los primeros trabajos que permitieron lograr un conocimiento amplio de las principales variables oceanográficas que regulan la producción primaria en el golfo San Matías fueron realizados en los meses de marzo, mayo y noviembre de 1971 durante las Campañas SAO I, II y III (Carreto *et al.*, 1974; Verona *et al.*, 1974). Estos trabajos permitieron concluir que las aguas del GSM pueden ser divididas en dos áreas netamente diferenciadas por sus características físicas, químicas y biológicas, y relacionadas entre sí por una zona de transición que las separa (Capítulo I).

La circulación de las masas de agua, el establecimiento de los intercambios de agua entre el mar y la atmósfera y la importancia de los procesos de advección horizontal en la determinación de los campos de temperatura y salinidad han sido abordados por diversos estudios y proyectos (Piola & Scasso, 1988; Martos & Piccolo, 1988, Rivas & Beier, 1990; Tonini, 2010) cuyos resultados y conclusiones se han detallado en el Capítulo I de la presente tesis.

Los estudios biológicos han mostrado que la biomasa promedio de todo el Golfo alcanza niveles máximos en otoño y primavera y mínimos en verano e invierno (Ramírez, 1996). Al mismo tiempo estudios puntuales mostraron que la abundancia de huevos y larvas ictioplanctónicas (Mercado *et al.*, 1993) y de organismos fitoplanctónicos (Sastre *et al.*, 1997) fueron mayores en la zona norte en primavera.

El análisis de parámetros oceanográficos obtenidos en campañas estacionales entre los años 1991 y 1994 indicó que el GSM presenta un ciclo estacional típico de aguas templadas con mezcla (invierno) y estratificación (primavera) de la columna de agua mostrando concentraciones máximas de nutrientes en invierno y principios de primavera, mientras que la concentración de clorofila-*a* fue máxima a principios de primavera y otoño (Esteves *et al.*, 1995; Williams, 2004). Sin embargo, estas campañas no se han podido mantener en forma sistemática en el tiempo como para obtener una serie temporal extensa de datos y así monitorear en forma frecuente los procesos físicos, químicos y biológicos en superficie y en la columna de agua.

La posibilidad de contar con datos satelitales de TSM y *Cla-sat* desde el año 2000 ha permitido analizar con una mayor frecuencia temporal los ciclos de estas dos variables (Sección 3.1) e identificar áreas con características particulares en superficie. En esta sección el objetivo fue analizar los patrones espacio-temporales de temperatura, nutrientes y clorofila-*a* en superficie y en perfiles verticales obtenidos en seis campañas oceanográficas realizadas entre los años 2007 y 2009 en el área del GSM. Se espera que esta información, junto con la provista por imágenes satelitales de TSM y *Cla-sat*, (obtenidas para las mismas fechas de realización de las campañas oceanográficas) permita identificar sectores con características ambientales particulares y que estos sean consistentes con los identificados en la sección 3.1.

3.2.2 Análisis de los datos

3.2.2.1 Análisis estadístico de los datos

En el Capítulo de Materiales y Métodos (2) se detalló la forma de obtención de las muestras de agua, la metodología aplicada en el laboratorio para obtener los valores de concentración de nutrientes y clorofila-*a* y los instrumentos utilizados para registrar los datos de temperatura *in-situ*. En la Tabla 3.2.1 se detalla el período, estación y número de datos superficiales obtenidos.

Los valores medios y desvíos estándar superficiales y totales de temperatura, concentraciones de nitrato+nitrito (μM), fosfato (μM), silicato (μM) y clorofila-*a* ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) fueron calculados para cada una de las seis campañas realizadas.

Tabla 3.2.1: Características de las campañas oceanográficas.

Campaña	Período	Estación	Número de datos de superficie
GSM-I-07	23-27 Junio 2007	otoño	25
GSM-II-02	17-19 Octubre 2007	primavera	18
GSM-III-08	20-23 Febrero 2008	verano	26
GSM-IV-08	19-21 Junio 2008	otoño	25
GSM-V-08	27-30 Noviembre 2008	primavera	23
GMS-VI-08	2-3 Octubre 2009	primavera	17

3.2.2.2. Mapas de las variables ambientales determinadas in-situ.

La representación cartográfica de mapas superficiales y perfiles verticales de las diferentes variables físicas y químicas se realizó mediante el método de interpolación de Krigging (Joumel & Huiybnegts, 1978), utilizando el programa gráfico Surfer, versión 7.0. Los datos de batimetría utilizados para asociar los perfiles verticales a datos de profundidad fueron tomados de la carta náutica H-214 del Servicio de Hidrografía Naval Argentina (SHN, 1999). Los datos de la carta fueron digitalizados e interpolados mediante el método del vecino natural (250m, remuestreado a 1100m) obteniendo un mapa topográfico en formato *raster* (Schneider, 2009). Los datos de profundidad correspondientes a las estaciones definidas sobre una transecta con orientación norte sur en el centro del Golfo (meridiano 64° 20'W) fueron utilizados en el cálculo de los perfiles verticales (Figura 3.2.1b).

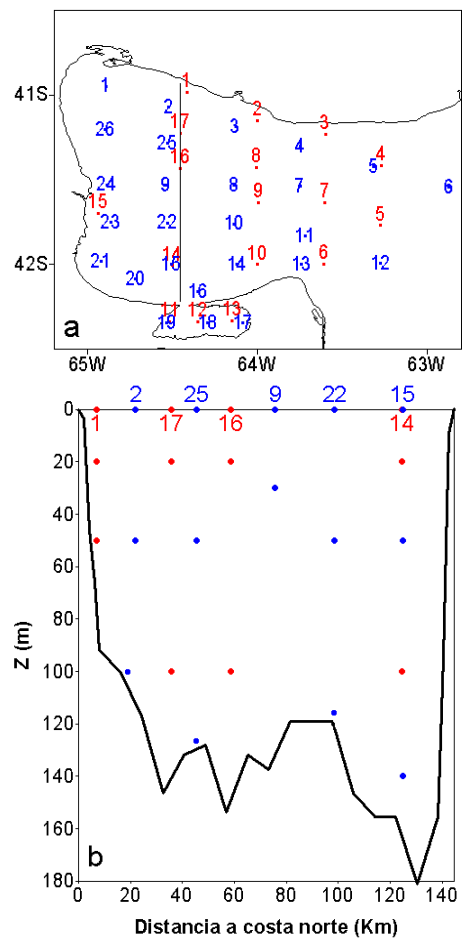


Figura 3.2.1. (a) Ubicación de las estaciones de muestreo y del perfil vertical en el centro del Golfo en sentido norte sur. (b) Perfil vertical construido mediante datos de batimetría de la carta náutica H-214 (SHN, 1999) indicando la ubicación de las estaciones y profundidades de muestreo (en el análisis de cada campaña se indicará la ubicación exacta). Rojo: campaña de octubre 2007. Azul: junio 2007 y 2008, febrero y noviembre 2008 y octubre 2009.

3.2.2.3 Datos satelitales

Las imágenes NOAA-AVHRR (nivel 11b) y MODIS-Aqua (nivel 3) de las fechas coincidentes a la obtención de los datos *in-situ* fueron facilitadas por el Centro de Distribución de Imágenes Satelitales (DISPA) de la CONAE y por la red Antares (<http://www.antares.ws>), respectivamente. Las imágenes fueron procesadas con el programa ERDAS IMAGINE 8.7 en el Laboratorio de Teledetección del CENPAT obteniéndose los productos TSM y *Cla-sat* (Capítulo 2). Los algoritmos utilizados para obtener los productos TSM y *Cla-sat* fueron el MCSST (Multichannel Sea Surface Temperature, McClain, 1985) y OC3M (O'Reilly, 1998), respectivamente. Estas imágenes tienen una resolución temporal de 24 h y espacial de 1,1 Km.

En esta sección se utilizaron imágenes MODIS en lugar de las imágenes SeaWiFS (LAC) utilizadas en la sección 3.1 debido a que la disponibilidad de estas últimas en la CONAE correspondió al período 1998-2006 y las campañas oceanográficas se realizaron a partir del año 2007.

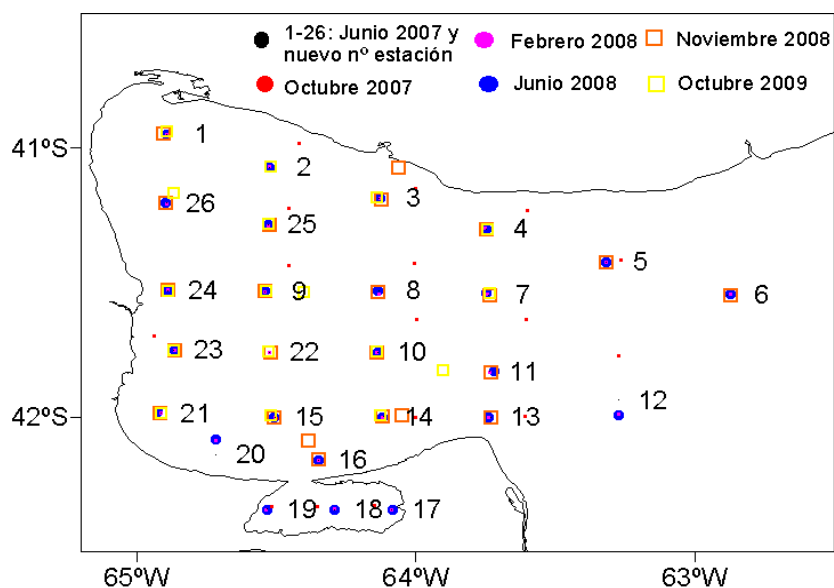


Figura 3.2.2: Estaciones de muestreo. Los símbolos de diferente forma y color identifican las campañas realizadas.

3.2.2.4 Análisis de los datos

El análisis de clasificación de las estaciones superficiales de muestreo en función de las variables medidas en cada campaña, se realizó mediante el cálculo de la distancia de Gower (citado en Templ *et al.*, 2008). Este índice promedia los valores absolutos de las diferencias de los datos estandarizados por rango y puede ser aplicado a datos con distintas unidades en cada variable.

La Distancia de Gower se calcula de la siguiente manera:

$$d_G(i,j) = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{x_{ik} - x_{jk}}{R_k}, \text{ donde } R_k = \max_h \{x_{hk}\} - \min_h \{x_{hk}\}, \text{ Ecuación 3.2.1}$$

Los análisis de agrupamiento de las estaciones de muestreo se realizaron aplicando la técnica de Ward (Ward, 1963; citado en Templ *et al.*, 2008). Este método utiliza un análisis de la varianza para evaluar las distancias entre los grupos, y minimiza la suma de los cuadrados de las dos agrupaciones que se pueden formar en cada paso.

El análisis de componentes principales (ACP) fue aplicado a todas las variables ambientales con el fin de conocer la relación entre ellas y con las estaciones de muestreo. (Sneath & Sokal, 1973; Legendre & Legendre, 1979; Teer Braak, 1988). La suma de los factores obtenidos explica la varianza total. De acuerdo con el criterio propuesto por Morrison (1976) y Bonilla Ruíz *et al.* (1998), en general, se eligen aquellos factores capaces de explicar más del 60% de la variabilidad total, considerando sólo las variables con una carga factorial mayor a 0,50 (valor absoluto).

Previamente a los análisis se corroboró que el número de estación utilizado estuviera asociado a aproximadamente la misma ubicación en todas las campañas. En la Tabla 3.2.2 se detallan las estaciones seleccionadas en cada campaña y el nuevo número asignado y en la Figura 3.2.2 se muestra la posición geográfica correspondiente.

En el ACP los datos fueron estandarizados para homogeneizar la escala de variación de las distintas variables incluidas en el análisis. La fórmula utilizada para la estandarización fue:

$$x_{sd} = \frac{(x - \bar{x})}{DS}, \text{ Ecuación 3.2.2}$$

donde:

x : dato original

x_{sd} : dato estandarizado

\bar{x} : valor medio

SD : desvío estándar

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

Tabla 3.2.2. Estaciones de cada campaña utilizadas para el análisis de componentes principales (ACP).

Nuevo n° de estación	1- Junio 2007	1- Octubre 2007	3- Febrero 2008	4-Junio 2008	5-Noviembre 2008	6-October 2009
1	1	---	1	1	1	1
2	2	1	2	2	---	2
3	3	2	3	3	3	3
4	4	3	4	4	4	4
5	5	4	5	5	5	---
6	6	13	6	6	6	---
7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	---
9	9	16	9	9	9	9
10	10	9	10	10	10	---
11	11	---	11	11	11	11
12	12	5	12	12	---	---
13	13	6	13	13	13	---
14	14	10	14	14	14	14
15	15	14	15	15	15	15
16	16	---	16	16	16	---
17	17	13	17	17	---	---
18	18	12	18	18	---	---
19	19	11	19	19	---	---
20	20	---	20	20	20	20
21	21	---	21	21	21	21
22	22	---	22	---	22	22
23	23	15	23	23	23	23
24	24	---	24	24	24	24
25	25	17	25	25	25	25
26	26	---	26	26	26	26

3.2.3 Resultados

3.2.3.1 Características generales de los parámetros físicos y químicos

El valor medio máximo de temperatura de superficie registrado *in-situ* para todo el Golfo y en toda la columna de agua, fue el correspondiente al mes de febrero de 2008 (18,90 y 16,20 °C, respectivamente), mientras que el mínimo fue el del mes de octubre de 2007 (11,18 y 10,99 °C, respectivamente). En las campañas realizadas en los meses de junio de 2007 y 2008, y noviembre de 2008 se registraron valores superficiales medios de 12,02; 12,37 y 16,24 °C, respectivamente). Las desviaciones máximas ocurrieron en el mes de febrero de 2008 (2,68 °C). Estos datos son consistentes con el ciclo estacional de temperatura superficial del mar obtenido mediante el sensor AVHRR (sección 3.1) el cual mostró máximas temperaturas y desvíos en los meses de diciembre a febrero y mínimos en los meses de junio a octubre (Figura 3.2.3).

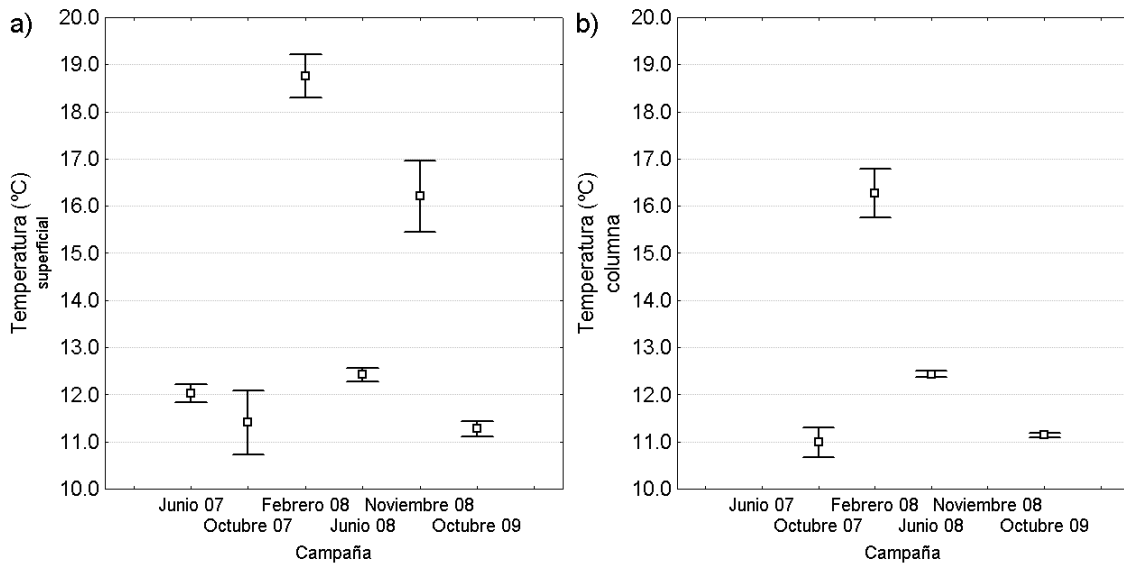


Figura 3.2.3: Valores medios de temperatura (°C) en las campañas San Matías 1-junio 2007, 2-October 2007, 3-Febrero 2008, 4-Junio 2008, 5-Noviembre 2008 y 6-October 2009. (a) Valores superficiales. (b) Valores de toda la columna de agua (estos últimos sólo disponibles en cuatro de las seis campañas).

Los valores de concentración de nitrato en superficie y en la columna de agua (Figura 3.2.4) fueron máximos en los meses de junio de 2007 y 2008 (2,55-2,60 y 2,88-2,83 μM , respectivamente). El mes de octubre de los años 2007 y 2009 presentó concentraciones intermedias en superficie (0,94 y 1,17 μM , respectivamente) y en la columna de agua (1,17 y 1,93 μM , respectivamente). Los meses de febrero y noviembre de 2008 presentaron mínimas concentraciones medias en superficie y en la columna de agua (0,13-0,48 y 0,33-0,86 μM , respectivamente). Las máximas variaciones de concentración para toda la columna de agua fueron obtenidas en octubre de 2007 y noviembre de 2008 ($\pm 1,22$ y $\pm 1,18$ μM , respectivamente).

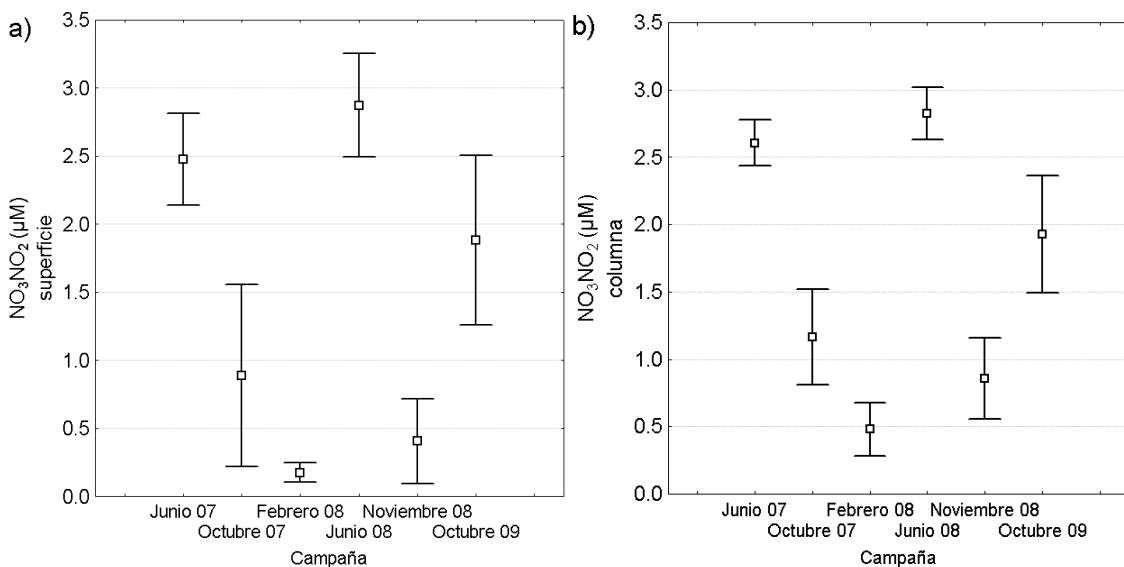


Figura 3.2.4: Valores medios de nitrato (μM) en las campañas San Matías 1-junio 2007, 2-October 2007, 3-Febrero 2008, 4-Junio 2008, 5-Noviembre 2008 y 6-October 2009. (a) Valores superficiales. (b) Valores de toda la columna de agua.

Las concentraciones medias superficiales de fosfato fueron máximas en los meses de junio de 2007 y 2008 ($1,10 \pm 0,51$; $1,18 \pm 0,11 \mu\text{M}$; respectivamente) y mínimas en los meses de noviembre 2008, octubre de 2007-2009 y febrero 2008 ($0,71 \pm 0,13$; $0,80 \pm 0,14$; $0,88 \pm 0,15$; y $0,85 \pm 0,68$ respectivamente). Las concentraciones medias de fosfato en la columna de agua mostraron el mismo patrón (Figura 3.2.5, Tabla 3.2.3). Las máximas variaciones se observaron en junio 2007 y febrero 2008 (desvíos de $0,33$ y $2,14 \mu\text{M}$, respectivamente). En el resto de las campañas las variaciones fueron del orden de $0,13$ a $0,15 \mu\text{M}$ (Figura 3.2.5).

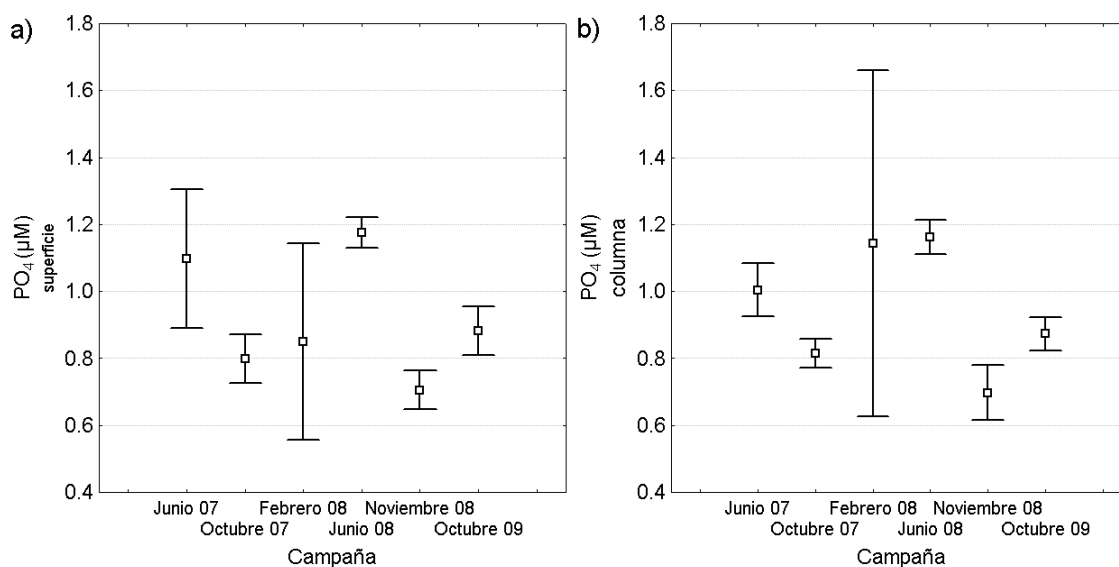


Figura 3.2.5: Valores medios de fosfato (μM) en las campañas San Matías 1-junio 2007, 2-October 2007, 3-Febrero 2008, 4-Junio 2008, 5-Noviembre 2008 y 6-October 2009. (a) Valores superficiales. (b) Valores de toda la columna de agua.

Las máximas concentraciones superficiales de silicato se registraron en los meses de febrero y junio de 2008 ($5,33 \pm 3,55$ y $5,94 \pm 2,28 \mu\text{M}$), mientras que las mínimas ocurrieron en los meses de octubre de 2007 y noviembre 2008 ($0,28 \pm 0,40$ y $1,05 \pm 0,48$; respectivamente). Los valores medios de la columna de agua (Tabla 3.2.3) presentaron un comportamiento similar al de los valores superficiales.

Los máximos desvíos se observaron en febrero 2008 y octubre 2009 ($\pm 3,52$ y $\pm 2,04$, respectivamente) considerando toda la columna de agua (Figura 3.2.6).

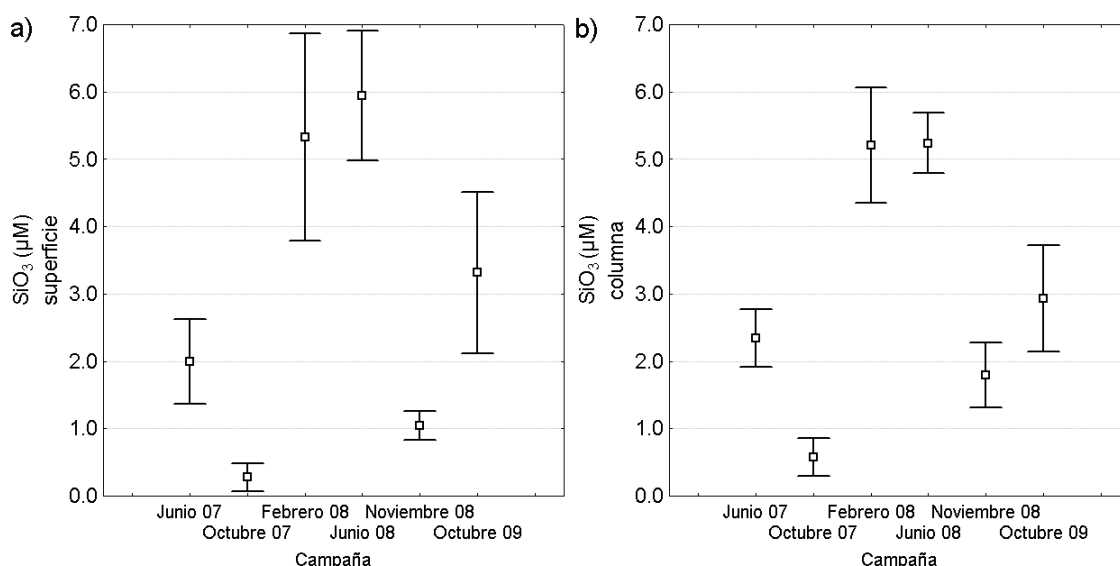


Figura 3.2.6: Valores medios de silicato (μM) en las campañas San Matías 1-junio 2007, 2-October 2007, 3-Febrero 2008, 4-Junio 2008, 5-Noviembre 2008 y 6-October 2009. (a) Valores superficiales. (b) Valores de toda la columna de agua.

Los valores medios máximos superficiales de clorofila-*a* se registraron en los meses de primavera: octubre de 2007 y 2009, al igual que las máximas variaciones ($1,92 \pm 1,62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $2,65 \pm 2,13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente), mientras que los valores mínimos se registraron en junio, noviembre y febrero de 2008 ($0,77 \pm 0,55 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $0,68 \pm 0,52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $0,75 \pm 0,62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente). Los valores medios en la columna de agua (Figura 3.2.7, Tabla 3.2.3) presentaron un patrón similar.

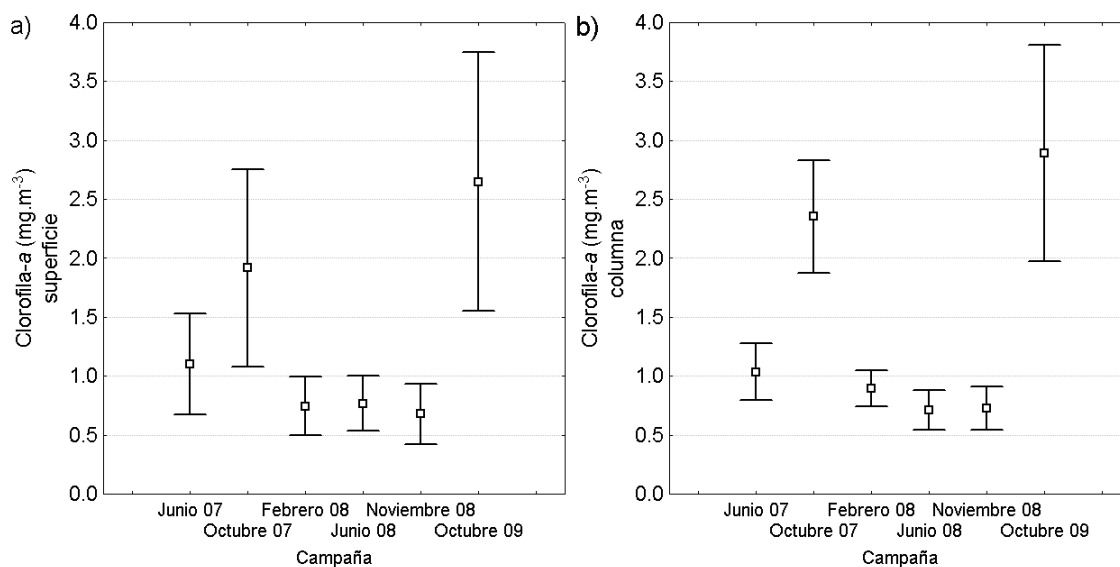


Figura 3.2.7: Valores medios de clorofila-*a* ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en las campañas San Matías 1-junio 2007, 2-October 2007, 3-Febrero 2008, 4-Junio 2008, 5-Noviembre 2008 y 6-October 2009. (a) Valores superficiales. (b) Valores de toda la columna de agua.

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

Tabla 3.2.3: Valores medios y desvíos estándar de los parámetros físicos y químicos en la columna de agua.

T (°C)	N° de datos de superficie	Media de superficie	DS de superficie	N° de datos en la columna de agua	Valor medio de la columna de agua	DS de la columna de agua
Total	117	13,83	3,01	540*	12,60*	2,40*
1-Junio 07	24	12,02	0,45	-----	-----	-----
2-October 07	16	11,18	0,77	33	10,99	0,89
3-Febrero 08	22	18,90	1,18	108	16,20	2,68
4-Junio 08	22	12,37	0,37	115	12,43	0,36
5-Noviembre 08	16	16,24	1,32	-----	-----	-----
6-October 09	17	11,91	1,17	247	11,12	0,36

NO₃+NO₂ (µM)	N° de datos de superficie	Media de superficie	DS de superficie	N° de datos en la columna de agua	Valor medio de la columna de agua	DS de la columna de agua
Total	131	1,47	1,35	342	1,66	1,34
1-Junio 07	26	2,55	0,82	70	2,60	0,72
2-October 07	17	0,94	1,26	48	1,17	1,22
3-Febrero 08	23	0,13	0,22	68	0,48	0,81
4-Junio 08	24	2,88	0,84	68	2,83	0,80
5-Noviembre 08	23	0,33	0,50	61	0,86	1,18
6-October 09	18	1,71	0,99	27	1,93	1,10

PO₄ (µM)	N° de datos de superficie	Media de superficie	DS de superficie	N° de datos en la columna de agua	Valor medio de la columna de agua	DS de la columna de agua
Total	131	0,93	0,41	343	0,97	0,99
1-Junio 07	26	1,10	0,51	70	1,00	0,33
2-October 07	17	0,80	0,14	48	0,81	0,15
3-Febrero 08	23	0,85	0,68	68	1,14	2,14
4-Junio 08	24	1,18	0,11	68	1,16	0,21
5-Noviembre 08	23	0,71	0,13	61	0,70	0,32
6-October 09	18	0,88	0,15	28	0,87	0,13

SiO₃ (µM)	N° de datos de superficie	Media de superficie	DS de superficie	N° de datos en la columna de agua	Valor medio de la columna de agua	DS de la columna de agua
Total	131	3,09	2,96	343	3,19	2,82
1-Junio 07	26	1,99	1,55	70	2,34	1,80
2-October 07	17	0,28	0,40	48	0,58	0,96
3-Febrero 08	23	5,33	3,55	68	5,21	3,52
4-Junio 08	24	5,94	2,28	68	5,24	1,87
5-Noviembre 08	23	1,05	0,48	61	1,79	1,88
6-October 09	18	3,31	2,41	28	2,94	2,04

Clorofila-<i>a</i> (mg.m⁻³)	N° de datos de superficie	Media de superficie	DS de superficie	N° de datos en la columna de agua	Valor medio de la columna de agua	DS de la columna de agua
Total	127	1,22	1,32	295	1,26	1,34
1-Junio 07	25	1,10	1,03	51	1,03	0,86
2-October 07	17	1,92	1,62	45	2,36	1,59
3-Febrero 08	26	0,75	0,62	71	0,89	0,65
4-Junio 08	24	0,77	0,55	49	0,71	0,59
5-Noviembre 08	18	0,68	0,52	52	0,73	0,65
6-October 09	17	2,65	2,13	27	2,89	2,32

* Valores calculados utilizando todos los datos disponibles (de superficie, de junio 2007 y noviembre 2008 y de toda la columna de agua para las campañas de octubre 2007 y 2009, febrero 2008 y junio 2008).

3.2.3.2 Distribuciones en superficie de los parámetros físicos y químicos

Temperatura

La temperatura de superficie mostró una distribución uniforme en las campañas realizadas en junio 2007 y 2008. En el área interna del Golfo (Figura 3.2.8), se registraron temperaturas próximas a los 12,0 °C, mientras que desde la boca hacia la plataforma la temperatura presentó una disminución gradual (10,0-11,0 °C). En primavera y verano se observaron importantes cambios horizontales en sentido noroeste-sudeste en la boca del Golfo (entre los 41°29' - 41°51'S y 064°17' - 063°41 W, y en sentido norte-sur entre los 41°32' - 41°56'S y 064°18' - 064°40'W. De este modo, se distinguieron el sector noroeste con temperaturas cálidas (13,0°C y 20,0°C en octubre y febrero, respectivamente) y el sector sudeste con temperaturas más frías (10,0°C y 16,0°C en octubre y febrero, respectivamente) (Figura 3.2.8).

Los registros verticales de temperatura estuvieron disponibles en octubre 2007, febrero de 2008, junio de 2008 y octubre de 2009 (Figura 3.2.9); en el resto de las campañas las sondas presentaron problemas técnicos. En las campañas de octubre de 2007 y 2009 fue posible observar temperaturas más cálidas en superficie y menores a mayores profundidades en las estaciones ubicadas en el sector norte (1 y 17; 2 y 25). En el sector sur (estaciones 14, 22 y 15), la temperatura presentó mayor homogeneidad en la columna de agua. En el perfil correspondiente a febrero de 2008 y en las estaciones de la zona norte, se observó una tendencia a la estratificación en la columna de agua con temperaturas del orden de los 18,0 °C en aproximadamente los primeros 20 metros. En las estaciones ubicadas en la zona sur, los registros de temperatura fueron menores (~16,0 °C) y se observaron cambios relativamente importantes de temperatura hacia aproximadamente los 80 metros de profundidad. En junio 2008 y octubre se observaron temperaturas homogéneas en toda la columna de agua en el orden de los 12,0 °C y 11,0 °C.

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

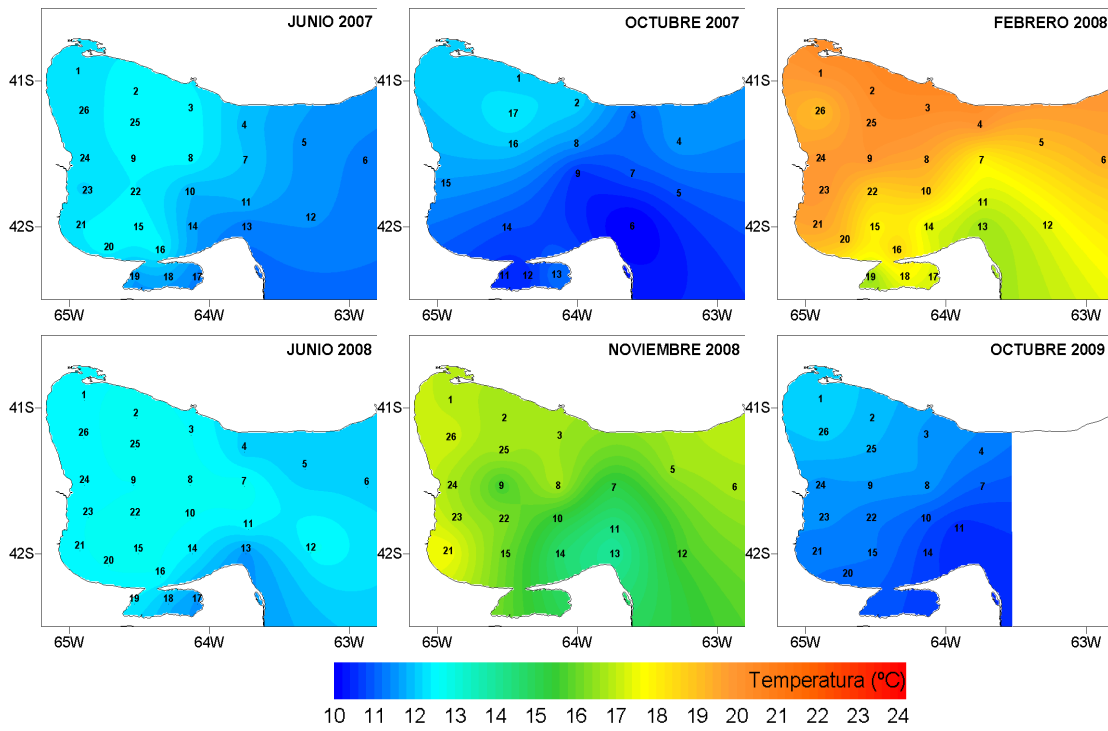
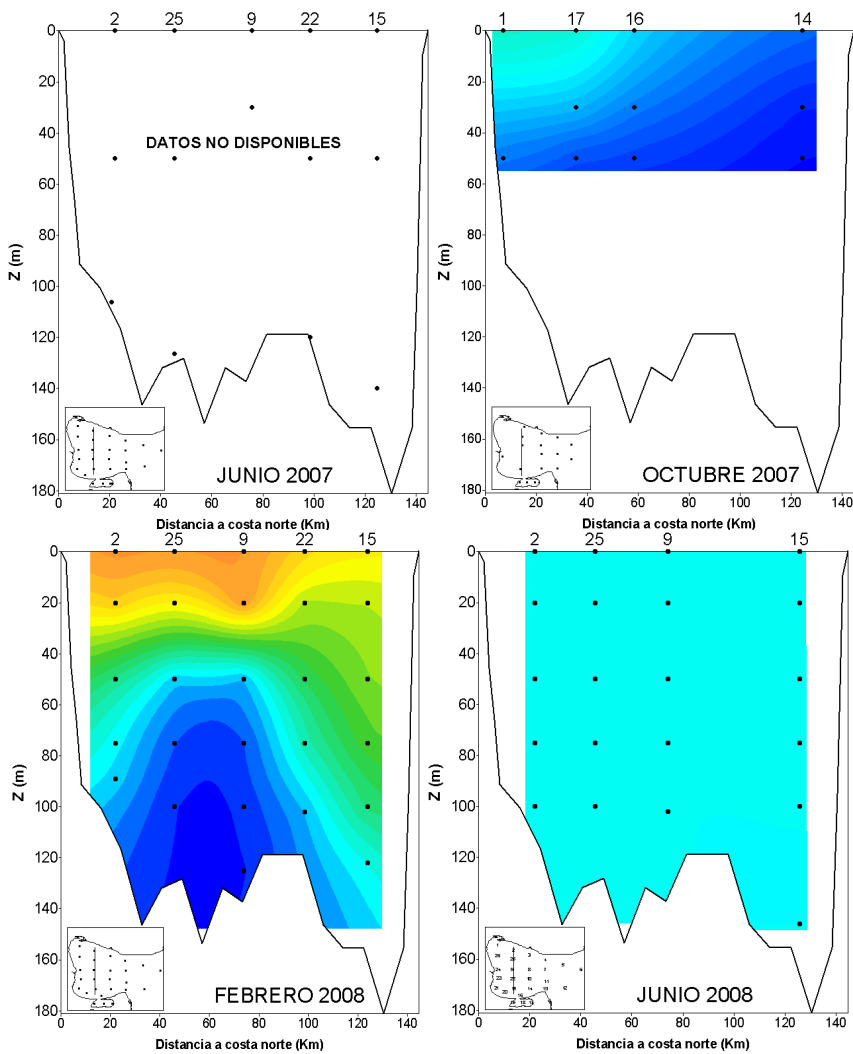


Figura 3.2.8. Mapas de temperatura de superficie (°C) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.



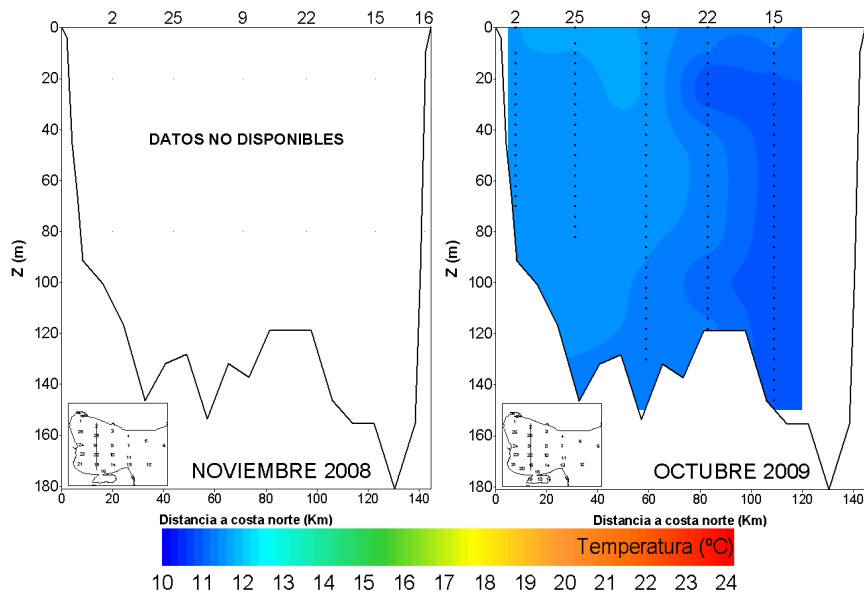
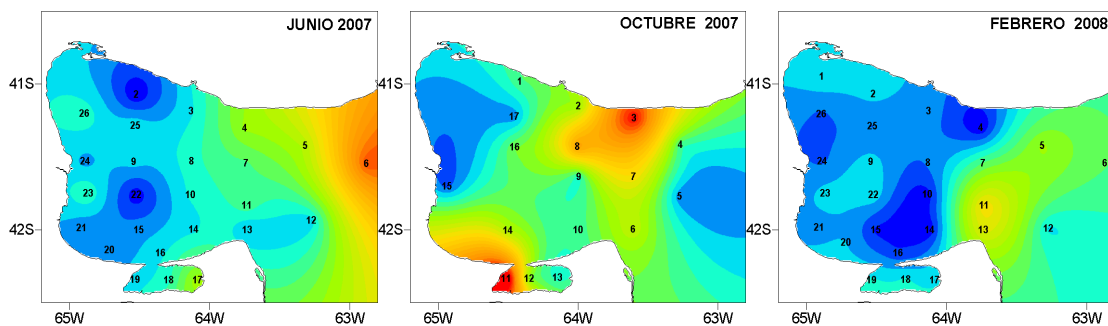


Figura 3.2.9. Perfiles verticales de temperatura (°C) para las campañas realizadas en los años 2007-2009.

Clorofila-a superficial

El ciclo estacional de la distribución de la concentración de clorofila-*a* presentó valores máximos en octubre de 2007 y 2009 (primavera) y mínimos en los meses de junio (invierno), noviembre y febrero (verano). En octubre de 2007 y 2009, las máximas concentraciones (superiores a $3,0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) se observaron en el sector norte de la boca, centro del Golfo y sector sur-sudoeste (Figura 3.2.10). En junio de 2007 y 2008, la distribución de clorofila-*a* fue relativamente uniforme en toda el área interna del Golfo, con un gradiente positivo del interior hacia la plataforma. En febrero se observaron bajas concentraciones de clorofila-*a* en toda el área, excepto en la zona sur y norte de la boca (en este último caso hacia la zona externa) en donde las concentraciones alcanzaron los $2,0$ a $3,0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.



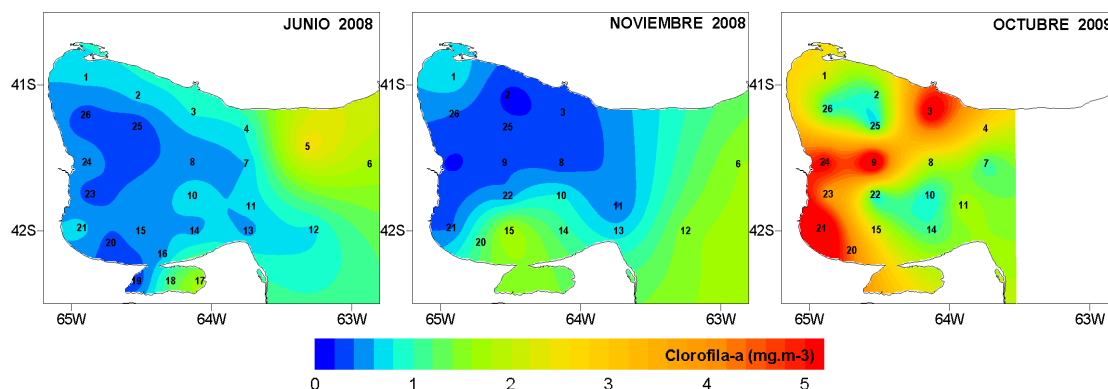


Figura 3.2.10. Distribuciones horizontales de clorofila-*a* (mg.m^{-3}) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

Los perfiles verticales de clorofila-*a* mostraron concentraciones mínimas ($0,5\text{-}0,9 \text{ mg.m}^{-3}$) relativamente uniformes e incrementándose en sentido norte-sur en los meses de junio de 2007 y 2008 (Figura 3.2.11). En los meses correspondientes a las estaciones de primavera-verano (octubre de 2007/2009, noviembre 2008 y febrero 2008), también se observó un incremento de la concentración de esta variable en sentido norte-sur (desde $0,5$ hasta $2,0 \text{ mg.m}^{-3}$). El mes de octubre de 2009 no reflejó la situación antes descrita ya que hubo un máximo ($4,5 \text{ mg.m}^{-3}$) en la estación central (identificada con el número 9) en superficie y a 40 metros. A ambos lados de esta estación las concentraciones disminuyeron a $1,50 \text{ mg.m}^{-3}$.

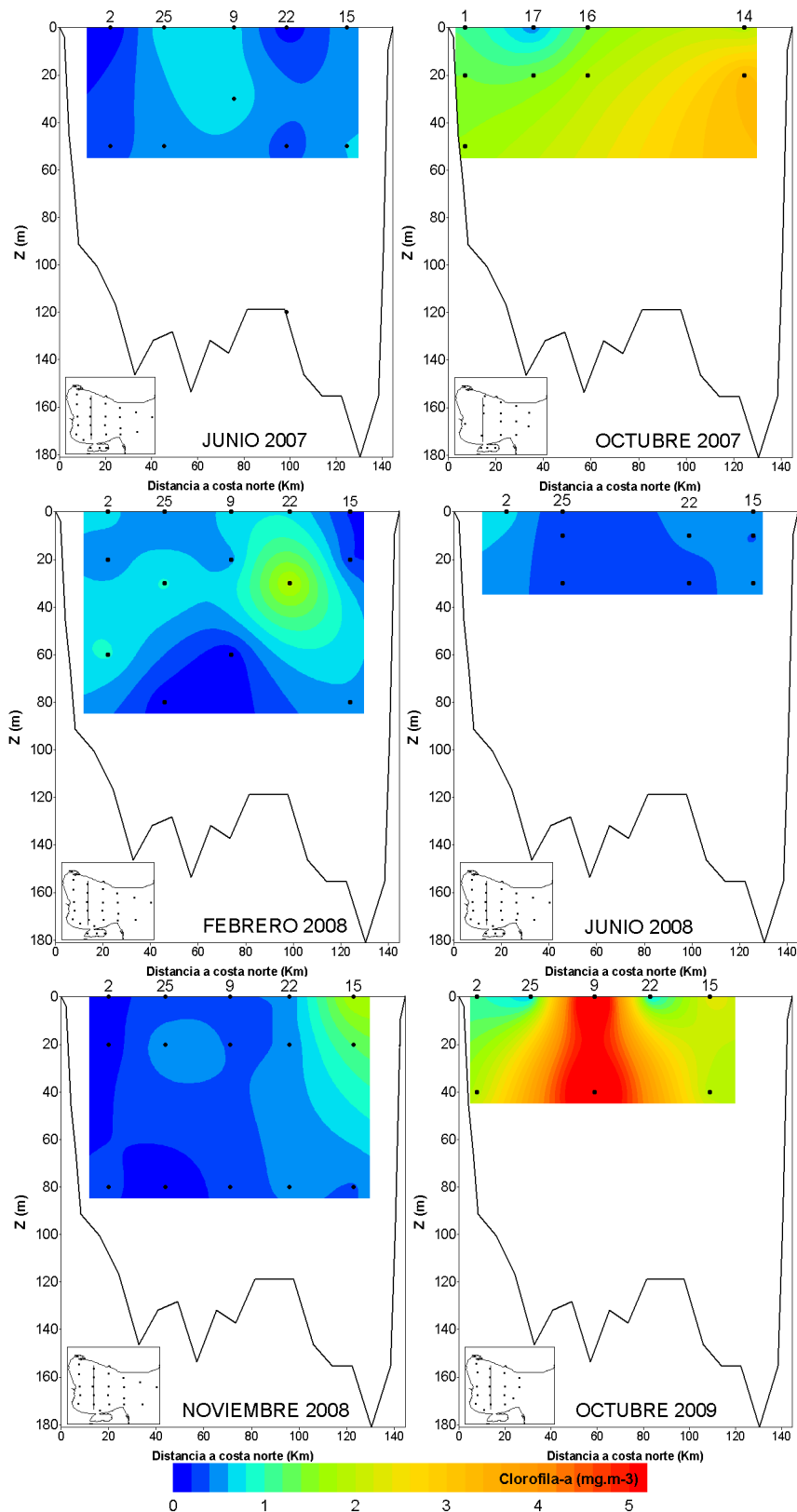


Figura 3.2.11. Perfiles verticales de clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para las campañas realizadas en los años 2007-2009.

Nitrato y Nitrito

El ciclo estacional de las concentraciones de nitrato y nitrito presentó valores máximos en junio ($2,48 \mu\text{M}$), medios en octubre ($0,89-1,88 \mu\text{M}$) y mínimos en febrero ($0,17 \mu\text{M}$). Considerando el valor medio para todo el Golfo, se observó una disminución de la concentración de nitrato y nitrito desde octubre (primavera) a noviembre y febrero (fines de primavera, principio de verano) y un incremento a fines de otoño y principios de junio (invierno). En los meses de octubre, noviembre y febrero se observaron los valores máximos en la zona sur-sudeste (Figura 3.2.12), mientras que en el mes de junio (fin de otoño) las zonas sur y centro fueron las que presentaron mayor concentración. Los valores mínimos se observaron en el área noroeste en los meses de octubre, noviembre y febrero (primavera y verano), mientras que en el mes de junio se observaron en el sector nordeste (externo al GSM).

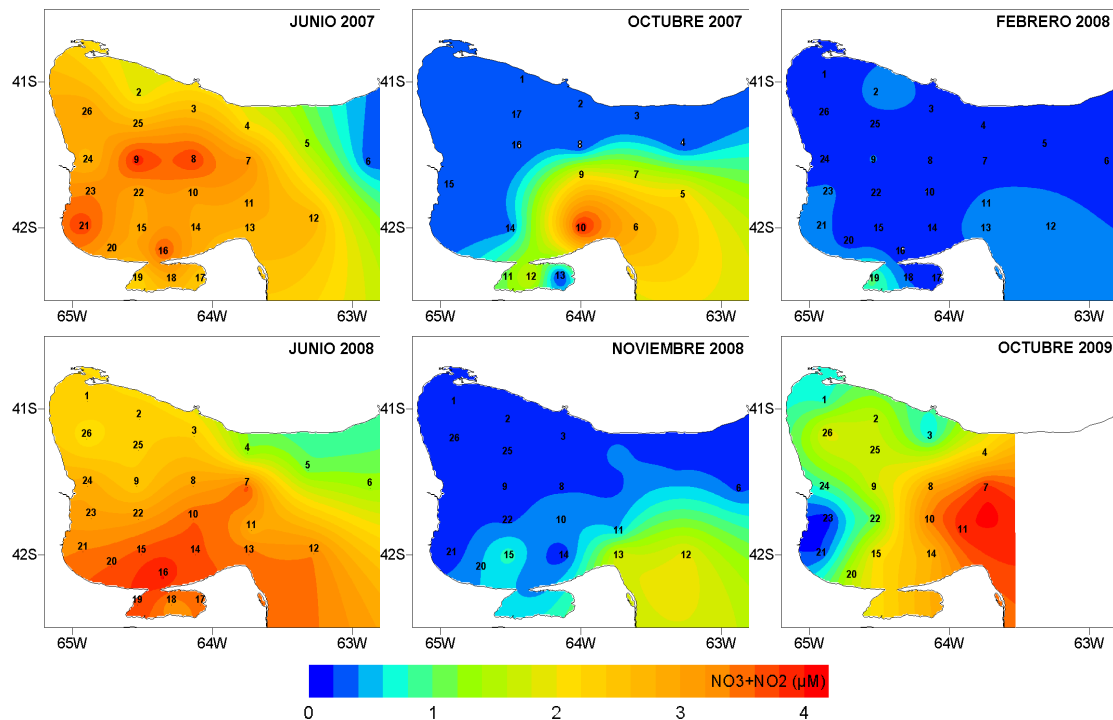


Figura 3.2.12. Distribuciones horizontales de nitrato+nitrito superficial (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

La distribución vertical de nitrato y nitrito (Figura 3.2.13) muestra homogeneidad vertical y mayores concentraciones en junio de 2007 ($\sim 5,0 \mu\text{M}$). En junio de 2008 fue posible observar el mismo patrón en la zona norte hasta aproximadamente los 30 metros de profundidad. En octubre de 2007, febrero y noviembre de 2008 se observaron concentraciones mínimas ($\sim 0,5 \mu\text{M}$) en los primeros 30 metros de la columna de agua. En profundidad las concentraciones aumentaron hasta los $\sim 5,0 \mu\text{M}$. En la zona norte se observó tendencia a la estratificación en

octubre mientras que en la zona sur de observó mayor homogeneidad. En febrero, se observaron concentraciones mínimas hasta aproximadamente los 40 metros aún en la zona sur.

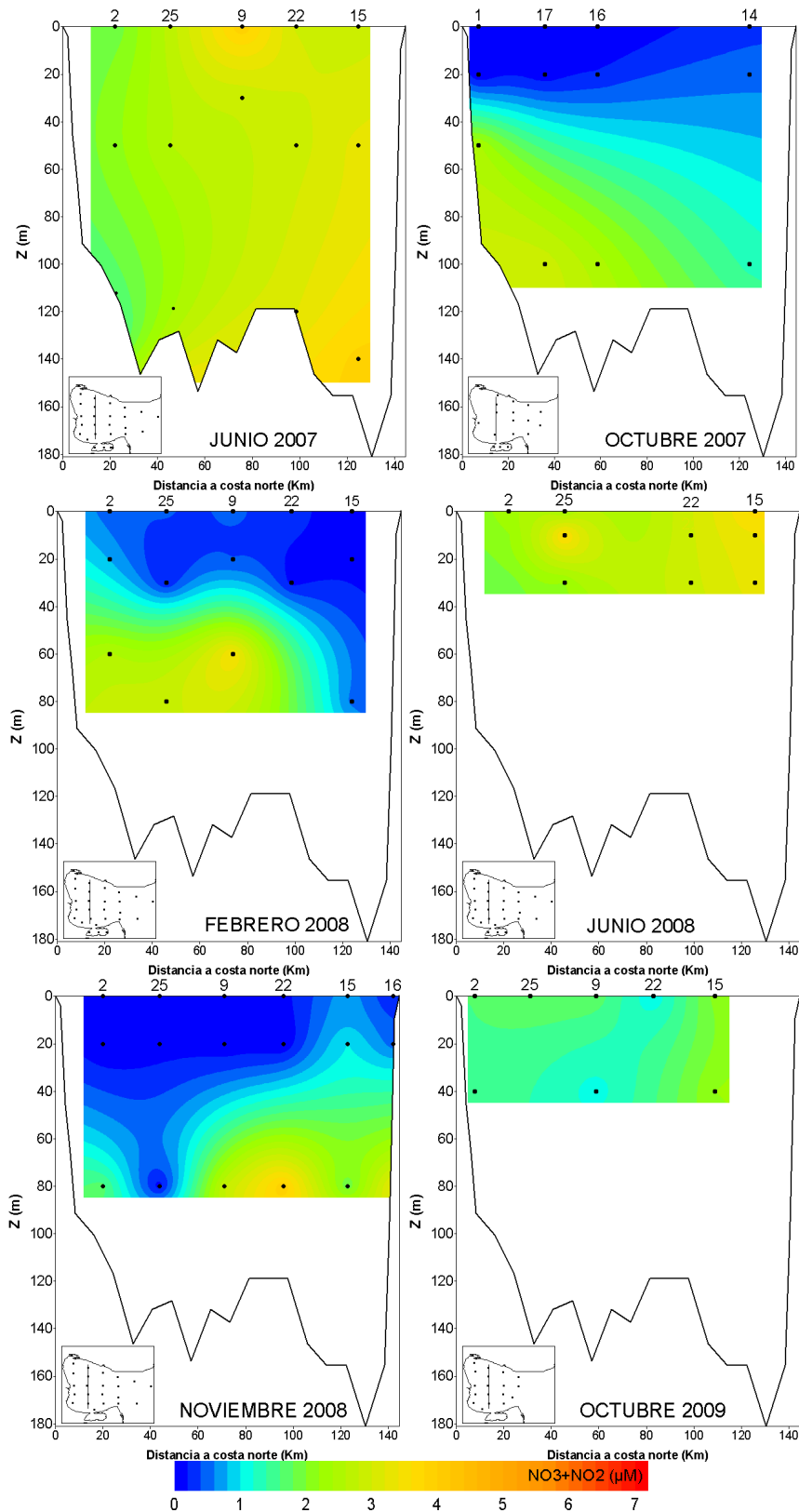


Figura 3.2.13. Perfiles verticales de nitrato+nitrito (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

Fosfato

La distribución superficial de la concentración de fosfato presentó valores altos en los meses de junio y octubre ($\sim 1,8 \mu\text{M}$, Figura 3.2.14). En junio la distribución espacial fue homogénea, mientras que en febrero se observó heterogeneidad en su distribución. Se observaron valores mínimos al norte y máximos en la zona sur y costa sudoeste. En los meses de primavera (octubre y noviembre) las concentraciones fueron relativamente más bajas ($0,8-1,5 \mu\text{M}$), y los valores más elevados se situaron en la zona de la boca y al sur de la misma.

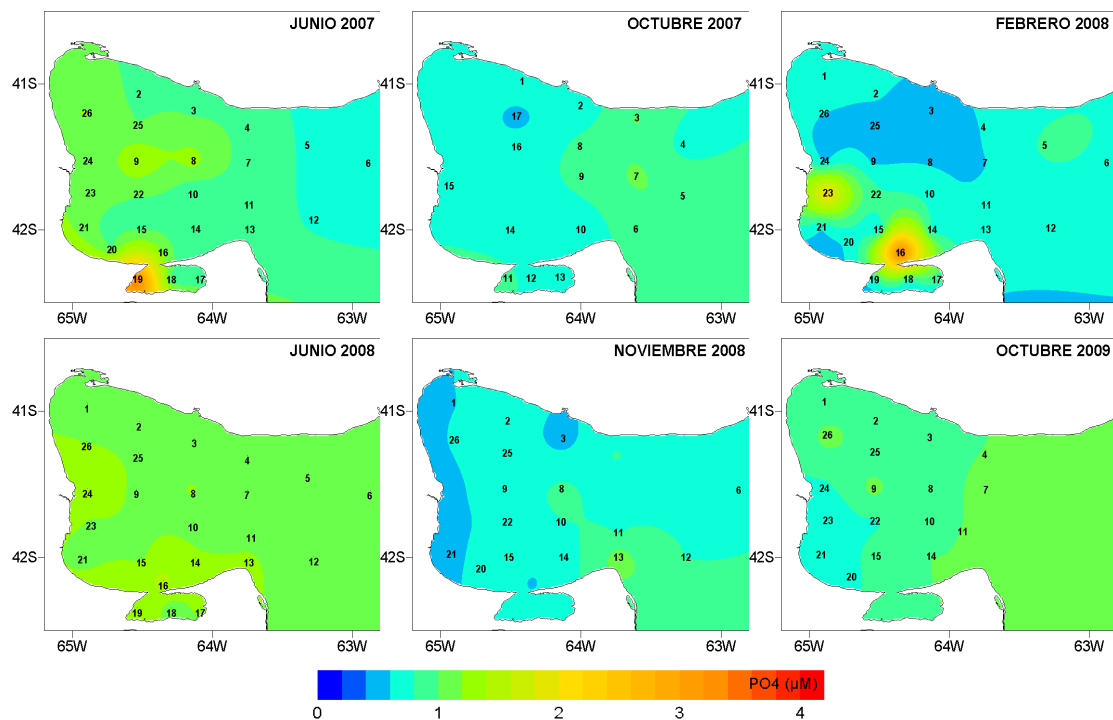


Figura 3.2.14. Distribuciones horizontales de fosfato superficial (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

Los perfiles verticales de fosfato (Figura 3.2.15) mostraron concentraciones no mayores a $1,5 \mu\text{M}$, a excepción de la campaña realizada en el mes de febrero de 2008, donde en la estación “25” a 30 metros de profundidad se registró un máximo de aproximadamente $2,0 \mu\text{M}$. En general se observó que los patrones de distribución fueron relativamente uniformes y no fue posible apreciar la estratificación de la columna de agua o la existencia de gradientes latitudinales.

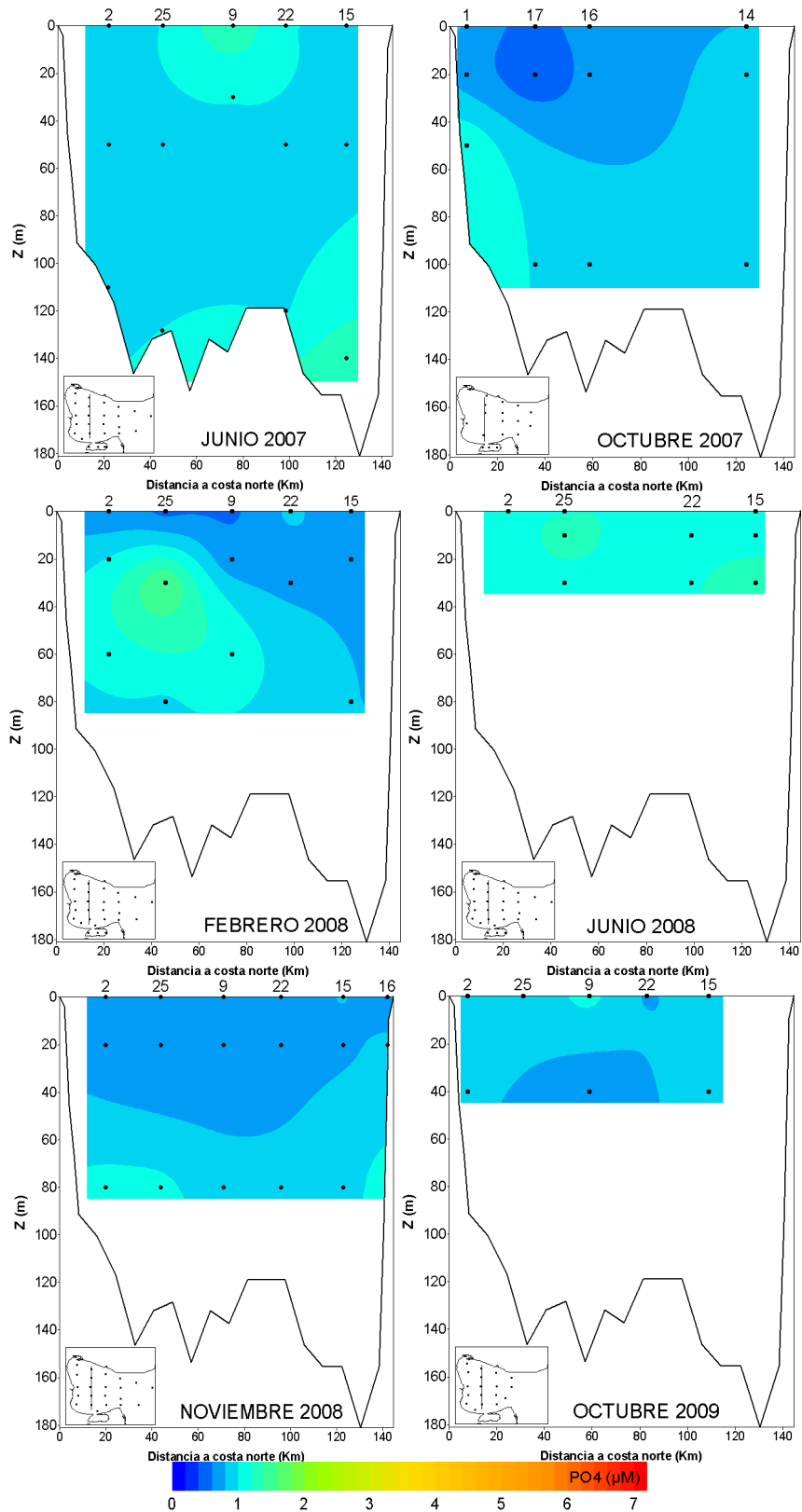


Figura 3.2.15. Perfiles verticales de fosfato (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

Silicato

La concentración media superficial de silicato mostró un patrón temporal variable (Figura 3.2.16). Se observaron concentraciones relativamente altas en el área interna del Golfo en junio de 2007 y 2008, febrero 2008 y octubre de 2009. Las concentraciones de silicato fueron relativamente bajas ($\sim 1,0\mu\text{M}$) y uniformes en octubre 2007 y noviembre 2008. En febrero de 2008 se observaron concentraciones altas tanto en la zona interna como externa ($7,0\mu\text{M}$), sin embargo desde la zona norte de la boca y hacia el sur del Golfo se registraron zonas de baja concentración ($\sim 1,0\mu\text{M}$). En los meses de junio de 2007 y octubre de 2009 se observó menor concentración en la zona de la boca con respecto al área interna.

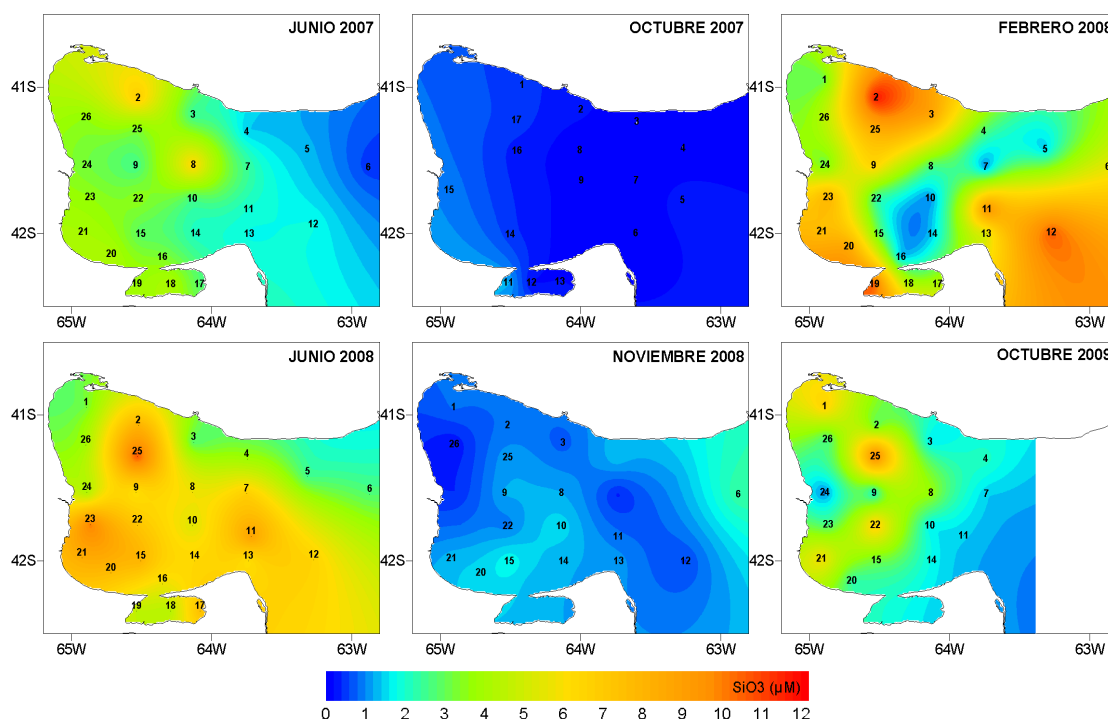


Figura 3.2.16. Distribuciones horizontales de silicato superficial (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

Los perfiles verticales de silicato (Figura 3.2.17) mostraron concentraciones relativamente altas ($\sim 6,0\mu\text{M}$) y uniformes en junio de 2008. En el mes de junio de 2007, en cambio, las concentraciones fueron bajas en la zona norte y en profundidad ($\sim 1,0\mu\text{M}$), mientras que en la zona sur, hasta aproximadamente los 50 metros se registraron concentraciones del orden de los $4,0\mu\text{M}$. Los meses de octubre de 2007 y noviembre de 2008 mostraron concentraciones mínimas en prácticamente todo el perfil con tendencia a incrementarse en profundidad (evidente en la zona norte por debajo de los 40 metros de profundidad en octubre de 2007 y en los 80 metros en las estaciones centrales del perfil de noviembre).

En octubre de 2009 se observaron concentraciones en el orden de los $6,0\mu\text{M}$ en los primeros 20 metros con valores altos en las estaciones 25 (zona norte) y 22 (zona sur). En el

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

perfil de febrero de 2008 se registraron concentraciones altas en todas las profundidades de la zona norte ($\sim 11,0\mu\text{M}$), mientras que hacia el sur la concentración de silicato disminuyó hasta $2,0-4,0\mu\text{M}$.

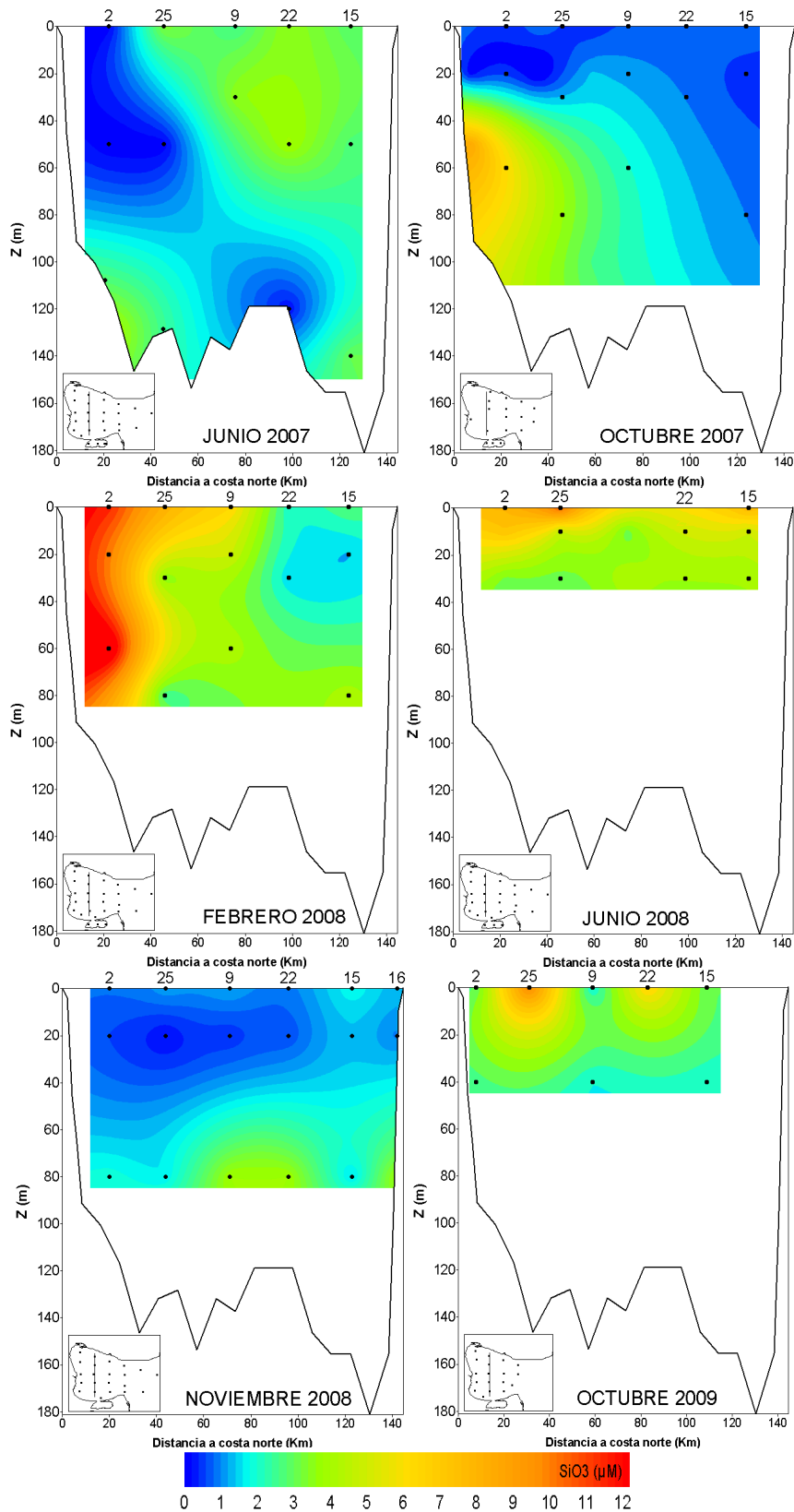


Figura 3.2.17. Perfiles verticales de silicato (μM) para las seis campañas realizadas en los años 2007-2009.

3.2.3.3. Clasificación y ordenación de las estaciones de muestreo

3.2.3.3.1. Análisis de agrupamiento

Los análisis de agrupamiento permitieron distinguir dos grupos de estaciones en invierno (junio de 2007 y 2008, Figura 3.2.18), mientras que en primavera-verano (octubre, noviembre y febrero) se llegaron a distinguir tres grupos (Figura 3.2.19).

La agrupación denominada con el número 1, estuvo integrada por estaciones ubicadas en el interior del Golfo y la denominada con el número 2 por estaciones ubicadas en la zona sur y en la zona externa de la boca. En junio de 2008 se observó un grupo de tres estaciones (4, 5 y 6) que se diferenciaron claramente de los grupos 1 y 2. Estas estaciones se localizaron desde la zona norte de la boca hacia el exterior del Golfo, es por ello que fue definido como grupo 2'.

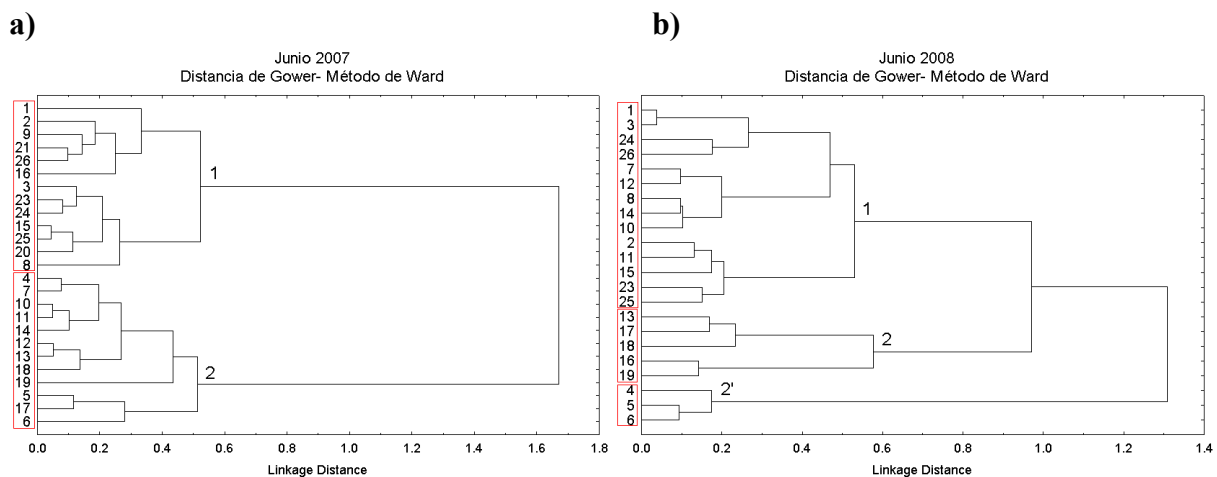


Figura 3.2.18 Análisis de agrupamiento correspondientes a las campañas oceanográficas de junio de 2007 y 2008.

En las campañas de octubre (2007 y 2009) y noviembre de 2008 las estaciones del grupo denominado 3 presentaron mayor similitud con las estaciones del grupo 2, mientras que en febrero las estaciones del grupo 3 se diferenciaron claramente de las estaciones de los grupos 1 y 2. Las estaciones del grupo 3 se ubicaron en la zona norte de la boca y sur del Golfo.

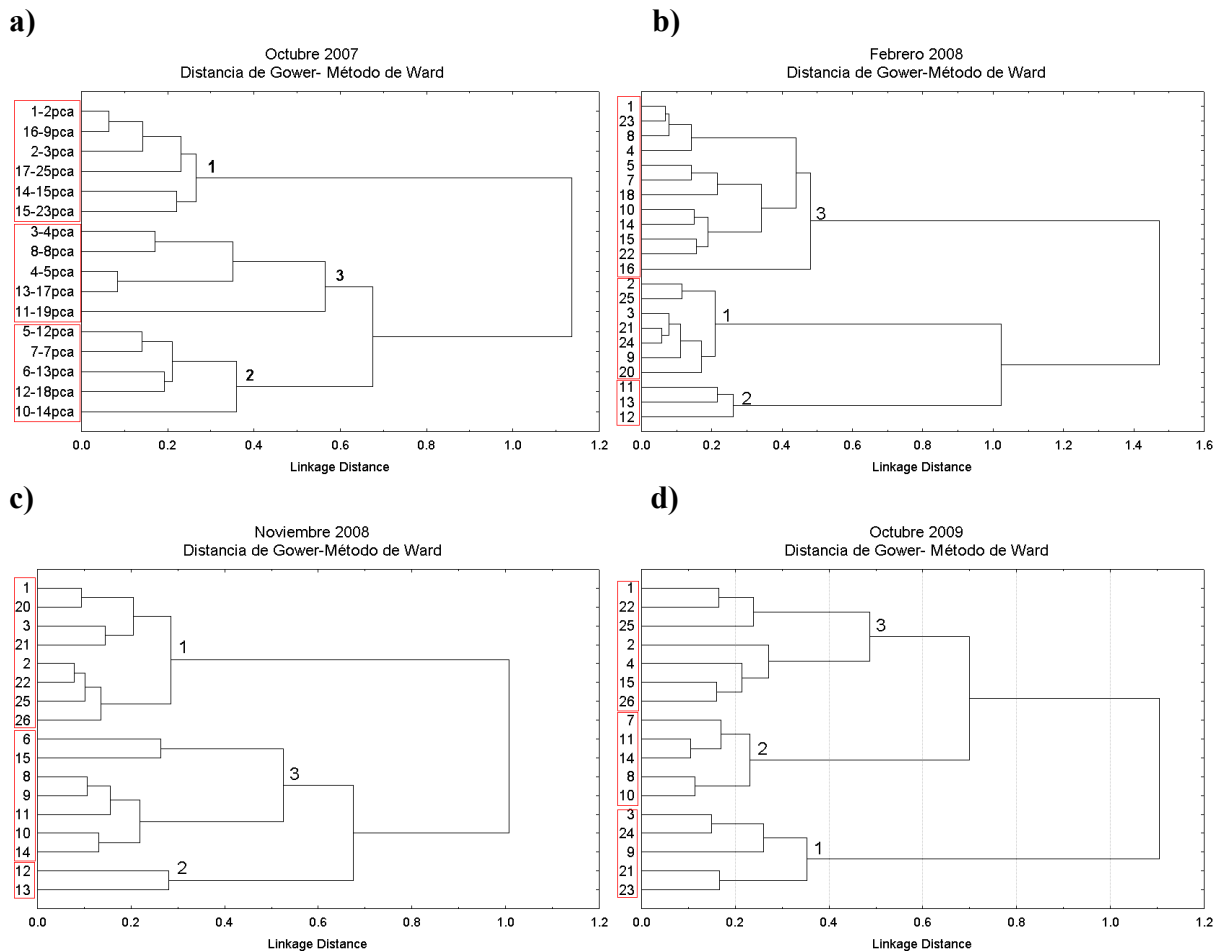


Figura 3.2.19. Análisis de agrupamiento correspondientes a las campañas oceanográficas de (a) octubre 2007, (b) febrero 2008, (c) noviembre 2008, (d) octubre 2009. En octubre de 2007 (a) el subíndice “pca” indica el renombramiento de las estaciones para el análisis de componentes principales.

Las variables ambientales que contribuyen en la definición de los agrupamientos obtenidos, serán identificadas a continuación mediante el análisis de componentes principales (ACP).

3.2.3.3.2. Análisis de componentes principales

La varianza total explicada por los tres primeros componentes principales obtenidos en las campañas realizadas en junio de 2007 y de 2008 fue del 76,8 y 84,7%, respectivamente (Tabla 3.2.4).

En junio de 2007, la varianza para los tres primeros componentes fue de 42,45, 21,2 y 13,2 %, mientras que en el 2008 la distribución fue de 42,4, 28,3 y 14,0 % (Tabla 3.2.2). La temperatura, la concentración de nitrato y la profundidad estuvieron correlacionadas positivamente con el primer componente (0,81; 0,77 y 0,73, respectivamente). La concentración de clorofila-*a* en cambio, se correlacionó en forma negativa (-0,72). La concentración de fosfato se asoció positivamente al segundo componente (0,85); mientras que

la concentración de silicato estuvo explicada por los dos primeros componentes (en forma positiva con el primer componente, 0,48; y negativa, -0,48; en el segundo) (3.2.20a, Tabla 3.2.4).

En junio de 2008 (al igual que en 2007), las variables temperatura, nitrato y silicato se correlacionaron en forma positiva al primer componente principal (0,67; 0,60 y 0,68, respectivamente). La concentración de clorofila-*a* se correlacionó, en forma negativa con el primer componente (-0,88). La concentración de nitrato también estuvo asociada en forma positiva a los dos primeros componentes (0,60 y 0,68, respectivamente), y la de fosfato tuvo una fuerte correlación positiva con el segundo componente (0,76) (Figura 3.2.20c, Tabla 3.2.4).

Cuando se analiza la representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2 (Figura 3.2.20 b y d), las estaciones que se asociaron en forma positiva al primer componente principal se ubicaron, en general en el interior del Golfo y son las identificadas como el grupo 1 en el análisis de agrupamiento (Figura 3.2.18). En general, las estaciones correspondientes al grupo 2 se asociaron en forma negativa al primer componente. Las estaciones de este segundo grupo se encontraron ubicadas en la zona de la boca y sur del golfo San Matías e interior del golfo San José. El primer componente se encontró definido, en forma positiva, por temperatura, nitrato y profundidad; y negativamente por clorofila-*a* (Figura 3.2.20 a y c). De este modo, las estaciones del primer grupo se caracterizaron por concentraciones de nitrato relativamente altas, temperaturas relativamente cálidas y bajas concentraciones de clorofila-*a*. Las estaciones correspondientes al segundo grupo presentaron temperaturas relativamente bajas y mayores concentraciones de clorofila-*a*. La contribución positiva del fosfato al segundo componente permite distinguir que en junio de 2007 todas las estaciones presentaron concentraciones intermedias de este nutriente, a excepción de la estación 19 (ubicada en el sector oeste del GSJ) que presentó mayor concentración relativa.

En junio de 2008 las variables asociadas al segundo componente permitieron diferenciar, dentro del grupo 2 las estaciones 4, 5 y 6 ubicadas en la zona norte externa al GSM y las estaciones 13, 16 (ubicadas en la zona sur), 17, 18 y 19 (ubicadas en el interior del GSJ).

Las estaciones ubicadas en la zona nordeste se diferenciaron del segundo grupo en que presentaron bajas concentraciones de nitrato y fosfato (y menor profundidad relativa); mientras que el segundo grupo se caracterizó por presentar concentraciones relativamente mayores de esos nutrientes (y estar localizadas en una región de mayor profundidad). En particular las estaciones 16 y 19 presentaron menor concentración de clorofila-*a*.

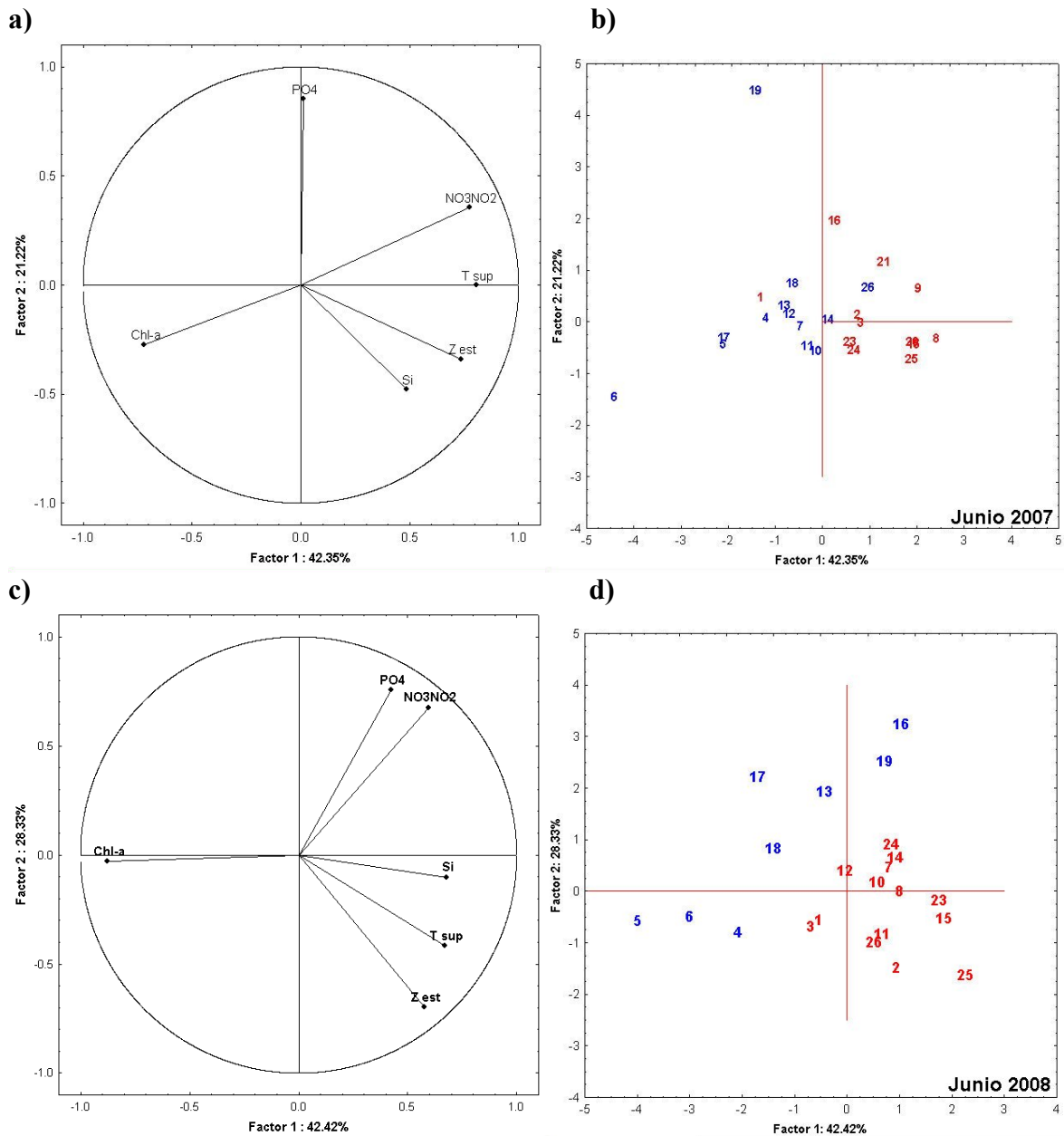


Figura 3.2.20. Junio 2007 y 2008. Análisis de componentes principales entre variables físicas y químicas (a y c). Representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2 (b y d). Los colores asignados a las estaciones indican el grupo al que pertenecen de acuerdo al análisis de agrupamiento realizado previamente (grupo 1: [rojo], grupo 2: [azul]).

La varianza total explicada por los tres primeros componentes principales obtenidos en las campañas realizadas en octubre de 2007 y de 2009 fue del 82,3 y 79,9%, respectivamente (Tabla 3.2.4). En octubre de 2007, la varianza para los primeros tres ejes fue de 42,9, 22,5 y 16,9%, mientras que en el 2009 la varianza fue de 37,65, 24,4 y 17,9 % (Tabla 3.2.4). En octubre de 2007 la temperatura y la profundidad se correlacionaron en forma positiva al primer componente, mientras que el nitrato y el fosfato lo hicieron en forma negativa (Figura 3.2.21a, Tabla 3.2.4). La concentración de clorofila-*a* se asoció en forma positiva al segundo componente. El nitrato también presentó una correlación negativa importante con el segundo

componente. El silicato se asoció al componente 3 en forma negativa (Figura 3.2.21a, Tabla 3.2.4).

En octubre de 2009 se observó que la contribución del primer componente a la varianza fue menor que la observada en octubre de 2007. El primer componente principal estuvo definido en forma positiva por nitrato y fosfato y negativamente por silicato y clorofila-*a* (Figura 3.2.21c, Tabla 3.2.4). La concentración de clorofila-*a* presentó, además, una alta correlación negativa con el segundo componente mientras que el silicato se correlacionó positivamente. La profundidad presentó una importante contribución positiva en el segundo componente (Figura 3.2.21c, Tabla 3.2.4). En este caso la temperatura, que generalmente se asociaba al primer componente, tuvo una alta correlación (0,95) con el tercer componente principal (17,95% de la varianza total).

El análisis de la representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2 para octubre de 2007 (Figura 3.2.21b), mostró que las estaciones que se asociaron en forma positiva al primer componente se ubicaron en el interior del Golfo (identificadas como grupo 1). Estas estaciones se caracterizaron por presentar temperaturas relativamente cálidas, mayor profundidad y menores concentraciones de nitrato y clorofila-*a*. Las estaciones del grupo 2 se asociaron negativamente a los componentes 1 y 2 estando caracterizadas por temperaturas relativamente frías, menor profundidad y mayores concentraciones de nitrato. En coincidencia con los análisis de agrupamiento estas estaciones se encontraron localizadas en la zona sudeste (externa) del Golfo. Finalmente, en esta campaña las estaciones pertenecientes al tercer agrupamiento se asociaron en forma positiva al segundo componente y se caracterizaron por concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* y bajas de nitrato. Estas estaciones se localizaron en la zona norte de la boca y en el golfo San José.

En octubre de 2009 las estaciones que se asociaron en forma positiva al primer componente pertenecen al grupo 2 (Figura 3.2.21d) y se encontraron ubicadas en la zona sur, próxima a la boca del GSM. Estas estaciones se caracterizaron por presentar concentraciones relativamente altas de nitrato y fosfato y menor concentración de clorofila-*a*. Las estaciones correspondientes al grupo 2 (localizadas principalmente en la costa oeste y norte de la boca del Golfo) se caracterizaron por presentar concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* y bajas de nitrato y fosfato. Las estaciones pertenecientes al tercer grupo se correlacionaron positivamente al componente 2 (Figura 3.2.21d, Tabla 3.2.4) y por lo tanto se caracterizaron por concentraciones relativamente altas de silicato, intermedias de nitrato y fosfato y bajas de clorofila-*a* (a excepción de la estación 4). En esta campaña la contribución de la temperatura

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

en el agrupamiento de las estaciones no fue importante (ya que se asoció al tercer componente principal). En esta campaña las localizaciones de los grupos 1 (interior) y 2 (sur del Golfo) fueron coherentes con las campañas analizadas previamente. Las estaciones identificadas pertenecientes al grupo 3 se localizaron en la zona noroeste y sudoeste del Golfo.

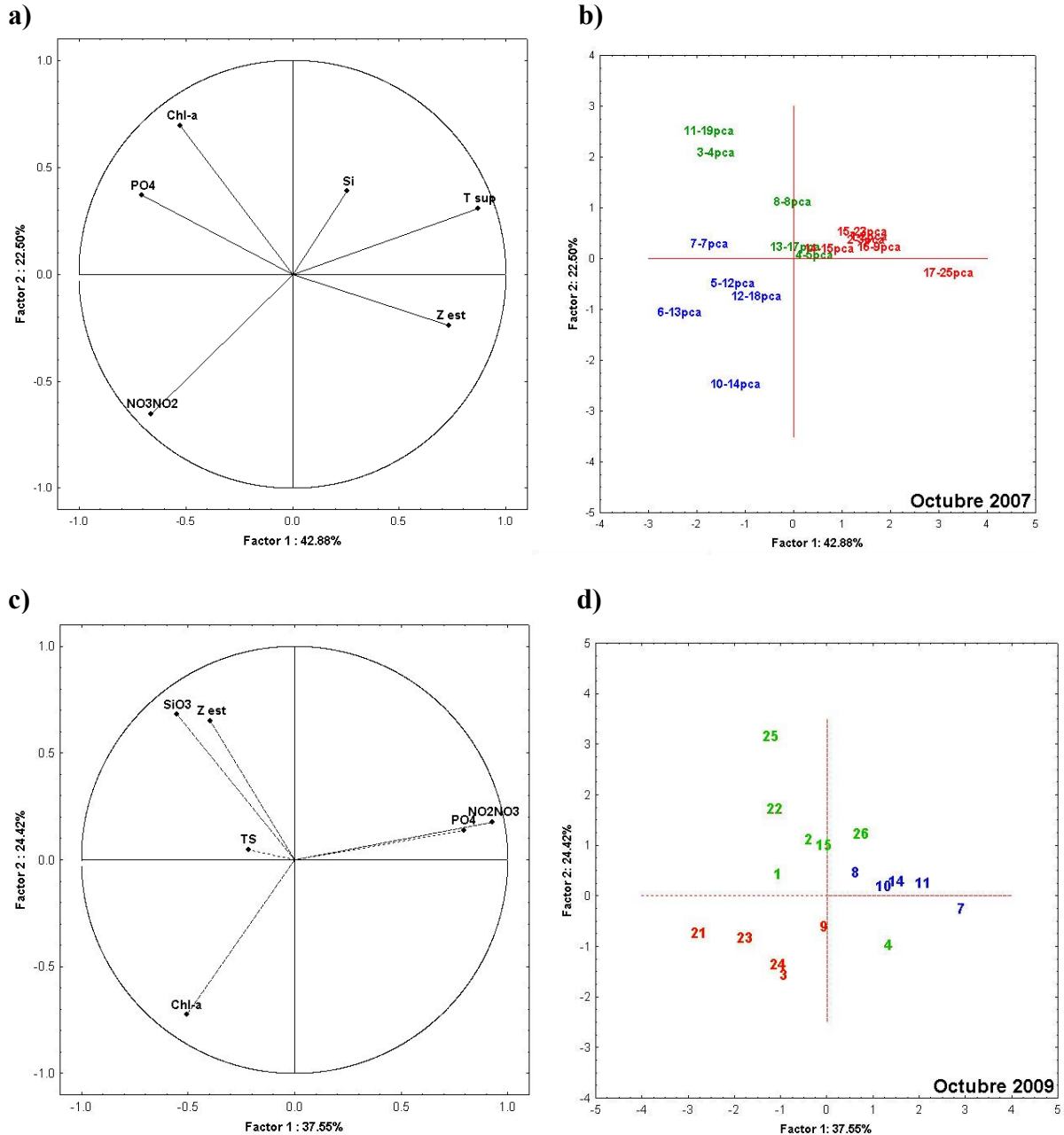


Figura 3.2.21. Octubre 2007 y 2009. (a y c): Análisis de componentes principales entre variables físicas y químicas. (b y d): Representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2. Los colores asignados a las estaciones indican el grupo al que pertenecen las estaciones de acuerdo al análisis de agrupamiento realizado previamente (grupo 1: [rojo], grupo 2: [azul], grupo 3: [verde]).

La varianza total explicada por los tres primeros componentes principales en la campaña realizada en febrero de 2008 fue del 82%. Para cada uno de los primeros tres componentes principales la distribución de la varianza fue de 36,3, 31,3 y 14,5% respectivamente (Tabla

3.2.4). En este caso el primer y segundo componentes presentaron contribuciones equivalentes. Al primer componente se asociaron en forma positiva las concentraciones de nitrato y silicato. La concentración de clorofila-*a* y la profundidad también se asociaron en forma positiva y tuvieron contribuciones más altas en el segundo componente: positiva en el caso de clorofila-*a* y negativa en el caso de la profundidad. La temperatura tuvo una contribución negativa importante en el segundo componente y la concentración de fosfato en el primero (Figura 3.2.22a, Tabla 3.2.4). En esta campaña, las estaciones de los grupos 1 y 2 se asociaron en forma positiva al primer componente principal estando caracterizadas por concentraciones relativamente altas de nitrato y silicato. Las estaciones del grupo 1 se diferenciaron de las del grupo 2 porque las primeras se asociaron en forma negativa al segundo componente mientras que el segundo grupo se correlacionó en forma positiva (Figura 3.2.22b). De acuerdo a esto, las estaciones del grupo 1 presentaron temperaturas cálidas, menor concentración relativa de clorofila-*a* y estuvieron localizadas en zonas de mayor profundidad. Las estaciones del grupo 2 presentaron menor temperatura, mayor concentración relativa de clorofila-*a* y fueron menos profundas. Las estaciones del grupo 1 se localizaron en el interior del Golfo, mientras que las del grupo 2 se localizaron hacia el sudeste. Las estaciones que definieron al grupo 3 se correlacionaron en forma negativa con el primer componente principal (Figura 3.2.22b), indicando que presentaron temperaturas intermedias, concentraciones levemente mayores de fosfato y menores de nitrato, silicato y clorofila-*a*.

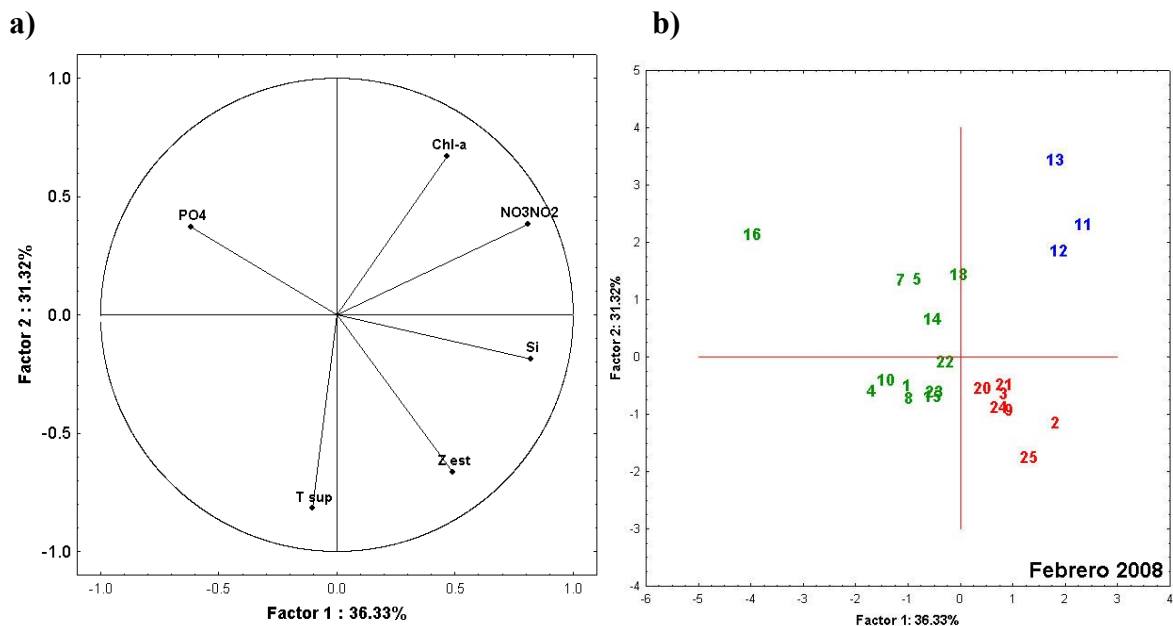


Figura 3.2.22. Febrero 2008. (a): Análisis de componentes principales entre variables físicas y químicas. (b): Representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2. Los colores asignados a las estaciones indican el grupo al que pertenecen las estaciones de acuerdo al análisis de agrupamiento realizado previamente (grupo 1:[rojo], grupo 2: [azul], grupo 3: [verde]).

En noviembre de 2008 la varianza total explicada por los tres primeros componentes fue de aproximadamente el 85%. La distribución de la varianza fue de 47,4, 21,0 y 16,3% para cada uno de los tres componentes (Tabla 3.2.4). La temperatura y la profundidad estuvieron positivamente correlacionadas con el primer componente, mientras que las concentraciones de nitrato y fosfato presentaron contribuciones negativas (Figura 3.2.23a, Tabla 3.2.4). La concentración de clorofila-*a* presentó sus contribuciones repartidas en forma negativa en el primer componente y positiva en el segundo (Figura 3.2.23a, Tabla 3.2.4). El segundo componente presentó una contribución positiva importante de silicato. Las estaciones correlacionadas en forma positiva con el primer componente principal se caracterizaron por temperaturas relativamente cálidas y menores concentraciones de nitrato, fosfato y clorofila-*a* (Figura 3.2.23b). Estas estaciones corresponden al interior del Golfo, en regiones con mayor profundidad y pertenecen al grupo identificado como 1. Las estaciones 11 y 12 forman el grupo 2, ubicado en la zona sur de la boca, caracterizado por temperaturas relativamente frías, mayores concentraciones relativas de nitrato y fosfato e intermedias de clorofila-*a* y menores de silicato. En esta campaña se identificó el grupo número 3, con características intermedias entre los grupos 1 y 2. Estas estaciones se localizaron hacia la zona sur del Golfo, a excepción de la estación 6 ubicada en la plataforma y las estaciones 8 y 9 localizadas hacia la zona centro norte del Golfo, que se diferencian levemente del resto del grupo por presentar menores concentraciones de clorofila-*a*.

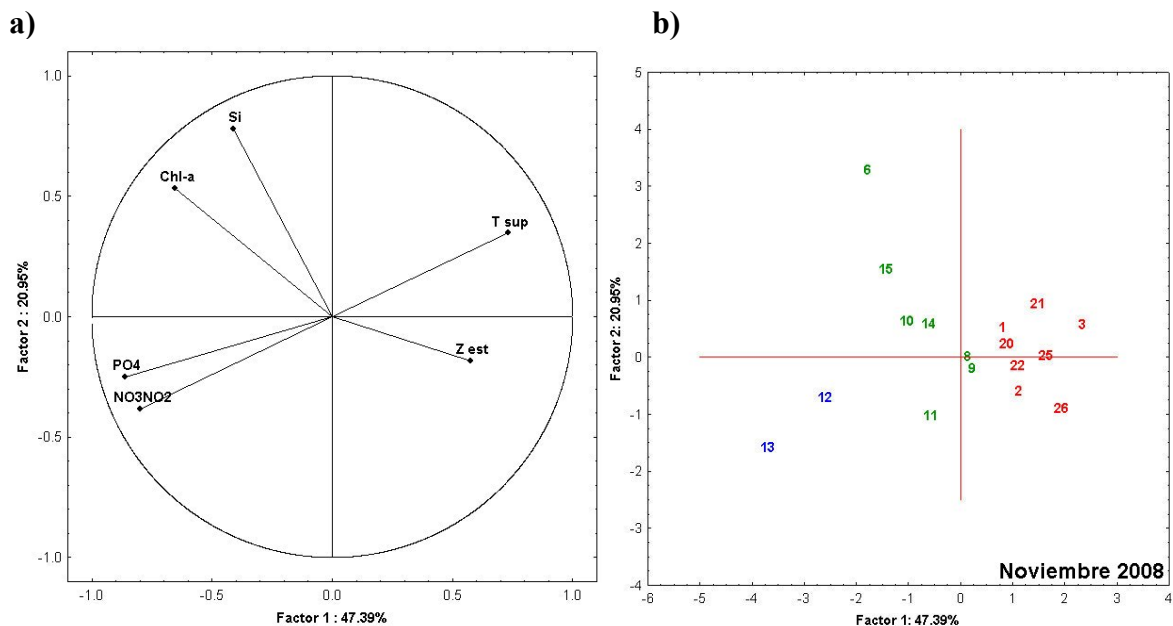


Figura 3.2.23. Noviembre 2008. (a): Análisis de componentes principales entre variables físicas y químicas. (b): Representación de las estaciones de muestreo en el plano de los componentes 1 y 2. Los colores asignados a las estaciones indican el grupo al que pertenecen las estaciones de acuerdo al análisis de agrupamiento realizado previamente (grupo 1: [rojo], grupo 2: [azul], grupo 3: [verde]).

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

Tabla 3.2.4: Análisis de Componentes Principales: coeficientes de correlación entre las variables oceanográficas y los tres primeros componentes principales (F1, F2 y F3) para cada campaña.

Variables	Código	Jun 2007			Oct 2007			Feb 2008			Jun 2008			Nov 2008			Oct 2009		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
temperatura	T	0,81	0,00	0,42	0,87	0,31	0,31	-0,10	-0,82	-0,32	0,67	-0,42	0,47	0,73	0,35	-0,45	-0,22	0,05	0,95
nitrate	NO ₂ NO ₃	0,77	0,36	-0,13	-0,66	-0,65	-0,29	0,81	0,38	-0,28	0,60	0,68	-0,20	-0,80	-0,38	-0,31	0,93	0,18	-0,16
fosfato	PO ₄	0,01	0,85	0,00	-0,71	0,37	0,30	-0,62	0,37	-0,57	0,42	0,76	0,29	-0,86	-0,25	0,28	0,79	0,14	0,34
silicato	SiO ₃	0,48	-0,48	-0,57	0,26	0,39	-0,85	0,82	-0,19	-0,49	0,68	-0,10	-0,67	-0,41	0,78	0,40	-0,55	0,68	-0,16
clorofila-a	Chla	-0,72	-0,27	0,35	-0,52	0,70	-0,14	0,47	0,67	0,23	-0,88	-0,03	-0,20	-0,65	0,53	-0,17	-0,51	-0,73	-0,03
Prof. de estación	Z	0,73	-0,34	0,39	0,73	-0,24	-0,14	0,49	-0,66	0,28	0,58	-0,70	-0,05	0,57	-0,18	0,64	-0,39	0,65	0,04
% varianza		42,35	21,22	13,23	42,88	22,50	16,94	36,33	31,32	14,53	42,42	28,33	13,99	47,39	20,95	16,27	37,55	24,42	17,95
% varianza acumulada		42,35	63,57	76,80	42,88	65,38	82,32	36,33	67,65	82,18	42,42	70,75	84,73	47,39	68,33	84,60	37,55	61,98	79,93
<u>Valores absolutos > 0.5</u>																			

Tabla 3.2.5: Análisis de Componentes Principales: coeficientes de correlación entre variables oceanográficas.

Jun-07	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	0.54*	1.00				
PO ₄	0.04	0.16	1.00			
SiO ₃	0.24	0.20	-0.19	1.00		
Chl-a	-0.35	-0.60*	-0.11	-0.23	1.00	
Z	0.62*	0.31	-0.17	0.31	-0.34	1.00

Jun-08	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	0.07	1.00				
PO ₄	0.06	0.60	1.00			
SiO ₃	0.24	0.41*	0.06	1.00		
Chl-a	-0.56*	-0.47*	-0.38	-0.42*	1.00	
Z	0.54*	-0.11	-0.21	0.44*	-0.43*	1.00

Oct-07	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	-0.82*	1.00				
PO ₄	-0.41	0.16	1.00			
SiO ₃	0.10	-0.19	-0.21	1.00		
Chl-a	-0.29	-0.02	0.47*	0.13	1.00	
Z	0.48*	-0.24	-0.48*	0.15	-0.39	1.00

Nov-08	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	-0.50*	1.00				
PO ₄	-0.75*	0.68*	1.00			
SiO ₃	-0.17	-0.10	0.31	1.00		
Chl-a	-0.24	0.45*	0.29	0.50*	1.00	
Z	0.14	-0.45*	-0.32	-0.19	-0.38	1.00

Feb-08	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	-0.34	1.00				
PO ₄	-0.13	-0.23	1.00			
SiO ₃	0.20	0.66*	-0.29	1.00		
Chl-a	-0.48*	0.45*	-0.13	0.17	1.00	
Z	0.28	0.05	-0.52*	0.39	-0.16	1.00

Oct-09	TS	NO ₃ NO ₂	PO ₄	SiO ₃	Chl-a	Z
TS	1.00					
NO ₃ NO ₂	-0.31	1.00				
PO ₄	0.07	0.66*	1.00			
SiO ₃	0.03	-0.37	-0.35	1.00		
Chl-a	-0.01	-0.56*	-0.33	-0.20	1.00	
Z	0.07	-0.23	-0.09	0.43*	-0.08	1.00

*coeficientes de correlación > |0,4|

En las campañas estacionales analizadas, el primer componente explicó entre el 47,4 y 36,3 % de la varianza total. En el lado positivo del primer componente se ubicaron: la temperatura, la concentración de nitrato y la profundidad en invierno (junio 2007-2008), la temperatura y la profundidad en primavera (octubre 2007 y noviembre 2008) y la concentración de nitrato, silicato y clorofila-*a* en verano (febrero 2008). En el lado negativo del primer componente, se ubicaron la concentración de clorofila-*a* en invierno (junio 2007-2008), los nutrientes y la clorofila-*a* en primavera (octubre 2007 y noviembre 2008) y la temperatura y la concentración de silicato en verano (febrero 2008).

El segundo componente explicó entre un 31,3 y 21,3% de la varianza total; tuvo contribuciones positivas de silicato en invierno (junio 2007 y 2008), de nitrato y fosfato en primavera (octubre 2007 y noviembre 2008, respectivamente), de fosfato en verano y de temperatura en junio y noviembre 2008. En el lado negativo del segundo componente, se ubicó el fosfato en junio de 2007-2008 y octubre 2007 y la clorofila-*a* se observó en primavera (octubre 2007 y noviembre 2008).

En general las relaciones entre las seis variables consideradas (Tabla 3.2.5) revelaron correlaciones negativas para temperatura-nitrato (a excepción de junio 2007 y 2008), temperatura-clorofila-*a* y clorofila-*a*-profundidad. También se observaron asociaciones positivas entre temperatura-profundidad y nitrato-clorofila-*a* (en noviembre y febrero 2008, mientras que en el resto de las campañas en general las asociaciones fueron negativas).

La representación de las estaciones de muestreo en función del primer y segundo componente estuvo, en general, determinada por las contribuciones de las variables temperatura, nitrato, clorofila-*a* y profundidad.

3.2.3.3.3. Resultados de los análisis de agrupamiento y componentes principales en relación a las distribuciones superficiales in-situ y satelitales.

Los mapas presentados en las figuras 3.2.25 a 3.2.29 sintetizan los resultados obtenidos mediante los análisis de agrupamiento y componentes principales. Los mapas obtenidos mediante interpolación de datos *in-situ* de temperatura y clorofila-*a* y las respectivas imágenes satelitales correspondientes a fechas comprendidas en el período de realización de las campañas oceanográficas (a excepción de junio de 2008 donde las fechas más cercanas a la campaña correspondieron a días previos), se presentan en forma conjunta con el objetivo de comparar los resultados del ACP, y los mapas de

interpolación e imágenes satelitales. En la sección 3.3 se analizará en forma cuantitativa la correlación entre los datos *in-situ* y satelitales de temperatura y clorofila-*a*.

En junio de 2007 y 2008 fue posible observar que las imágenes satelitales de TSM y los respectivos mapas *in-situ* mostraron patrones espaciales similares (Figura 3.2.24 a-d). La temperatura fue relativamente uniforme en el área de estudio; sin embargo se observó que la zona interna del Golfo fue levemente más cálida. En el caso de los mapas *in-situ* de clorofila-*a* se observó, en ambos años, que el interior del Golfo presentó concentraciones relativamente menores al área de la boca y externa (Figura 3.2.25a-c). El mapa satelital de junio de 2007 presentó gran similitud con el respectivo mapa *in-situ*. A pesar de la presencia de nubes, fue posible observar que el interior del Golfo presentó concentraciones menores a la zona norte de la boca y externa. El mapa satelital de junio de 2008 mostró “parches” de concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* en el interior del Golfo (Figura 3.2.25d). En el mapa *in-situ* estos parches no fueron observados, posiblemente porque la muestras de agua para la determinación de la clorofila-*a* (es decir, la ubicación de las estaciones de muestreo) no fue representativa del área en que fue tomada. Como se ha mencionado previamente la determinación de clorofila-*a* en el campo es puntual (sobre 1L de agua de mar) mientras que la del sensor satelital se realiza sobre un área de aproximadamente 1,21Km².

El análisis de los mapas resultantes del ACP (Figura 3.2.26a-b) mostró que el grupo 1 correspondió a la zona interna del Golfo. El grupo 2 se ubicó en la zona sur del GSM, a lo largo de la boca (especialmente en junio de 2007) y en el GSJ. En las imágenes satelitales y mapas *in-situ* se observa que el área ocupada por las estaciones del grupo 2 se caracteriza por temperaturas relativamente más frías y de mayor concentración de clorofila-*a* que la zona interna y coinciden con la caracterización de las estaciones mediante el ACP. En junio de 2008 se observó que estaciones con características del grupo 1 (7, 11 y 12) se localizaron en la zona externa. La distribución de temperatura superficial en el mapa (Figura 3.2.24b) y en la imagen correspondiente (Figura 3.2.24d) muestran que la zona ocupada por estas estaciones tiene temperatura similar a la del área interna.

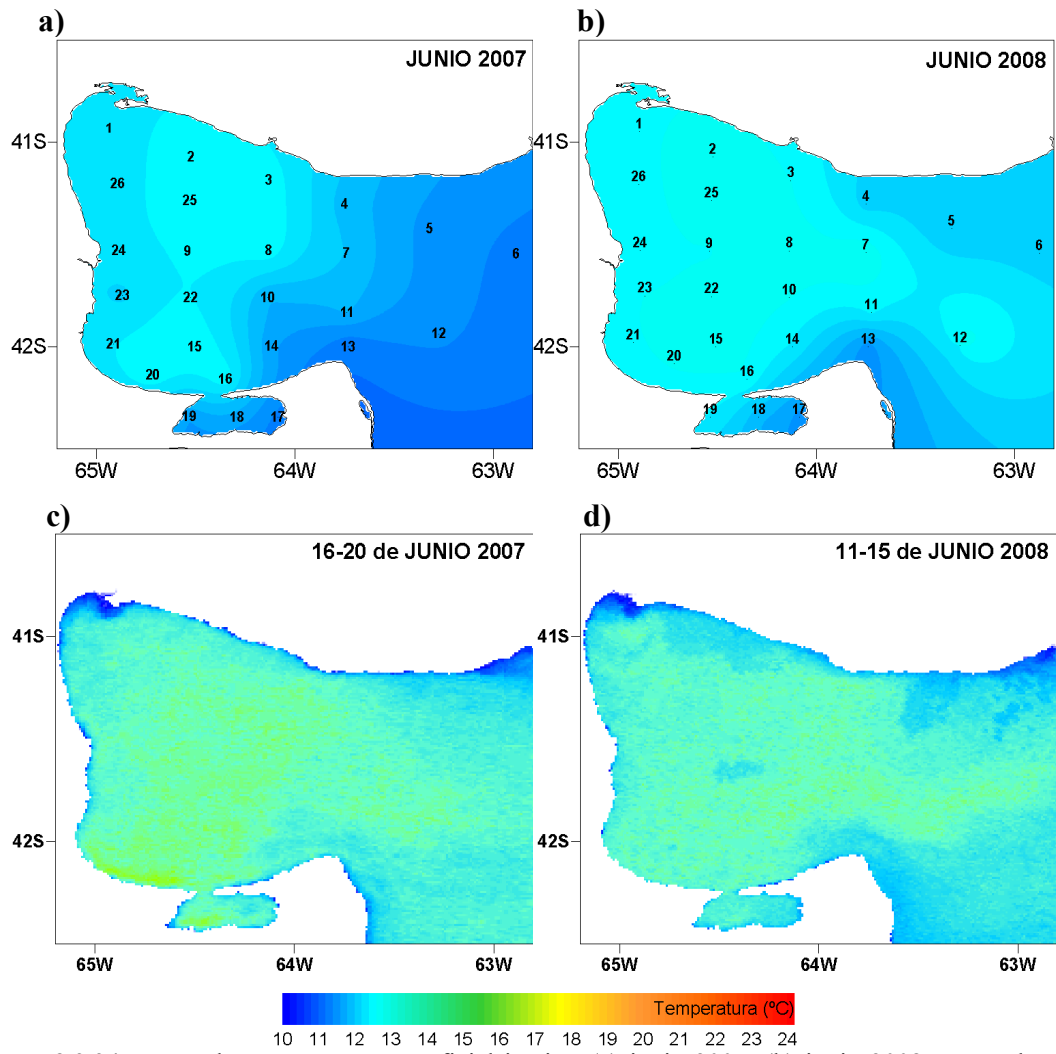
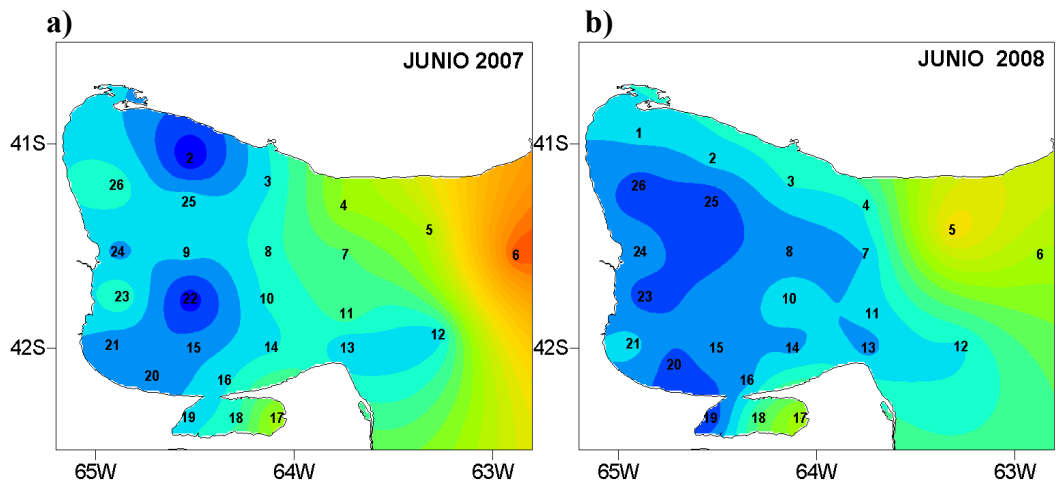


Figura 3.2.24: Mapa de temperatura superficial in-situ: (a) junio 2007, (b) junio 2008. Mapa de TSM (AVHRR): (c) junio 2007, (d) junio 2008.



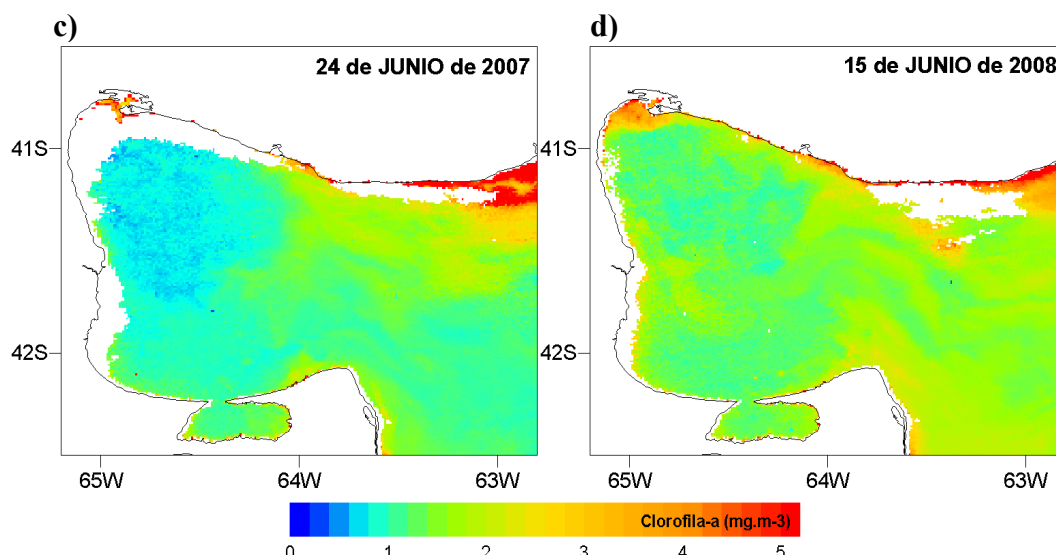


Figura 3.2.25: Mapa de clorofila-a superficial in-situ: (a) junio 2007, (b) junio 2008. Mapa de clorofila-a satelital (MODIS): (c) junio 2007, (d) junio. Los sectores en color blanco dentro del área del golfo indican ausencia de datos de clorofila-a por presencia de cobertura nubosa.

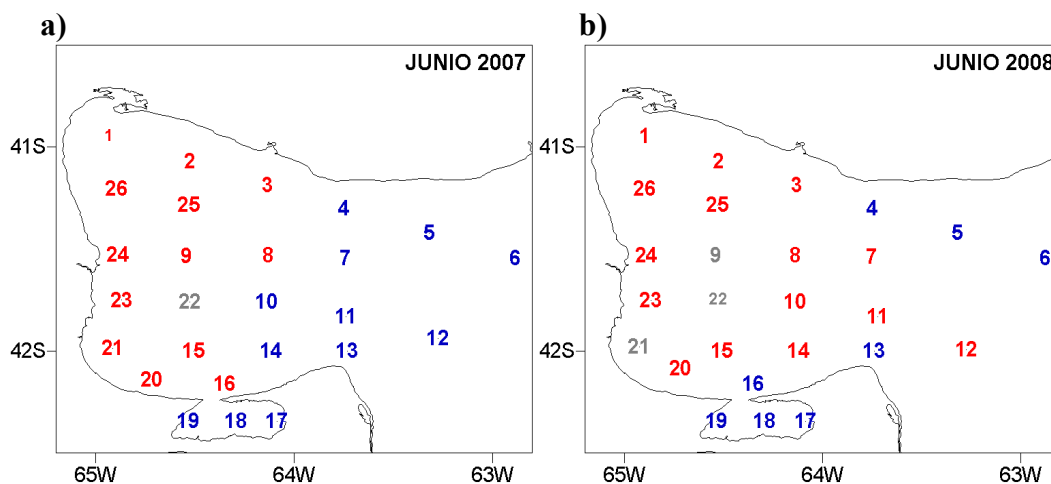


Figura 3.2.26: Clasificación de las estaciones en función de los análisis de agrupamiento y componentes principales: (a) junio 2007, (b) junio 2008. Referencias: grupo 1: rojo, grupo 2: azul, estaciones sin clasificar: gris.

Los mapas de temperatura superficial y las respectivas imágenes satelitales fueron similares en octubre de 2007 y 2009 (Figura 3.2.27 a-d). En ambos casos fue posible observar que la zona de la boca y sudeste del Golfo presentaron temperaturas relativamente más frías que el área interna.

La distribución de clorofila-a *in-situ* y satelital mostraron que la zona interna tuvo concentraciones menores que la plataforma en octubre 2007 (Figura 3.2.27 a-c). En la imagen satelital se observó mayor concentración de clorofila-a desde la boca norte hacia el sur del GSM con concentraciones intermedias hacia el interior y exterior del Golfo. En coincidencia con la imagen satelital el mapa *in-situ* mostró concentraciones altas en la zona norte de la boca y sur del Golfo. En octubre de 2009 la imagen satelital y el

mapa obtenido mediante la interpolación de los valores de clorofila-*a* mostraron mayores concentraciones de clorofila-*a* sobre la costa sudoeste, centro y noreste del Golfo. En octubre de 2009 a diferencia de 2007 las concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* ocurrieron en la costa oeste del Golfo, indicando un posible florecimiento de primavera.

En octubre de 2007 el análisis del mapa resultante del ACP (Figura 3.2.29a) y los respectivos mapas *in-situ* y satelitales de temperatura y clorofila-*a* permitieron verificar que las estaciones del grupo 1 se ubican en el área interna de temperaturas cálidas y concentraciones de clorofila-*a* relativamente bajas. Las estaciones del grupo 2 corresponden al sector sur de la boca y centro del GSJ de temperaturas superficiales relativamente más frías y mayor concentración de clorofila-*a*. Las estaciones del grupo 3 (caracterizadas por valores medios de las variables analizadas), se localizaron en la zona norte de la boca y oeste y este del GSJ. En los mapas *in-situ* y satelitales se observó que estas estaciones se ubicaron en zonas de características intermedias. En octubre de 2009 (Figura 3.2.29b), las estaciones del grupo 1 se localizaron en la zona norte de la boca del GSM y en el sector sur sobre la costa oeste. En este caso las estaciones de este grupo presentaron temperaturas relativas más cálidas, menor concentración de nitrato y a diferencia de lo esperado, altas concentraciones de clorofila-*a*, indicando un florecimiento de primavera en esta área. El grupo 2, de acuerdo a lo esperado, se ubicó en la zona sur de la boca con temperaturas y concentraciones de clorofila-*a* levemente menores a la zona interna y concentraciones relativamente altas de nutrientes. Las estaciones del grupo 3, de características intermedias, estuvieron ubicadas en el sector noroeste y sur. Las características particulares de esta campaña y el hecho de no obtener los patrones esperados (concentraciones de clorofila-*a* bajas para el grupo 1 y altas para el grupo 2, estaciones del grupo 3 ubicadas hacia la zona noroeste y sudoeste), puede deberse a que el muestreo ocurrió durante un episodio de florecimiento en la costa oeste del Golfo (observado en la imagen satelital de clorofila-*a*), con lo cual estos datos no reflejan los patrones generales esperados y obtenidos en la sección 3.1.

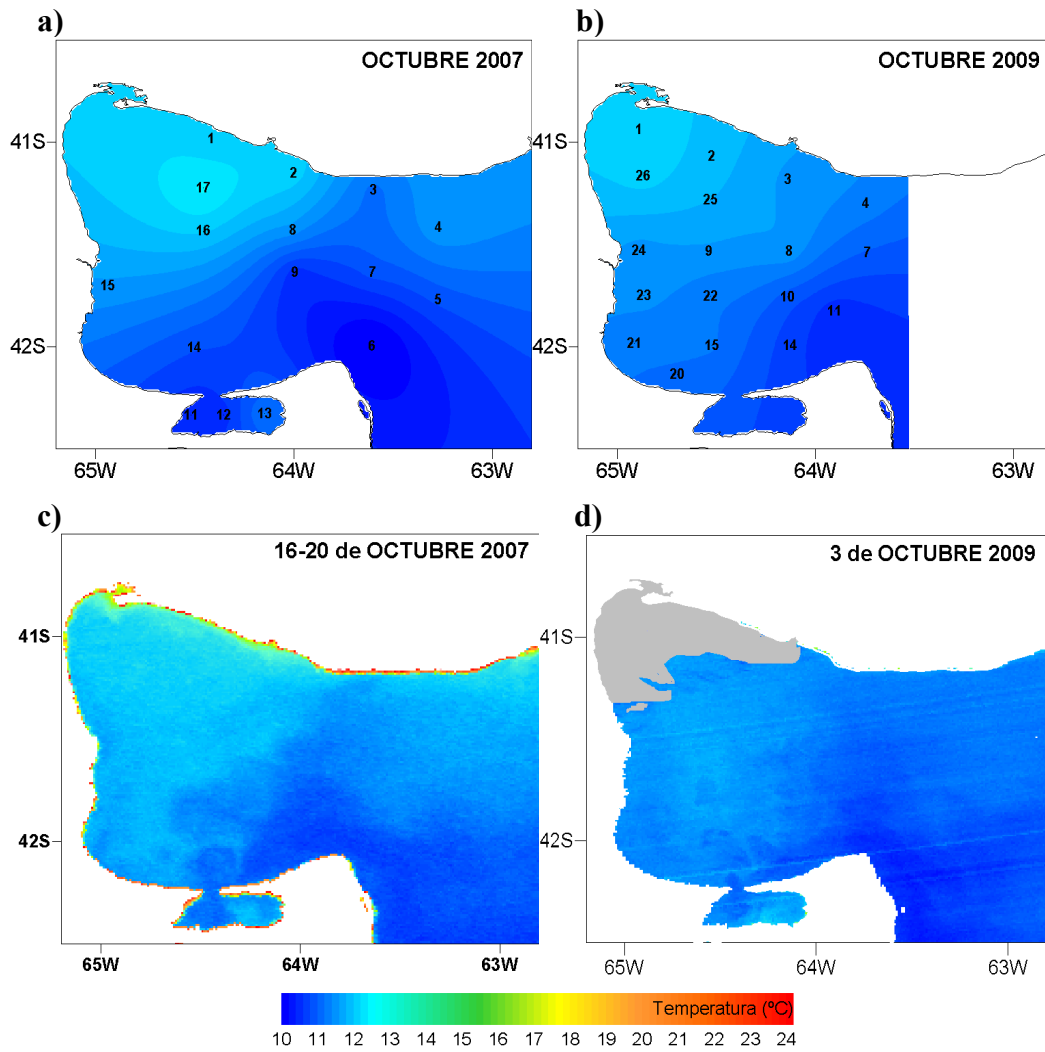
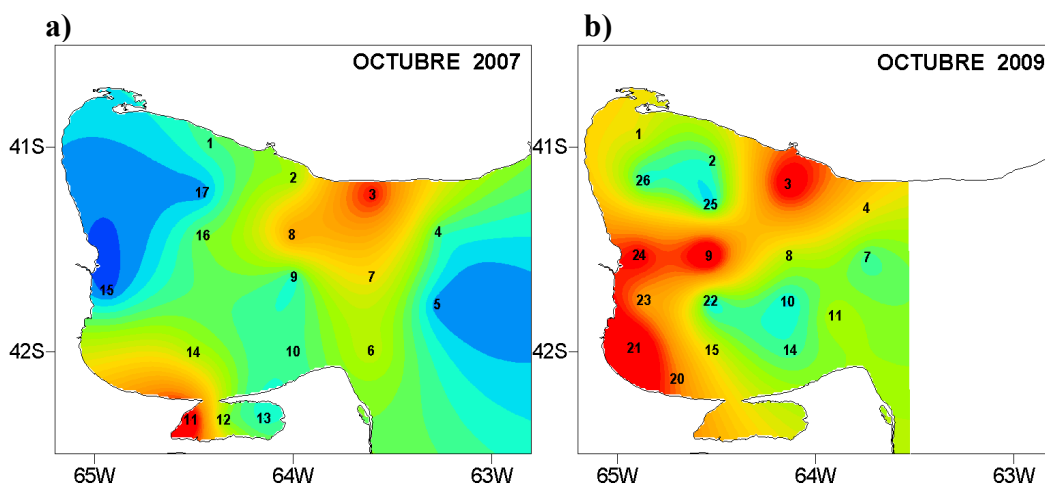


Figura 3.2.27: Mapa de temperatura superficial in-situ: (a) octubre 2007, (b) octubre 2009. Mapa de TSM (AVHRR): (c) octubre 2007, (d) octubre 2009. Los sectores en color gris dentro del área del golfo indican ausencia de datos de TSM por presencia de nubes.



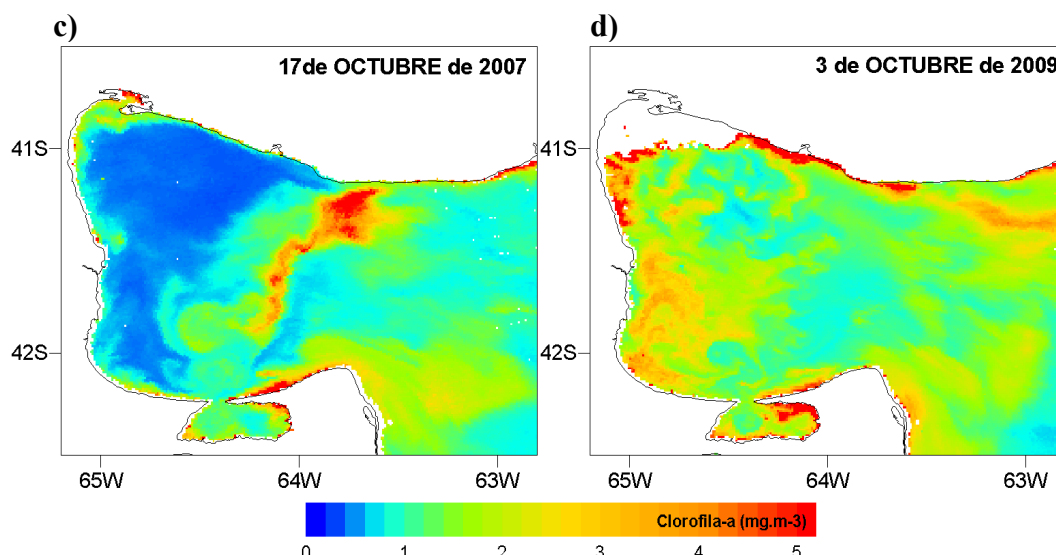


Figura 3.2.28: Mapa de clorofila-a superficial in-situ: (a) octubre 2007, (b) octubre 2009 . Mapa de clorofila-a satelital (MODIS): (c) octubre 2007, (d) octubre 2009.

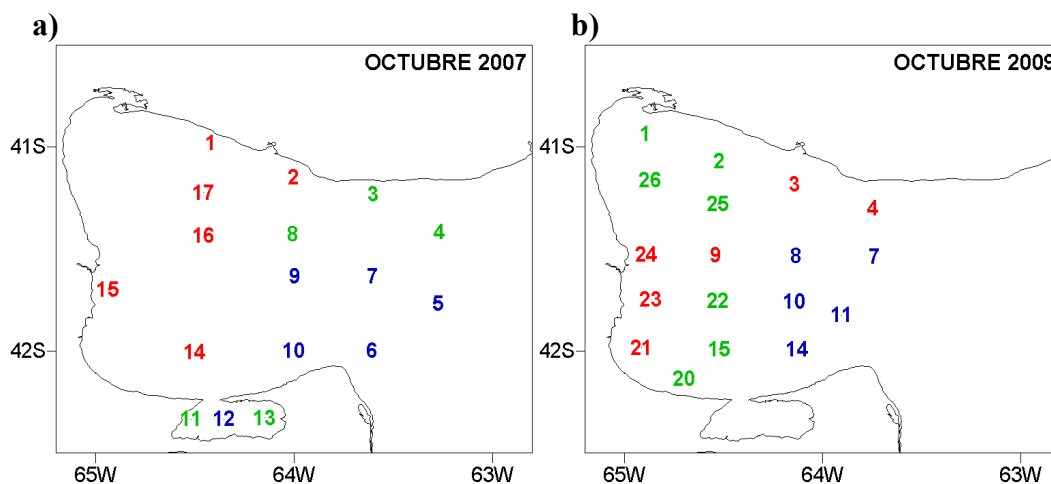


Figura 3.2.29: Clasificación de las estaciones en función de los análisis de agrupamiento y componentes principales: (a) octubre 2007, (b) octubre 2009. Referencias: grupo 1: rojo, grupo 2: azul, estaciones sin clasificar: gris.

Las imágenes satelitales de TSM y Cla-sat correspondientes a noviembre de 2008 mostraron diferencias entre el área interna y externa del Golfo. Los mapas obtenidos mediante la interpolación de datos in-situ mostraron el mismo patrón de distribución espacial que en las imágenes satelitales (Figura 3.2.31 a-c y b-d).

Según lo esperado las estaciones del grupo 1 correspondieron al sector noroeste del Golfo de aguas relativamente cálidas y mínimas concentraciones de clorofila-a (Figura 3.2.31 e). Las estaciones correspondientes al grupo 2 se ubicaron al sur de la boca de aguas relativamente frías y mayores concentraciones relativas de clorofila-a. Fue posible verificar que las estaciones del grupo 3 ubicadas en el centro y sur del Golfo correspondieron a la zona de transición entre aguas cálidas y de baja concentración de

clorofila-a (interior del GSM) y aguas de menor temperatura y mayor concentración de clorofila-a de la zona sur y externa al GSM.

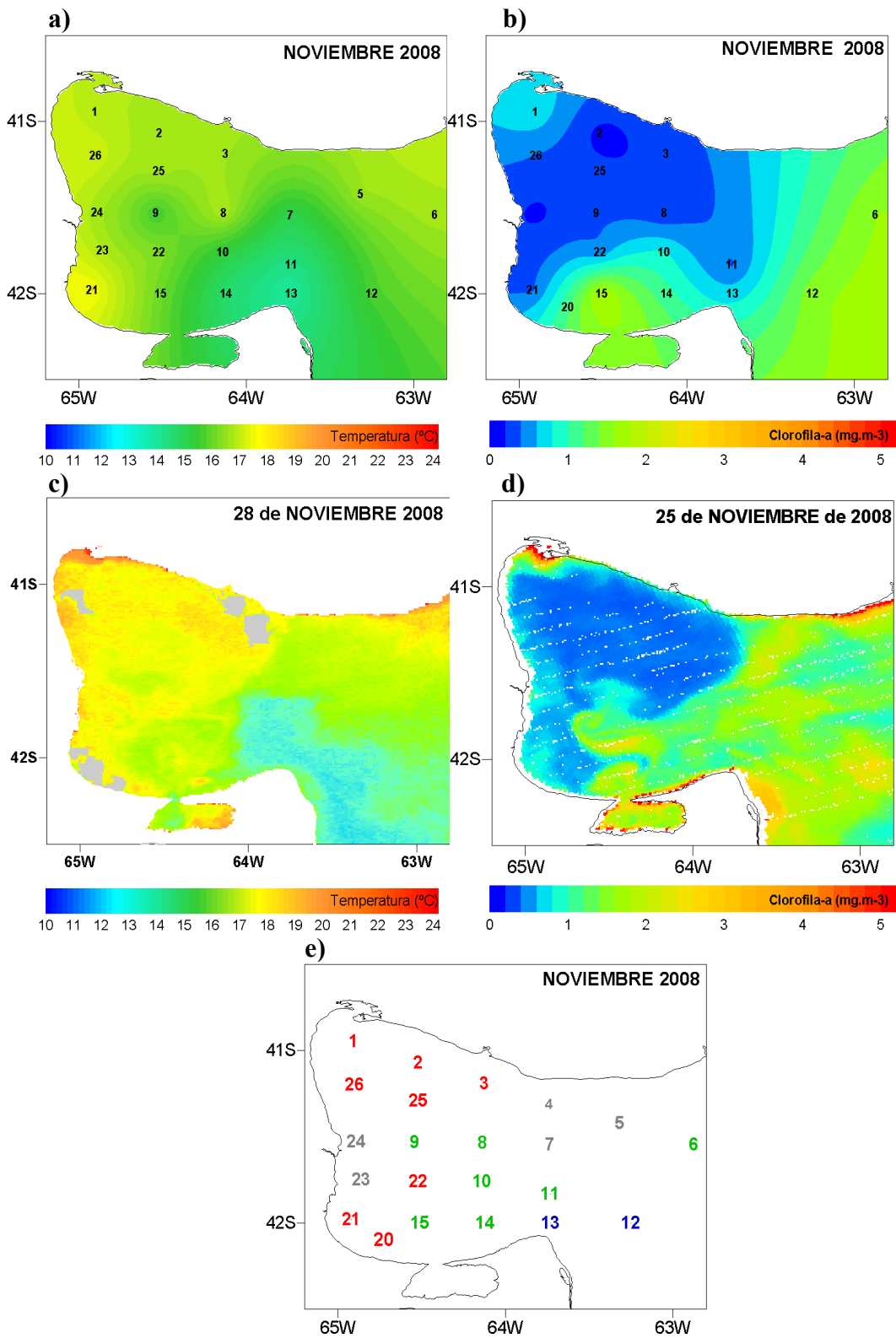
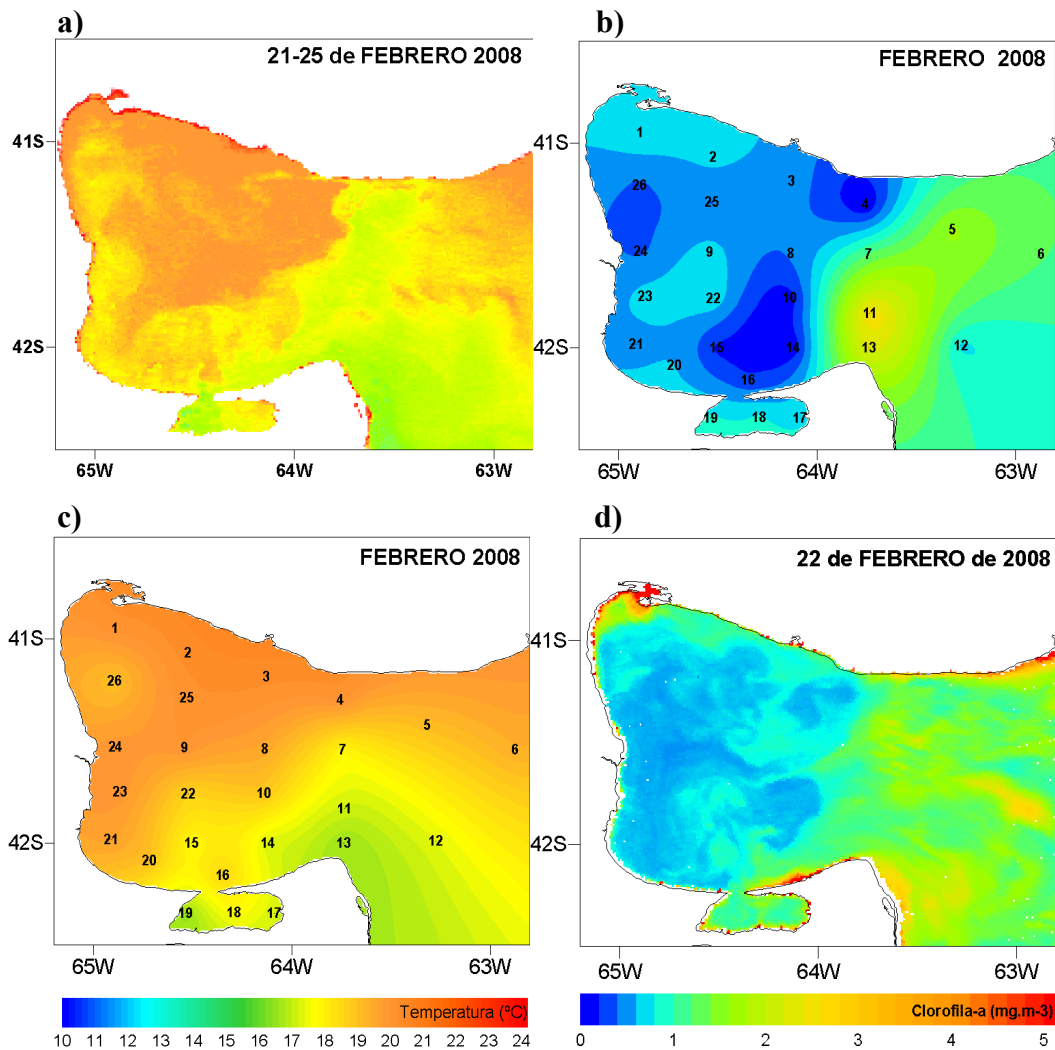


Figura 3.2.30: Noviembre 2008. (a) Mapa de temperatura superficial *in-situ*, (b) mapa de clorofila-a superficial *in-situ*, (c) mapa de TSM-AVHRR, (d) mapa de clorofila-a satelital-MODIS, (e)clasificación de las estaciones en función de los análisis de agrupamiento y componentes principales. Referencias: grupo 1: rojo, grupo 2: azul, grupo 3: verde, estaciones sin clasificar: gris.

CAPITULO 3- Sec.2: Distribución superficial y vertical de datos físicos y químicos

Las imágenes satelitales correspondientes a febrero de 2008 volvieron a mostrar diferencias entre el área interna del Golfo y la plataforma (Figura 3.2.32). En este caso las estaciones con características del grupo 3 ocuparon la zona norte de la boca, la zona sur y el centro del GSJ (estación 18, Figura 3.2.32e). En las imágenes satelitales se corroboró que las estaciones estuvieron ubicadas en la zona de transición entre el área interna y externa. Las estaciones correspondientes al grupo 2 se ubicaron al sur de la boca del Golfo, corroborando nuevamente que corresponden a estaciones de aguas relativamente más frías y de mayores concentraciones de clorofila-a. Las estaciones del grupo 1 se ubicaron en sectores cálidos y de mínimas concentraciones de clorofila-a.



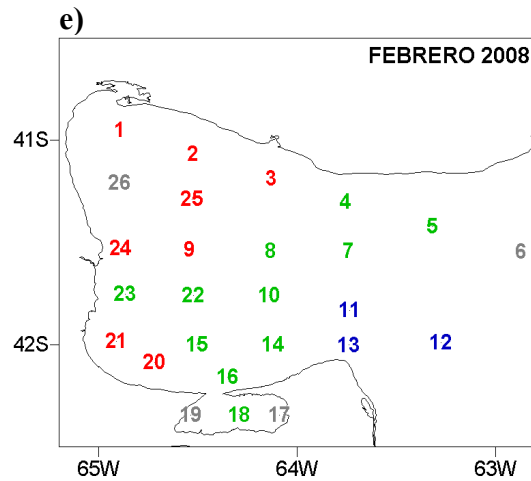


Figura 3.2.31: Febrero 2008. (a) Mapa de temperatura superficial *in-situ* , (b) mapa de clorofila-a superficial *in-situ* , (c) mapa de TSM-AVHRR , (d) mapa de clorofila-a satelital-MODIS, (e)clasificación de las estaciones en función de los análisis de agrupamiento y componentes principales . Referencias: grupo 1: rojo, grupo 2: azul, grupo 3: verde, estaciones sin clasificar: gris.

Discusión General (Secciones 1 y 2).

En el GSM el análisis de la distribución de los valores medios temporales de TSM y *Cla-sat* junto con los análisis multivariados y los perfiles verticales realizados sobre datos oceanográficos han permitido identificar dos sectores con características particulares, correspondientes a la zona interna (noroeste y sudoeste), y la zona externa (sur de la boca y plataforma adyacente) separados por una zona de transición (norte de la boca y zona sur). Asimismo, la variabilidad temporal expresada en los mapas medios mensuales de TSM y *Cla-sat* mostró que en los meses de primavera-verano (noviembre a marzo) la diferencia entre la zona interna del Golfo y la zona externa fueron más marcadas, mientras que en los meses de invierno (mayo a septiembre) estas áreas no se diferenciaron entre sí. A continuación se discuten las características observadas en las áreas identificadas y finalmente se considera la totalidad del área de estudio.

Zona interna. Esta zona incluye el área norte (ZN) y el área sudoeste (ZSO) del Golfo. Esta zona se caracterizó, en general, por temperaturas cálidas, bajas concentraciones de nutrientes y clorofila-*a* y mayor profundidad. La mayor temperatura media y amplitud térmica observadas en esta área se deben a la menor exposición de esta zona a la advección de las aguas frías de la plataforma continental (Rivas, 2010). Por otro lado la relativa menor fase armónica, estimada hacia fines de enero (Sección 3.1), estaría explicada por la estratificación que presenta esta zona en la estación estival (Rivas, 2010). Esta interpretación es apoyada por el perfil de temperatura de febrero de 2008, en el cual se observó mayor estratificación en la zona norte con respecto a la zona sur (sección 3.2). Estos resultados son además consistentes con diversos trabajos previos (Carreto *et al.*, 1974; Rivas & Beier, 1990; Gagliardini & Rivas, 2004; Tonini *et al.*, 2006; Williams, 2004) que ya han caracterizado a esta zona como de mayor temperatura y salinidad, marcada termoclina y baja tasa de renovación. En esta área las concentraciones medias mensuales de *Cla-sat* estimadas a partir de datos satelitales, fueron menores a las medias de toda el área del Golfo y su evolución anual mostró concentraciones mínimas en los meses de verano. Estas podrían estar explicadas por la menor disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica, debido a la estratificación de la columna de agua (Carreto *et al.*, 1974; Rivas & Beier, 1990) y por el mayor consumo de fitoplancton por parte del zooplancton cuya actividad es de importancia en esta época (Ramírez, 1996; Guerrero, 2010).

En el extremo noroeste de esta zona las imágenes satelitales permitieron identificar la zona de influencia de la bahía San Antonio (BSA). Este sector se caracterizó por presentar una temperatura media similar al área noroeste, sin embargo el ciclo térmico anual presentó la máxima amplitud y menor fase armónica de todas las áreas consideradas (hacia principios de

enero). Estas características estarían explicadas por la mayor influencia continental debido al carácter costero de este sector, que presenta profundidades menores a 15 m y las importantes amplitudes de marea del Golfo (6 a 9 metros según SHN, 1999). La amplitud de marea determina que la totalidad de la superficie de la Bahía se inunde dos veces al día y en forma alternada el intermareal quede expuesto más del 50% del tiempo por jornada. Durante los períodos de bajamar, el sol calienta las llanuras intermareales de la Bahía, aumentando la temperatura del agua de las fosas y canales de marea. Este calor es transferido por convección a la masa líquida que inunda la Bahía en pleamar, lo que incrementa la temperatura media del agua (Carreto *et al.*, 1974). Este sector, además, presentó las concentraciones más altas de *Cla-sat* junto con un ciclo de mayor amplitud con respecto a todas las áreas consideradas. Estas concentraciones relativamente altas pueden estar explicadas por mayor presencia de sedimentos que se suspenderían en la columna de agua debido a la mezcla turbulenta de las corrientes de marea que afectan a la BSA, sobreestimando la concentración de este pigmento (IOCCG, 2000) y la baja profundidad del sector (SHN, 1999). Sin embargo, mediciones de nutrientes, clorofila-*a* y fitoplancton realizadas en la zona interna y externa a la Bahía (Esteves *et al.*, 1996), han evidenciado aporte de nutrientes y mayor abundancia de fitoplancton en el sector oeste del área de influencia por lo cual esta resuspensión podría aportar nutrientes a la zona eufótica e incrementaría el potencial productivo de este sector. El ciclo de *Cla-sat* para esta zona muestra una importante disminución de la concentración en los meses de verano y otoño, la cual también podría estar explicada por el consumo de fitoplancton por parte de moluscos bivalvos (mejillones, almejas, vieiras, ostras, etc.), ya que esta área se caracteriza por presentar densos bancos de estos organismos (Morsán, 2003; Narvarte *et al.*, 2007).

El área sudoeste (ZSO) en particular, presentó un ciclo térmico de características intermedias a las áreas sudeste y noroeste. Asimismo, los análisis estadísticos entre los valores mensuales climatológicos de *Cla-sat* (Sección 3.2 y Apéndice D) mostraron que este sector no presenta diferencias significativas con el sector sur (ZS). El ciclo de concentración de *Cla-sat* presentó un ciclo característico de aguas templadas con un máximo en otoño (marzo-abril) y otro en primavera (septiembre-octubre) y con concentraciones menores en invierno y verano. Estas estarían explicadas por la menor radiación solar y disponibilidad de nutrientes, respectivamente (Mann & Lazier, 1996). Estas características y la distribución superficial de TSM y *Cla-sat* observada en los mapas satelitales indican que esta zona podría estar influenciada tanto por las aguas del área noroeste como por las aguas provenientes de la plataforma continental adyacente constituyendo una zona de transición.

Zona Externa. Esta zona comprende la zona sur del Golfo (ZS) y el área externa adyacente es decir, la zona de ingreso al Golfo (dividida en norte (ZiN) y sur (ZiS) en el análisis realizado en la sección 3.1). La zona sur del Golfo (ZS) y sur de la boca (ZiS) se caracterizaron, por presentar temperaturas relativamente más bajas, mayores concentraciones de clorofila-*a* y nutrientes y menor profundidad relativa. Los mapas de TSM y Cla-sat mostraron claras diferencias entre este sector y el interior del Golfo en verano. En esta zona la menor TSM media y la amplitud térmica están explicadas por el ingreso de agua fría desde el sur. Asimismo, este sector presentó menor estratificación estacional como se observó en el perfil de temperatura de febrero de 2008. Estas características también fueron citadas en estudios previos (Glorioso & Flather, 1995; Palma *et al.*, 2004a; Tonini *et al.*, 2006). La mezcla turbulenta causada por las mareas logra distribuir el flujo de calor en toda la columna de agua evitando así la estratificación (Rivas, 2010); este proceso también explica la mayor fase armónica del ciclo térmico anual con respecto al resto de las áreas consideradas, indicando que esta zona alcanza la temperatura máxima más tarde (hacia mediados y fines de febrero). En esta área tanto en este trabajo como en estudios previos se han medido mayores concentraciones relativas de nitrato y fosfato, indicando su potencial productivo (Carreto *et al.*, 1974; Williams, 2004).

En el sector sur del Golfo, el ciclo de Cla-sat parece seguir un patrón característico de aguas que no se estratifican estacionalmente, presentando menor amplitud y mayores concentraciones medias, en verano; mientras que en los sectores norte y sur de la boca, los ciclos de Cla-sat presentaron mayor amplitud y concentraciones medias con respecto al promedio de toda el área del GSM. Estas observaciones coinciden con Podestá (1997) quien también detectó máximas concentraciones de Cla-sat en la boca del GSM. Otros estudios han puntualizado que el flujo de energía de mareas en esta zona es uno de los más grandes del mundo (Tonini *et al.*, 2006), siendo un forzante efectivo en producir la mezcla de la columna de agua. Particularmente, el parámetro de Simpson-Hunter (Palma *et al.*, 2004a), calculado a través de modelos hidrodinámicos distinguió una zona de mezcla vertical en la boca del GSM que coincide con la distribución local de aguas de menor temperatura y máximas concentraciones relativas de Cla-sat. Estas características hacen que esta zona constituya un frente de mareas que ha sido identificado en diversos trabajos mediante imágenes satelitales (Glorioso & Simpson, 1994; Rivas & Dell’Arciprete, 2000; Gagliardini & Rivas, 2004; Williams *et al.*, 2010). La alta disipación de energía de mareas en este sector podría provocar la resuspensión de sedimentos del fondo, mientras que la descarga del río Negro en la costa nordeste del GSM podría contribuir con partículas y detritos disueltos de origen continental.

Las concentraciones máximas de *Chl-a* a lo largo de la entrada podrían deberse a resuspensión de sedimentos, causados por la combinación entre la baja profundidad de la boca del Golfo y la mezcla causada por los vientos y mareas que influirían en la señal de los sensores satelitales (Podestá, 1997). Datos inéditos (Esteves, com. Pers.) de sedimentos de la zona sudeste muestran granulometrías gruesas (gravas) a muy gruesas, por lo que en esta zona, la estimación satelital relacionada con la *Chl-a* estaría asociada a un proceso de producción y no de resuspensión de sedimentos. Las concentraciones relativamente bajas de *Chl-a* en el verano a lo largo de la entrada indicarían que existe consumo de fitoplancton por parte del zooplancton como ha sido descrito en estudios previos (Santos & Ramírez, 1995; Ramírez, 1996; Sabatini & Martos, 2002). A pesar de que las diferencias entre los valores medios de *Chl-a* no fueron significativas entre los sectores norte (ZiN) y sur (ZiS) de la boca, se distinguieron algunas particularidades en cada uno de sus ciclos anuales. En el norte de la boca, la amplitud del ciclo térmico anual fue mayor y la fase armónica anual presentó valores intermedios a las áreas noroeste y sur de la boca. Este sector presentó un ciclo de *Chl-a* de mayor amplitud que la zona noroeste adyacente con concentraciones relativamente más altas que se mantienen en los meses de invierno. En este sentido, trabajos realizados en el estuario de Bahía Blanca (al norte de la desembocadura del río Negro), han mostrado florecimientos de fitoplancton en invierno, que inclusive se han extendido hacia el sur y han estado caracterizados por especies adaptadas a una menor intensidad de luz y temperatura y posiblemente favorecidos por una baja tasa de depredación y alta disponibilidad de nutrientes (Popovich *et al.*, 2008). Del mismo modo Guinder *et al.* (2009), sugirieron que la disminución en las concentraciones de material suspendido particulado aumenta la penetración de la radiación solar en la columna de agua favoreciendo el desarrollo de una floración de invierno en el estuario de la Bahía Blanca. Debido a la proximidad geográfica con la zona norte de la boca del GSM, se podría pensar que las relativamente altas concentraciones de *Chl-a* podrían deberse a un fenómeno similar. Sin embargo es necesario realizar estudios específicos para comprobar esta hipótesis. Del mismo modo que en la zona noroeste, la disminución de la *Chl-a* en verano (noviembre a febrero) podría ser explicada por un mayor consumo y menor disponibilidad de nutrientes (Ramírez, 1996, Carreto *et al.*, 1974, Williams, 2004).

Zona de transición. Los análisis multivariados mostraron que en verano existen estaciones ubicadas en la zona norte de la boca y sector sur con valores de temperatura y concentración de nutrientes y clorofila-*a* intermedios entre la zona interna y externa. Del mismo modo, las imágenes satelitales mostraron una zona que se extiende desde el norte de la boca hacia el

sudoeste del Golfo donde existen cambios importantes en TSM y *Cla*-sat. El análisis del ciclo térmico mostró que el sector sudoeste y el norte de la boca del Golfo presentaron parámetros intermedios al área noroeste y externa. Esta zona de transición, entonces, separa masas de aguas con diferentes características, constituyendo un frente cuyo carácter estacional ha sido mencionado en estudios previos (Piola & Scasso, 1988; Bava *et al.*, 2002; Gagliardini & Rivas, 2004; Palma *et al.*, 2004; Tonini, 2010). La caracterización e importancia ecológica de este frente será analizada en mayor detalle en los Capítulos 4 y 5.

Golfo San Matías. El análisis de de los valores medios espaciales de TSM y *Cla*-sat para toda el área de estudio mostró un marcado ciclo estacional. En el caso de TSM el ciclo se encuentra explicado, principalmente por una señal armónica anual y se debe a que el flujo superficial de calor es dominado también, por esta frecuencia (Rivas, 2010).

Los resultados en los valores de temperatura superficial obtenidos en las campañas realizadas coinciden con los observados previamente (Krepper & Bianchi, 1982) y con los obtenidos en el análisis de imágenes satelitales de TSM correspondientes al período 2000 - 2008 (sección 3.1). Scasso & Piola (1988), mencionaron temperaturas de 18,0 °C en el mes de febrero y de 11,0 °C en el mes de agosto explicando que esta amplitud se debe a la influencia de la atmósfera en el GSM; de este modo a lo largo del ciclo anual, el Golfo gana temperatura y salinidad a través de la interfase aire- mar, provocando que la amplitud térmica anual sea mayor que en el mar abierto (Krepper & Bianchi 1982; Scasso & Piola, 1988).

La variabilidad estacional de los valores mensuales de *Cla*-sat en toda el área del GSM muestra concentraciones medias entre marzo y agosto, máximas en primavera (septiembre) y mínimas en verano (noviembre y febrero). Este ciclo estacional es característico de aguas subtropicales, con concentraciones de clorofila-*a* medias en el invierno alcanzado un máximo en primavera, para luego descender en verano, reflejando posiblemente el consumo por parte de zooplancton (Mann & Lazier, 1996). Sin embargo, el análisis del ciclo de *Cla*-sat en los diferentes sectores del GSM mostró diferencias que estarían explicadas por las características particulares de cada área: estratificación, influencia de la plataforma continental y la topografía del fondo. En las diferentes áreas consideradas, la disminución general de la concentración de *Cla*-sat en los meses de invierno se explicaría por la disminución de la irradiación solar que no sería suficiente para el crecimiento del fitoplancton (Greenan *et al.*, 2004). En otoño, la disponibilidad de nutrientes por procesos de degradación rápida de los organismos con producción de nutrientes y el transporte de éstos hacia la superficie, estimula el crecimiento del fitoplancton (Mann & Lazier, 1996), lo cuál explicaría el máximo relativo en esta época del año en algunas zonas del Golfo (ZN, ZS, ZSO y ZiS).

La asociación entre las variables oceanográficas obtenidas mediante la ordenación de las estaciones de muestreo en función de los dos primeros componentes principales (Sección 3.2) reveló correlaciones negativas entre temperatura y nitrato (particularmente en primavera y verano), entre temperatura y clorofila-*a* y entre clorofila-*a* y profundidad. Estos análisis corroboran que las aguas de menor temperatura situadas en el sector sur de la boca, alrededor de Península Valdés presentaron concentraciones de nutrientes relativamente mayores, como fue posible observar en los mapas de distribución superficial y perfiles verticales. Asimismo estas masas de agua se caracterizaron por presentar también mayores concentraciones relativas de clorofila-*a*, de acuerdo a la correlación positiva obtenida entre clorofila-*a* y nitrato y observada en los mapas analizados. En forma complementaria a la caracterización superficial, los perfiles verticales de temperatura y nitrato mostraron para la zona norte del Golfo una tendencia a la estratificación en verano (febrero), mientras que en invierno (junio) la columna de agua presentó características uniformes en todo el Golfo en coincidencia con trabajos previos (Piola & Scasso, 1988; Rivas 1990). Los perfiles verticales analizados mostraron cambios en temperatura, concentración de nitrato y nitrito y clorofila-*a* en sentido norte-sur: la temperatura disminuyó hacia el sur, y las concentraciones de nitrato y clorofila-*a* se incrementaron. Asimismo en el sector norte se observó un gradiente vertical en la columna de agua en las campañas de febrero y octubre de 2007, con temperaturas más cálidas y concentraciones de nitrato menores en superficie, mientras que en la zona sur el gradiente no fue tan pronunciado. Esto puede explicarse porque el agua que ingresa desde la plataforma provoca mayor turbulencia generada por las características topográficas y la relativa baja profundidad (Piola & Scasso, 1988; Gagliardini *et al.*, 2004) lo que genera una homogenización de la columna de agua en la zona sur. En las imágenes satelitales analizadas se observó claramente una masa de agua más fría en la zona externa del Golfo. Esta masa de agua proviene del sur bordeando la Península Valdés hasta la boca del golfo San José, interactuando con las aguas de este Golfo y las de la zona sur del San Matías (Gagliardini & Rivas, 2004; Amoroso & Gagliardini, 2010).

Las distribuciones verticales de temperatura y densidad (este último parámetro no fue analizado en este trabajo) en el golfo San Matías, han sido analizadas en las campañas Norpat I y II (Rivas & Beier, 1990). Estos trabajos explican que durante la segunda quincena de marzo, el mar comienza a perder energía hacia la atmósfera. Esto provoca la pérdida de temperatura en la capa superficial, el incremento de la densidad y una intensificación de los movimientos verticales que homogenizan la parte superior de la columna de agua. A medida que la pérdida de calor a través de la superficie continua, la mezcla vertical se intensifica

hasta alcanzar mayores profundidades, con enfriamiento de la superficie (Rivas & Beier, 1990). Como otra consecuencia, se incrementan las concentraciones de nutrientes en superficie durante el invierno; este sería, presumiblemente, uno de los factores que soportan el florecimiento de primavera. El comienzo de la ganancia de calor en la interfase aire-atmósfera se da aproximadamente a fines de agosto, provocando un proceso de calentamiento superficial que inhibe la convección y da como resultado un perfil de temperaturas más estable en superficie (Rivas & Beier, 1990). Durante la primavera, con el incremento de la radiación solar, aumenta el consumo de nutrientes por el fitoplancton provocando floraciones importantes de estos organismos y en consecuencia, las concentraciones de clorofila-*a* aumentan. En las campañas presentadas en este trabajo, estas características se observaron en el mes de octubre. En el mes de febrero, los perfiles verticales indicaron que la termoclina se encontraría bien desarrollada entre los 20 y 40 metros de profundidad.

La dirección e intensidad de los vientos son citadas en diversos trabajos como un agente clave en la variabilidad estacional de los florecimientos en áreas de aguas templadas (Radiarta *et al.*, 2008). De acuerdo a la mayor frecuencia de los vientos del cuadrante oeste y sudoeste en el golfo San Matías, se espera que estos colaboren activamente en la mezcla del agua y el mantenimiento de nutrientes en superficie, afectando la producción primaria (Williams, 2004). En este sentido en simulaciones con forzante de vientos se observó que cerca de la costa se generan regiones de afloramiento y hundimiento dependiendo de la dirección del viento, orientación de la costa y topografía del fondo (Tonini *et al.*, 2007), lo cuál podría afectar la distribución en las concentraciones de nutrientes y por lo tanto de la producción primaria del Golfo.

Los resultados de los análisis de las variables *in-situ* obtenidos en las campañas analizadas en este trabajo y las distribuciones superficiales de imágenes de TSM y *Cl_a-sat* permiten corroborar los resultados obtenidos por Carreto *et al.* (1974). Estos autores concluyeron que durante la primavera el Golfo presenta dos zonas bien diferenciadas. Las denominadas “aguas propias del Golfo” que cubren el sector norte y oeste del mismo, caracterizadas por una elevada temperatura y salinidad, una marcada termoclina y concentraciones limitantes de nitrato (la población fitoplanctónica estuvo dominada por dinoflagelados); y las “aguas de origen externo”, localizadas en el sector sur y sudeste, con menor temperatura y salinidad, ausencia de estratificación y concentraciones relativamente altas de nitrato (la población fitoplanctónica estuvo dominada por diatomeas).

Por último, se ha observado que los mapas superficiales calculados mediante interpolación de datos *in-situ* y los análisis de agrupamiento y clasificación han demostrado consistencia

con la información brindada mediante las imágenes satelitales de los sensores AVHRR y MODIS. Sin embargo se ha observado que en primavera y verano, cuando la distribución de clorofila-*a* y temperatura no es uniforme, las grillas de muestreo no reflejan fenómenos locales o de corta duración (por ejemplo, florecimientos fitoplanctónicos). La disponibilidad y el análisis de las series temporales de imágenes de TSM y *Cla-sat* presentados en la sección anterior (3.1) posibilitaron interpretar con mayor claridad el análisis de los datos obtenidos en el campo.

3.1.4 Conclusiones

En este capítulo los datos satelitales de alta resolución temporal han sido utilizados para estudiar la variabilidad espacial y temporal de la TSM y *Cla-sat* sobre el área del GSM en la Plataforma Patagónica entre los años 2000-2008 (TSM) y 2000-2006 (*Cla-sat*).

- El valor medio espacial mostró un ciclo estacional muy marcado para las dos variables consideradas. Los valores de TSM fueron máximos en verano y mínimos en invierno. Las concentraciones de *Cla-sat* alcanzaron los máximos valores en otoño (marzo-mayo) y primavera (septiembre), seguidas de bajas concentraciones de *Cla-sat* en verano. El ciclo de TSM y la ocurrencia del florecimiento de primavera siguen patrones característicos de aguas subtropicales (Mann & Lazier, 1996) y coinciden con trabajos previos basados en datos registrados *in-situ* (Carreto *et al.*, 1974; Williams, 2004).

- El valor medio temporal de *Cla-sat* mostró altas concentraciones en la entrada del Golfo en coincidencia con la zona de mayor cambio de profundidad entre el GSM y la plataforma adyacente y la tasa de disipación por energía de mareas en esta área determinada en trabajos previos. Durante el verano, las relativamente bajas concentraciones observadas se asocian a un mayor consumo de fitoplancton por consumidores primarios en el interior del GSM.

- El valor medio temporal de TSM mostró la influencia que tiene la circulación sobre el área sur del GSM, donde la advección horizontal es mayor mientras que el área noroeste del Golfo se encuentra relativamente aislada de la plataforma continental. El ciclo anual de TSM mostró un ciclo estacional muy marcado explicado por la armónica anual.

- La consideración de las áreas noroeste (interna) y sudeste (externa) en forma separada muestra que el ciclo estacional de TSM y *Cla-sat* es diferente entre ambas. En el área sudeste se mantiene la producción en verano debido a un aporte de nutrientes desde la plataforma adyacente.

- La descripción de los patrones espaciales a partir de datos de alta resolución ha permitido identificar y corroborar comportamientos diferenciales dentro del GSM y ha mostrado la influencia que tienen las aguas de la plataforma continental en esta región.

Es importante tener en cuenta que la información obtenida con sensores remotos tiene como limitación el grado de confianza que puede esperarse de las estimaciones de las variables. En este trabajo el análisis se limitó a patrones relativos, los que resultaron consistentes con datos de campo descritos previamente en la literatura (Carreto *et al.*, 1974; Rivas & Beier, 1990; Piola & Scasso, 1988; Williams, 2004). Otra fuente de incertidumbre en los datos utilizados está asociada a la representatividad de las medias mensuales anuales y climáticas empleadas en el análisis. La nubosidad limita el número de datos. Las imágenes utilizadas en este trabajo no son el verdadero valor medio mensual pues en cada píxel se utiliza un número diferente de datos. En el caso de la concentración de *Chl-a* las floraciones de corta duración pueden afectar desproporcionadamente el valor medio mensual en una región de la imagen o ser omitidas por completo en otro sector de la misma (Dogliotti, 2007).

Sin embargo la alta resolución temporal y espacial de información satelital utilizada en este capítulo permitió evaluar la variabilidad anual, y permitió identificar la estabilidad del ciclo térmico y la variabilidad en el tiempo y magnitud de los florecimientos de *Chl-a*. Estos resultados no hubieran sido posibles con datos obtenidos en las tradicionales campañas oceanográficas.

Los resultados de estas dos secciones muestran que las imágenes satelitales constituyen una herramienta de importancia en el diseño previo de las grillas de muestreo de las campañas oceanográficas; de esta manera, se podrían realizar muestreos específicos, obteniendo datos en la columna de agua en áreas caracterizadas por procesos físicos y ecológicos particulares (frentes, surgencias, florecimientos fitoplanctónicos).

3.3 Comparación entre datos de TSM y Cla satelital (AVHRR, SeaWiFS/MODIS) e *in-situ*

3.3.1 Introducción

El sensor AVHRR es el más utilizado para la estimación de TSM en estudios científicos y aplicaciones operacionales oceanográficas y pesqueras. Las estimaciones de TSM mediante el sensor AVHRR generalmente producen resultados con una dispersión máxima del orden de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ (Strong & McClain, 1984; Llewellyn-Jones *et al.*, 1984), la cual proviene de errores atmosféricos residuales, pequeños cambios en los valores de emisividad, o bien resultantes de los métodos de comparación utilizados (Minnett, 1991). No obstante, es importante destacar que cada algoritmo es generado considerando datos de temperatura de brillo de un sistema NOAA-AVHRR en particular, por lo que idealmente debe utilizarse solamente con datos de ese sistema satelital. El uso de un algoritmo equivocado puede inducir a errores mayores a los citados en las estimaciones de TSM.

Las correlaciones entre valores de temperatura *in-situ* y estimados por el sensor AVHRR en el Atlántico Sudoccidental (ASO) han sido significativas (Bava, 2004). La alta correlación de los datos de la serie AVHRR del período 1998-2003 con datos *in-situ* provistos por el INIDEP (Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero), CENPAT y CEADO (Centro Argentino de Datos Oceanográficos) indicó que la metodología para la generación de las imágenes de la serie temporal utilizada fue adecuada y reflejó la variación real del campo de TSM en la zona de análisis. En el presente trabajo la metodología de procesamiento utilizada fue similar a la indicada en los trabajos mencionados (Bava, 2004).

Desde el lanzamiento del primer sensor de color del mar, el Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) en 1978 y los subsiguientes y más avanzados instrumentos, tales como el Ocean Colour and Temperature Scanner (OCTS), el SeaWiFS, el MODIS y el MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), los algoritmos globales para estimar la concentración de clorofila-*a* han sido empíricamente derivados de una gran base de datos *in-situ* recogidos en aguas de todo el mundo (O'Reilly *et al.*, 1998; 2000; Morel & Antoine, 2007). Estos algoritmos empíricos se basan en relaciones estadísticas medias entre la concentración de clorofila-*a* (Cla-sat) y el cociente entre la reflectancia en el azul y verde y son válidas en aguas caso 1, de acuerdo al esquema de clasificación binario propuesto por Morel & Prieur (1977) (Tabla 3.3.1). En este tipo de aguas, de carácter oceánico, las propiedades ópticas son controladas exclusivamente por el fitoplancton y partículas asociadas (tales como detritos, organismos heterótrofos y bacterias, y materia orgánica disuelta producida por los mismos organismos).

Tabla 3.3.1: Clasificación binaria de aguas oceánicas propuesta por Morel & Prieur (1977), redefinida por Gordon & Morel (1983).

Aguas Caso I	Aguas Caso II
-aguas de océano abierto.	-aguas costeras ópticamente complejas.
-por definición las “aguas caso I” son aquellas en las cuáles el fitoplancton, (y el material de origen biológico que lo acompaña, covaría con él). El fitoplancton es el principal agente responsable de las variaciones en las propiedades ópticas del agua.	-las “aguas caso II” no están influenciadas únicamente por el fitoplancton y otras partículas relacionadas con él, sino también por otras sustancias cuya variación es independiente del fitoplancton.
-El fitoplancton es la componente principal que puede variar significativamente las propiedades ópticas de este tipo de aguas	-Las componentes que pueden variar significativamente las propiedades ópticas de este tipo de aguas son las partículas inorgánicas en suspensión y las sustancias amarillas, o incluso pueden depender de la combinación de cualquiera de éstas con la componente fitoplancton.

La presencia de fitoplancton con una composición de pigmentos diferente a la utilizada para construir los algoritmos empíricos puede hacer que esta relación no se cumpla. Además, las desviaciones en las relaciones estándar podrían ser causadas por la presencia de componentes ópticamente activos distintos de la clorofila-*a* que pueden o no co-variar con la concentración de clorofila-*a*. Esta relación empírica no se cumple, incluso en los casos en que las sustancias ópticamente activas covaríen con la concentración de clorofila-*a*. Estas sustancias pueden estar constituidas por material particulado de origen terrestre, estar disueltas, o ser resuspendidas desde el fondo en aguas poco profundas o introducidas por drenaje terrestre y escorrentía.

Los algoritmos globales de concentración de clorofila-*a* funcionan bien en algunas regiones del mundo, en especial en aquellos lugares donde los datos fueron obtenidos para construir los algoritmos (Bailey *et al.*, 2000; Hooker & McClain, 2000). La evaluación de clorofila-*a* mediante algoritmos globales y regionales de los sensores SeaWiFS y MODIS fue realizada en la Plataforma Continental Argentina entre 38°S y 55°S (Dogliotti *et al.*, 2009). Los resultados mostraron que los algoritmos regionales no mejoraron significativamente las estimaciones realizadas a partir de los algoritmos globales. No obstante, todos los algoritmos analizados mostraron incertidumbres dependientes de la concentración de clorofila-*a*: concentraciones bajas de clorofila-*a* tienden a ser sobreestimadas y las altas tienden a ser subestimadas (Dogliotti *et al.*, 2009).

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la comparación de los productos de TSM y concentración de clorofila-*a* satelital (*Cla-sat*) con mediciones *in-situ* de temperatura y concentración superficial de clorofila-*a*, respectivamente para el golfo San Matías.

3.3.2 Metodología

3.3.2.1 Datos *in-situ* de temperatura superficial y concentración de clorofila-*a*.

Las mediciones *in-situ* fueron obtenidas en estaciones fijas y campañas oceanográficas realizadas en el marco de diversos proyectos (ver Apéndice F) ejecutados entre los años 2007 a 2009 en el golfo San Matías.

En el presente trabajo se utilizaron registros de temperatura de estaciones fijas (Tabla 3.3.2) y de las seis campañas oceanográficas detalladas en el Capítulo 2 (Tabla 2.2.1). Los registros de estaciones fijas provienen de una boya de Hidrografía Naval localizada frente al balneario Las Grutas (40°55'S, 065°04'W) durante el período julio a diciembre de 2005 y de registradores de datos (*data-loggers*) (Optic Stow Away-Temp (°C, ONSET, ±

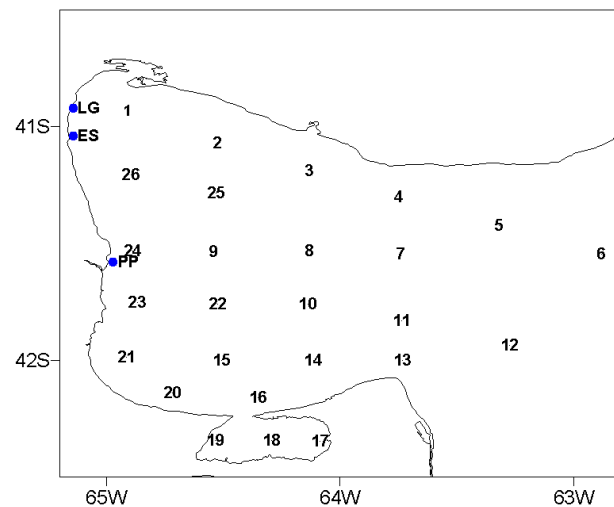


Figura 3.3.1: Grilla general de muestreo. En azul se indican, las localizaciones de las estaciones fijas: Las Grutas (LG), El Sótano (ES), Punta Pozos (PP)

0,20 °C) ubicados en las localizaciones denominadas Punta Pozos (41°35'S, 064°58,2'W) y El Sótano (41°2,4'S, 065°8,4'W) en los períodos, del 3 de octubre de 2007 a 7 de septiembre de 2008 y del 1° de septiembre de 2007 a 28 de agosto de 2008, respectivamente. La boya obtuvo 11 registros por día, mientras que los registradores tomaron 6 registros diarios; en ambos casos se calcularon las medias diarias. En las campañas oceanográficas los registros se obtuvieron mediante la utilización de sondas multiparámetricas YSI 556 e YSI 6600v2 (± 0,15 °C).

Las mediciones discretas de concentración de clorofila-*a* fueron obtenidas según la metodología indicada en el Capítulo 2.

Tabla 3.3.2: Estaciones fijas utilizadas para obtener registros de temperatura.

Localidad	Latitud	Longitud	Período	Número de datos
Las Grutas	40°57'S	065° 4,1W	Julio a diciembre de 2005	64
Punta Pozos	41°35'S	064°58'W	3 de octubre de 2007 a 7 de setiembre de 2008	249
El Sótano	41° 2'S	065°8'W	1° de setiembre de 2007 a 28 de agosto de 2008	246

3.3.2.2 Datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) y concentración de clorofila-a (Cla-sat).

Las imágenes de TSM y Cla-sat fueron obtenidas de los sensores AVHRR y MODIS (como ya se ha explicado en la Sección 3.2). Debido a que la recepción de imágenes SeaWiFS de alta resolución fue interrumpida en diciembre de 2006, no fue posible comparar el producto Cla-sat de este sensor (correspondiente a la serie temporal utilizada en la sección 3.1) con datos *in-situ*. Por tal motivo se compararon los productos de concentración de clorofila-a de los sensores SeaWiFS y MODIS en pares de fechas coincidentes, de manera de evaluar la coherencia de información entre estos dos sensores.

Las imágenes MODIS de nivel 3 de procesamiento suministraron los siguientes productos georreferenciados: concentración de clorofila-a (Cla-sat), radiancia emergente del agua marina normalizada para las bandas visibles de cada sensor con longitud de onda central λ ($nLw(\lambda)$), densidad óptica de aerosoles en 865 nm ($\tau_a(865)$) y datos auxiliares, tales como el ángulo cenital solar (θ_s) y de visión del sensor (θ_v) para cada píxel y los indicadores de calidad o *flags* generados en el procesamiento (Tabla 2.1.2 en Capítulo 2).

El programa SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS) versión 5.2 (update#4) (Baith *et al.*, 2000) fue utilizado para obtener el producto Cla-sat de SeaWiFS (según se indicó en el Capítulo 2).

Los productos TSM y Cla-sat fueron mapeados a una proyección geográfica lat-long WGS84 con una resolución de 1,1 Km en el nadir o píxel sub-satelital y corregistradas con respecto a una máscara de tierras referenciada.

La corrección atmosférica aplicada a las imágenes SeaWiFS y MODIS se basó principalmente en el trabajo de Gordon & Wang (1994a) y es el que utilizaba la NASA en el momento de procesar dichas imágenes (año 2007).

3.3.2.3 Protocolo para determinar coincidencia entre datos satelitales e *in-situ*

Para determinar coincidencias entre datos *in-situ* y satelitales es necesario fijar criterios espaciales, temporales, de calidad de los datos y de exclusión. Un protocolo formal que permite determinar la coincidencia espacial y temporal de los datos *in-situ* y satelitales fue presentado por Bailey & Werdell (2006). El procedimiento utilizado en el presente trabajo es una versión modificada del mismo y se presenta en la Figura 3.3.2.

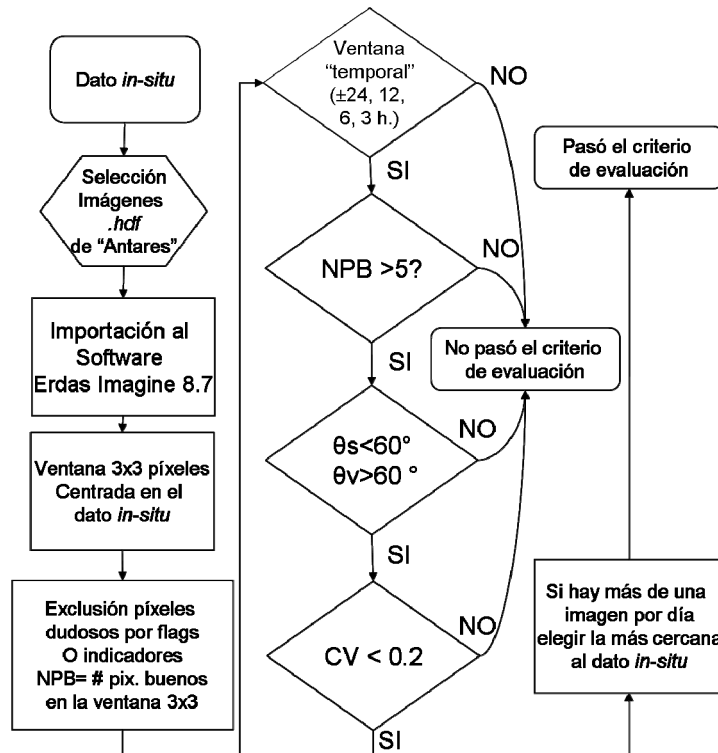


Figura 3.3.2. Diagrama de flujo con el proceso de evaluación y el criterio de exclusión utilizado para la comparación entre clorofila-*a in-situ* y satelital (adaptado de Dogliotti, 2007). NPB: número de píxeles válidos, CV: coeficiente de variación, θ_s : ángulo cenital solar, θ_v : ángulo de visión del sensor.

Consideraciones espaciales

Al comparar observaciones de campo con datos satelitales es importante tener en cuenta las escalas de las diferentes mediciones, particularmente la escala de los fenómenos geofísicos locales que influyen en dichas mediciones. La escala de las mediciones satelitales puede variar entre los 300 m y 1,1 Km según el instrumento utilizado. Considerando esta escala, los datos de campo deberían ser colectados idealmente en regiones donde la variabilidad espacial de la variable geofísica sea relativamente estable en un área varias veces mayor que la resolución del instrumento que se encuentra a bordo del satélite (Gordon *et al.*, 1983). Esto tendría en cuenta posibles errores de navegación en los datos satelitales y minimizaría el

efecto de la variabilidad a pequeña escala en las mediciones *in-situ*. El sensor remoto promedia la variabilidad existente a nivel sub-píxel, mientras que las mediciones *in-situ* son puntuales y no la tienen en cuenta.

La navegación del satélite puede no ser precisa a nivel del píxel (Patt, 2002), por lo que conviene definir una ventana de un cierto número de píxeles (por ej. 3x3, 5x5, 7x7, etc.), centrada en la posición de la medición *in-situ*. Esta ventana permite generar estadísticos simples, tales como el promedio y desviación estándar, para evaluar la estabilidad espacial u homogeneidad de la variable en esa posición. El tamaño de la ventana elegido en el presente trabajo fue de 3x3, ya que es un tamaño relativamente pequeño y limita el error debido a la variabilidad espacial y los errores en la navegación. Al utilizar el promedio de los valores de la ventana elegida para comparar con el dato *in-situ*, se supone que en la región definida por la ventana la variable medida es homogénea. Para analizar la variabilidad entre los píxeles de la ventana se calculó el coeficiente de variación (CV), estimado como el cociente de la desviación estándar y el promedio. Con el fin de evitar usar datos de zonas con una alta variabilidad espacial (tales como bordes de nubes o zonas frontales), se excluyeron del análisis las estimaciones satelitales que tuvieran un CV mayor a 0,2 (McClain *et al.*, 2000).

Consideraciones temporales

En general las mediciones *in-situ* no suelen coincidir exactamente con el momento de toma de la imagen satelital, por lo que hay que elegir un umbral temporal en la definición de coincidencia. Esta ventana temporal debe ser lo suficientemente corta como para reducir los efectos de la variabilidad temporal de los valores medidos *in-situ*, pero lo suficientemente amplia como para tener una alta probabilidad de coincidencia.

La comparación de los datos satelitales con datos *in-situ* de temperatura superficial provenientes de estaciones fijas se realizó con la imagen obtenida en la misma fecha. En el caso de los datos obtenidos en campañas oceanográficas la comparación fue realizada entre el registro *in-situ* y el valor medio de los píxeles libres de nubes de las imágenes obtenidas en el período de obtención de los datos (entre 2 y 4 imágenes). Se adoptó este criterio ya que las campañas oceanográficas fueron de corta duración (no superaron los cuatro días) asumiendo que en este período la temperatura *in-situ* se mantuvo relativamente estable. El coeficiente de variación temporal calculado en función del número de imágenes disponibles en el período de campaña para cada una de las estaciones oceanográficas estuvo entre 0,04 y 0,5 con un valor medio de 0,10.

La comparación entre datos satelitales e *in-situ* de clorofila-*a* se realizó considerando cuatro ventanas temporales diferentes. A diferencia de la temperatura del mar la concentración de clorofila-*a* presenta mayor variabilidad espacial y temporal. En primer lugar se consideraron coincidentes las mediciones *in-situ* realizadas entre ± 24 horas de la toma de la imagen (Gregg & Casey, 2004). Luego se eligieron condiciones más estrictas, de ± 12 a ± 6 y finalmente a ± 3 horas antes y después de la toma de la imagen. En los casos en que hubieron dos imágenes disponibles para el mismo día se utilizó la imagen cuya hora de pasada fuese más cercana a la hora de toma de la muestra. En el caso de la ventana de 3 horas se considera que la iluminación fue suficiente y que las condiciones atmosféricas fueron estables durante dicho período (Bailey *et al.*, 2000), con lo cual se espera obtener un mejor ajuste entre ambos datos.

Consideraciones sobre la calidad de los datos

Con el fin de minimizar los efectos de datos anómalos en la comparación, se generaron criterios de exclusión. En las imágenes de TSM utilizadas se excluyeron los valores correspondientes a nubes. En el caso de los productos de clorofila-*a* se utilizaron los indicadores de calidad o *flags* producidos al procesar la imagen para descartar píxeles de dudosa calidad. No fueron incluidos en el análisis los píxeles marcados con los siguientes indicadores estándar del procesamiento: ATMFAIL, LAND, HIGLINT, HILT, HISATSEN, STRAYLIGHT, CLDICE, HISOLSEN, LOWLW (ver Tabla 2.2, en el Capítulo 2, para la descripción de cada indicador). Esto da confianza al promedio estimado en la ventana y evita la inclusión de estimaciones erróneas. El protocolo utilizado en este trabajo se esquematiza en la Figura 3.3.2.

*3.3.2.4 Metodología para la comparación de imágenes satelitales de clorofila-*a* de los sensores SeaWiFS y MODIS.*

La red Antares (<http://www.antares.ws>) provee información satelital de concentración de clorofila-*a* del sensor MODIS procesadas en el Instituto de Teledetección Marina de la Universidad del Sur de Florida. Esta información está disponible para los golfos norpatagónicos y otras regiones del Mar Argentino en formato *.hdf*. Como se mencionó previamente, las imágenes de Cla-sat de este sensor fueron las que se utilizaron para la comparación con datos *in-situ*. Los archivos *.hdf* del período 16 de octubre de 2004 al 21 de febrero de 2010 fueron descargados desde la página web en el Laboratorio de Teledetección del CENPAT. Los archivos fueron importados al formato *.img* del software ERDAS Imagine

8.7, siendo georreferenciados y corregistrados con la información suministrada en la misma página.

La existencia de un período de solapamiento entre las imágenes producidas por el sensor MODIS (octubre 2004 a febrero de 2010) y SeaWiFS permitió realizar comparaciones entre las imágenes de ambos sensores para evaluar la coherencia de información entre ambas series temporales.

En estas imágenes se seleccionaron puntos (valores medios de ventanas de 3x3 píxeles) al azar distribuidos en el área de cobertura que abarcó al golfo San Matías.

3.3.2.5 Algoritmos

Los algoritmos de TSM consisten en fórmulas de regresión que involucran comparaciones empíricas de TSM medidas mediante boyas (Figura 2.1.16 del Capítulo 2), con una combinación de mediciones AVHRR en distintas bandas espectrales (Bernstein, 1982; McMillin & Crosby, 1984; McClain *et al.*, 1985; Walton, 1988). Los algoritmos de TSM así generados son de naturaleza global, es decir que pueden ser aplicados para obtener imágenes de TSM en cualquier región del océano y no son dependientes del tiempo. En este trabajo se utilizaron algoritmos denominados MCSST (*multi channel sea surface temperature*) cuyos coeficientes dependen del sistema satelital considerado (NOAA 12, NOAA 14, etc.) y la hora del día de la toma de la imagen en el área de interés (imágenes diurnas o nocturnas). La forma matemática del algoritmo MCSST se muestra en la Tabla 3.3.3. Los coeficientes para cada satélite y hora del día de toma de la imagen se detallan en el Apéndice C.

Los algoritmos estándar OC4v4 y OC3M (O'Reilly *et al.*, 2000) fueron aplicados a las imágenes Orbview2-SeaWiFS y MODIS/Aqua para la obtención de valores de clorofila-*a*, actualmente utilizados en forma operacional por la NASA. La forma funcional de estos algoritmos empíricos es la siguiente

$$Cla = 10^{(a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3)} + a_4 \quad (3.3.1)$$

Donde R es el \log_{10} de $R_{\lambda_2}^{\lambda_1}$, el cociente de la reflectancia teledetectada (R_{RS}) corregida atmosféricamente en dos bandas, $R_{\lambda_2}^{\lambda_1} = R_{RS}(\lambda_1)/R_{RS}(\lambda_2)$, centradas en la longitud de onda λ_1 y λ_2 . Los valores de los coeficientes a_i se incluyen en la Tabla 3.3.4.

3.3.2.6 Criterios de comparación

La correspondencia entre las estimaciones satelitales y las mediciones *in-situ*, y entre estimaciones de concentración de clorofila-*a* de los sensores SeaWiFS y MODIS se evaluó

utilizando criterios estadísticos y gráficos. Los estadísticos utilizados para comparar los diferentes algoritmos fueron el error relativo (ER) y el error cuadrático medio (RMS), de uso reciente en la literatura (O'Reilly *et al.*, 2000; Gregg & Casey, 2004). Los errores fueron calculados mediante las siguientes ecuaciones:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (RE)^2} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3.3.1})$$

$$RE = \frac{X_{sat} - X_{in-situ}}{X_{in-situ}} \quad (\text{Ecuación 3.3.2})$$

Donde X_{sat} es el registro de temperatura o de la concentración de clorofila-*a* obtenida a partir de la estimación satelital, X_{situ} es el registro de temperatura o la concentración de clorofila-*a* medidos *in-situ* y n es el número de pares de datos analizados. Se realizaron gráficos de dispersión de los valores estimados en forma satelital versus los valores medidos *in-situ*. El modelo de regresión lineal tipo II, Standard Major Axis (SMA), fue utilizado para calcular la pendiente y la ordenada al origen de la ecuación lineal que relaciona las estimaciones satelitales y los datos *in-situ*. Cuando ambas variables tienen un error asociado, la técnica de SMA estima mejor la recta que las relaciona ya que la varianza residual es minimizada en ambos ejes, (McArdle, 1988; Sokal & Rohlf, 1995). El programa (S) MATR (Versión 1, Falster DS, Warton DI y Wright IJ: <http://www.bio.mq.edu.au/ecology/SMATR/>), fue utilizado para obtener la pendiente, la ordenada al origen y el coeficiente de determinación (r^2). El coeficiente de determinación indica el grado de asociación lineal entre las mediciones *in-situ* y las estimaciones satelitales de *Cl-a-sat*, pero no es una medida de cuán bien el algoritmo estima la variable medida. De esta manera la pendiente (cercana a 1), la ordenada al origen (cercana a 0) y los mencionados estadísticos fueron utilizados en el presente trabajo para evaluar las estimaciones satelitales utilizando distintos algoritmos.

Tabla 3.3.3. Algoritmos de temperatura superficial del mar y clorofila-*a* de los sensores AVHRR y SeaWiFS/MODIS respectivamente.

Sensor	Nombre	Ecuación
AVHRR	MCSST	$MCSST = B_1(T_4) + B_2(T_4 - T_5) + B_3(T_4 - T_5)(\text{Secq} - 1) - B_4$
SeaWiFS	OC4v4	$Cl-a = 10^{(0,366 - 3,067R + 1,93R^2 + 0,649R^3 - 1,532R^4)} + (-1,532)$ donde $R = \text{Log}_{10} \left(\frac{R_{555}^{443}}{R_{555}^{490}} > \frac{R_{555}^{490}}{R_{555}^{510}} \right)$
MODIS	OC3M	$Cl-a = 10^{(0,283 - 2,753R + 1,457R^2 + 0,659R^3 - 1,403R^4)} + (-1,403)$ donde $R = \text{Log}_{10} \left(\frac{R_{550}^{443}}{R_{550}^{488}} > \frac{R_{550}^{488}}{R_{550}^{510}} \right)$

Los datos de clorofila-*a* *in-situ* y satelitales fueron transformados logarítmicamente antes de realizar el análisis estadístico, dado que los datos bio-ópticos presentaron una distribución log-normal (Campbell, 1995). La raíz cuadrada del error logarítmico (RMS_{\log} , Ecuación 3.3.3) y el error medio (EM_{\log} , Ecuación 3.3.4) (O'Reilly *et al.*, 2000; Gregg & Casey, 2004), se calcularon según las siguientes ecuaciones:

$$RMS_{\log} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log Cla_{sat} - \log Cla_{in-situ})^2} \quad (\text{Ecuación 3.3.3})$$

$$EM_{\log} = \frac{1}{n} \sum (\log Cla_{sat} - \log Cla_{in-situ}) \quad (\text{Ecuación 3.3.4})$$

Finalmente, la coherencia de información entre las imágenes SeaWiFS y MODIS (ambas con una resolución espacial de 1,1 Km), se evaluó con el objetivo de verificar la continuidad entre ambas series temporales para el área de los golfos norpatagónicos y plataforma adyacente. Se escogieron pares de imágenes correspondientes a determinadas fechas entre octubre de 2004 a diciembre de 2006. En cada par de imágenes seleccionadas se compararon los datos de clorofila-*a* de pixeles correspondientes a la misma ubicación, seleccionados al azar y distribuidos en forma relativamente homogénea en el área de cobertura de las imágenes. El análisis de correlación se realizó para cada par de imágenes, utilizando entre 12 y 30 pares de datos.

3.3.3 Resultados

3.3.3.1 Comparación de los productos de TSM-AVHRR con datos *in-situ*.

Los coeficientes de correlación correspondientes a la comparación entre TSM-AVHRR y los datos *in-situ* fueron mayores a 0,7 en cada una de las estaciones fijas (Las Grutas, Punta Pozos y El Sótano) y de cada campaña en particular, inclusive cuando se realizó el análisis incluyendo todos los datos *in-situ* disponibles. Sin embargo al analizar el error relativo (ER) y RMS porcentual se observó que fueron mayores para las estaciones fijas y para todo el conjunto de datos y menores al considerar cada campaña en forma particular (Tabla 3.3.4).

Las pendientes de la rectas para cada estación o campaña, en general fueron mayores a la unidad (Tabla 3.3.4) indicando una sobreestimación del sensor AVHRR con respecto a los datos *in-situ*. En los casos de la estación de Las Grutas y la campaña IV se observó que la

CAPITULO 3. Sec. 3: Comparación entre datos satelitales e *in-situ*

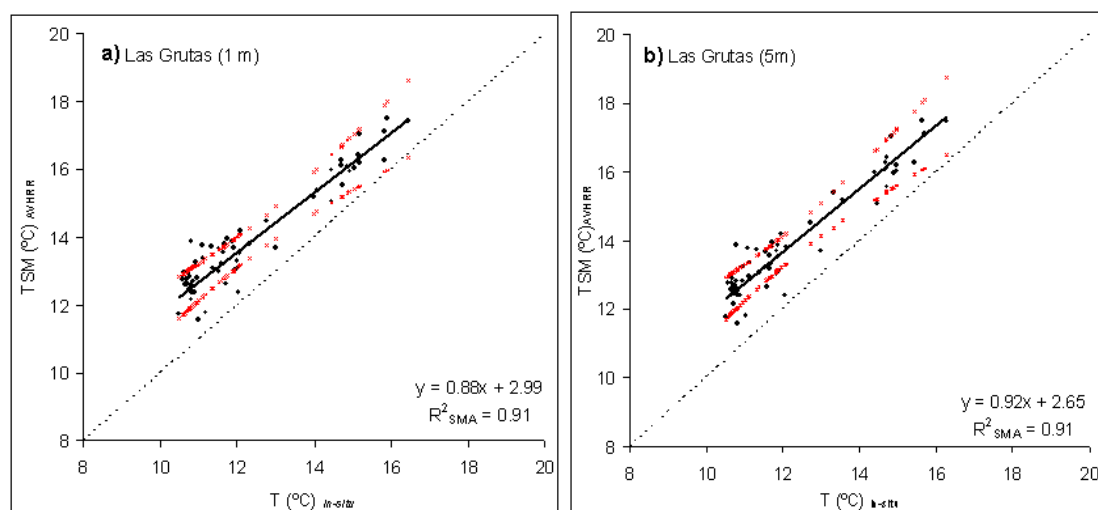
pendiente fue levemente menor a 1. La ordenada al origen del modelo de regresión tuvo valores variables entre -4,0 y 4,0.

En estos resultados se puede observar que si bien hay una alta correlación entre ambas fuentes de datos, la sobreestimación de la temperatura *in-situ* del sensor AVHRR puede estar afectada por las condiciones atmosféricas que pueden variar de acuerdo a la época del año.

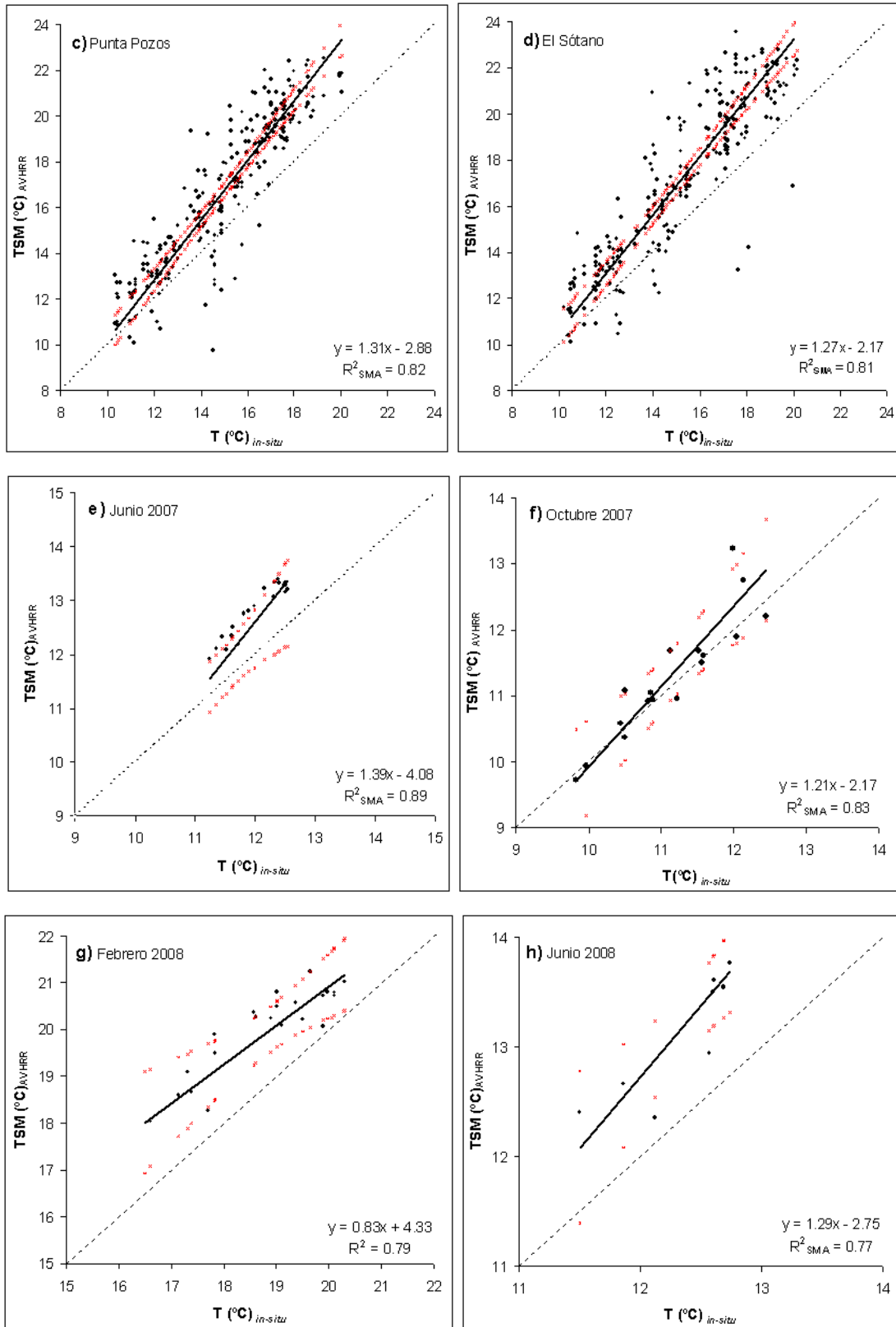
Tabla 3.3.4: Coeficientes de la recta de regresión (b: pendiente, a: ordenada al origen) junto con el coeficiente de determinación (r^2). Todas las correlaciones fueron estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Resultados de los estadísticos de la evaluación de los algoritmos.

Datos	b	[b] _{95%}	a	[a] _{95%}	R ²	EM	RMS	ER [†]	RMS (%)	n
Las Grutas (1m)	0,89	0,82-0,96	2,99	2,14-3,84	0,91	1,60	1,68	0,14	14,62	64
Las Grutas (5m)	0,92	0,85-0,99	2,65	1,79-3,53	0,91	1,70	1,77	0,15	15,28	64
Punta Pozos	1,31	1,24-1,38	-2,88	-3,96- -1,81	0,82	1,79	2,30	0,12	15,09	249
El Sótano	1,27	1,20-1,35	-2,17	-3,26- -1,08	0,81	1,98	2,52	0,12	16,35	246
Junio 2007	1,13	0,98-1,31	-0,77	-2,75- 1,22	0,91	0,81	0,82	0,06	6,40	21
Octubre 2007	1,21	0,96-1,51	-2,17	-5,22- 0,89	0,83	0,16	0,41	0,00	3,28	17
Junio 2008	1,29	0,88-1,88	-2,75	-8,94- 3,44	0,77	0,79	0,83	0,07	6,26	10
Febrero 2008	0,83	0,67-1,03	4,33	0,97-7,70	0,79	1,21	1,31	0,07	3,87	22
Junio 2007, Octubre 2007 y Junio 2008	1,39	1,27-1,54	-4,08	-5,66- -2,49	0,89	0,58	0,71	0,06	5,47	48
Totalidad de datos disponibles	1,24	1,20-1,28	-1,83	-2,41- -1,26	0,84	1,73	2,23	0,11	14,85	629

† Mediana del error medio relativo.



CAPITULO 3. Sec. 3: Comparación entre datos satelitales e *in-situ*



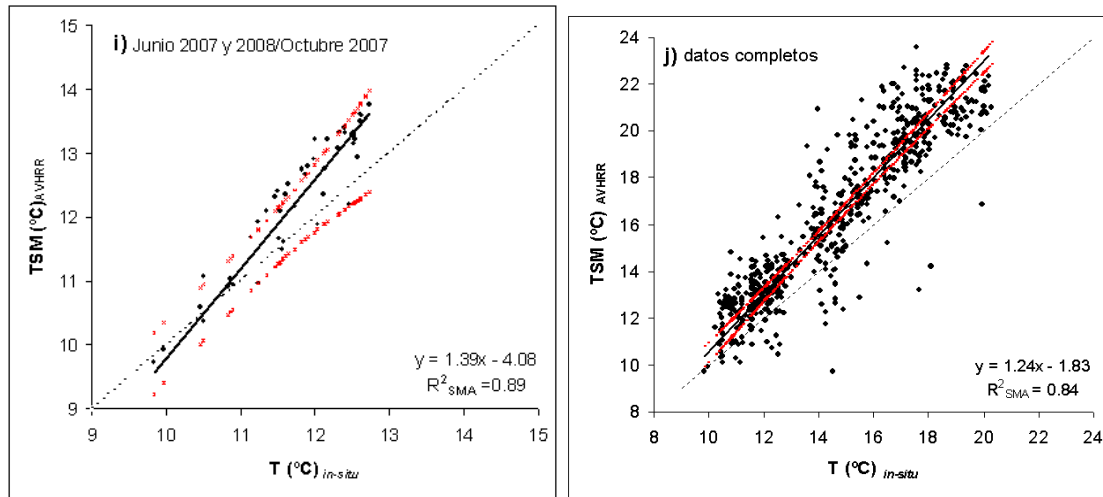


Figura 3.3.3: Diagramas de dispersión de los valores estimados utilizando datos de temperatura *in-situ* y del sensor AVHRR. Las rectas fueron obtenidas mediante el ajuste de los datos al modelo de regresión SMA; los puntos rojos indican los límites de los intervalos de confianza (95%), la línea punteada corresponde a la relación 1:1.

3.3.3.2 Comparación de los productos del Cla-sat-MODIS con datos *in-situ*.

El análisis cualitativo entre las estimaciones *in-situ* y satelitales (Figura 3.3.4) mostró que las estimaciones de clorofila-*a* satelital por parte del algoritmo OC3M reprodujeron bastante bien la distribución de clorofila-*a* medida *in-situ*, aunque se observaron diferencias entre ambas estimaciones.

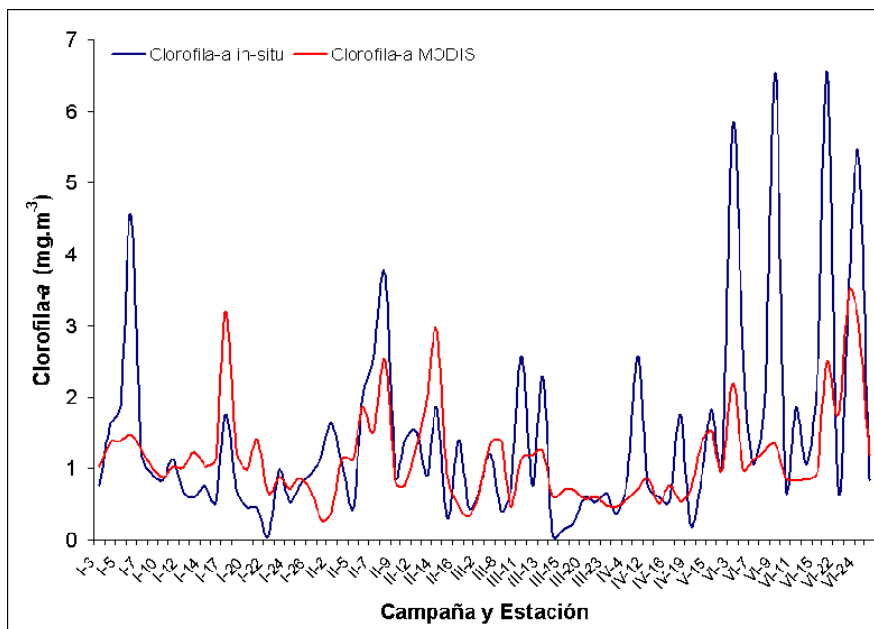


Figura 3.3.4: Concentración de clorofila-*a* medida *in-situ* (azul), y por el sensor MODIS (rojo) en las estaciones de las campañas realizadas en el GSM.

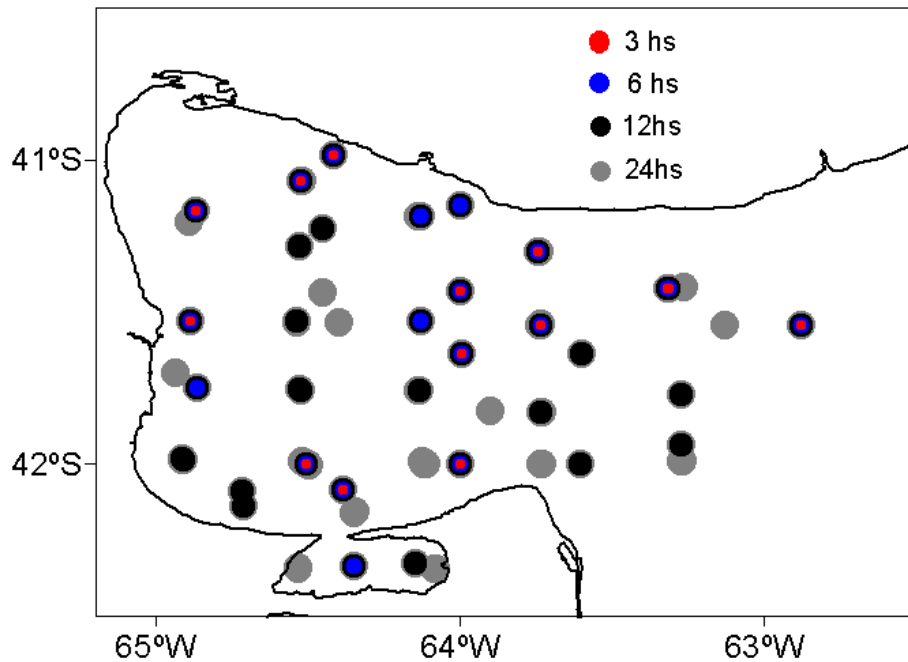


Figura 3.3.5. Localización de los datos *in-situ* colectados durante las campañas oceanográficas y de pares de datos coincidentes (*in-situ*-satélite) utilizando los criterios de selección de ventanas temporales (± 24 h, 12h, 6h y 3 horas de la hora de pasada del satélite).

A partir de las muestras de agua obtenidas en las campañas oceanográficas se lograron obtener 134 datos de clorofila-*a in-situ* (Figura 3.3.5). La presencia de nubes y la aplicación del criterio de selección de las ventanas temporales de 24, 12, 6 y 3 horas, dio como resultado que los pares de datos (*in-situ* vs. satelitales) coincidentes se redujeran a 74, 38, 20 y 14 (Figura 3.3.5). El rango de valores de concentración de clorofila-*a in-situ* estuvo entre 0,06 y 6,53 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Los principales resultados de los parámetros estadísticos y los análisis de correlación se presentan en la Tabla 3.3.6. La mediana del error medio relativo porcentual (ER, Tabla 3.3.6) mostró que en promedio, el algoritmo OC3M subestimó la concentración de clorofila-*a*. El ajuste al modelo II de regresión lineal indicó que menos del 35% de la varianza fue explicada por la regresión lineal ($r^2 < 0,35$ para todas las ventanas temporales). Se observó dispersión de los datos alrededor de la recta estimada (Figura 3.3.6) y los errores cuadráticos medios fueron muy grandes para las ventanas temporales de 24 y 12 h ($\text{RMS} > 100\%$). Al considerar los criterios temporales de 6 y 3 h el coeficiente de determinación no mejoró notablemente ($r^2 \sim 0,3$; $p < 0,05$); sin embargo el error cuadrático medio fue sensiblemente menor ($\text{RMS} \sim 40\%$) y la pendiente de la recta fue más cercana a la unidad ($\sim 0,8$). Para la ventana de 12 h se obtuvieron coeficientes de determinación similares; sin embargo, la pendiente de la recta fue menor (0,64) y el error cuadrático medio mayor ($\text{RMS} > 100\%$) (Tabla 3.3.5).

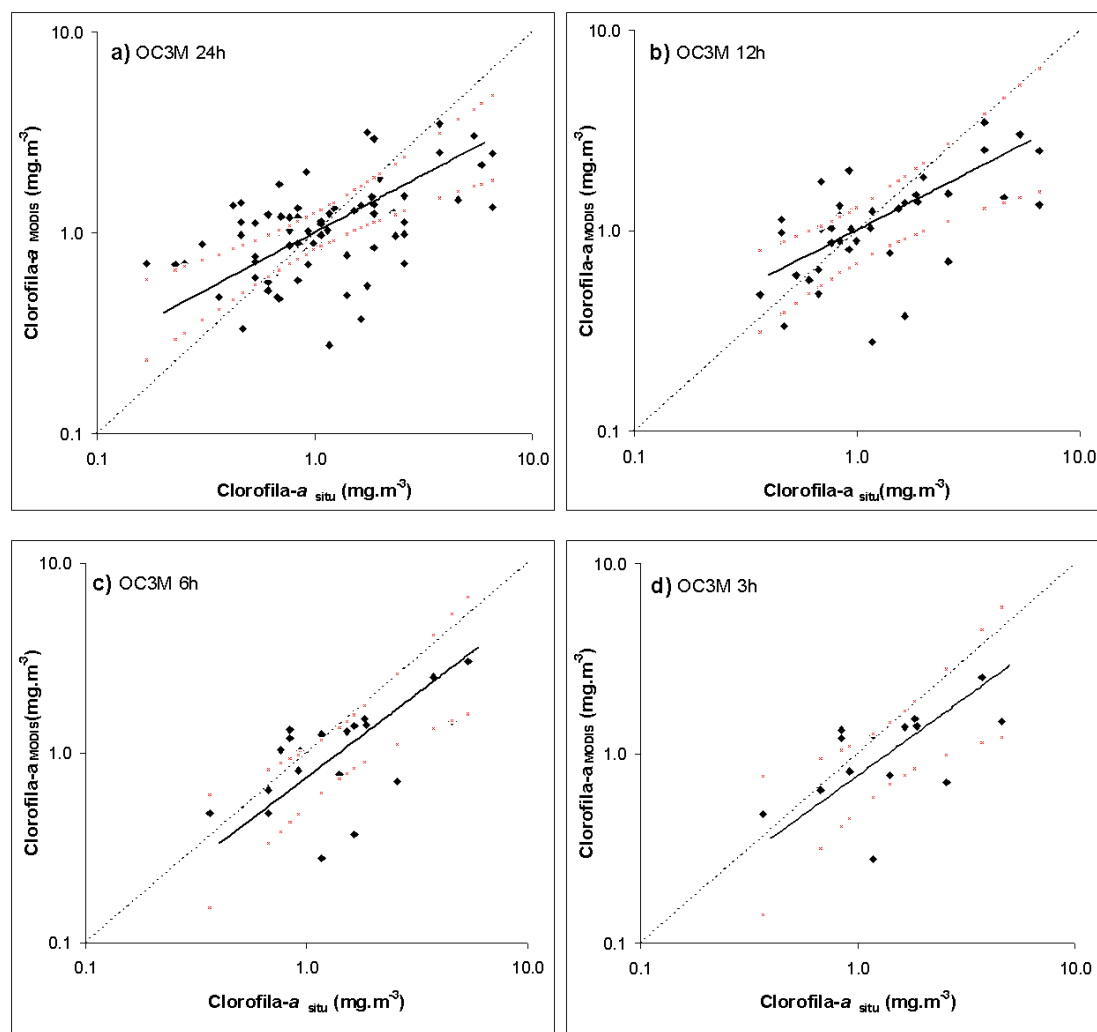


Figura 3.3.6. Dispersión de los valores estimados utilizando datos satelitales *versus* los valores medidos *in situ* para el algoritmo aplicado a las imágenes MODIS: OC3M: ventana temporal (a) 24h, (b) 12h, (c) 6 (d)3h. La línea sólida es la recta determinada por el modelo II de regresión lineal. Los puntos rojos indican los límites de los intervalos de confianza (95%), la recta punteada corresponde a la relación 1:1.

Tabla 3.3.5: Resultados estadísticos de la evaluación de las ventanas temporales. b: pendiente, a: ordenada al origen. Todas las correlaciones fueron estadísticamente significativas. ($p < 0.05$).

MODIS Ventana tempora l	b	[b] _{95%}	a	[a] _{95%}	r ²	n	RMS- log	BIAS- log	RMS (%)	ER (%) [†]
24 h	0,57	0,47-0,70	0,01	-0,05-0,06	0,26	74	0,34	0,01	191,73	-5,73
12 h	0,64	0,49-0,85	-0,02	-0,10-0,06	0,32	38	0,33	-0,05	187,23	-8,05
6 h	0,88	0,60-1,30	-0,13	-0,25- (-0,01)	0,34	20	1,03	-0,54	41,82	-16,77
3 h	0,83	0,50-1,37	-0,12	-0,26-0,03	0,30	14	0,29	-0,14	43,51	-16,20

[†] Mediana del error medio relativo porcentual

La subestimación en la concentración de clorofila-a por parte del sensor MODIS fue analizada calculando el cociente entre el valor satelital y el valor *in-situ* para cada una de las

ventanas temporales que mostraron el mejor ajuste (6 y 3 h) y en los rangos de valores de concentración de clorofila-*a* mayores y menores a 1,0 mg.m⁻³ (Tabla 3.3.6).

El cociente entre el valor satelital e *in-situ* fue menor a 0,94 en las ventanas temporales y rangos de concentración analizados. Sin embargo se observó que para concentraciones menores de 1,0 mg.m⁻³, el algoritmo tiende a subestimar la concentración de clorofila-*a* y los gráficos de dispersión del error relativo (ER) en función de la Cla medida *in situ* (Figura 3.3.7), muestran que este error tiende a ser mayor a concentraciones más bajas. Para concentraciones por encima del valor indicado, el cociente se aproximó a la unidad. En síntesis, para el conjunto de datos analizados el algoritmo OC3M tuvo el mejor desempeño en concentraciones mayores a 1,0 mg.m⁻³ en las ventanas de 6 y 3 hs.

Tabla 3.3.6. Coeficiente (media ± desvío estándar) de los valores satelitales (MODIS) e *in-situ* de clorofila-*a*.

Ventana temporal	<1.0 mg.m ⁻³ Cla-sat	>1.0 mg.m ⁻³ Cla-sat
06 h	0,65 ± 0,40 (n=8)	0,94 ± 0,37 (n=10)
03 h	0,70 ± 0,42 (n=6)	0,87 ± 0,36 (n=7)

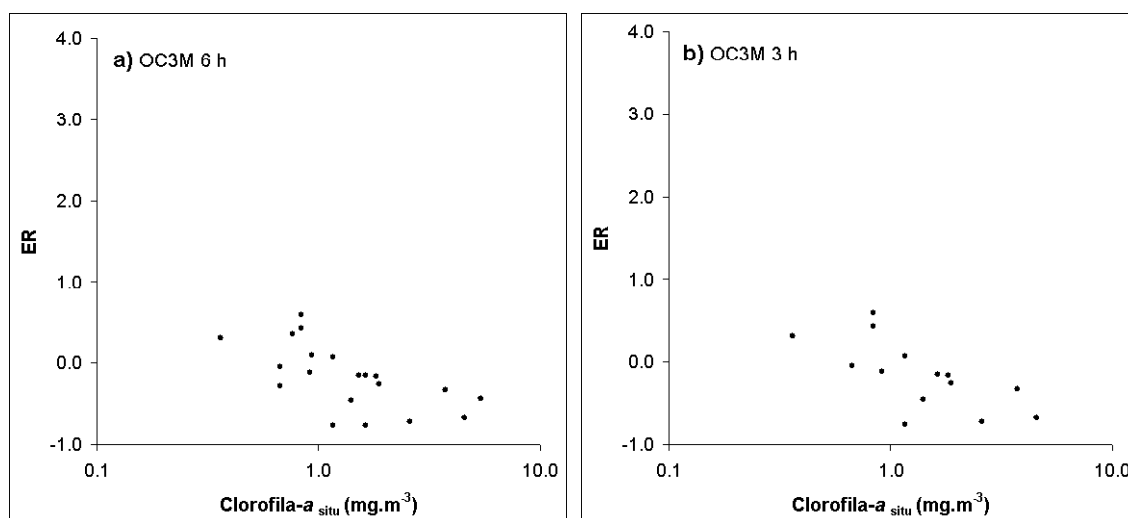


Figura 3.3.7. Error relativo (ER) de las estimaciones satelitales versus la concentración de clorofila-*a* *in-situ* medida para el algoritmo aplicado a las imágenes MODIS: OC3M. Ventanas temporales analizadas: (a) 6h (b) 3h.

3.3.3.3 Comparación de los productos de clorofila-*a* de los sensores SeaWiFS y MODIS en el período 2004-2006.

Se obtuvieron 22 pares de imágenes coincidentes y de buena calidad (baja cobertura nubosa) correspondientes a ambos sensores en el período 2004-2006. En algunas ocasiones los pares de datos estuvieron afectados por nubes o fallas del sensor con lo cual el número de pares coincidentes fue menor.

CAPITULO 3. Sec. 3: Comparación entre datos satelitales e *in-situ*

Los resultados obtenidos mostraron altos coeficientes de correlación (indicando el grado de asociación lineal entre los datos de ambos sensores), las pendientes de las rectas fueron cercanas a la unidad (0,8-1,2; Tabla 3.3.7), mientras que las ordenadas al origen variaron entre -0,2 a 0,26 y el RMS entre 60-30%.

Los coeficientes de correlación de menor magnitud (por ejemplo, $r^2 < 0,3$) pueden ser explicados por problemas en la recepción de la señal por parte del sensor en algunas fechas en particular (ver en Apéndice C).

Tabla 3.3.7: Resumen de resultados del análisis de SMA para cada fecha analizada (b: pendiente, a: ordenada al origen, r^2 : coeficiente de determinación, EM-log: error medio logarítmico, ER_m : media del error relativo, RMS: error cuadrático medio).

Fecha	R^2_{SMA}	b	[b] _{95%}	a	[a] _{95%}	EM-log	RMS-log	ER_m	RMS (%)	N
26/10/2004	0,90	0,99	0,84-1,17	0,12	0,06-0,17	-0,12	0,16	-0,29	0,36	18
05/11/2004	0,82	1,85	1,37-2,48	-0,02	-0,60-	-0,25	0,27	-0,53	0,59	12
03/12/2004	0,79	1,25	0,95-1,65	0,05	-0,07-0,18	-0,12	0,20	-0,14	0,44	15
09/12/2004	0,82	1,05	0,80-1,37	-0,20	-0,31- -0,08	0,18	0,21	0,37	0,47	14
16/12/2004	0,82	1,09	0,86-1,38	0,24	0,16-0,33	-0,25	0,29	-0,52	0,62	16
19/12/2004	0,78	0,81	0,63-1,03	0,06	0,01-0,11	-0,06	0,13	-0,08	0,29	18
01/01/2005	0,78	1,27	1,04-1,56	0,24	0,18-0,30	0,28	0,30	0,61	0,65	25
01/02/2005	0,85	0,86	0,73-1,02	0,09	0,05-0,13	0,12	0,14	0,29	0,31	25
01/03/2005	0,73	0,91	0,74-1,13	-0,21	-0,25- -0,16	-0,22	0,24	-0,51	0,53	27
17/04/2005	0,73	1,11	0,89-1,38	-0,02	-0,05-0,01	-0,01	0,05	-0,04	0,12	25
12/05/2005	0,26	0,83	0,58-1,18	0,05	0,01-0,09	0,04	0,10	0,07	0,23	26
21/07/2005	0,21	1,95	1,35-2,82	-0,41	-0,48-(-0,33)	-0,41	0,44	-0,78	0,90	26
13/09/2005	0,16	0,74	0,51-1,06	-0,02	-0,04-0,00	-0,02	0,06	-0,06	0,13	27
09/10/2005	0,84	0,87	0,74-1,03	0,06	0,02-0,10	0,04	0,10	0,15	0,23	27
19/11/2005	0,94	0,76	0,69-0,84	-0,14	-0,17-(-0,11)	-0,09	0,14	-0,19	0,30	27
09/02/2006	0,83	0,81	0,68-0,96	-0,08	-0,11-(-0,05)	-0,06	0,10	-0,10	0,23	27
04/03/2006	0,92	0,68	0,60-0,76	-0,11	-0,13-(-0,08)	-0,07	0,12	-0,09	0,27	27
26/08/2006	0,72	0,64	0,52-0,80	-0,20	-0,22-(-0,17)	-0,20	0,22	-0,40	0,48	27
04//09/2006	0,94	0,63	0,57-0,69	-0,02	-0,03-(-0,013)	0,00	0,06	0,02	0,14	27
25/10/2006	0,89	0,69	0,60-0,79	-0,10	-0,13-(-0,07)	-0,05	0,13	-0,05	0,29	27
03/12/2006	0,96	0,88	0,81-0,96	-0,03	-0,06-0,01	0,01	0,06	0,05	0,15	26
Valores medios	$0,75 \pm 0,23$	$0,94 \pm 0,24$		$0,02 \pm 0,23$		$-0,06 \pm 0,15$	$0,16 \pm 0,10$	$-0,11 \pm 0,32$	$0,36 \pm 0,20$	$22,77 \pm 5,27$ (total 507)

Al analizar, en forma conjunta, la totalidad de los pares de datos obtenidos (562 pares), la pendiente fue levemente mayor a la unidad y la ordenada al origen próxima a cero ([-0,01; 0,02]). El coeficiente de correlación mostró que la ecuación lineal explicó el 60% de la varianza y se obtuvo un RMS de 42%. (Figura 3.3.9, Tabla 3.3.8).

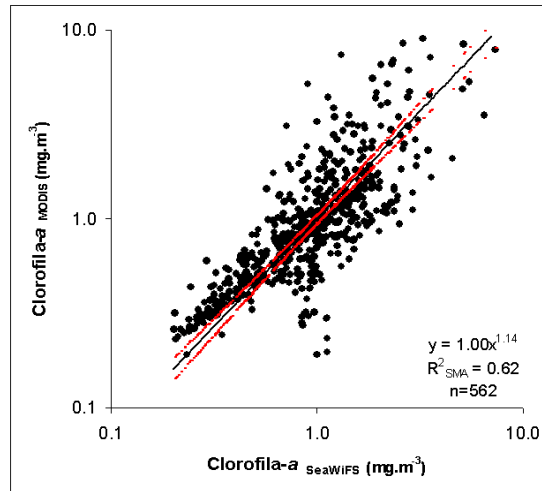


Figura 3.3.9. Diagrama de dispersión de los valores estimados por el sensor SeaWiFS *versus* los valores estimados por MODIS. Los puntos rojos indican los límites de los intervalos de confianza (95%).

Nuevamente, se observó una coherencia entre las series temporales de ambos sensores en el período analizado. El menor coeficiente de correlación podría ser atribuido a la variabilidad en las condiciones atmosféricas de los sitios y fechas analizados.

Tabla 3.3.8: Resultados del análisis de regresión (b= pendiente, a= ordenada al origen).

R^2_{SMA}	b	$[\rho]_{95\%}$	a	$[\rho]_{95\%}$	EM-log	RMS-log	ER _m	RMS (%)	N	Resolución espacial
0.62	1,14	1,1- 1,2	0,01	-0,01-0,02	0,00	0,19	0,01	42,00	562	1,1

3.3.4 Discusión

En este trabajo fueron evaluadas las incertidumbres en la estimación de temperatura y clorofila-*a* superficial en el GSM por parte de los sensores AVHRR y MODIS.

En el caso de TSM los resultados mostraron una alta correlación entre los datos *in-situ* y los estimados mediante el sensor AVHRR, sin embargo en general hubo una sobrestimación del algoritmo MCSST con respecto a los registros *in-situ*. El algoritmo MCSST fue generado a partir de la correlación con datos de temperatura tomados por boyas, principalmente en el Océano Pacífico tropical, con lo cual el error medio de 0,7 °C (Strong & McClain, 1984; Llewellyn-Jones *et al.*, 1984) indicado para las estimaciones de TSM del sensor AVHRR, es

sólo nominal para estas latitudes, ya que las condiciones atmosféricas y los instrumentos utilizados en los registros de temperaturas *in-situ* son claramente diferentes a los del Océano Pacífico.

Los productos globales de color del océano del sensor MODIS han sido comparados con las medidas de clorofila-*a* obtenidas en las seis campañas oceanográficas realizadas entre 2007 y 2009. Los resultados de los análisis muestran que las ventanas temporales de 6 y 3 horas tuvieron un mejor ajuste con respecto a las ventanas de 12 y 24 horas, al menos durante el período en el que fueron tomados los datos (2007-2009). Esto podría ser explicado por condiciones óptimas de iluminación (es decir, cerca del mediodía local) y por condiciones atmosféricas más estables en ventanas temporales acotadas (Bailey *et al.*, 2000).

El algoritmo OC3M del sensor MODIS mostró una subestimación general sobre todo el rango analizado en las ventanas temporales de 6 y 3 horas. Las diferencias entre los valores satelitales estimados e *in-situ* de clorofila-*a*, pueden deberse a errores en las correcciones atmosféricas o a las características ambientales del golfo San Matías, y a que el algoritmo utilizado ha sido desarrollado en base a datos oceánicos y pueden no ajustarse a datos de ambientes costeros (IOCCG, 2000). En este trabajo, el producto satelital de clorofila-*a* analizado fue obtenido aplicando el algoritmo OC3M a datos satelitales y no a mediciones radiométricas por lo cual no fue posible evaluar o cuantificar el posible error inducido por el término de corrección atmosférica (Dogliotti *et al.*, 2009).

En la sección 3.1 se observó que el área interna del GSM presentó concentraciones de clorofila-*a* uniformes y relativamente menores al área de la boca y área externa en los meses de otoño e invierno. En el periodo que transcurre desde la primavera y hacia fines del verano el GSM se caracteriza por presentar un frente térmico que aísla el área noroeste, la cual posee características muy diferentes al área externa y sur-sudeste (Carreto *et al.*, 1974; Piola & Scasso, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004; Williams, 2004). El área sudeste se encuentra afectada por el ingreso de aguas de menor temperatura provenientes de la plataforma adyacente. Como se ha citado previamente (sección 3.1) en la entrada del GSM el flujo de energía por mareas es uno de los más altos del mundo (Palma *et al.*, 2004a). El criterio de *Simpson-Hunter* indicó zonas de mezcla vertical en esta área (Palma *et al.*, 2004a) y coincide con la distribución local de aguas que no pertenecen al caso 1 (Morel & Prieur, 1977) determinadas por Dogliotti *et al.* (2009). El flujo de energía de mareas puede ocasionar la resuspensión de sedimentos mientras que la descarga del río Negro en la costa nordeste del GSM puede contribuir con material particulado y de origen terrestre. Estas características pueden, parcialmente, explicar el bajo rendimiento de los algoritmos empíricos en esta región.

Muchos de los datos utilizados en este análisis estuvieron localizados en áreas cercanas a la costa o en el área de la boca, y por lo tanto se ven afectados por el flujo de las mareas, que junto con la baja profundidad de estas áreas puede ocasionar la resuspensión de los sedimentos. Aunque no existen datos ópticos que sustenten esta hipótesis, las aguas de la entrada del Golfo probablemente no pertenezcan a aguas caso 1 (Dogliotti *et al.*, 2009) y por lo tanto los algoritmos empíricos fracasan.

Contradictoriamente a la hipótesis de sobreestimación de la concentración de clorofila-*a* en la entrada del Golfo, se podría atribuir la subestimación de la concentración de clorofila-*a* a la presencia de diatomeas de gran tamaño que pueden influir en las propiedades ópticas del agua en el sector homogéneo de los frentes de marea (Dogliotti *et al.*, 2009). En este sentido, en áreas próximas a Península Valdés Carreto *et al.* (1986) encontraron que ciertas especies de diatomeas forman cadenas. Si bien en este estudio no fue posible analizar muestras de fitoplancton; la estructura y distribución de la comunidad fitoplanctónica en el GSM fue analizada por Sastre *et al.* (1995) en campañas oceanográficas previas. El trabajo citado mostró que el grupo de las diatomeas fue dominante, y se identificaron especies formadoras de cadenas como *Chaetoceros* spp. y *Thalassiosira* spp. (Riebesell, 1991). En células de gran tamaño el coeficiente de absorción específica del fitoplancton (es decir, el coeficiente de absorción de fitoplancton por unidad de clorofila-*a*) disminuye debido al efecto de empaquetamiento pudiendo ocasionar una subestimación significativa de la concentración de clorofila-*a* mediante algoritmos satelitales empíricos (Sathyendranath *et al.*, 2001). Este efecto de empaquetamiento predice, en teoría, el “achatamiento” de los espectros de absorción (es decir, una disminución de la eficacia de absorción), en células de gran tamaño (Duysens, 1956; Sathyendranath *et al.*, 1987), sin embargo hay que tener en cuenta que este efecto esta influenciado por la historia lumínica de las células de fitoplancton (Bricaud *et al.*, 1995).

Una fuente adicional de error es la incertidumbre en la medición *in-situ*. La técnica fluorométrica utilizada en este trabajo se caracteriza por su sensibilidad para detectar concentraciones de clorofila-*a* pero presenta menor precisión que el método espectrofotométrico (Strickland & Parsons, 1972). La concentración de clorofila-*a* *in-situ* en las muestras analizadas estuvo en un rango entre 0,06 y 6,53 mg.m⁻³. Se ha citado que la precisión es muy dependiente de la cantidad de pigmento, pero para valores de clorofila-*a* que superen los 0,5 mg.m⁻³ mejora hasta un 8% (Strickland & Parsons, 1972). En este trabajo más del 80% de los datos *in-situ* utilizados en los análisis de correlación excedieron ese valor (Fig. 3.3.4), con lo cual la precisión del método puede ser considerada adecuada.

Si bien los resultados obtenidos muestran bajos coeficientes de correlación, la pendiente de la recta fue próxima a la unidad, indicando que el producto de *Cla-sat* puede ser utilizado con precaución en análisis espacio-temporales. En este sentido, los análisis de los ciclos estacionales de TSM y *Cla-sat* realizados en la sección 3.1 han sido coherentes con trabajos previos (Carreto *et al.*, 1974; Piola & Scasso, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004; Williams 2004). Los análisis espacio-temporales llevados a cabo en esta tesis fueron realizados con datos del sensor SeaWiFS, sin embargo, la alta correlación obtenida entre datos de clorofila-*a* estimados por los algoritmos OC3M (MODIS) y OC4v4 (SeaWiFS), indica que la serie temporal del sensor SeaWiFS, interrumpida en el año 2006, construida mediante datos de área de cobertura local (LAC) suministrados por CONAE y procesados por el IAFE puede ser reemplazada, en su defecto, por la serie MODIS. Los resultados pueden ser tenidos en cuenta además, para analizar la variabilidad espacio temporal de clorofila-*a* en un período de 10 años (2000 a 2009), utilizando ambos sensores.

Dadas las características oceanográficas del GSM las propiedades ópticas de las áreas noroeste y sur-sudeste posiblemente sean diferentes. En este sentido Dogliotti *et al.* (2007, 2009), realizaron análisis regionales, utilizando el algoritmo OC4v4, considerando las regiones homogéneas y estratificadas a un lado y otro de los diferentes frentes presentes en la plataforma patagónica. Los resultados mostraron menor ajuste y mayor dispersión en los pares de datos correspondientes a las regiones homogéneas, probablemente por la presencia de sedimentos y materia particulada ocasionados por resuspensión.

En el futuro sería necesario poder contar con una extensa serie temporal de datos *in-situ* acompañados de mediciones de variables bio-ópticas y especies fitoplanctónicas de modo de poder realizar un análisis intenso a escala local, de modo de evaluar el desempeño de los algoritmos en el área interna y externa del Golfo y en diferentes épocas del año. Por ejemplo en el Noroeste Atlántico, Fuentes-Yaco *et al.* (2005) observaron que los análisis de correlación mejoraron cuando analizaron los datos estacionalmente o incorporaron datos meteorológicos o de concentración de ozono simultáneos a la toma de datos.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de obtener datos bio-ópticos para poder entender las causas por las cuales los algoritmos no presentan un buen ajuste en el GSM y también realizar los análisis bajo los principios de la teoría de color del océano incluyendo mediciones *in-situ* de propiedades ópticas aparentes (mediciones de radiación, obtención de coeficientes de atenuación difusa), e inherentes (coeficientes de absorción, dispersión y retrodispersión de clorofila-*a*, materia orgánica particulada e inorgánica suspendida, entre otros) (IOCCG, 2000; Sathyendranath *et al.*, 2001).

4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías utilizando imágenes satelitales y datos oceanográficos.

4.1 Introducción

En general, los cambios espaciales en las propiedades físicas y químicas del océano son graduales. Sin embargo, existen zonas de gradientes intensos denominadas “frentes” que pueden ser identificados a partir de discontinuidades en parámetros como temperatura u otras variables ambientales (Le Fevré, 1986).

La plataforma continental del Océano Atlántico Sudoccidental (ASO) presenta una importante variedad de frentes físicos (Guerrero & Piola, 1997; Bava, 2004; Acha *et al.*, 2004; Romero, 2008). En el ASO se han identificado frentes de turbidez (ej. Río de la Plata), termohalinos (ej. del Talud y Plataforma media) y de mareas (ej. Bahía Grande, Península Valdés, Cabo Blanco) (Bava, 2004; Bianchi *et al.*, 2005) (Figura 4.1).

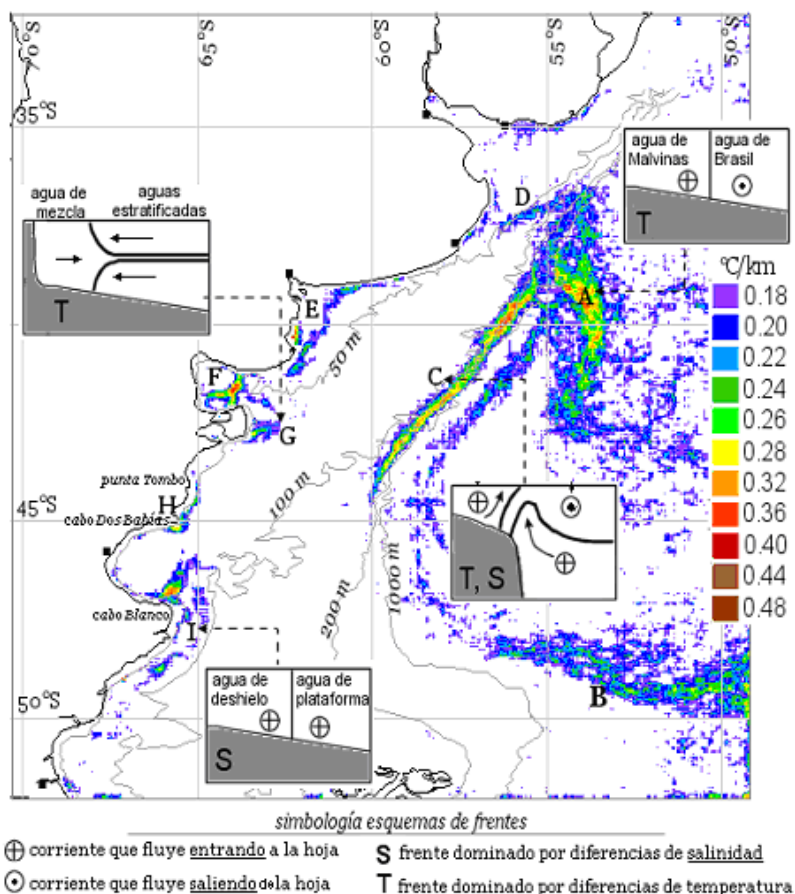


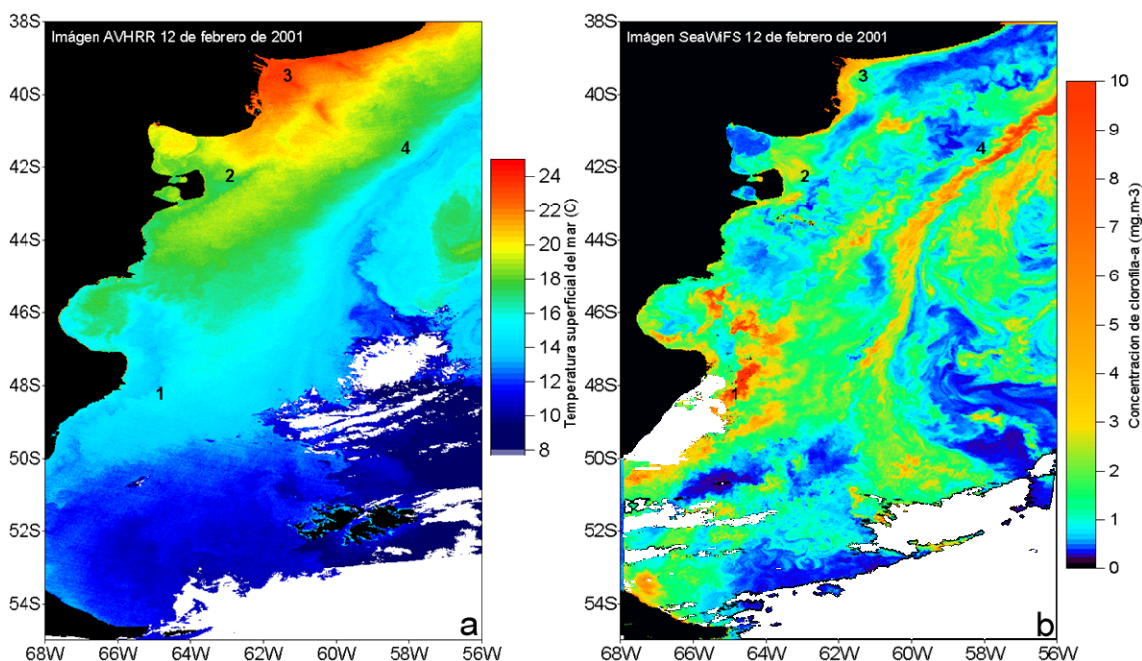
Figura 4.1: Imagen de gradientes medios mensuales para el mes de enero indicando las distintas zonas frontales detectadas en el ASO mediante el análisis de la serie de datos AVHRR 1985-95 y esquema (T, S) de la estructura frontal en la columna de agua (adaptado de Bava, 2004). A: Frente subtropical, B: Frente subantártico, C: Talud continental, D: Frente Marítimo del Río de la Plata, E: El Rincón, F: Golfo San Matías, G: Península Valdés, H: Golfo San Jorge Norte, I: Golfo San Jorge Sur y Litoral costero de Santa Cruz.

Los procesos responsables de la formación de frentes varían de acuerdo con el tipo considerado. De modo general, la circulación en estas zonas está asociada a una diferencia de densidad entre dos masas de agua, lo cual genera una convergencia en la superficie o el fondo y mantiene el frente como una transición relativamente brusca, incluso en presencia de efectos difusivos (Largier, 1993). La característica más importante de las estructuras frontales presentes en los mares y océanos reside en su capacidad para concentrar nutrientes y material particulado en superficie y en el hecho de que constituyen frentes permeables, es decir, que puede existir intercambio de propiedades entre las masas de agua a un lado y otro del frente. Los procesos físicos asociados con la formación de frentes controlan la transferencia de masas de agua de un lado al otro y son probablemente responsables de las mayores tasas de crecimiento fitoplanctónicas que caracterizan estas zonas (Pingree *et al.*, 1978; Carreto *et al.*, 1995; Bertolotti *et al.*, 1996), ya que generan un aporte diario de nitrato en la zona frontal mucho mayor que en las regiones adyacentes (Longhurst, 1998). De este modo, la abundancia de fitoplancton se puede atribuir tanto a un crecimiento *in-situ* causado por condiciones ambientales óptimas como a una acumulación en la zona frontal.

Las condiciones de alta biomasa fitoplanctónica en las zonas ocupadas por frentes costeros y del talud en el ASO se han descrito en varias ocasiones (Carreto *et al.*, 1986; Podestá & Esaias, 1988; Negri *et al.*, 1992; Carreto *et al.*, 1995; Gayoso & Podestá, 1996; Brown & Podestá, 1997) y resultan hoy claramente identificables mediante imágenes satelitales de color del mar, las cuales permiten derivar imágenes de índices de concentración de clorofila-*a* (Figura 4.2b). En el sector sur de la plataforma continental del ASO (entre 38° y 55° S) se observaron variaciones interanuales de clorofila-*a*; sin embargo las posiciones de los frentes identificados y los máximos de clorofila-*a* asociados son relativamente estables. Esta estabilidad es atribuida a una fuerte influencia de la topografía del fondo (Romero, 2008), debido a que rasgos topográficos importantes del fondo marino inducirían la circulación vertical y los flujos de nutrientes necesarios para sustentar el crecimiento del fitoplancton en la capa eufótica. En este sentido se ha observado que el nitrato es el nutriente limitante en esta región y se ha correlacionado negativamente con la concentración de clorofila-*a* (Papparazzo *et al.*, 2010).

En general, las zonas frontales resultan identificables mediante imágenes satelitales de TSM o color del mar (Bava, 2004; Romero, 2008). Las primeras dan cuenta de la manifestación térmica de la estructura frontal, mientras que las imágenes de color del

mar permiten inferir el aumento en la abundancia fitoplanctónica asociado al fenómeno oceanográfico. Los análisis de ambos tipos de imágenes permiten deducir que la visualización, en superficie, de zonas con alta productividad potencial, que corresponden a frentes oceanográficos de distintos tipos, es más evidente que la identificación de los frentes mediante el simple análisis visual de imágenes de TSM (Figura 4.2a). Las zonas de alta productividad aparecen en las imágenes de color del mar con una concentración de clorofila-*a* que resulta al menos un orden de magnitud mayor que las zonas adyacentes menos productivas (Figura 4.2b).



- 1- Litoral de la provincia de Santa Cruz.
- 2- Frente de mareas de Península Valdés.
- 3- El Rincón.
- 4- Frente marítimo del talud.

Figura 4.2: Imágenes de temperatura superficial del mar y concentración de clorofila-*a* del día 12 de febrero de 2001. Se señalan algunos de los principales frentes identificados en el ASO (Bava 2004) mediante imágenes de TSM y las áreas de máxima concentración de clorofila-*a* correspondientes a los frentes (Dogliotti, 2007; Romero, 2008).

La significativa habilidad para mapear y entender estos frentes ha sido uno de los primeros beneficios resultantes del uso de las imágenes satelitales (Longhurst, 1998). A estos efectos, se desarrollaron herramientas de procesamiento digital de imágenes que permiten resaltar el cambio de TSM en las zonas frontales (Simpson, 1990; 1994). Estas imágenes derivadas denominadas de “gradientes térmicos” proveen una perspectiva a gran escala que puede complementarse con estudios observacionales *in-situ* (Ullman & Cornillon, 1999).

La importancia socio-económica de los frentes del ASO se ve reflejada en la variedad de pesquerías industriales que explotan los recursos en estas regiones. En la zona norte de la plataforma continental argentina la anchoa de banco (*Pomatomus saltatrix*) es el recurso pesquero más importante del sector sur de la plataforma de Brasil, (Muelbert & Sinque, 1996), influenciada por las aguas de mezcla provenientes del Plata. En la zona sur de la plataforma continental argentina, se capturan varias especies de peces entre las cuales podemos citar a la anchoita (*Engraulis anchoita*, Sánchez & Ciechomski, 1995) y la merluza común (*Merluccius hubbsi*, Podestá, 1990; Bertolotti *et al.*, 1996), que constituyen la base de la industria pesquera argentina, destacándose tanto en el mercado externo como en el interno (Cousseau & Perrota, 2000).

Los resultados derivados del análisis espacio temporal de imágenes de TSM, clorofila-*a*, y mapas y perfiles verticales de las mismas variables y de concentración de nutrientes determinados *in-situ* (Capítulo 3) han permitido confirmar que el golfo San Matías presenta en primavera y verano dos áreas principales con características físicas y químicas diferentes (Carreto, 1974; Piola & Scasso, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004). Estas dos áreas se encuentran separadas por un frente térmico que ha sido identificado previamente mediante datos hidrográficos (Piola & Scasso, 1988) y satelitales de alta resolución espacial (Figura 4.3, Gagliardini & Rivas, 2004).

El objetivo principal de este capítulo fue determinar la posición e intensidad (variabilidad espacio-temporal) del frente del GSM mediante el

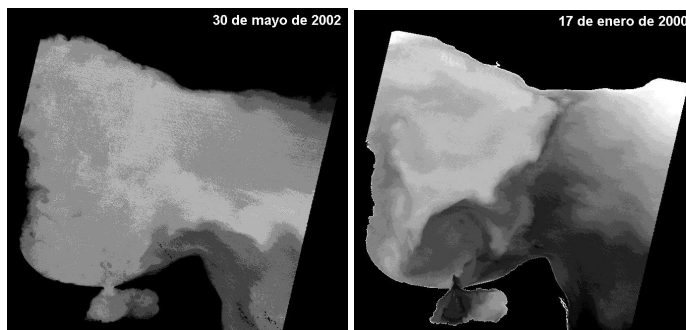


Figura 4.3: Imágenes de temperatura superficial de brillo del sensor ETM (canal 6.2) mostrando la distribución térmica en invierno (panel izquierdo) y en verano (panel derecho). Las tonalidades más oscuras indican menor temperatura de brillo (adaptado de Gagliardini & Rivas, 2004).

cálculo de gradientes térmicos y determinar en qué medida la distribución del fitoplancton en la capa superficial del GSM está relacionada con la formación del frente y características ambientales como la batimetría y la estructura vertical de la columna de agua.

4.2 Metodología

4.2.1 *Identificación de frentes en imágenes satelitales de TSM.* Existen diversas herramientas de procesamiento digital de imágenes que permiten resaltar el cambio de TSM en las zonas frontales. En general, la imagen original de TSM da lugar a una imagen derivada en donde se destacan las zonas de cambio más brusco de la TSM (los frentes) contra un “background” de la imagen caracterizado por las zonas marinas en donde la variable presenta un comportamiento más homogéneo a lo largo de grandes distancias.

La característica común de estas herramientas de procesamiento es que detectan “bordes” sobre la imagen de TSM. En el dominio de la imagen, los frentes de TSM representan bordes, o sea ubicaciones de píxeles en las cuales hay un cambio abrupto en la escala de grises o en la intensidad de una variable ambiental. En el dominio de la variable física que se quiere analizar, los mismos cambios abruptos corresponden al cambio de TSM de un lado al otro de la estructura frontal.

Los métodos de detección de frentes oceanográficos a partir de imágenes AVHRR de TSM varían en complejidad y prestaciones. Por complejidad debe entenderse básicamente el grado de dificultad que exige el diseño del algoritmo de detección, y los problemas asociados con su aplicación sobre una imagen de TSM de grandes dimensiones (varios cientos de kilómetros por ejemplo), relativos al tiempo de procesamiento y dimensiones de la imagen derivada. Las prestaciones refieren a la información que la aplicación del algoritmo brinda (Bava, 2004). Por ejemplo, ciertos algoritmos brindan solamente la posición del frente, mientras que otros pueden indicar además la magnitud del cambio de TSM registrado por unidad de superficie o gradiente (Simpson, 1990; 1994). Otros brindan incluso información sobre diversos parámetros físicos del frente, como temperatura media, ancho y diferencias de

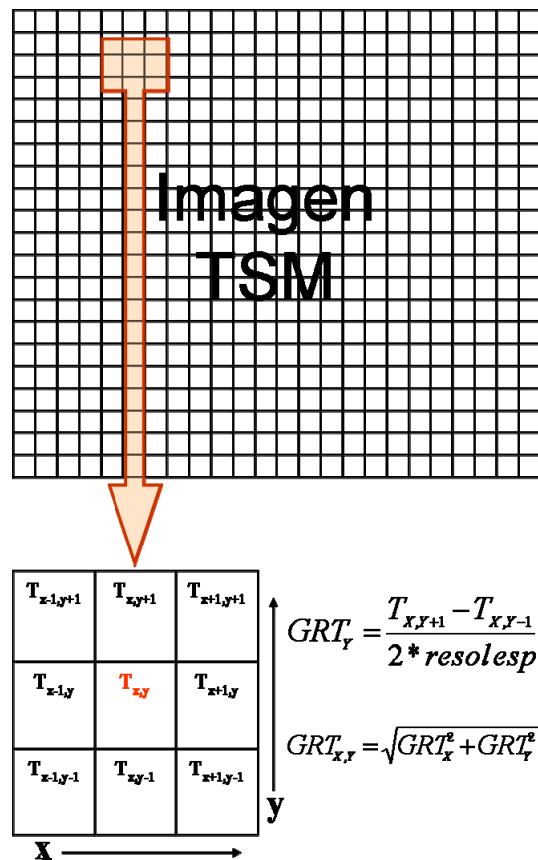


Figura 4.4: Cálculo del gradiente local de temperatura.

temperatura a ambos lados de la zona frontal (Shaw & Venell, 2000). Evidentemente, cuanto más complejo el algoritmo, mayor tiempo de procesamiento requerido para analizar una única imagen de TSM.

El método más utilizado para aplicaciones de detección de bordes en oceanografía satelital es el de la identificación del gradiente de temperatura, el cual puede ser computado usando operadores de gradiente, detectores de bordes y realzadores de bordes (Simpson, 1992; 1994). Los operadores de gradiente son utilizados cuando los valores reales de gradiente de temperatura son necesarios. Los detectores de borde se utilizan cuando sólo se necesita determinar la posición precisa de los límites frontales, mientras que los realzadores de bordes son utilizados para incrementar la relación entre las estructuras frontales a detectar y los valores “*background*” de la imagen, por ejemplo en el caso de frentes débiles que apenas resultan identificables en la imagen original.

El gradiente de temperatura bidimensional mide, para cada píxel de la imagen, un máximo local de la distribución de temperatura en la dirección de un borde. Todos los algoritmos para determinación de gradientes (GRT), aunque difieran en ciertos aspectos, utilizan funciones de vecindad, es decir, la comparación de los valores de TSM en una ventana de $N \times N$ píxeles para determinar el valor del GRT (Figura 4.4).

Dependiendo de la resolución de la imagen el método de gradiente suele producir ruido en el resultado. Por ese motivo se utilizan distintos operadores capaces de “suavizar” la imagen de gradiente y a su vez mantener los rasgos más importantes de la misma. Entre estos operadores se pueden mencionar el Sobel, el Prewitt, el Kirsch y el Roberts, llamados así en referencia a sus autores (Figura 4.5a). Los mismos calculan varias derivadas para un solo punto considerando los píxeles cercanos. La cantidad de derivadas que realizan depende del tamaño de las ventanas a utilizar. Estos métodos trabajan sobre lo que se denomina un nivel local o de vecindad, considerando un filtro o *kernel* de análisis de una cierta dimensión ($N \times N$ píxeles) centrado en cada píxel de la imagen. El filtro presenta generalmente un tamaño impar de modo de asegurar una aplicación simétrica del mismo sobre la imagen. Como debe obtenerse un valor de gradiente para cada píxel de la imagen, el filtro se aplica secuencialmente sobre toda la imagen. A su vez, como la utilización del filtro requiere considerar fracciones de la imagen que tengan sus mismas dimensiones, es necesario emplear tantas ventanas de la imagen como píxeles tenga la misma. Mediante este procedimiento, conocido como *convolución*, se obtiene una nueva imagen derivada a partir de la original de TSM, en

donde cada píxel presenta un valor de gradiente de temperatura en $^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ y en donde es posible destacar las estructuras frontales existentes en la imagen original.

La magnitud de un gradiente local se obtiene considerando dos filtros ortogonales (Figura 4.4). De modo general, un filtro permite aproximar el gradiente en sentido este-oeste (X) mientras que el restante lo hace en la dirección norte-sur (Y), obteniéndose así dos imágenes que aproximan el gradiente en cada dirección. El cambio de TSM promedio para cada píxel se obtiene dividiendo el valor resultante de la convolución por un factor de normalización (N), que básicamente tiene en cuenta el número de diferencias efectuadas en cada ventana de convolución (Figura 4.4).

En el caso de un operador Prewitt por ejemplo, se consideran tres diferencias para obtener el producto de convolución de cada píxel, por lo que el factor N resulta igual a 3 (Figura 4.5a). El gradiente de TSM para cada dirección resulta de dividir el valor normalizado por un factor espacial (Sp), que considera la distancia en píxeles sobre la cual se realiza la detección. Para un operador de 3x3, el factor espacial es dos veces la dimensión del píxel, mientras que para el operador Roberts, es $\sqrt{2}$ veces la dimensión del píxel. Para el sensor AVHRR la dimensión del píxel puede ser tomada como 1,1 km (LAC) o 4,4 km (GAC). Resta finalmente obtener el valor de gradiente adireccional para cada píxel, el cual viene dado por la combinación las componentes este-oeste y norte-sur,

$$GRT(x, y) = \sqrt{GRT_x^2 + GRT_y^2}$$

y que por motivos de eficiencia computacional generalmente se aproxima como:

$$GRT(x, y) \cong |GRT_x| + |GRT_y|$$

a) Prewitt N 3 Sp 2

Este-Oeste			Norte-Sur		
-1	0	-1	-1	-1	-1
-1	0	-1	0	0	0
-1	0	-1	-1	-1	-1

Isotrópico N $2\sqrt{2}$ Sp 2

Este-Oeste			Norte-Sur		
-1	0	-1	-1	$\sqrt{2}$	-1
$\sqrt{2}$	0	$\sqrt{2}$	0	0	0
-1	0	-1	-1	$\sqrt{2}$	-1

Roberts N 1 Sp $\sqrt{2}$

máscara 1		máscara 2	
0	1	1	0
-1	0	0	-1

Kirsch N 3 Sp 2

máscara 1			máscara 2		
-3	-3	5	5	5	5
-3	0	5	-3	0	-3
-3	-3	5	-3	-3	-3

Sobel 3x3 N 4 Sp 2

Este-Oeste			Norte-Sur		
-1	0	-1	-1	-2	-1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	-1	-1	2	-1

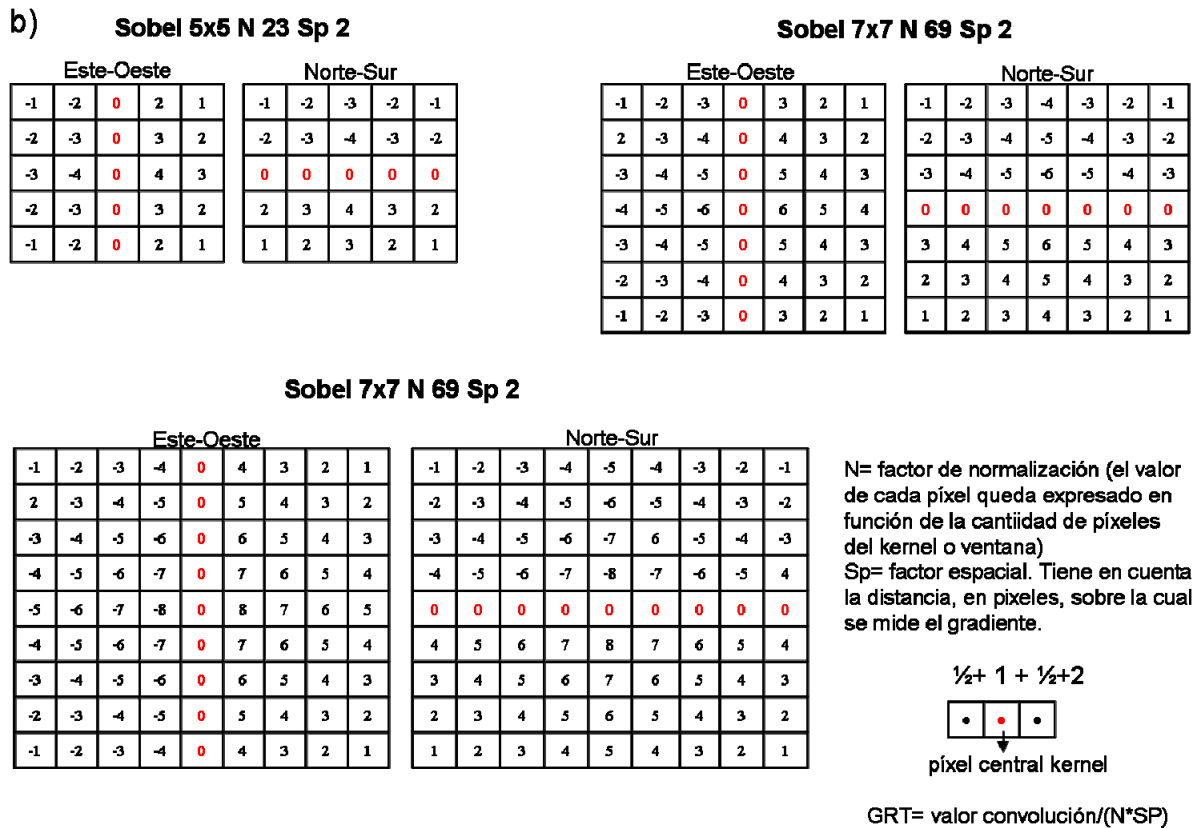


Figura 4.5: a) Operadores locales de gradientes más comunes para la obtención de valores de gradiente en imágenes digitales. b) Expansión a tamaños de ventanas mayores de análisis para el operador Sobel, el cual se considera en el presente trabajo para la obtención de gradientes de TSM.

En la literatura se mencionan diversos operadores de gradiente (Jain, 1989; Simpson 1990; 1994; Gonzáles & Woods, 1992), los cuales fueron analizados en detalle por Simpson (1990), para la detección de estructuras oceánicas mediante el uso de imágenes AVHRR de TSM.

La metodología desarrollada en el presente trabajo se basa en el uso del operador de gradiente denominado “Sobel” (Figura 4.5b) sobre imágenes TSM y es la misma utilizada en la determinación de los frentes del ASO en la serie temporal 1985-2005 del sensor AVHRR (Bava, 2004). Estos operadores de gradiente permiten obtener una aproximación al valor de gradiente de temperatura ($GRT = ^\circ C.km^{-1}$). Una de las utilidades potenciales de esta técnica es la asociación con variables biológicas en relación no sólo con la presencia, sino también con la magnitud de las estructuras frontales, por lo cual la utilización de este tipo de operadores se prefiere a los detectores de bordes.

Una vez obtenida la imagen de gradientes de TSM, se debe determinar cuáles píxeles corresponden a verdaderos frentes y cuáles a valores de gradientes ruidosos o “background”, resultantes del procesamiento mismo de la imagen AVHRR. El valor

límite o umbral para considerar un píxel como frontal surge a partir del análisis de frecuencias acumuladas de la imagen, de modo tal que el valor umbral de GRT corresponde a una frecuencia acumulada de entre 90 y 95% (Figura 4.6). En otras palabras, se consideran como píxeles borde o frontales solamente aquellos píxeles cuya distribución de frecuencias es menor al 10% del total de píxeles de la imagen. Estos píxeles representan los mayores valores de gradientes, los cuales corresponden a la “cola” del histograma de frecuencias.

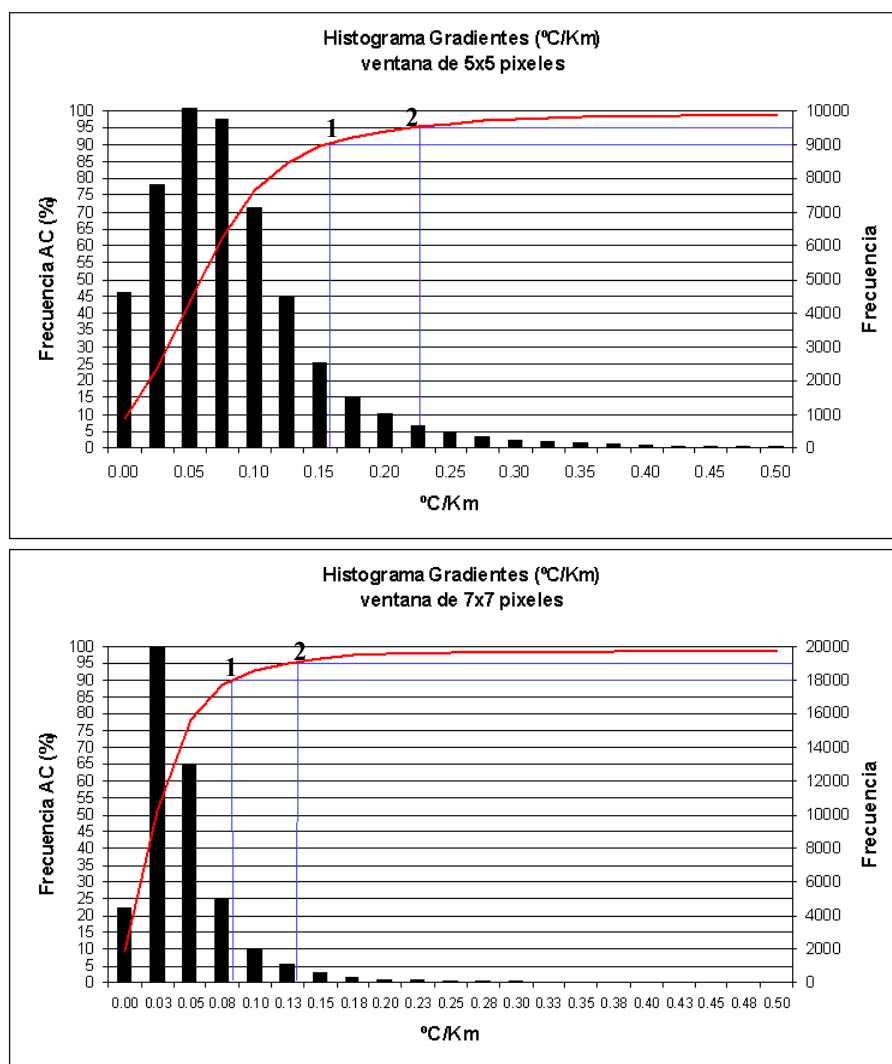


Figura 4.6: Histograma de frecuencias y frecuencias acumuladas para una imagen de gradientes de TSM, resultante de aplicar sobre una imagen AVHRR-LAC (fecha: 13 de febrero de 2006) dos filtros Sobel con un tamaño de ventana de 5x5 (a) y 7x7 (b) píxeles. Los criterios estadísticos para diferencias píxeles *background* se indican con los números 1 y 2 (ver explicación en el texto).

4.2.1.2 *Detección del frente térmico del golfo San Matías a partir del análisis de imágenes AVHRR de gradientes de TSM.* A fin de determinar los valores de los gradientes frontales en el área del GSM, se aplicaron dos operadores de gradiente Sobel que se diferenciaron en el tamaño de ventana (5x5 y 7x7 píxeles) sobre imágenes de

TSM correspondientes al día 13 de febrero de 2006, al promedio mensual de enero de 2002 y el promedio climatológico 2000-2008 (Figura 4.7).

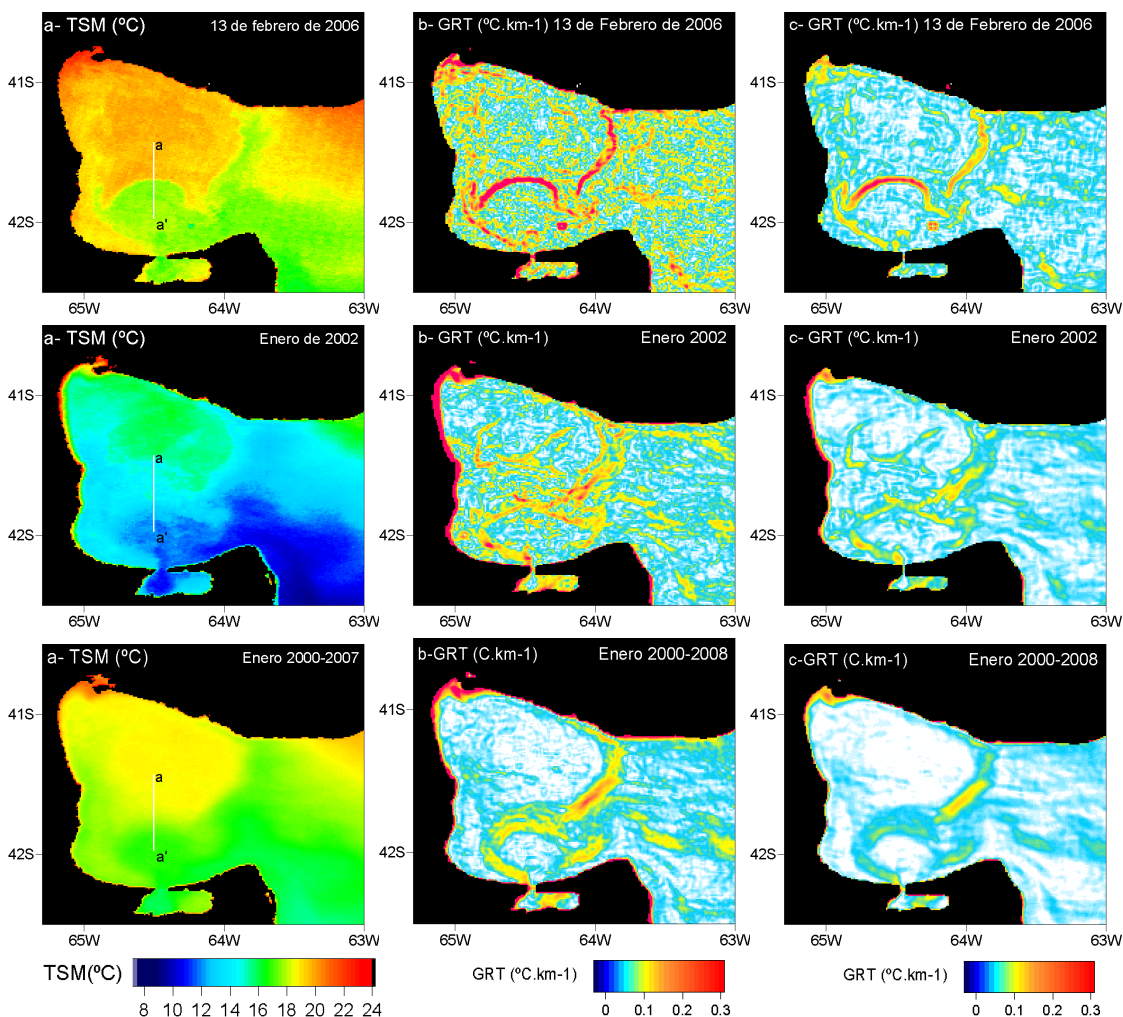


Figura 4.7: Imágenes de TSM indicando la transecta con orientación norte-sur a-a' (a) y mapas de gradiente (GRT) obtenidos a partir de ventanas Sobel de 5x5 (b) y 7x7 (c) píxeles para la imágenes del 13 de febrero de 2006, media de enero de 2002 y climatológico de enero de 2000-2007.

A cada una de las imágenes mencionadas se les efectuó un análisis de frecuencias acumuladas para determinar qué valores de gradientes son considerados frontales de acuerdo al tamaño de ventana utilizado (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Valores límite para considerar un píxel como “frontal”.

Imagen	Sobel 5x5	Sobel 7x7
13/02/2006	$GRT \geq 0,15-0,23$	$GRT \geq 0,10-0,13$
Media enero 2002	$GRT \geq 0,15-0,5$	$GRT \geq 0,10-0,23$
Media enero 2000-07	$GRT \geq 0,10-0,15$	$GRT \geq 0,05-0,08$

Al comparar los valores umbrales calculados por ambas ventanas, se observó que en todos los casos los valores calculados mediante la ventana de 5x5 son levemente mayores a los calculados por la venta de 7x7, es decir la ventana de 7x7 le asigna menores valores de gradiente a los píxeles frontales ya que considera un mayor número de píxeles y por lo tanto de distancias.

4.2.1.3 Relación entre la escala espacial, la magnitud del frente y el tamaño de la ventana de detección. Sobre cada una de las imágenes antes mencionadas se realizó una transecta a lo largo del meridiano 064° 32'W atravesando en sentido norte-sur las áreas con diferentes características térmicas del GSM (transecta a-a' en las figuras 4.7a de TSM) . La variación de los valores de TSM y GRT fue analizada a lo largo de dicha transecta (Figura 4.8) para cada una de las imágenes consideradas (imagen diaria, mensual y promedio mensual de 9 años). En las figuras se destacan en círculos negros las posiciones de las transectas que permitieron analizar ciertas diferencias y similitudes entre los distintos tamaños de ventana considerados. La posición A (Figura 4.8) corresponde al frente térmico característico del GSM que separa al Golfo en las zonas norte y sur como ya han mencionado diversos autores (Piola & Scasso, 1988; Gagliardini & Rivas, 2004) y permite verificar la exactitud de la localización del GRT a lo largo del frente. Sin importar el tamaño de la ventana considerado, el GRT máximo siempre corresponde al máximo cambio lineal de TSM entre dos píxeles consecutivos.

Las posiciones B (Figura 4.8) muestran que el tamaño de ventana de 5x5 permite detectar gradientes débiles, que corresponden a cambios lineales del orden de $0,12\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ en las imágenes LAC, mientras que las ventanas de 7x7 no detectan estas diferencias.

Diferencias ocasionales menores a $0,10^{\circ}\text{C}$ entre píxeles adyacentes, debidas al procesamiento y ruido intrínseco de las imágenes AVHRR, pueden ser detectadas como píxeles frontales por los operadores si se consideran ventanas de menor tamaño. La utilización de mayores tamaños de ventanas suaviza estas diferencias puntuales, ya que toma en cuenta un entorno más amplio en donde existen temperaturas relativamente homogéneas.

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

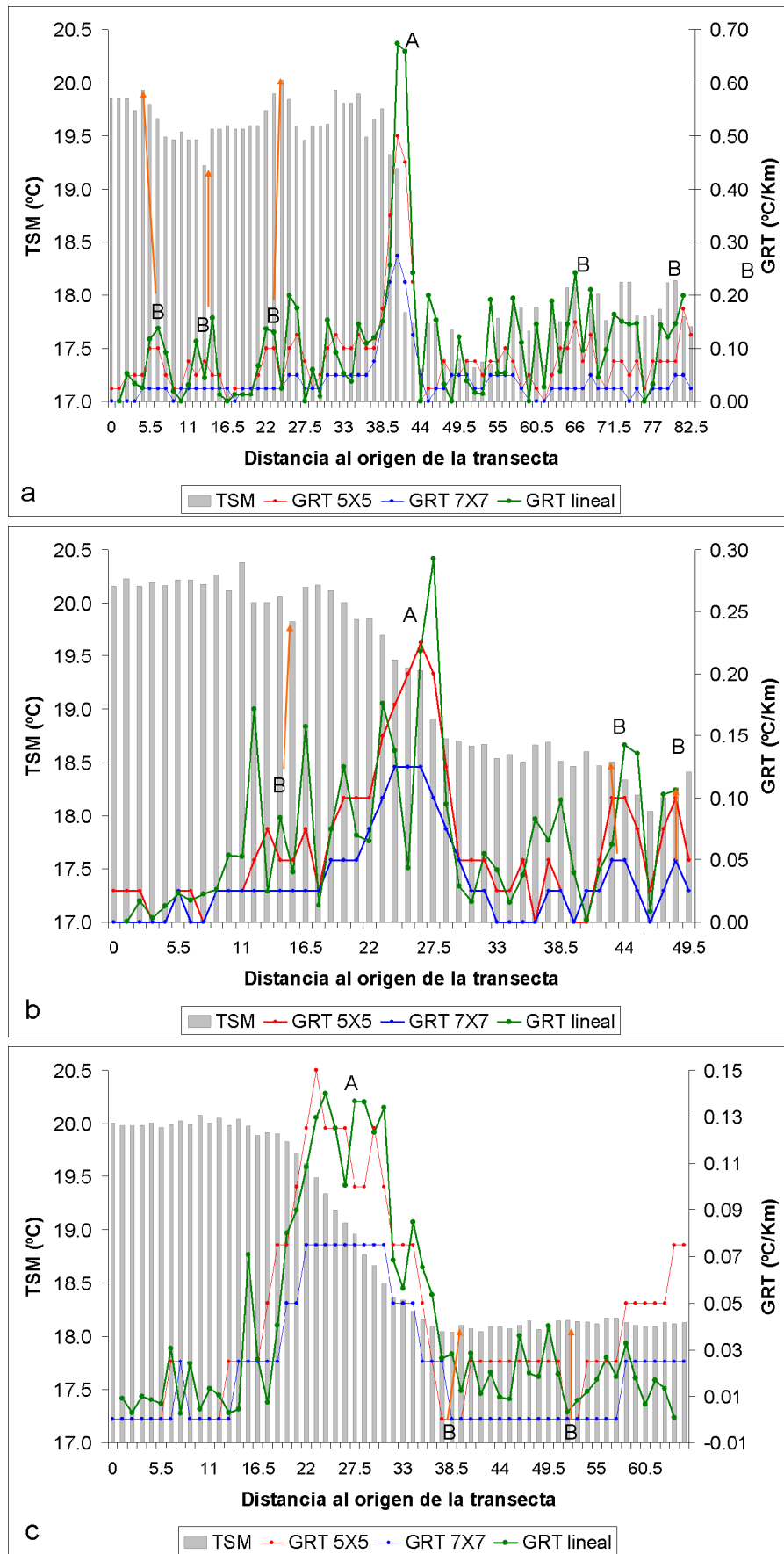


Figura 4.8: Transectas sobre imágenes: (a) 13 de febrero de 2006 , (b) media de enero 2002 y (c) promedio climatológico de enero 2000-2008 (c).

El cálculo del gradiente lineal considerando la dirección en “y” (explicado en la figura 4.4) y la aplicación del operador Sobel en los dos tamaños de ventana considerados en la zona donde se ubicó el frente del GSM (Figura 4.8) permitió obtener los siguientes parámetros:

Distancia efectiva de detección del frente: se midió sobre la imagen de TSM en función del número de píxeles a lo largo de la transecta definida anteriormente. En las imágenes de gradientes ese valor correspondió a la cantidad de píxeles con valores de GRT superiores al umbral mínimo del 90% de los datos acumulados.

Variación de TSM: correspondió a la diferencia de temperatura entre los píxeles extremos de la distancia efectiva.

Gradiente máximo: representó el mayor valor de GRT registrado a lo largo de la distancia efectiva,

Gradiente promedio: correspondió a la media de todos los valores de GRT presentes en la distancia efectiva.

Los valores obtenidos para los distintos parámetros indican que ambos operadores dan resultados similares (Tabla 4.2). Los dos tamaños de ventana subestiman el valor de GRT lineal máximo y medio en el frente, la ventana de 5x5 mostró valores cercanos a los medidos linealmente a partir de las imágenes de TSM del 13 de febrero de 2006 y el promedio climatológico de enero 2000-2008. En el caso del promedio mensual de enero de 2002, el valor de gradiente medio del operador Sobel de 7x7 fue similar al obtenido en forma lineal. Debe considerarse que los parámetros medidos de las imágenes de TSM sólo representan la situación frontal de modo lineal, a lo largo de la transecta, mientras que los valores de GRT reflejan la distribución espacial de la TSM para una superficie de N x N píxeles.

En el área del GSM se eligió el operador Sobel de 5x5 píxeles, ya que el valor de gradiente máximo obtenido para los tres tipos de imágenes analizados se acerca al calculado en forma lineal. Este tamaño de ventana implica un análisis espacial de vecindad para cada píxel de aproximadamente 5,5 x 5,5 kilómetros. Por estos motivos, las imágenes mensuales de gradientes térmicos por año (2000-2008 sección 3.1), fueron obtenidas aplicando el operador Sobel mencionado.

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

Tabla 4.2: Imagen del 13 de febrero de 2006 Promedio mensual (enero de 2002), promedio climatológico

Imagen utilizada	13/02/06			enero 2002			enero 2000/08		
	Lineal	Sobel 5x5	Sobel 7x7	Lineal	Sobel 5x5	Sobel 7x7	Lineal	Sobel 5x5	Sobel 7x7
Distancia efectiva (píxeles)	8	5	5	9	5	5	21	10	14
Variación de TSM (°C)	2,06	2,01	2,01	1,19	0,78	0,78	1,81	1,23	1,58
Gradiente Máximo(°C/Km)	0,67	0,50	0,28	0,29	0,23	0,13	0,14	0,15	0,07
Gradiente Medio(°C/Km)	0,29	0,34	0,20	0,12	0,19	0,12	0,08	0,12	0,07

Las imágenes de gradientes mensuales de cada año se utilizaron para obtener imágenes de gradientes representativos de las condiciones frontales presentes en cada mes durante los nueve años analizados (2000-2008). Cada imagen mensual climatológica de gradientes se obtuvo promediando las nueve imágenes disponibles para el mismo mes en el período 2000-2008. Los mapas de frentes mensuales climatológicos correspondientes al período 2000-2008 se obtuvieron finalmente al aplicar un criterio de corte que permitiera diferenciar los valores de gradiente correspondientes a frentes oceanográficos de aquellos valores de fondo (*background*), que indican la variabilidad natural del campo de TSM de píxel a píxel.

De acuerdo con lo indicado en la sección 4.2.1.2, la discriminación entre píxeles frontales y píxeles de fondo (*background*) se realizó a partir de la distribución de frecuencias de la imagen. Se consideraron como píxeles frontales aquellos con una distribución de frecuencias menores o iguales al 10% del total de píxeles de la imagen (Figura 4.5); este porcentaje correspondió a un valor aproximado de $0,1^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ para las 12 imágenes de frentes mensuales 2000-2008 generadas.

La periodicidad en la ocurrencia del frente a lo largo de los años se evaluó considerando tanto las imágenes mensuales de gradientes para cada año, como las imágenes de gradientes medios climatológicos para cada mes a lo largo de los nueve años. Las primeras permitieron definir las zonas frontales para cada mes y año; mientras que las segundas indicaron, a partir de la magnitud del gradiente medio mensual, qué píxeles dentro de cada zona resultaron píxeles frontales estables durante el mismo mes en todos los años. Esto último permite inferir la posición geográfica media de la zona frontal para todo el período.

Con el objetivo de obtener claramente el patrón del frente en los mapas se representaron únicamente los valores mayores a $0,1 \text{ } ^\circ\text{C.Km}^{-1}$, de este modo se ignoró el “ruido” en la distribución de los gradientes de TSM.

4.2.2 Variación espacial de la concentración de clorofila satelital (Cla-sat) en el frente térmico. Se calcularon mapas de promedios estacionales climatológicos de TSM, GRT (AVHRR) y Cla-sat (SeaWiFS) para el período 2000-2006. Las estaciones del año fueron definidas de la siguiente manera: verano: enero a marzo, otoño: abril a junio, invierno: julio a setiembre y primavera: octubre a diciembre. Sobre los mapas de promedios estacionales se delinearon dos transectas sobre las cuales se extrajeron los valores de TSM, GRT, Cla-sat y datos de profundidad extraídos de la carta H214 (SHN, 1999). La posición, extensión y orientación de las transectas estuvo determinada por la posición del frente térmico en verano, de modo de extraer información de las variables mencionadas a ambos lados y en la zona de mayor gradiente térmico. Las transectas tuvieron orientación norte-sur sobre el meridiano $064^\circ 25' \text{W}$ (transecta A) y orientación oeste-este sobre el paralelo $41^\circ 36' \text{S}$ (transecta B).

4.2.3 Perfiles verticales de datos in-situ. Se seleccionaron nueve perfiles verticales de temperatura, concentración de nitrato-nitrito y clorofila-*a* para ilustrar la estructura vertical de las mismas en un ciclo anual. Los perfiles fueron calculados mediante datos históricos y de campañas realizadas durante el período de toma de datos de la presente tesis doctoral. Los datos históricos corresponden a las campañas realizadas en el B/O “El Austral” en mayo de 1991, noviembre 1992 y marzo 1994; los datos actuales correspondieron a las campañas realizadas en junio 2007 y 2008, octubre 2007, febrero 2008, noviembre 2008 y 2009. Los datos de nutrientes y clorofila-*a* de todas las campañas consideradas fueron obtenidos en el Laboratorio de Oceanografía y Contaminación de aguas del CENPAT, mediante las mismas metodologías analíticas descritas previamente (Capítulo 2). En el caso de temperatura, los datos históricos fueron registrados mediante termómetros de inversión Kahlsico, adosados a botellas Nansen, mientras que los datos recientes fueron obtenidos mediante sondas multiparamétricas YSI (Capítulo 2).

Los perfiles fueron construidos a partir de estaciones ubicadas a lo largo de una transecta con orientación noroeste-sudeste mediante el método de interpolación de

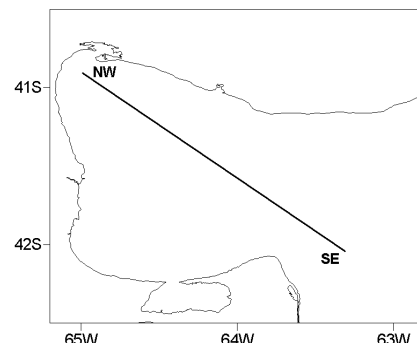


Figura 4.9. Ubicación de los perfiles verticales con orientación NW-SE.

krigging. La posición de los perfiles (Figura 4.9) fue aproximadamente la misma para cada campaña. El objetivo fue obtener perfiles verticales que abarcaran información de la misma región para todas las campañas con el fin de mostrar en forma relativa, la distribución vertical de los parámetros considerados en relación a la ubicación superficial del frente térmico.

4.3 Resultados

4.3.1 Frentes térmicos mensuales medios para el período 2000-2008. Los mapas de gradientes térmicos mensuales correspondientes al período 2000-2008 indicaron en forma general la estructura, extensión, variabilidad e intensidad del frente del golfo San Matías (Figura 4.10). El frente mostró mayor extensión en los meses de diciembre a febrero, alcanzando la máxima intensidad ($\sim 0,3 \text{ }^\circ\text{C.Km}^{-1}$) en el mes de enero en la zona centro de la boca. Los gradientes frontales se alinearon en sentido nordeste-sudoeste en los meses de diciembre a febrero (Figura 4.10). El frente comenzó a manifestarse en el mes de noviembre, en el cual se observó la presencia de gradientes frontales en la zona centro de la boca del Golfo. En el mes de diciembre, los gradientes frontales se extendieron hacia la zona norte de la boca y hacia el oeste para luego (enero) manifestarse hacia el sur (cerca de la boca del GSJ). En esta zona los gradientes formaron una media circunferencia con el lado convexo orientado hacia la costa oeste, este ordenamiento fue claro en el mes de enero (con magnitudes que no superaron los $0,1 \text{ }^\circ\text{C.Km}^{-1}$), mientras que en la zona centro de la boca se observaron gradientes que alcanzaron los máximos valores registrados en el ciclo anual medio ($\sim 0,3 \text{ }^\circ\text{C.Km}^{-1}$). Hacia el mes de febrero la intensidad de los gradientes disminuyó y la estructura superficial observada comenzó a desvanecerse.

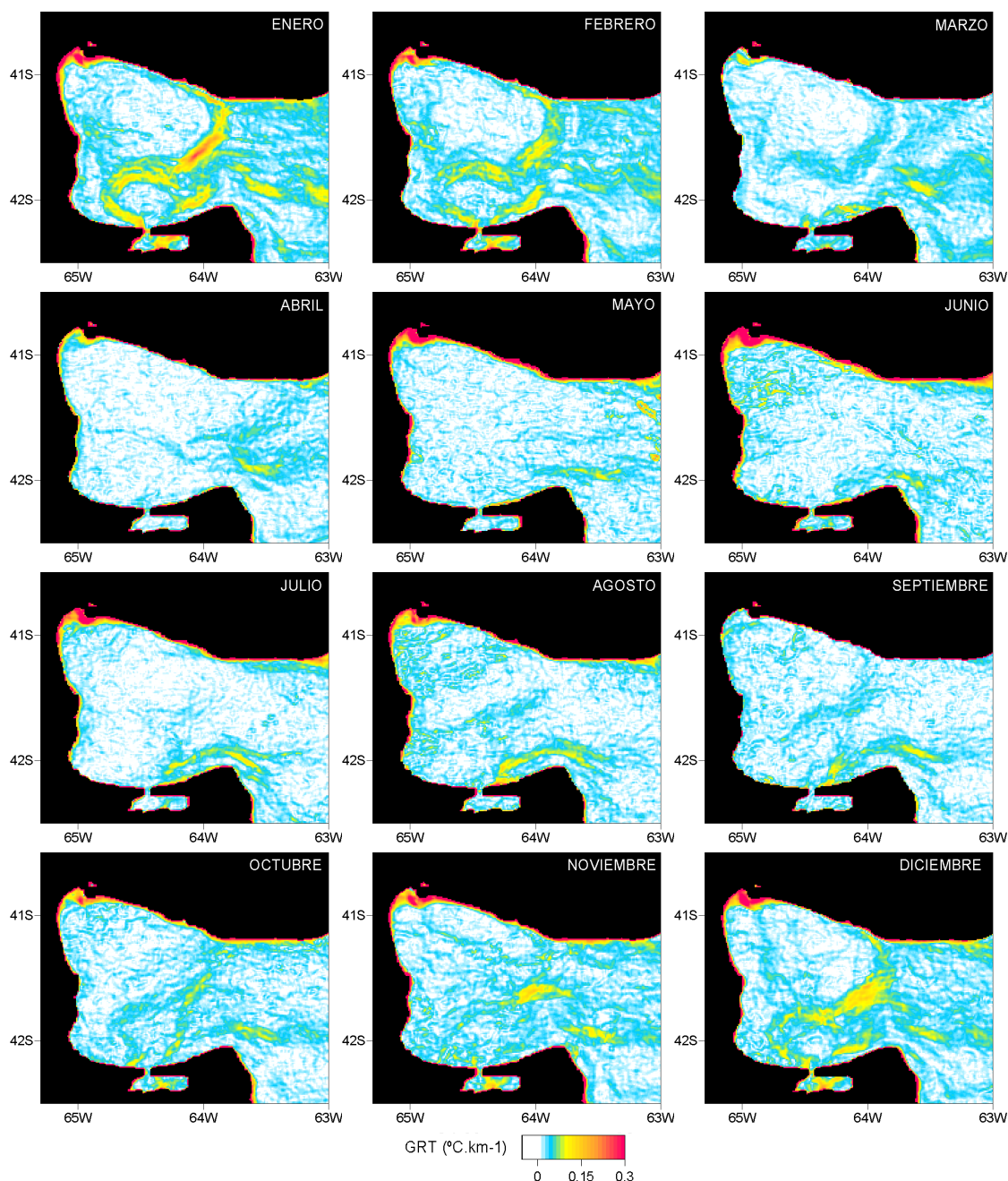


Figura 4.10: Promedios mensuales climatológicos (2000-2008) de gradientes térmicos (GRT, $^{\circ}\text{C.km}^{-1}$). Los $\text{GRT} > 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ son considerados frontales.

En los meses de invierno (junio a setiembre) se detectaron gradientes de $0,1-0,15^{\circ}\text{C.Km}^{-1}$ en la zona sudeste del GSM alrededor de la costa norte de Península Valdés; estos gradientes están asociados a la diferencia de temperatura que existe entre las aguas internas relativamente más cálidas del GSM y las aguas que ingresan desde la plataforma continental de menor temperatura. La evolución del número de píxeles frontales por mes (se excluyeron del análisis las zonas adyacentes a la costa norte y oeste y el golfo San José) mostró que los píxeles cuyos gradientes se encontraron entre

0,1 y 0,2 °C.Km⁻¹ fueron dominantes entre noviembre y febrero, alcanzando su máxima presencia en enero (Figura 4.11).

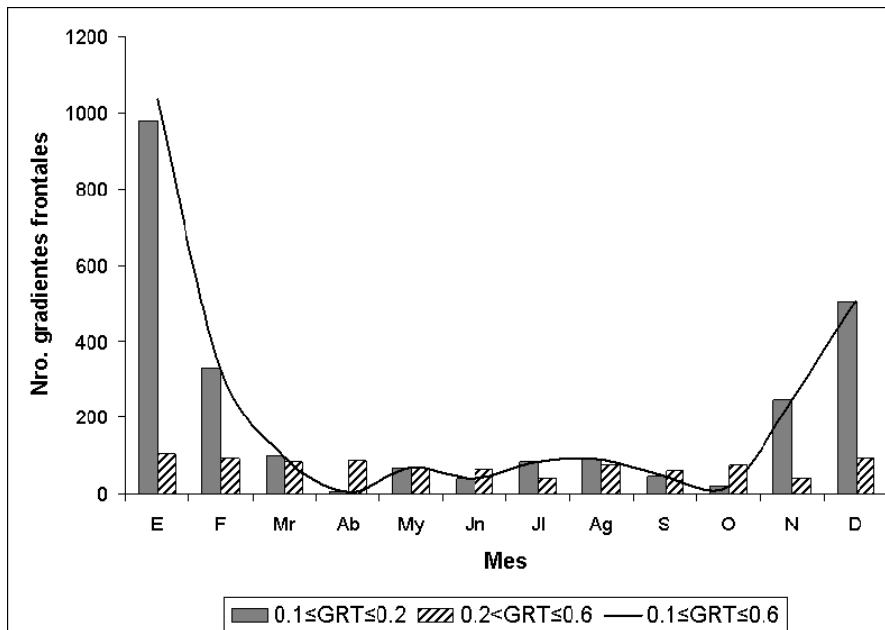


Figura 4.11: Evolución anual de los gradientes frontales (se consideraron gradientes frontales los mayores a 0,1°C.Km⁻¹).

4.3.2 Variabilidad interanual de la presencia y magnitud de gradientes térmicos “frontales”. La localización y magnitud de los pixeles frontales ($GRT \geq 0,1 \text{ } ^\circ\text{C.Km}^{-1}$) para las temporadas 2000-2001 a 2007-2008 se presenta en las figuras 4.12 a 4.19. En general se observó que los pixeles frontales con valores mayores a 0,1 °C.Km⁻¹ comenzaron a detectarse en el mes de noviembre; hacia el mes de diciembre, los pixeles con estos valores comenzaron a alinearse desde el nordeste del Golfo hacia el sudoeste. En enero de 2001 y 2004 se observó claramente esta formación. En general, los máximos valores de gradientes (Tabla 4.2) se detectaron en los meses de enero y febrero (0,3-0,5 °C.Km⁻¹) a excepción de enero de 2005 en donde el máximo valor de gradiente fue de 0,2 °C.Km⁻¹. En 2004 el frente estuvo claramente desarrollado en el mes de noviembre y hasta marzo de 2005 (Figura 4.15). El frente mostró menor definición y persistencia temporal en los meses de enero a febrero de 2007 (Figura 4.18).

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

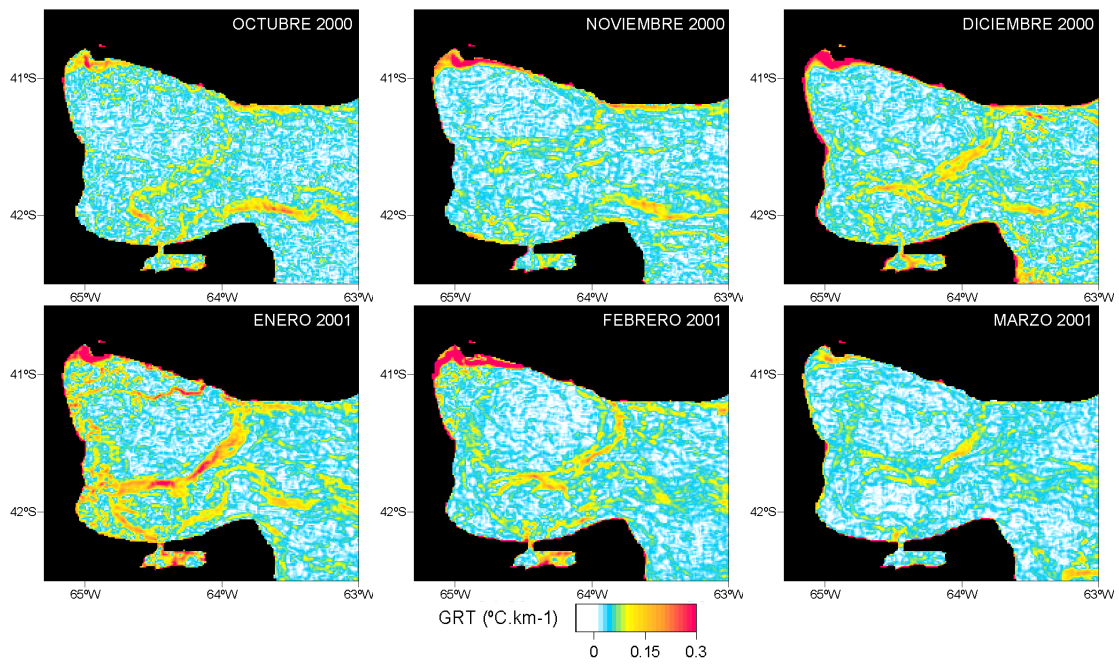


Figura 4.12: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2000-2001.

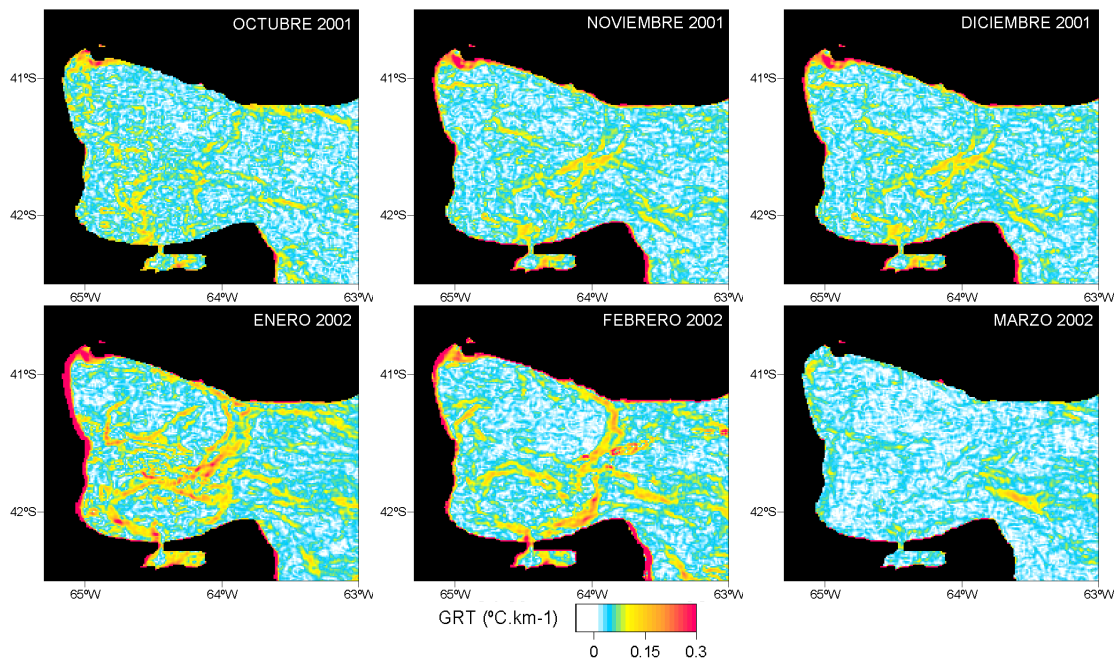
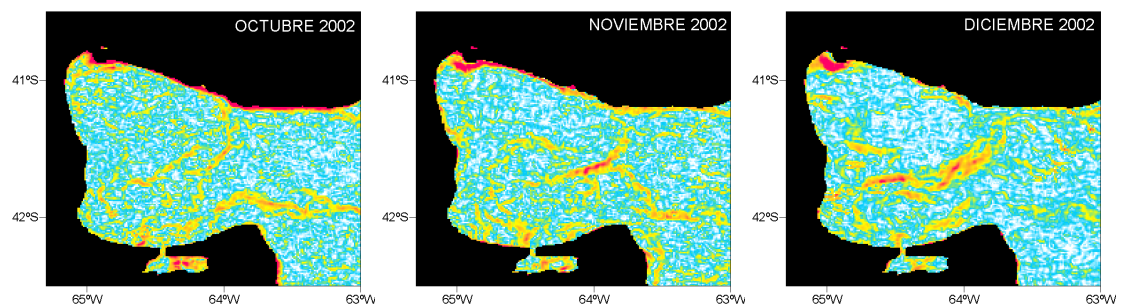


Figura 4.13: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2001-2002.



CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

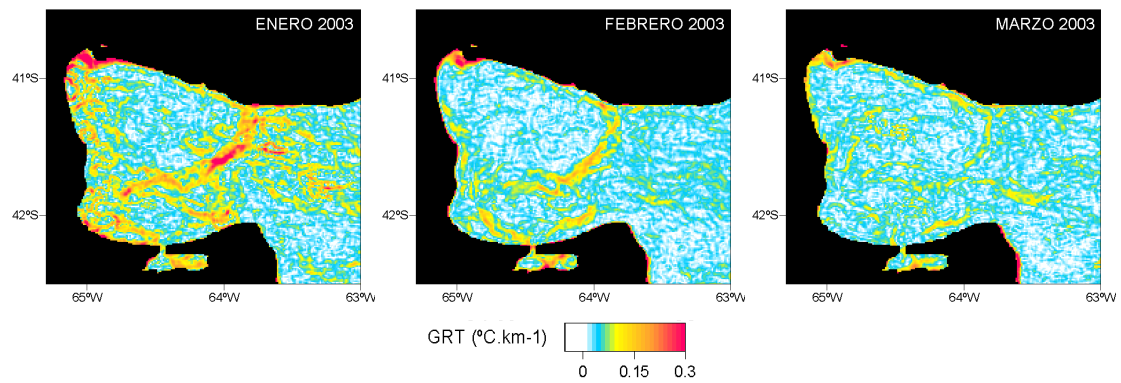


Figura 4.14: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2002-2003.

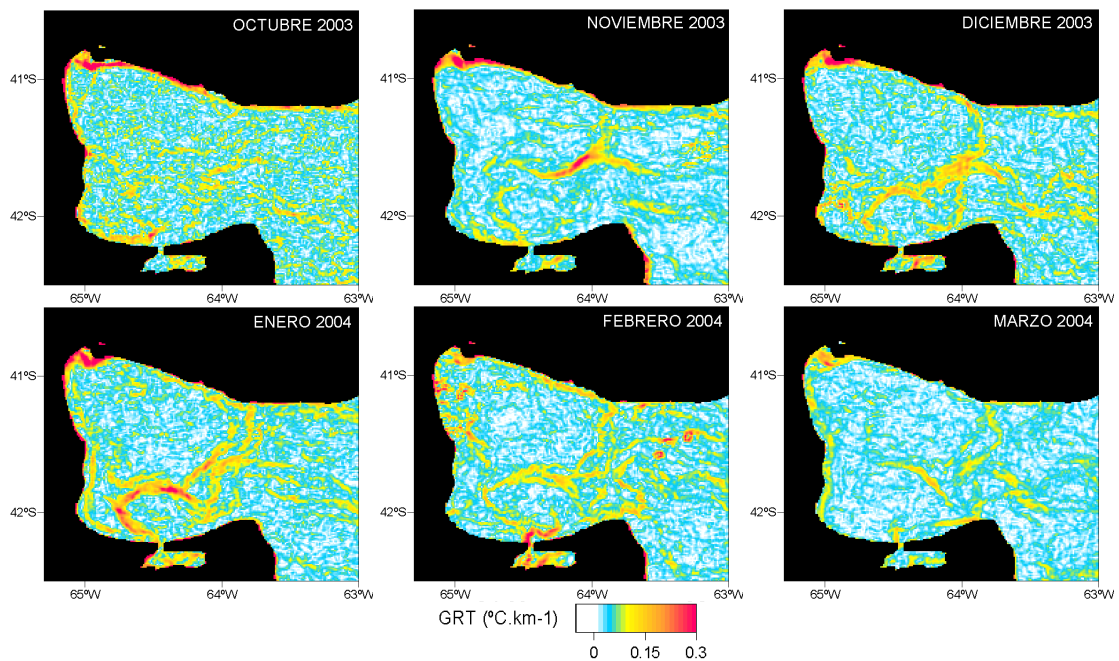
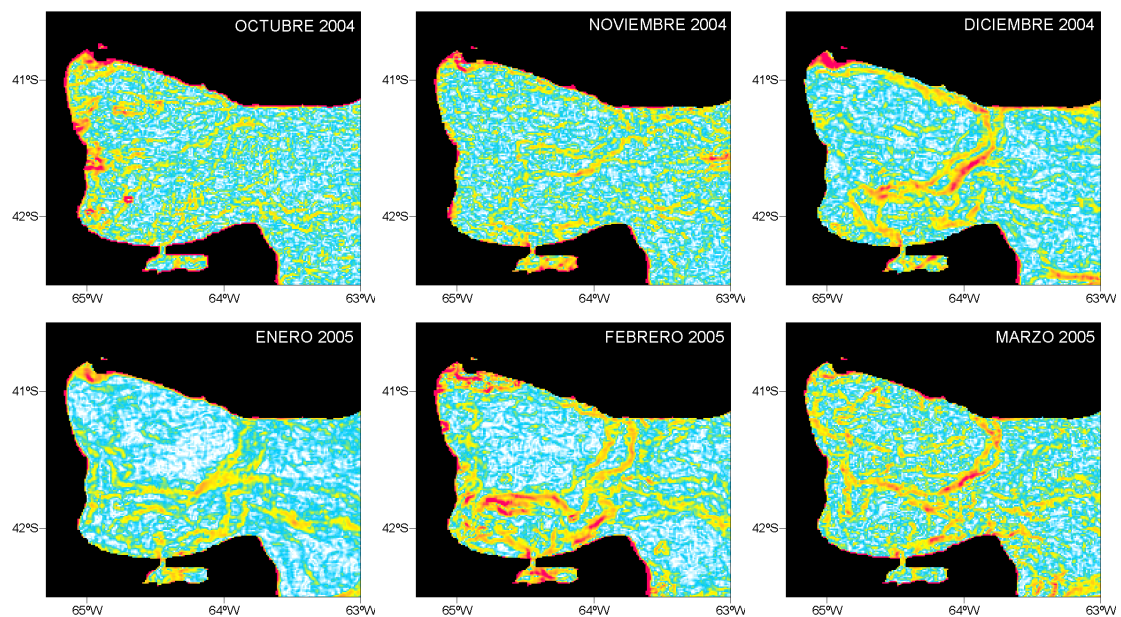


Figura 4.15: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2003-2004.



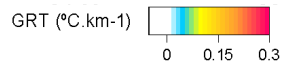


Figura 4.16: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2004-2005.

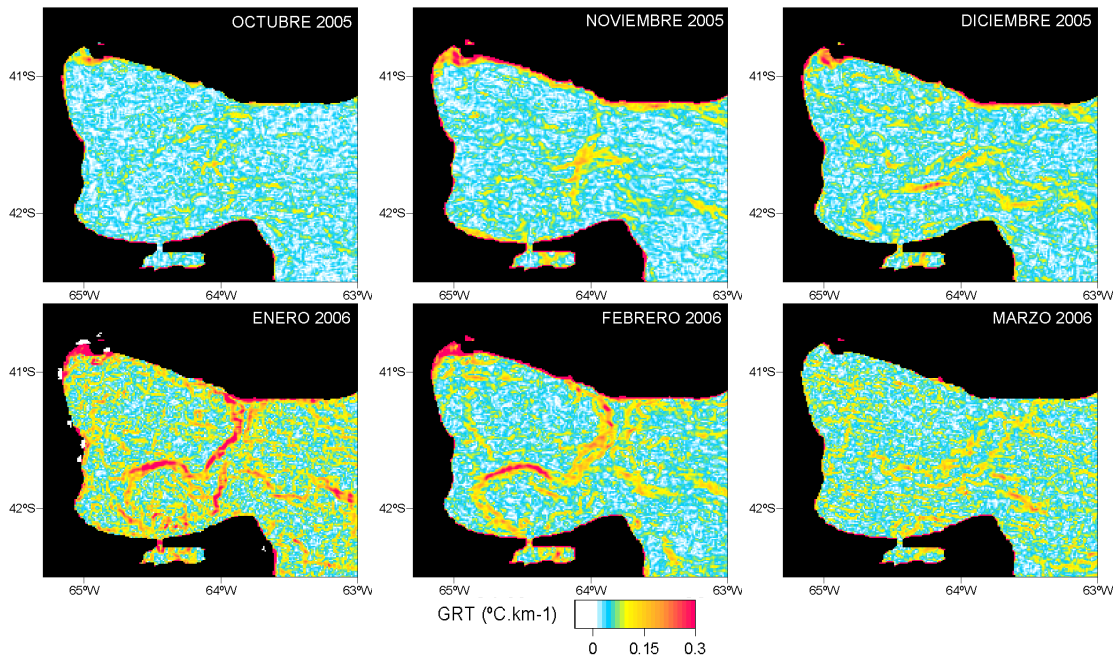


Figura 4.17: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2005-2006.

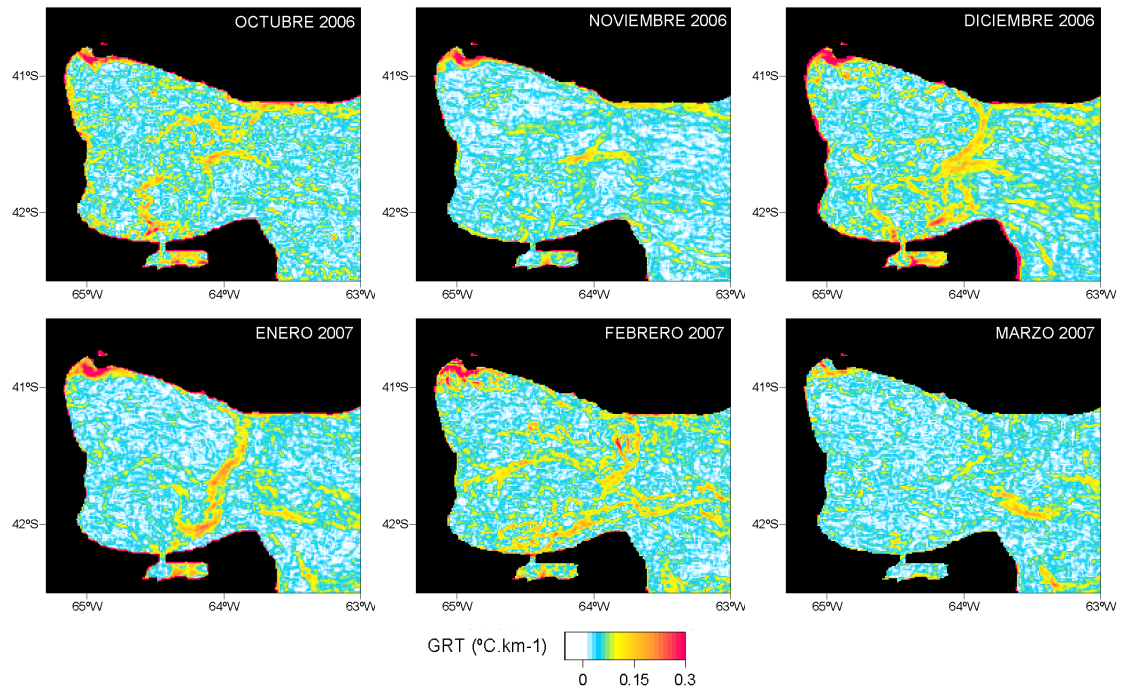


Figura 4.18: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2006-2007.

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

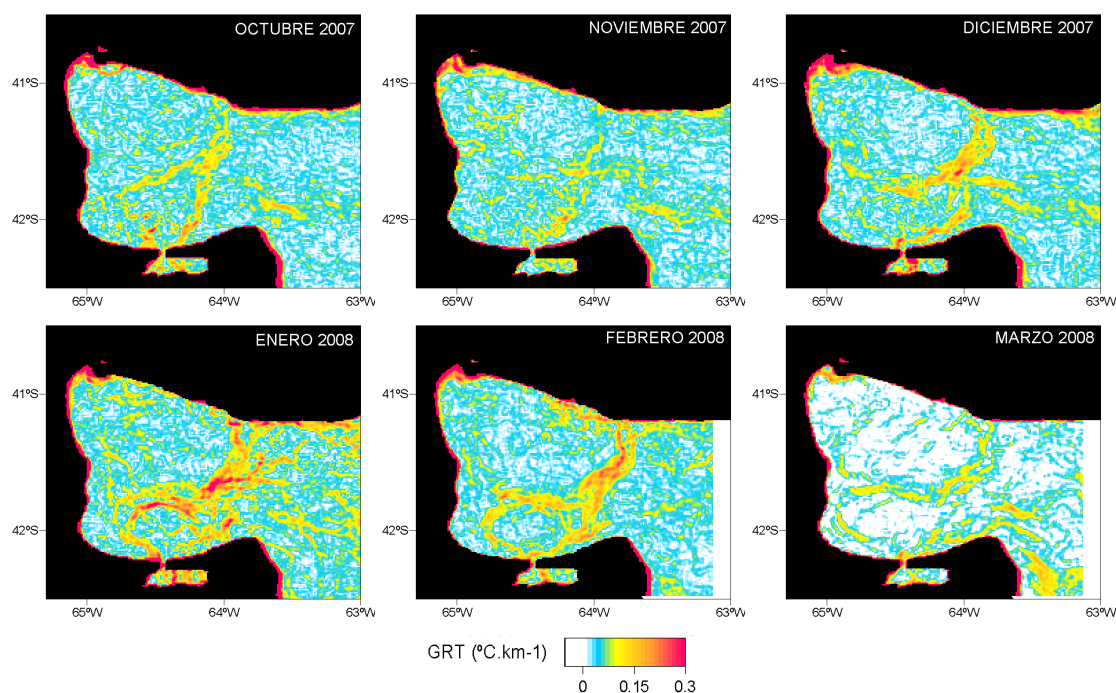


Figura 4.19: Gradientes medios mensuales correspondientes a los meses de octubre a marzo para la temporada 2007-2008.

Tabla 4.2: Parámetros estadísticos (Media; DS: desvío estándar; Max: valor máximo; M: moda) de las imágenes de gradientes térmicos ($^{\circ}\text{C.Km}^{-1}$) para los meses de octubre (O), noviembre (N), diciembre (D), enero (E), febrero (F) y marzo (Mr) en las temporadas analizadas.

Mes→ Temporada	Octubre					Noviembre					Diciembre				
	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2
2000-2001	0,13	0,03	0,27	0,10	0,21	0,12	0,03	0,23	0,10	0,20	0,13	0,04	0,28	0,10	0,26
2001-2002	0,12	0,03	0,19	0,10	0,00	0,12	0,03	0,18	0,10	0,00	0,13	0,04	0,29	0,10	0,26
2002-2003	0,13	0,05	0,24	0,10	0,20	0,13	0,05	0,32	0,10	0,26	0,14	0,04	0,35	0,10	0,26
2003-2004	0,12	0,04	0,31	0,10	0,26	0,14	0,03	0,36	0,10	0,26	0,13	0,04	0,29	0,10	0,21
2004-2005	0,13	0,06	0,55	0,11	0,26	0,12	0,04	0,36	0,10	0,26	0,14	0,05	0,35	0,26	0,26
2005-2006	0,12	0,02	0,19	0,10	0,00	0,12	0,04	0,21	0,11	0,20	0,12	0,03	0,29	0,10	0,26
2006-2007	0,13	0,05	0,33	0,10	0,26	0,12	0,02	0,20	0,10	0,00	0,13	0,05	0,29	0,10	0,26
2007-2008	0,13	0,05	0,31	0,10	0,26	0,12	0,05	0,25	0,10	0,20	0,14	0,06	0,30	0,10	0,26

Mes→ Temporada	Enero					Febrero					Marzo				
	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2	Media*	DS	Max	M> 0,1	M> 0,2
2000-2001	0,15	0,06	0,33	0,26	0,26	0,13	0,05	0,25	0,10	0,20	0,12	0,02	0,20	0,10	0,00
2001-2002	0,14	0,05	0,37	0,10	0,26	0,14	0,05	0,34	0,10	0,26	0,13	0,02	0,20	0,10	0,00
2002-2003	0,15	0,06	0,41	0,26	0,26	0,13	0,03	0,22	0,10	0,20	0,12	0,02	0,20	0,10	0,00
2003-2004	0,14	0,05	0,34	0,10	0,26	0,14	0,05	0,39	0,10	0,26	0,12	0,02	0,18	0,10	0,00
2004-2005	0,12	0,03	0,22	0,10	0,20	0,15	0,06	0,46	0,26	0,26	0,14	0,06	0,34	0,10	0,26
2005-2006	0,15	0,08	0,50	0,26	0,26	0,14	0,06	0,41	0,26	0,26	0,13	0,05	0,26	0,10	0,21
2006-2007	0,14	0,05	0,25	0,10	0,20	0,13	0,04	0,40	0,10	0,26	0,12	0,02	0,21	0,10	0,20
2007-2008	0,15	0,07	0,42	0,26	0,26	0,14	0,05	0,29	0,10	0,26	0,12	0,04	0,24	0,10	0,21

*Media calculada para $GRT \geq 0,1$

M > 0,1 Moda calculada sobre $GRT \geq 0,1$

M > 0,2 Moda calculada sobre $GRT \geq 0,2$

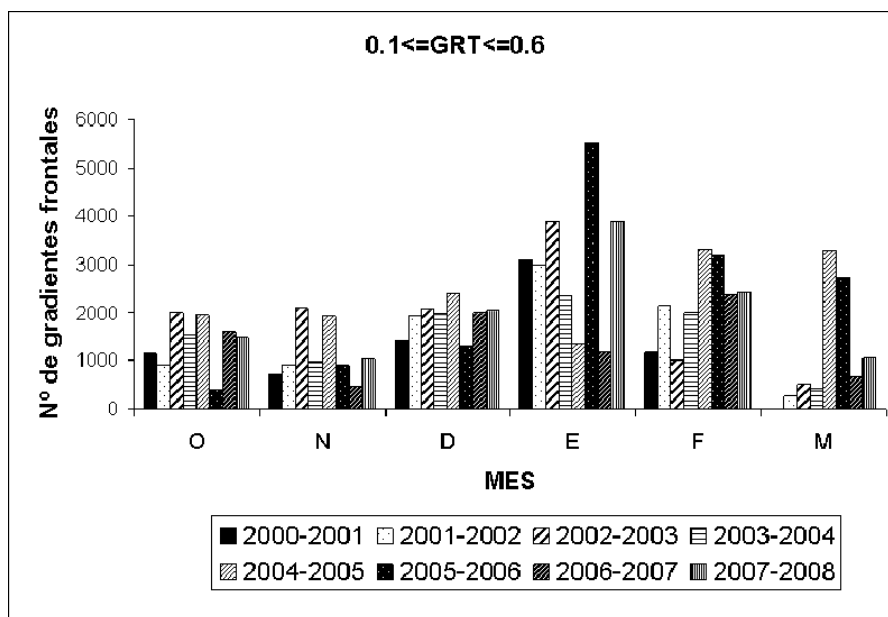


Figura 4.20: Nº de gradientes frontales por mes y año ($0,1 \leq GRT \leq 0,6 \text{ } ^\circ\text{C.Km}^{-1}$).

En general se observó que el mes de enero fue el que presentó la mayor cantidad de gradientes frontales, a excepción de los años 2005 y 2007 (Figura 4.20). Los mapas de gradientes térmicos (Figuras 4.12 a 4.19), los estadísticos calculados (Tabla 4.2) y la evolución temporal del número de gradientes frontales (Figuras 4.20 y 4.21) mostraron que en los meses de enero de las temporadas 2005-2006, 2007-2008, 2002-2003 y 2000-2001 los gradientes más frecuentes alcanzaron $0,26^\circ\text{C.km}^{-1}$, las máximas intensidades ($GRT > 0,3 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$) y mayor número de gradientes frontales. Del mismo modo se pudo determinar que en los meses de enero de las temporadas 2004-2005 y 2006-2007 los gradientes más frecuentes no superaron el valor de $0,1 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$, las máximas intensidades alcanzaron los $0,22\text{-}0,25 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$ y se registró un menor número de pixeles frontales.

4.3.3 Variabilidad espacial y estacional de la concentración de Chla-sat en relación a la presencia del frente térmico del GSM y la topografía del fondo. Las imágenes climatológicas estacionales (Figuras 4.21 a 4.24), en correspondencia con los resultados analizados previamente (sección 3.1), mostraron que en primavera y verano el GSM se caracterizó por presentar dos masas de agua con características diferentes delimitadas por un frente térmico cuya definición e intensidad fue máxima en verano (Figura 4.22b). En otoño e invierno la distribución superficial de TSM y Cla-sat fue relativamente uniforme en el interior del Golfo (Figuras 4.23 y 4.24). En invierno se observó la

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

influencia de aguas relativamente más frías que ingresan por el sur desde la plataforma continental, con lo cual se observaron gradientes frontales del orden de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ al norte de Península Valdés (Figura 4.24b). La concentración de *Chl-a*-sat fue relativamente menor en el interior del Golfo en otoño e invierno con respecto a la zona de la boca y externa (Figuras 4.23c y 4.24c). En primavera y verano se observó que la zona sur presentó mayor concentración que el área noroeste y oeste del Golfo (Figura 4.22c y 4.23c).

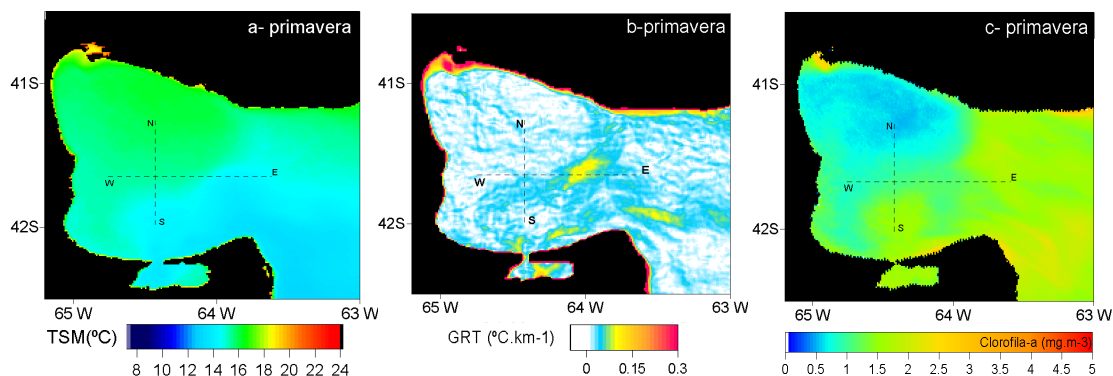


Figura 4.21: Mapas estacionales de TSM (a), GRT (b) y *Chl-a*-sat (c) en primavera, * TSM y GRT corresponden a la media de los años 2000-2008, *Chl-a*-sat corresponde al promedio 2000-2006.

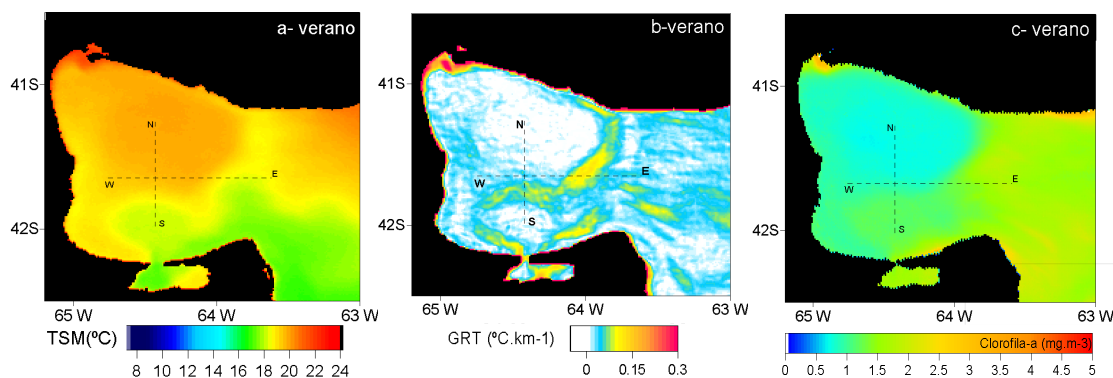


Figura 4.22: Mapas estacionales de TSM (a), GRT (b) y *Chl-a*-sat (c) en verano, * TSM y GRT corresponden a la media de los años 2000-2008, *Chl-a*-sat corresponde al promedio 2000-2006.

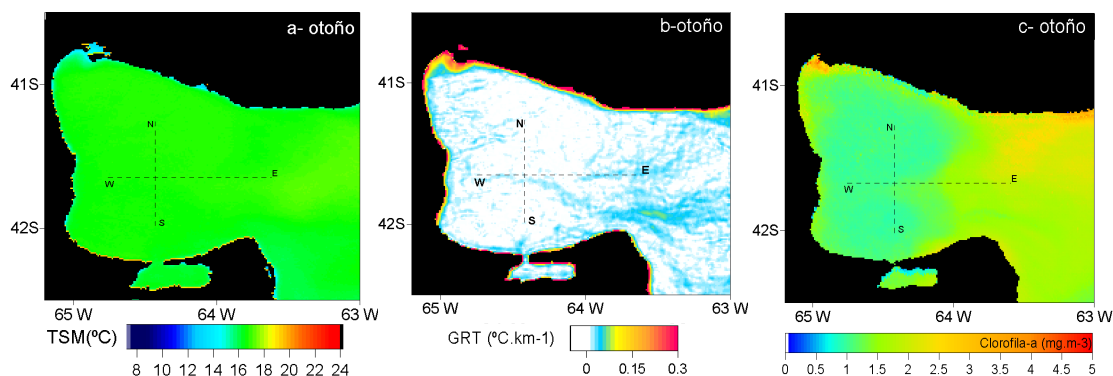


Figura 4.23: Mapas estacionales de TSM (a), GRT (b) y *Chl-a*-sat (c) en otoño, * TSM y GRT corresponden a la media de los años 2000-2008, *Chl-a*-sat corresponde al promedio 2000-2006.

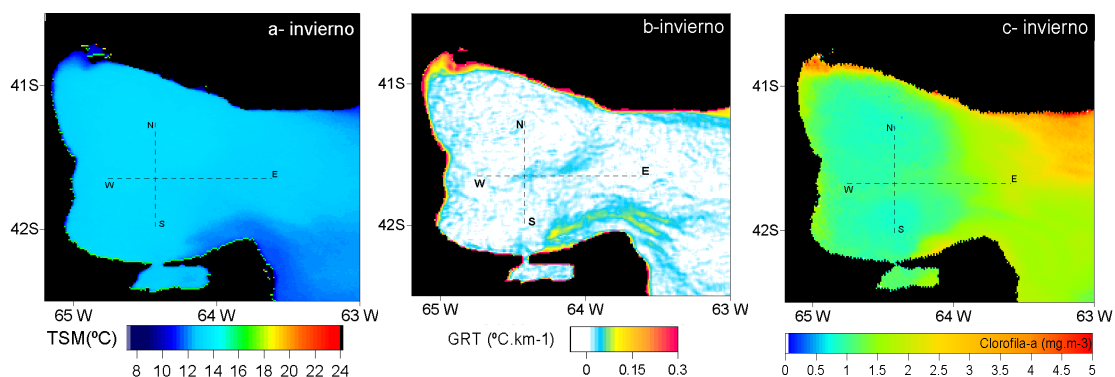


Figura 4.24: Mapas estacionales de TSM (a), GRT (b) y *Cla-sat* (c) en invierno, * TSM y GRT corresponden a la media de los años 2000-2008, *Cla-sat* corresponde al promedio 2000-2006.

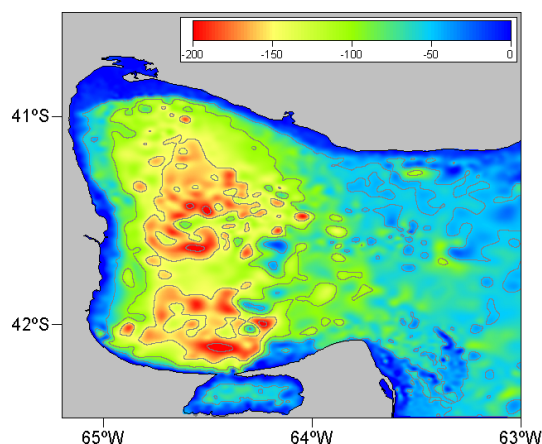


Figura 4.25: Batimetría de los golfos San Matías y San José (Profundidades en metros. Fuente: Carta Náutica H214, SHN, 1999).

La transecta con orientación oeste-este sobre el paralelo $41^{\circ}30'S$ (Figura 4.26) muestra que el interior del Golfo presenta profundidades de hasta 180 m, mientras que la zona externa tiene una profundidad media de 70 m (aproximadamente 110 metros de diferencia entre ambas áreas). La concentración de clorofila-*a* mostró un aumento hacia el este en correspondencia con la disminución de la profundidad.

Los máximos valores de gradientes térmicos registrados en la estación de verano ($0,12\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$) y primavera ($0,10\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$) se localizaron entre los $064^{\circ}60'$ y $063^{\circ}48'$ de longitud oeste, coincidiendo espacialmente con la disminución de la temperatura y el incremento en la concentración de clorofila-*a* hacia el este. El incremento de concentración de clorofila-*a* desde el interior del GSM hacia la zona externa se observó para todas las estaciones del año, mientras que la disminución de temperatura y la presencia de gradientes térmicos relativamente altos sólo fueron registradas en verano. La variabilidad estacional de clorofila-*a* a lo largo de la transecta fue importante. La concentración de clorofila-*a* mostró máximos valores en otoño e invierno ($1,0\text{ mg.m}^{-3}$ en la zona interna a $2,5\text{ mg.m}^{-3}$ hacia el este) y menores concentraciones en el verano y

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

la primavera $0,8-1,0 \text{ mg.m}^{-3}$ en la zona interna a $1,6-1,8 \text{ mg.m}^{-3}$ hacia el este). Estas observaciones indicarían que los máximos de clorofila-*a* en la boca se deben al cambio de pendiente en la topografía entre el interior del Golfo y la plataforma continental, mientras que el descenso de la concentración hacia el verano podría estar asociado a un mayor consumo por parte del zooplancton (Ramirez, 1996).

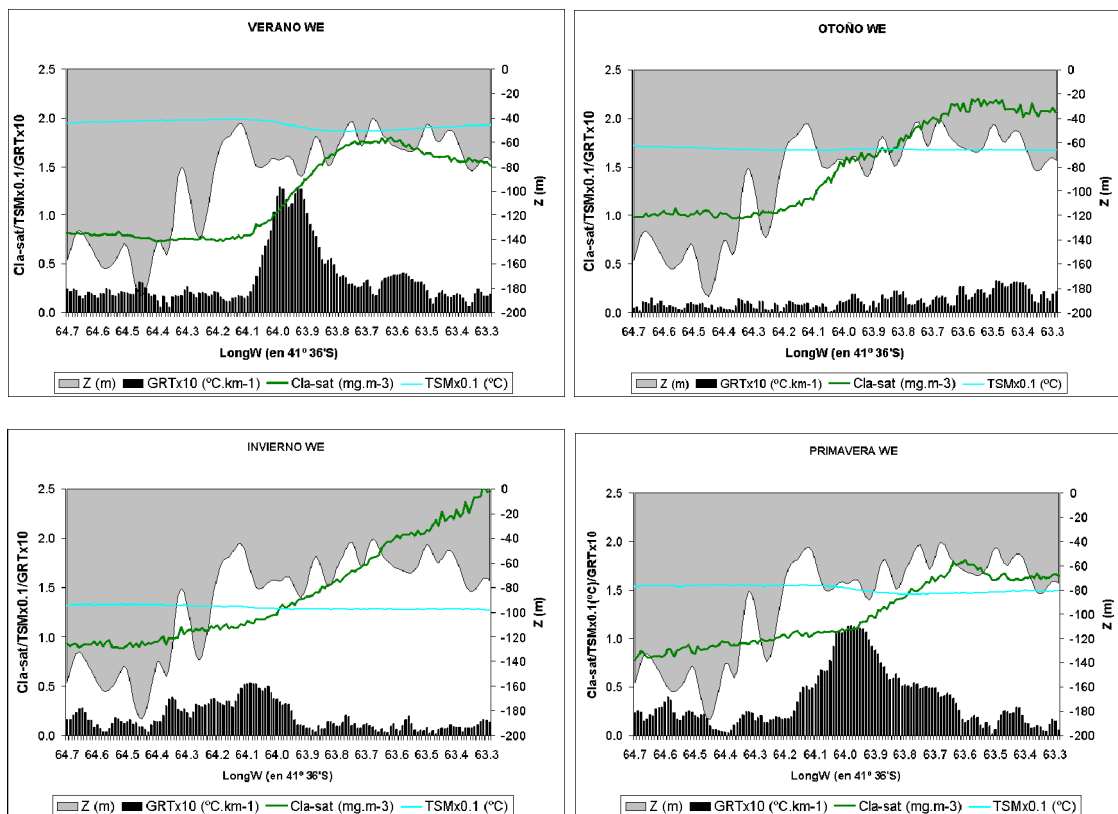


Figura 4.26: Valores de clorofila-*a*, gradientes térmicos, temperatura y profundidad en la transecta con orientación oeste-este (WE, sobre el paralelo $41^{\circ} 36'S$) transversal al frente térmico del GSM. Los valores de TSM y GRT fueron multiplicados por 0,1 y 10 para poder representarlos juntos con la concentración de clorofila-*a* sobre el eje *y*.

La transecta con orientación norte-sur sobre el meridiano $064^{\circ}25'W$ (Figura 4.27) mostró que en esta zona (entre $41^{\circ} 36'S$ y $41^{\circ} 48'S$), los gradientes térmicos en verano fueron de menor magnitud ($0,08 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$) que en la zona de la boca. A lo largo de esta transecta la profundidad media es de aproximadamente 120 m, siendo la zona sur (180 m) más profunda que la norte (~ 130 m). La concentración de clorofila-*a* mostró concentraciones máximas en el área sur en primavera ($\sim 1,5 \text{ mg.m}^{-3}$) y medias en verano ($\sim 1,0 \text{ mg.m}^{-3}$). En otoño e invierno las concentraciones fueron similares entre ambas áreas ($0,8 \text{ mg.m}^{-3}$, al sur y al norte de la posición media del frente térmico estival).

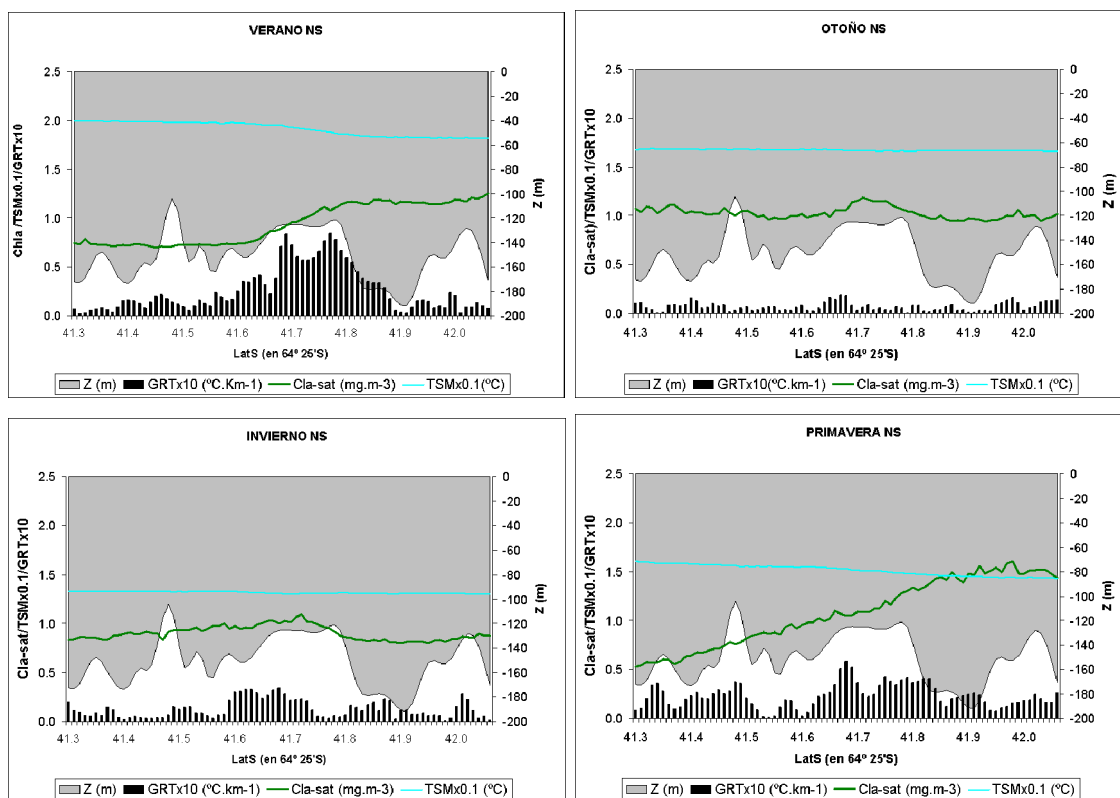


Figura 4.27: Valores de clorofila-*a*, temperatura, gradientes térmicos y profundidad en la transecta con orientación norte-sur (NS, sobre 064°25'W) transversal al frente térmico del GSM. Los valores de TSM y GRT fueron multiplicados por 0,1 y 10 para poder representarlos juntos con la concentración de clorofila-*a* sobre el eje *y*.

4.4.4 Estructura vertical del frente

Los datos oceanográficos obtenidos en campañas históricas y realizadas durante el período de realización de esta tesis sobre un perfil vertical ilustran la distribución de las propiedades físicas y químicas (temperatura, concentración de nitrato-nitrito y clorofila-*a*) de la columna de agua en diferentes épocas del año. Los perfiles con orientación noroeste-sudeste fueron ubicados de manera que permitieran mostrar la distribución vertical de las áreas noroeste y sudeste del GSM y de la zona que presentó mayores gradientes térmicos en los meses de verano. Los perfiles obtenidos se ordenaron de acuerdo a la estación del año en que fueron tomados, independientemente del año de realización de la campaña, con el objetivo de mostrar cualitativamente la evolución de la estructura de la columna de agua a lo largo de un año.

El perfil vertical de temperatura y nitrato en febrero de 2008 mostró estratificación de la columna de agua en la zona noroeste (Figura 4.28). La temperatura alcanzó los 16,0°C en la capa superficial (primeros 20m) y las concentraciones de nitrato fueron menores a 1,0 μM . A mayor profundidad se registró una disminución de la temperatura (menor a 12,0 °C) y un aumento en la concentración de nitrato (>2,0 μM). Las

concentraciones de clorofila-*a* fueron bajas ($\leq 1,0 \text{ mg.m}^{-3}$) y uniformes. Hacia el sudeste los registros de temperatura disminuyeron ($14,0 \text{ }^\circ\text{C}$) y los de clorofila-*a* se incrementaron (a $2,5 \text{ mg.m}^{-3}$). Los nutrientes tuvieron un leve incremento y mayor homogeneidad en la columna de agua al igual que la temperatura y la clorofila-*a*. En esta región la distribución de las variables presentadas fue relativamente homogénea en la columna de agua.

En marzo de 1994 (Figura 4.29) se observaron temperaturas cálidas ($17,0 \text{ }^\circ\text{C}$) en prácticamente todo el perfil vertical. En el área noroeste hay evidencias de estratificación mientras que en el sudeste se observó distribución homogénea de la temperatura. En la capa superficial se registraron concentraciones menores a $1,0 \mu\text{M}$ de nitrato-nitrato incrementándose a más de $3,0 \mu\text{M}$ por debajo de los 40 m de profundidad. La estación 34 ubicada en el extremo este del perfil (Figura 4.29b) mostró concentraciones de nitrato relativamente constantes ($1,0 - 2,0 \mu\text{M}$) en la columna de agua y levemente mayores a las estaciones ubicadas en el noroeste. Las concentraciones de clorofila-*a* en el área noroeste estuvieron en el orden de los $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ (Figura 4.29c), incrementándose levemente hacia el sudeste ($1,0 \text{ mg.m}^{-3}$). En este mes la presencia de la termoclina no fue tan evidente como en el mes de febrero, lo cual indicaría que la estratificación de la columna de agua se estaría debilitando.

El perfil vertical de mayo de 1991 (Figura 4.30) presentó temperaturas del orden de los $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta los 50 m de profundidad. En el área noroeste se observó que la temperatura en profundidad disminuyó a $11,0 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el área sudeste presentó prácticamente la misma temperatura en toda la columna de agua (Figura 4.30a). Las concentraciones de nitrato fueron prácticamente uniformes, con concentraciones en el orden de los $3,0 \mu\text{M}$ (Figura 4.30b). La estación número 19 mostró concentraciones relativamente menores ($1,0 \mu\text{M}$, Figura 4.30b). El perfil de clorofila-*a* (Figura 4.30c, registros hasta los 20m), mostró concentraciones en el orden de los $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$, a excepción de la estación 19, que en coincidencia con la mínima concentración relativa de nitrato mostró mayor concentración de clorofila-*a* ($2,0 \text{ mg.m}^{-3}$).

En el mes de junio se presentaron dos perfiles diferentes correspondientes a los años 2007 (Figuras 4.31) y 2008 (Figuras 4.32). En junio de 2007 no fue posible contar con registros de temperatura, sin embargo las temperaturas registradas en el año 2008 permiten inferir que en esta época del año la columna de agua es homogénea con temperaturas en el orden de los $11,0-12,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Las concentraciones de nitrato estuvieron en el orden de los $5,0 \mu\text{M}$ (Figuras 4.31b y 4.32b). La concentración de clorofila-*a*

estuvo en el orden de los $0,5-1,0 \text{ mg.m}^{-3}$ y también fue relativamente uniforme (Figura 4.32c). En los perfiles de ambos años se observó homogeneidad de las variables presentadas tanto en sentido noroeste-sudeste como en profundidad.

Al igual que en junio, en el mes de octubre los perfiles corresponden a dos años diferentes (2007 y 2008, figuras 4.33 y 4.34). En octubre de 2007 no se contó con registros de temperatura. El análisis conjunto de los perfiles verticales de ambos años mostró que en el año 2007, el ordenamiento de las isotermas en el área noroeste indicó una leve estratificación, con temperaturas de $12,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en los 20 metros superiores disminuyendo levemente a $11,0 \text{ }^\circ\text{C}$ con la profundidad. El perfil de concentración de nitrato en 2008 (Figura 4.34b) indicó estratificación en el área noroeste con concentraciones cercanas a $1,0 \text{ } \mu\text{M}$ en los primeros 20 metros, aumentando por debajo de esta profundidad hasta $4,0 \text{ } \mu\text{M}$. En el área sudeste se registraron concentraciones del orden de $4,0 \text{ } \mu\text{M}$ relativamente uniformes en la columna de agua. La concentración de clorofila-*a* en octubre de 2007 (Figuras 4.33c), presentó máximos de concentración ($\sim 3,5 \text{ mg.m}^{-3}$) en las estaciones 7 y 8. Al noroeste y sudeste de estas estaciones el perfil mostró que las concentraciones tendieron a disminuir a valores del orden de $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$.

En noviembre se contó con información de campañas realizadas en los años 1992 y 2008 (Figuras 4.35 y 4.36). En el año 2008 no se contó con registros de temperatura. Sin embargo el perfil del año 1992 evidenció que en este mes la columna de agua presentó estratificación térmica (Figuras 4.35a). Se observaron temperaturas del orden de los $14,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en los primeros 20 metros disminuyendo a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ en los 50-100m. Los perfiles de nitrato mostraron concentraciones menores a $1,0 \text{ } \mu\text{M}$ en los primeros 20 m de la columna de agua, aumentando a $3,0-4,0 \text{ } \mu\text{M}$ en profundidad (Figuras 4.35b y 4.36b). El perfil del año 2008 mostró homogeneidad e incremento de la concentración hacia el sudeste (Figura 4.36b). Esta característica se observó también en la estación 26 del perfil del año 1992 (Figuras 4.36b). La concentración de clorofila-*a* (Figuras 4.35c y 4.36c) presentó, en ambos años, concentraciones del orden de $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ en el sector noroeste. Asimismo, se observó un incremento en la concentración de clorofila-*a* hacia el sudeste alcanzando los $2,0 \text{ mg.m}^{-3}$.

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

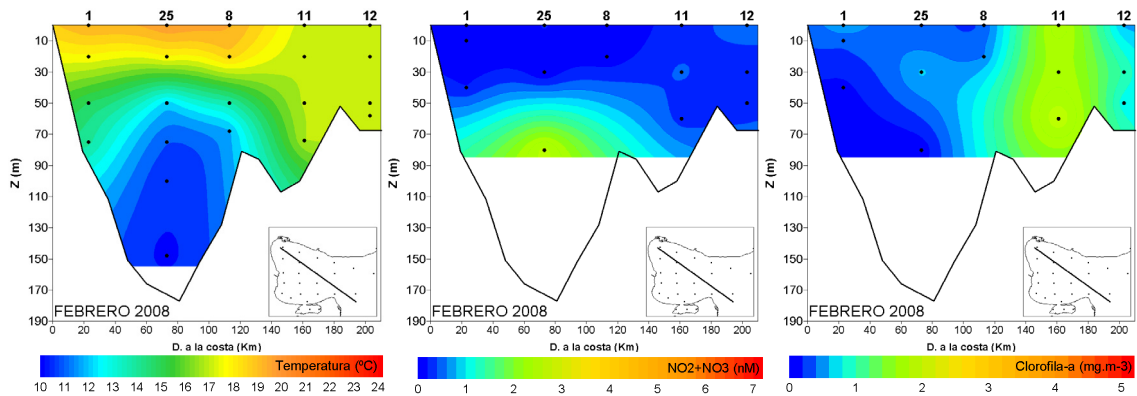


Figura 4.30: Febrero 2008: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

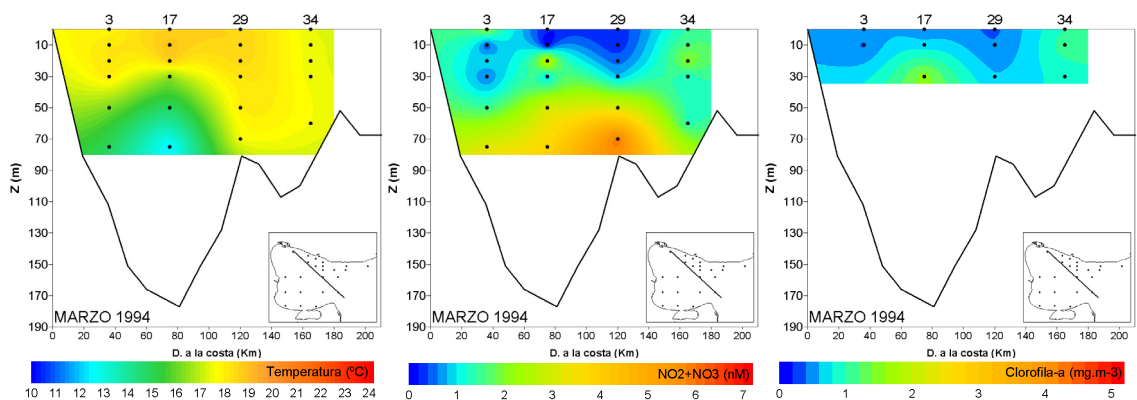


Figura 4.31: Marzo 1994: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

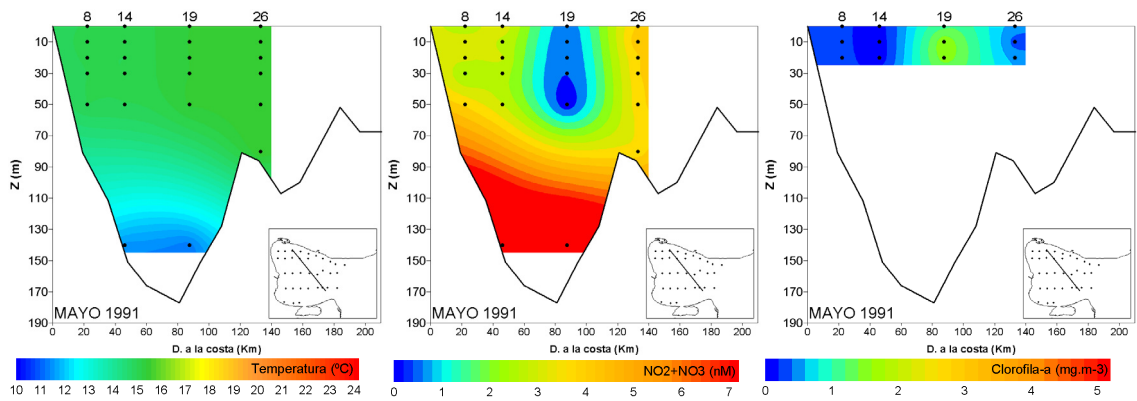
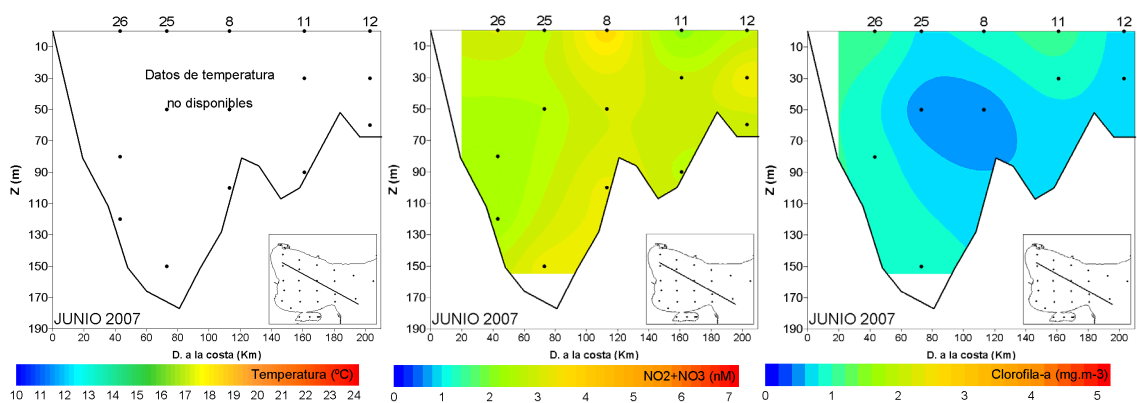


Figura 4.32: Mayo 1991: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.



CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

Figura 4.33: Junio 2007: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

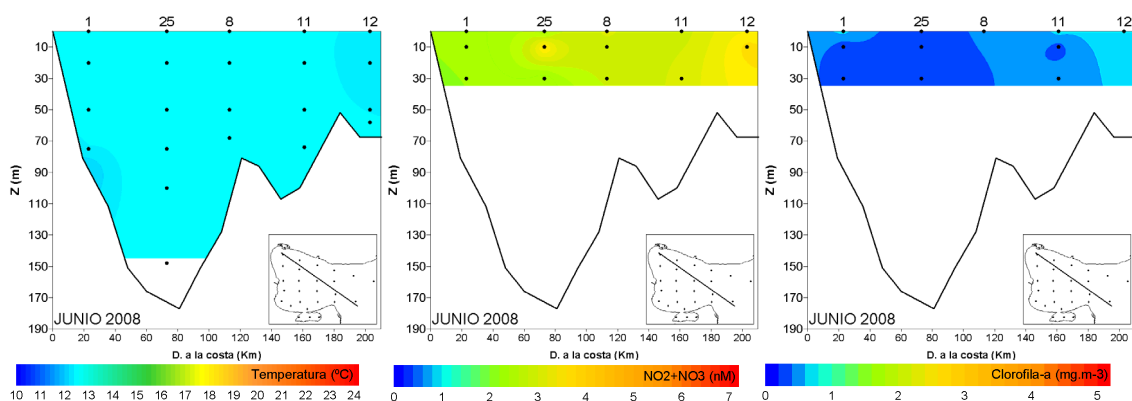


Figura 4.34: Junio 2008: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

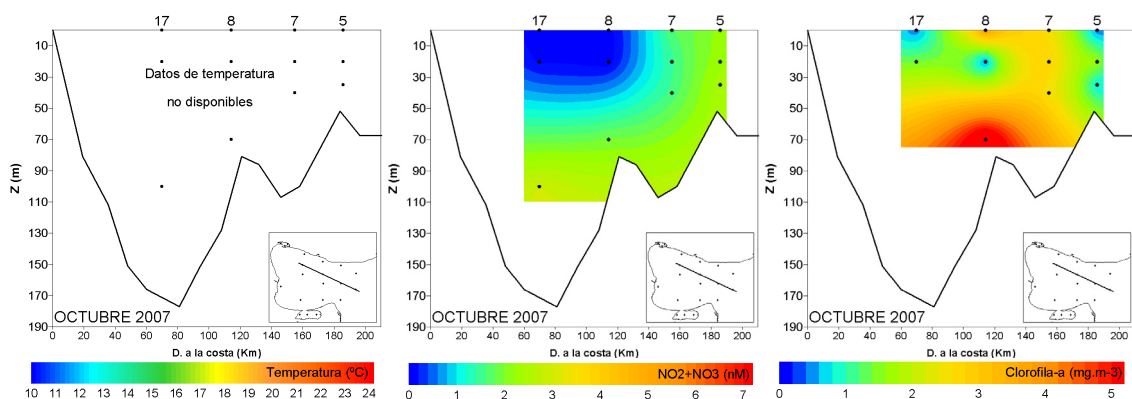


Figura 4.35: Octubre 2007: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

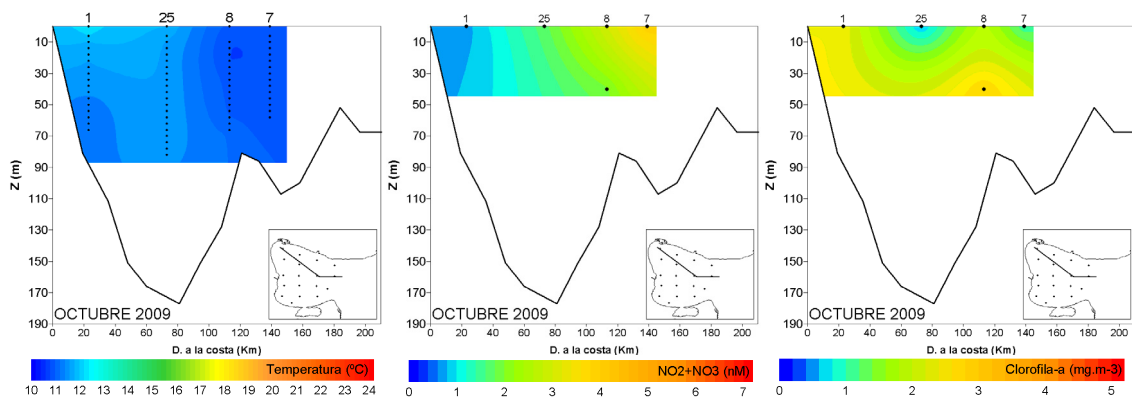


Figura 4.36: Octubre 2009: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el ciclo anual.

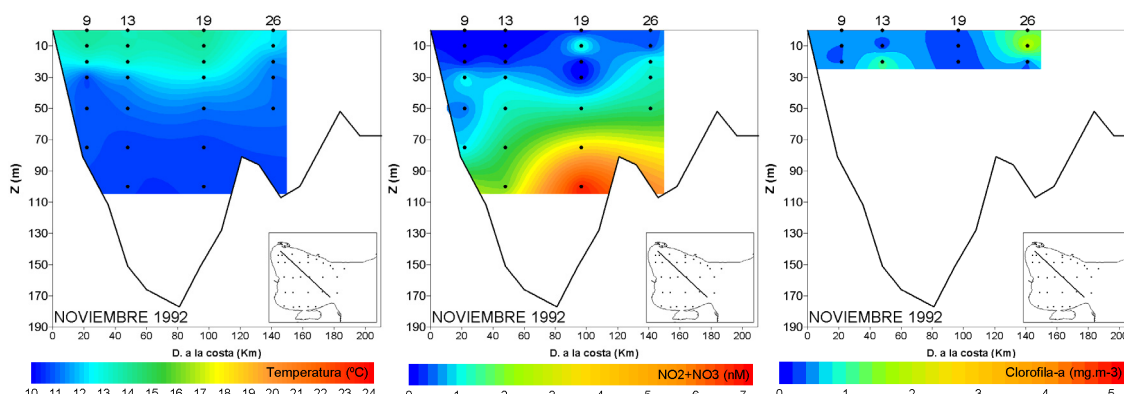


Figura 4.37: Noviembre 1992: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a (mg.m^{-3}) en el ciclo anual.

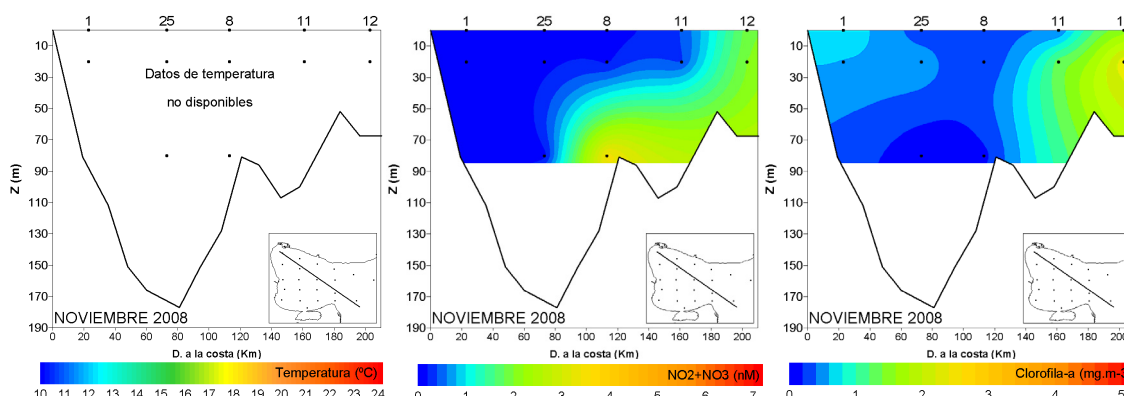


Figura 4.38: Noviembre 2008: Perfiles verticales de temperatura, concentración de NO_3+NO_2 (μM) y clorofila-a (mg.m^{-3}) en el ciclo anual.

4.4 Discusión

A partir de imágenes de gradientes de TSM derivadas de 9 años de información AVHRR de TSM, se identificó y caracterizó temporalmente la zona de ocurrencia del frente de mareas del GSM. El método utilizado para la identificación de frentes, determinó el valor de gradiente para cada píxel de la imagen en función de la distribución de vecindad de la TSM y permitió diferenciar de manera precisa el frente existente en cada imagen individual de TSM. La resolución espacial y temporal utilizada en el presente trabajo demostró ser útil para caracterizar la manifestación superficial del frente térmico presente en la región. La consideración de imágenes mensuales de gradientes para cada año, e imágenes de gradientes medios mensuales para los 9 años de datos, introduce un sesgo en los valores de magnitud de gradientes obtenidos en el frente, resultando los valores finales menores a los observados en imágenes individuales.

No obstante, debido a que el promedio se aplica de igual modo sobre toda la región del GSM, el resultado final en la generación de imágenes mensuales indica que

solamente aquellas zonas de la imagen que fueron zonas frontales a lo largo de todo el mes permanecerán como tales en la imagen mensual. Análogamente, solamente aquellas zonas frontales que mostraron estabilidad a lo largo de los 9 años deberían estar reflejadas en los mapas de frentes mensuales 2000-2008. En efecto, la metodología considerada permitió identificar y caracterizar el frente periódico presente en la región, mientras que las zonas del GSM con temperaturas homogéneas para cada mes quedaron identificadas en segundo plano (“*background*”).

La presencia y magnitud del frente de mareas del GSM fue máxima en el mes de enero. En este mes fue posible observar que los gradientes frontales se alinearon en forma de “S” invertida desde la zona norte de la boca del GSM hasta Punta Quiroga (punta oeste de la boca del GSJ). En trabajos previos se ha mencionado la posibilidad de que la zona del frente desde el norte hasta el punto medio de la boca del GSM se forme mediante un mecanismo diferente al frente interno del GSM con orientación oeste-este (Gagliardini & Rivas, 2004; Tonini, 2010). Tonini (2010), propuso que el frente de Península Valdés y el del GSM son generados por la intensa mezcla por marea en la boca del GSM y la estratificación en superficie. Este mecanismo genera los frentes de superficie a fondo. Por otro lado, el frente interno del GSM (W-E, frente zonal del GSM: FZGSM) se forma por una mecánica diferente siendo más superficial, entre los meses de enero y febrero. En el interior del GSM no existen zonas de alta disipación de energía de marea, por lo que el frente con orientación W-E dentro del GSM podría estar respondiendo a un mecanismo diferente al del frente de Península Valdés (FPV) y el frente de mareas del GSM (FMGSM). Los frentes generados por la mezcla por marea como el FPV y el de la boca del GSM son frentes que tienen incidencia de superficie a fondo y una mayor permanencia temporal, mientras que el frente zonal en el GSM se forma entre enero y febrero cuando la estratificación empieza a incrementarse y se rompe la zona Sur del frente en la boca del GSM permitiendo el ingreso de agua mas densa al Golfo, encerrando en el norte una zona entre Caleta de los Loros y Punta Colorada de alta temperatura superficial, similar a la detectada por Piola & Scasso (1988). La zona Sur del Golfo tiene mayor mezcla por marea y además se suma la dinámica generada por el flujo de ingreso-egreso al GSJ, con lo cual su temperatura es más homogénea de superficie a fondo y genera un contraste con la zona Norte que retiene agua superficial más cálida (Tonini, 2010).

La transecta de orientación W-E se caracterizó por presentar una importante disminución de la profundidad del fondo desde el interior del Golfo hacia la Plataforma

y por un incremento de clorofila-*a* desde el interior del Golfo hacia la plataforma durante todo el año en coincidencia espacial con el cambio de profundidad. Los gradientes térmicos “frontales” se registraron únicamente en primavera y verano. El mantenimiento de altas concentraciones relativas de clorofila-*a* en la zona de la boca del GSM con respecto a la zona interna en coincidencia espacial con la existencia de un “escalón” entre la plataforma y el GSM indicaría que las mismas se deben al efecto de la topografía del fondo que en combinación con las mareas genera una zona de alta disipación de energía (Glorioso & Simpson, 1984; Tonini, 2010) que podría provocar la resuspensión de sedimentos que llevarían a confundir la señal del sensor satelital o, alternativamente favorecerían la inyección de nutrientes para la producción del fitoplancton. De este modo, este proceso podría favorecer la producción biológica secundaria que podría ser aprovechada por las pesquerías regionales.

La transecta de orientación N-S se caracterizó por presentar menor variación en la profundidad del fondo, el incremento espacial en la concentración de clorofila-*a* se dio hacia la zona sur en primavera y verano. Los gradientes térmicos frontales fueron detectados únicamente en verano, presentaron menores magnitudes a los registrados en la transecta sobre el frente N-S ($0,08\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ contra $0,13\text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$). El hecho de que el incremento de clorofila-*a* hacia el sur se observe solamente en primavera y verano (y no durante todo el año como en el caso de la transecta sobre el frente N-S) indicaría que este incremento no se debería a la influencia de la topografía del fondo sino que estaría respondiendo al ingreso de agua rica en nutrientes desde la plataforma por el sur.

Los perfiles verticales con orientación noroeste-sudeste en dirección transversal a la región de máximos gradientes frontales permitieron obtener una visión de la estructura vertical y su evolución temporal a lo largo del ciclo anual. En los meses de primavera-verano (octubre a febrero) se observó que la zona interna del GSM estuvo estratificada con temperaturas cálidas y mínimas concentraciones de nitrato y clorofila por encima de los 20 m. En la zona externa las variables analizadas presentaron homogeneidad con temperaturas relativamente más frías y mayores concentraciones de nitrato y clorofila-*a*. El cambio en la estratificación entre la zona interna y externa coincide espacialmente con la ubicación de los máximos gradientes frontales (es decir con la manifestación térmica superficial del frente) y con la disminución de la profundidad entre el área interna del GSM y la Plataforma.

En los meses de otoño invierno se observó homogeneidad de la columna de agua para todas las variables consideradas a ambos lados de la estructura frontal.

En meses de verano entonces, se observó un gradiente desde el interior hacia el exterior del GSM con incrementos de nutrientes y clorofila-*a* y disminución de la temperatura hacia la zona de la boca. En la zona interna se observó un gradiente vertical: disminución de la temperatura e incremento de nitrato hacia zonas profundas, mientras que en la zona de la boca y externa se observó homogeneidad (ocasionada por alta disipación de energía, de acuerdo a Palma *et al.* (2004) y Tonini (2010)).

En el golfo San Matías se han citado máximos relativos de salinidad y temperatura (Guerrero & Piola 1997), el frente detectado durante primavera y verano separa así aguas del Golfo con mayor salinidad, temperatura, estratificación y menores concentraciones de nutrientes y clorofila-*a* por encima de los 25 m de las aguas de la plataforma.

La zona frontal identificada y caracterizada temporalmente se encuentra asociada a una zona de alta productividad biológica. La importancia de las zonas frontales reside en que muchas de ellas constituyen zonas de reproducción, cría, y/o alimentación de distintas especies de interés económico pesquero (Pingree *et al.*, 1978; Carreto *et al.*, 1995; Bertolotti *et al.*, 1996; Sabatini & Martos, 2002). Esta zona se corresponde también con áreas costeras habitadas por numerosas colonias de aves y mamíferos marinos. En este sentido, la perspectiva a gran escala del frente del GSM obtenida mediante la detección superficial con datos AVHRR, pudo complementarse con datos satelitales de clorofila-*a* y con estudios observacionales *in-situ*, los cuales mostraron mayores detalles sobre las características de la zona frontal del GSM en la columna de agua y su asociación con variables físicas (temperatura y profundidad), químicas (nitrito y nitrato) y biológicas (clorofila-*a*). La utilización de datos de alta resolución AVHRR con una resolución temporal diaria puede brindar incluso mayores detalles del frente aquí identificado, como ha sucedido en otras partes del mundo (Kahru *et al.* 1995; Ullman & Cornillon, 1999).

Finalmente, los gradientes térmicos observados en los distintos años analizados mostraron variaciones que no superaron el valor de $0,1 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$, como fueron los meses de enero de las temporadas 2004-2005 y 2006-2007, mientras que fueron observadas intensidades que alcanzaron los $0,22\text{-}0,25 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$ en las temporadas 2005-2006, 2007-2008, 2002-2003 y 2000-2001. Esta variabilidad interanual podría ser explicada por procesos de mayor escala (por ejemplo el fenómeno El Niño/La Niña Southern

CAPITULO 4. Caracterización del frente de mareas del golfo San Matías

Oscillation) no analizados en el marco de esta Tesis y para el cuál se requieren análisis específicos.

5. Utilización de datos satelitales en aplicaciones biológico-pesqueras¹

5.1 Introducción

Las propiedades físicas de los mares influyen en los procesos biológicos en todas las escalas espacio-temporales (Mann, 1992). Dentro de las diferentes variables físicas que afectan la distribución de los organismos marinos, la temperatura del mar es considerada una de las más relevantes, existiendo una gran variedad de especies asociadas a estructuras y/o condiciones térmicas específicas (Yañez *et al.*, 1995; Perrota *et al.*, 2001). La temperatura superficial del mar (TSM) ha sido considerada como una variable importante en estudios biológico-pesqueros, principalmente en el pronóstico de reclutamiento, supervivencia larval, áreas de desove, capturas y en el estudio de los cambios espacio-temporales en la abundancia de especies de interés comercial (Ramírez, 2002; Bava, 2004; González *et al.*, 2004). Muchas especies muestran altas densidades en las cercanías de frentes oceánicos y zonas de surgencias (Reddy *et al.*, 1995; Sabatini & Martos, 2002) las cuales constituyen zonas de alta productividad. La concentración de clorofila-*a* es utilizada como un estimador de biomasa fitoplanctónica y en aguas costeras se relaciona con concentraciones limitantes de nutrientes (Aminot *et al.*, 1998; Herut *et al.*, 2000). En general áreas con alta concentración de clorofila-*a* presentan además, gran abundancia de peces y larvas de crustáceos (Friedland *et al.*, 1996; Wehrtmann, 1994), aves (Ballance *et al.*, 1997) y mamíferos marinos (Jaquet *et al.*, 1996) por lo cual esta variable es un factor importante en el diseño de medidas de manejo pesquero y de conservación.

La variación espacial y estacional en la concentración de clorofila-*a* puede estar determinada por movimientos de las masas de agua (Lluch-Cota, 2000; Kress *et al.*, 2002) mediante los cuales los nutrientes pueden ser desplazados hacia las capas superficiales iluminadas, creando condiciones favorables para la multiplicación celular del fitoplancton (Carreto, 1989), incrementando, de este modo, la productividad primaria del área afectada.

Teniendo en cuenta que la TSM puede ser un indicador de la presencia en superficie de aguas frías provenientes de capas más profundas y por lo tanto un factor relevante en la distribución y concentración de nutrientes, clorofila-*a* y consecuentemente, en la distribución y abundancia de los recursos biológicos, es de importancia integrar la información proveniente de sensores transportados a bordo de satélites capaces de medir variables como

¹ los datos de este capítulo fueron compartidos con la tesis “Evaluación pesquera integral de la merluza común (*Merluccius hubbsi* Marini, 1933) del Golfo San Matías y efectos de la explotación de esta especie sobre otros componentes de la trama trófica” defendida en la Universidad Nacional de Córdoba por el Dr. Matías Ocampo Reinaldo en Julio de 2010.

TSM y clorofila-*a* y relacionar esta información con datos de distribución, abundancia y capturas de especies de interés pesquero (Laurs *et al.*, 1984; Yáñez *et al.*, 1996). En tal sentido, las especies ícticas que integran las comunidades pelágicas y demersal-pelágicas, las cuales desarrollan gran parte de su ciclo de vida en relación con las capas intermedias o superiores del océano, aparecen como buenas candidatas para este tipo de estudios (Laurs *et al.*, 1984; Yáñez *et al.*, 1996). Para el caso del GSM, donde existe desde hace más de 30 años una pesquería que se sustenta en la merluza común y otras especies del conjunto demersal-pelágico, el análisis de la distribución y abundancia de dichas especies respecto de los factores ambientales mencionados, podría aportar información novedosa sobre tales relaciones.

La comunidad de especies demersal – pelágicas del GSM se encuentra dominada por la merluza común, la merluza de cola, la palometa (*Parona sygnata*), el pampanito (*Stromateus brasiliensis*) y el savorín (*Seriolella porosa*) (Angelescu & Prenski, 1987). La merluza y el savorín constituyen desde hace varios años las dos especies blanco de la pesquería con red de arrastre de fondo (Romero *et al.*, 2008), por lo que los desplazamientos de la flota arrastrera del GSM podrían ser considerados indicativos de los desplazamientos migratorios y de la abundancia relativa de estas especies. Así, el análisis de la dinámica espacio-temporal de la flota en relación a factores ambientales tales como TSM y concentración de clorofila-*a*, podría aportar nueva información, o corroborar información ya existente, que contribuya a la identificación de patrones espacio-temporales de distribución de estas especies en el GSM, indicativos a su vez de la existencia de procesos biológicos y ecológicos críticos (Ej.: zonas de alimentación, áreas de desove, etc.).

La merluza común *Merluccius hubbsi* Marini, 1933 (Gadiformes, Merlucciidae) (Fig. 5.1) se encuentra distribuida desde Cabo Frío, en Brasil (22°S) hasta el sur de Argentina (55°S), siendo muy frecuente en toda la Plataforma Continental Argentina (PCA) (Cousseau & Perrota, 2004). Presenta un cuerpo alargado y fusiforme, cubierto de escamas cicloides. Es euribática (se la encuentra entre 50 y 500 m de profundidad) y euritérmica (temperatura óptima entre 5,0 y 10,0°C), de hábitos demersal-pelágicos y su óptimo de salinidad ambiental rondaría los 33,5 ups. La merluza es un activo predador oportunista en su dieta, que varía su alimentación durante su historia de vida (Angelescu & Prenski, 1987). Realiza migraciones verticales diarias para alimentarse en las capas superficiales de la columna de agua (Angelescu & Prenski, 1987), por lo cuál su comportamiento y distribución estarían fuertemente ligados a los procesos oceanográficos de



Figura 5.1: *Merluccius hubbsii*

las capas superficiales los cuales, como se ha mencionado, pueden ser identificados mediante información de TSM y concentración de clorofila-*a* de la capa superficial del mar. Estudios recientes (Ocampo Reinaldo, 2010) han determinado que los crustáceos constituyen una parte importante de la dieta de la merluza en todas las etapas de vida.

La merluza común es una especie iterópara, desovante múltiple y de fecundación externa que presenta puestas casi todo el año, por lo cual los procesos reproductivos en este tipo de especies suelen estar asociados a zonas del océano que constituyen áreas de retención de huevos y larvas para favorecer el éxito reproductivo (Illes & Sinclair, 1982).

En la Plataforma Continental Argentina se han identificado tres efectivos pesqueros o stocks de merluza común, que presentan su propia época y zonas de desove y que se explotan bajo diferentes esquemas:

Efectivo norte: ubicado entre 34°S y 41°S (Macchi *et al.* 2004), explotado en la región conocida como Zona Común de Pesca Argentina-Uruguay (ZCPAU) (Bezzi *et al.*, 1994; Ernst *et al.*, 2005). Presenta su máxima actividad reproductiva en invierno (mayo a julio), entre los 35° y 38°S (Cousseau & Perrota, 2004).

Efectivo sur o patagónico: localizado entre 41° y 55°S (Macchi *et al.*, 2004) constituye aproximadamente el 85% del total de la biomasa estimada en Argentina (Dato *et al.*, 2000). Se reproduce principalmente entre octubre y marzo en la zona costera patagónica (desde Península Valdés hasta el sur del golfo San Jorge en la provincia de Chubut) (Cousseau & Perrota, 2004).

Efectivo del golfo San Matías: Su explotación comercial comenzó en 1971 y desde entonces ha sido administrada de forma autónoma por la provincia de Río Negro. Constituyó la especie más importante en términos de desembarcos y retornos económicos después de la vieira tehuelche (*Aequipecten tehuelchus*) (González *et al.*, 2004, González *et al.*, 2007). Presenta su pico de desove en octubre y noviembre en la zona norte de la cuenca (Di Giacomo *et al.*, 1993; Ocampo-Reinaldo, 2010).

El savorín (*Seriolella porosa*) (Figura 5.2) es una especie de hábitos semipelágicos que se distribuye en aguas del Atlántico Sudoccidental entre los paralelos 35° y 52°S. Si bien es un pez esencialmente costero (raramente se lo encuentra a profundidades mayores de 100 metros), en la



Figura 5.2. *Seriolella porosa*.

zona norte de su distribución sólo se lo halla cerca del talud. Esta disposición alejada de la costa puede estar relacionada con una reducida capacidad para vivir en las aguas de mayor

temperatura y baja salinidad presentes frente a la desembocadura del Río de la Plata (Cousseau *et al.*, 1993; Forciniti & Perrota, 1994).

En el golfo San Matías el savorín es capturado estacionalmente con red de arrastre por la flota pesquera local como segunda especie blanco de la pesquería de la merluza común (Romero *et al.*, 2008). En el norte del GSM se ubicó y delimitó un área de desove y de cría. El área de cría se detectó en el mes de noviembre en un rango de profundidades de 30 a 99 m (Perier & DiGiácomo, 2002). La especie es de hábitos alimentarios macro-zooplancónicos alimentándose principalmente de crustáceos (Eufáusidos y Anfípodos hipéridos).

La utilización de los recursos demersales del GSM ha sido exclusivo de la flota de arrastre de fondo (buques del segmento rada o ría y costeros lejanos y cercanos) desde el inicio de la actividad hasta 1996. A partir de entonces se sumaron embarcaciones palangreras industriales y artesanales a la explotación, que también se dirigieron a la captura de la merluza común. En los últimos años, los desembarcos de especies totales anuales para arrastreros y palangreros oscilaron entre las 8000 y 21000 t (González *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2008).

Las imágenes NOAA-AVHRR de TSM se utilizaron en distintas pesquerías para analizar la correlación entre este parámetro y la distribución de ciertas especies de interés (Reddy *et al.*, 1995; Yañez *et al.*, 1995; Yañez *et al.*, 1996; Cole & McGlade, 1998). Asimismo, ciertos productos derivados como los gradientes de TSM (GRT), han sido utilizados para tratar de encontrar una correspondencia entre las condiciones oceanográficas y la distribución de ciertas especies (Yañez *et al.*, 1996). Sin embargo, los estudios sobre pesquerías que utilizan datos satelitales como base para el análisis de algunas variables oceanográficas son muy limitados en el Océano Atlántico Sudoccidental. La TSM y la distribución de peces fue principalmente observada en recursos pelágicos (Sánchez *et al.*, 1995; Santos *et al.*, 2001); pero ha sido poco estudiado para especies demersales y bentónicas (Jaureguizar *et al.*, 2003). En el ASO la distribución de la merluza de cola (especie de hábito demersal) fue evaluada en relación a la distribución de temperatura superficial y de fondo. Se observó que las capturas presentaron una clara relación con la TSM (la mayoría de las capturas se registró entre los 6,5° y 8,0°C), indicando que la distribución de las CPUE en función de la TSM se encontró desplazada aproximadamente 1,5°C con respecto al análisis con la temperatura de fondo (Bava, 2004).

El manejo integrado de los recursos pesqueros es posible mediante el conocimiento y entendimiento de los factores abióticos y bióticos que gobiernan la distribución y abundancia de los stocks marinos explotados (Santos, 2000). Los métodos de sensoramiento remoto, junto con las clásicas mediciones realizadas en cruceros oceanográficos, constituyen un modo

eficiente para mejorar el conocimiento del ambiente de los ecosistemas pesqueros. Como se ha mostrado en los primeros capítulos, el sensoramiento remoto y la toma de datos *in-situ* han corroborado los resultados de estudios previos para el GSM y han permitido monitorear procesos oceanográficos con mayor resolución temporal (frentes y florecimientos fitoplanctónicos) y cobertura espacial.

Por otra parte, los sistemas de monitoreo satelital de flotas pesqueras (conocidos como Vessel Monitoring Systems –VMS- a nivel internacional), constituyen herramientas tecnológicas indispensables para obtener información detallada sobre la dinámica espacio-temporal de las flotas pesqueras, permitiendo así evaluar las potenciales relaciones entre distribución y abundancia relativa de los recursos respecto de las variables ambientales determinadas mediante sensoramiento remoto (González *et al.*, 2004).

Esta tesis doctoral constituye uno de los primeros trabajos que analizan en forma conjunta datos ambientales y biológico-pesqueros mediante la combinación de ambos tipos de herramientas tecnológicas para el Mar Argentino.

Este capítulo tiene por objetivo investigar la relación entre las condiciones ambientales y las capturas de merluza y savorín en el golfo San Matías, utilizando para ello las series de tiempo de los productos TSM-AVHRR, GRT (AVHRR) y clorofila-*a* (SeaWiFS) de alta resolución espacial (1,1x1,1km).

5.2 Metodología

5.2.1 Procesamiento de los datos satelitales

Se generaron imágenes mensuales medias de TSM y concentración de clorofila-*a* (Cla-sat) de acuerdo al procesamiento indicado en el Capítulo 2 y sección 3.1. Las imágenes correspondieron a los períodos 2004-2006. En este caso las imágenes fueron corregidas geométricamente y proyectadas al sistema de coordenadas Gauss Kruger zona 3 WGS 84 (o Transverse Mercator) con un tamaño de píxel de 1,1 x 1,1 km.

5.2.2 Distribución de la flota industrial

La plantilla de patrones de pesca de la flota industrial del GSM está compuesta mayormente por veteranos locales con gran experiencia. Sin embargo, gran parte de la pesca se basa en procedimientos de “prueba y error” y el éxito en un lance de pesca genera la repetición de la experiencia en la zona. En sentido contrario, un lance fallido (de poca captura), motiva la búsqueda de otra zona. Esta limitación lleva a asumir que la flota se comporta como un depredador relativamente eficiente y que su persistencia en un lugar es

indicador de la ubicación de las mayores concentraciones de recursos de características comerciales (Ocampo-Reinaldo, 2010).

La distribución espacial de la flota industrial fue obtenida a partir de información suministrada por el Sistema de Monitoreo Pesquero y Oceanográfico (SiMPO), un sistema de seguimiento satelital de los buques pesqueros implementado por la provincia de Río Negro desde el año 2003 (González *et al.*, 2004). La información suministrada por el SiMPO fue filtrada, conservando las posiciones geográficas de las velocidades comprendidas entre 2,5 y 4,0 nudos, ya que se considera que son las velocidades típicas durante la maniobra de arrastre de la flota analizada. Estas posiciones, entonces, son las de presunta actividad de pesca y posteriormente fueron auditadas para eliminar registros inválidos (Ej.: velocidades de ese rango debidas a condiciones climáticas adversas, entradas a puerto, etc.).

La información fue agrupada por mes para la temporada analizada (2004-2006). Se realizó un suavizado espacial de los conteos de registros por unidad de área con el objetivo de visualizar y cuantificar las áreas con actividad pesquera. El suavizado espacial de los conteos de registros por unidad de área se realizó mediante una interpolación *Kernel*, que consiste en asignar sobre cada punto (registro de pesca) una superficie simétrica, evaluando luego la cantidad de puntos (con su superficie) que resultan dentro de un área de búsqueda móvil. El procedimiento se repite para varias ubicaciones de referencia y se obtiene una superficie final suavizada de densidad de puntos (Levine, 2004). La función matemática de superficie utilizada fue la de la distribución de densidad *normal*, según:

$$g(x_j) = \sum \left\{ I_i \frac{1}{h^2 \cdot 2\pi} e^{-\left[\frac{d_{ij}^2}{2h^2}\right]} \right\}$$

Donde,

d_{ij} : distancia entre la ubicación de referencia y cualquier punto dentro del radio de búsqueda considerado.

h : desviación estándar de la distribución *normal* (en este caso el ancho de banda o radio de búsqueda)

I_i : intensidad de cada punto.

En este caso se utilizó un valor de escala de $I_i = CPUE_{reg}$, siendo

$$CPUE_{reg} = \left(\frac{C_i}{R_i} \right)$$

donde:

C_i : Captura total agrupada por cada mes para el conjunto de años 2004 a 2006, tomada de las estadísticas pesqueras oficiales (Millán, 2007).

R_i : número de registros de pesca (SiMPO) agrupados por cada mes para el conjunto de años 2004 a 2006.

El ancho de banda (radio de búsqueda) fue de 2500 m, y las densidades fueron representadas en una grilla regular de 1100 m de lado de celda, consistente con la resolución de las imágenes satelitales utilizadas.

5.2.3 Integración de la información

Los mapas satelitales de TSM y Cla-sat y las densidades de CPUE fueron ingresados en un Sistema de Composición Cartográfica (SCC) del IBMP Alte. Storni, el cual opera bajo el programa ArcMap 9.3TM, software de ESRI© para manejo de información geográfica y creación de mapas (Schneider, 2009). El objetivo fue observar si la distribución de densidades de lances de pesca estuvo asociada a la distribución superficial de TSM o Cla-sat. Los mapas de CPUE fueron representados junto con las isotermas de cada imagen mensual de TSM (representadas como contornos de mapa).

5.2.4 Información biológico-pesquera

Se utilizaron datos de muestreos cuasi-mensuales obtenidos a bordo por personal del POP (Programa de Observadores Pesqueros) del IBMP Alte. Storni, a partir de capturas comerciales (2004 a 2006) siguiendo los protocolos ya descritos en el Capítulo 2 (Datos y Métodos). El estadio gonadal fue registrado para hembras de merluza mayores a 27 cm, ya que ésta es la talla media a partir de la cual las hembras se consideran en maduración gonadal (Ocampo Reinaldo, 2010).

5.3 Resultados

5.3.1 Distribución espacio-temporal de TSM, Cla-sat y CPUE.

En el período enero 2004 a diciembre de 2006 se obtuvieron 206 imágenes medias diarias de TSM, mientras que del sensor SeaWiFS se obtuvieron 215 imágenes diarias de Cla-sat para el período enero 2004 a diciembre de 2006 (Tabla 5.1). En consistencia con los

resultados presentados en los Capítulos 3 y 4, la presencia del sistema frontal característico de los meses de verano (diciembre a febrero) fue observada en los promedios mensuales de TSM. Durante el invierno (mayo a agosto) la distribución de la TSM fue uniforme en toda el área del GSM. Los meses de septiembre-octubre y marzo-abril pueden ser caracterizados como meses de transición hacia la formación y debilitamiento de la estructura frontal, respectivamente (Figura 5.3).

La distribución de la concentración de clorofila-*a* estuvo claramente relacionada con la estructura térmica superficial del Golfo entre los meses de diciembre a febrero. Se observó que las aguas cálidas (20,0°C) de la zona norte estuvieron caracterizadas por concentraciones mínimas de clorofila-*a* (0,30 mg.m⁻³), mientras que las aguas de temperatura intermedia (18,0 °C) en la boca y relativamente más frías (17,0 °C) del sur presentaron concentraciones del orden de 1,30 mg.m⁻³.

Tabla 5.1: Número de imágenes utilizadas según cada plataforma satelital (2004 a 2007).

Mes	AVHRR	SeaWiFS
	2004-2006	2004-2006
Enero	25	37
Febrero	20	26
Marzo	18	16
Abril	10	16
Mayo	5	6
Junio	12	3
Julio	20	7
Agosto	11	7
Septiembre	22	22
Octubre	10	20
Noviembre	24	27
Diciembre	29	28

Durante el verano (diciembre a marzo), la mayor actividad de la flota se concentró en las zonas sudeste y sur del Golfo, próxima a la región con mayores gradientes térmicos y en donde se observó el incremento de clorofila-*a* hacia el sector sur (Figura 5.3). En ese período se obtuvieron los máximos rendimientos de merluza (700-900 kg.h arrastre⁻¹) (Figura 5.4) mientras que de marzo a septiembre los rendimientos fueron menores (alrededor de 200 kg.h arrastre⁻¹) Entre agosto y septiembre se observó un incremento significativo de las capturas de savorín, que pasó de rendimientos casi nulos a máximos cercanos a los 1000 kg.h arrastre⁻¹, disminuyendo abruptamente en octubre, con la flota concentrada en la zona norte del Golfo. Durante los meses de octubre y noviembre la flota se desplazó al sur debido a la aplicación de la veda anual de merluza, que prohíbe la actividad al norte del paralelo 41°30'S. Los

rendimientos del resto de las especies agrupadas no presentaron variaciones importantes a lo largo del año, aunque en otoño-invierno (mayo a agosto) se obtuvieron valores ligeramente más altos.

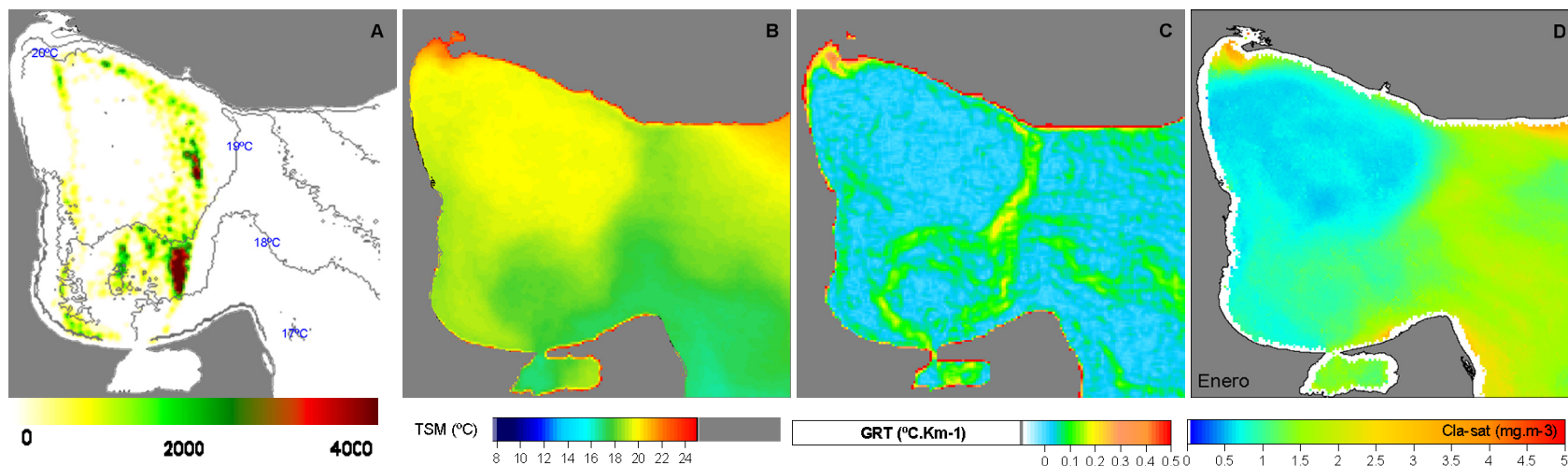


Figura 5.3: **Enero**. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

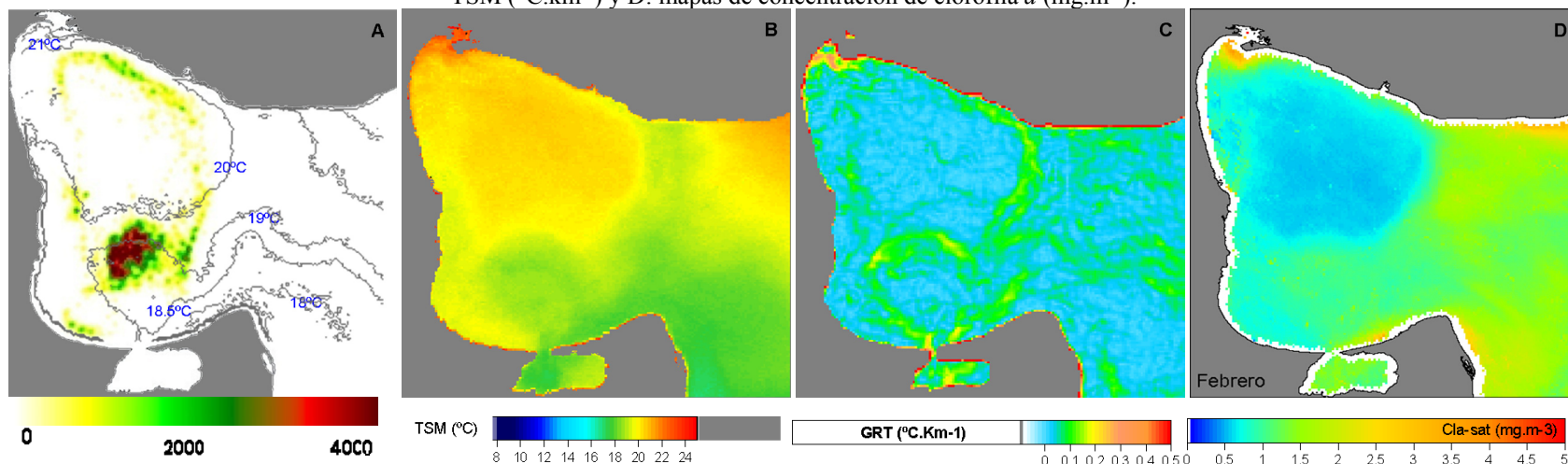


Figura 5.3: **Febrero**. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

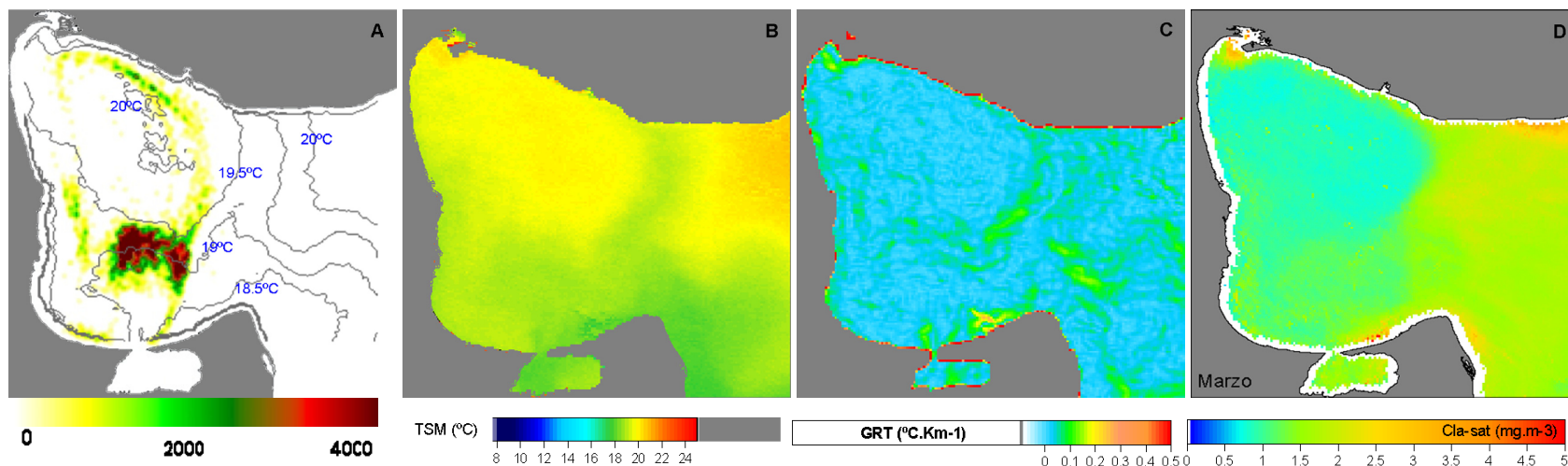


Figura 5.3. **Marzo.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

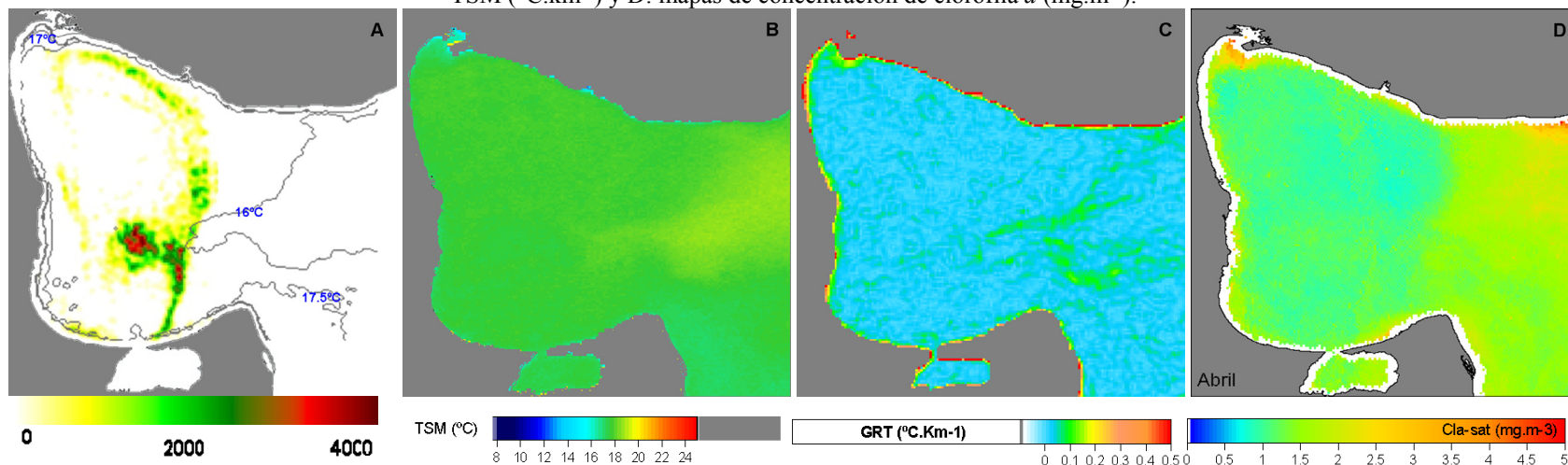


Figura 5.3. **Abril.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

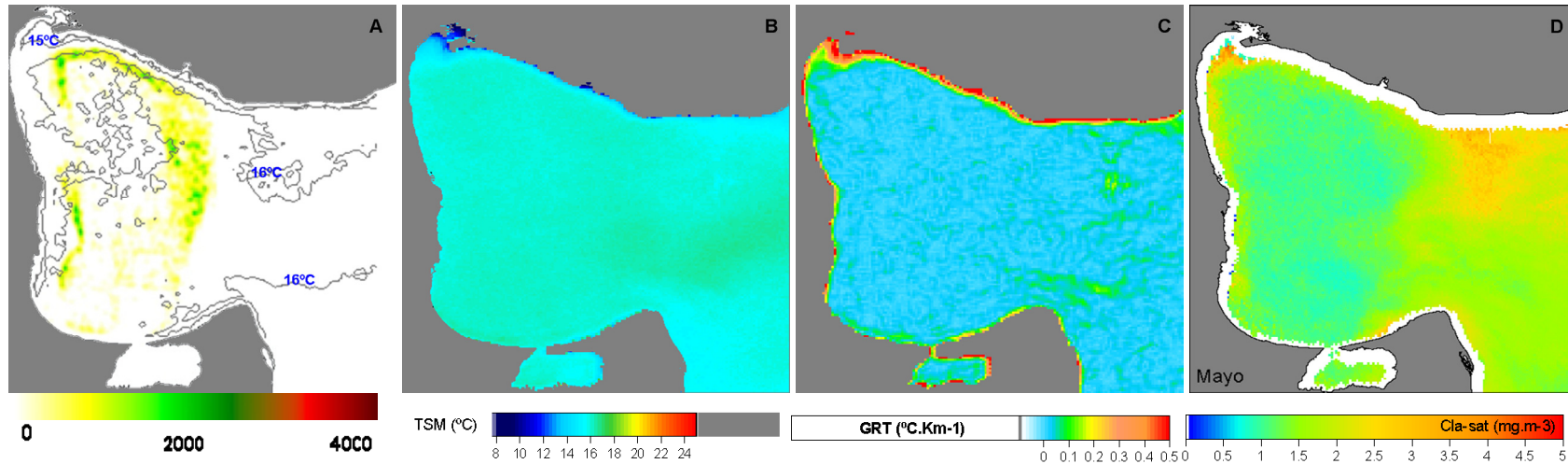


Figura 5.3. Mayo. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera (CPUE_{corr.}.km⁻²), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM (°C); C: mapas de gradientes de TSM (°C.km⁻¹) y D: mapas de concentración de clorofila *a* (mg.m⁻³).

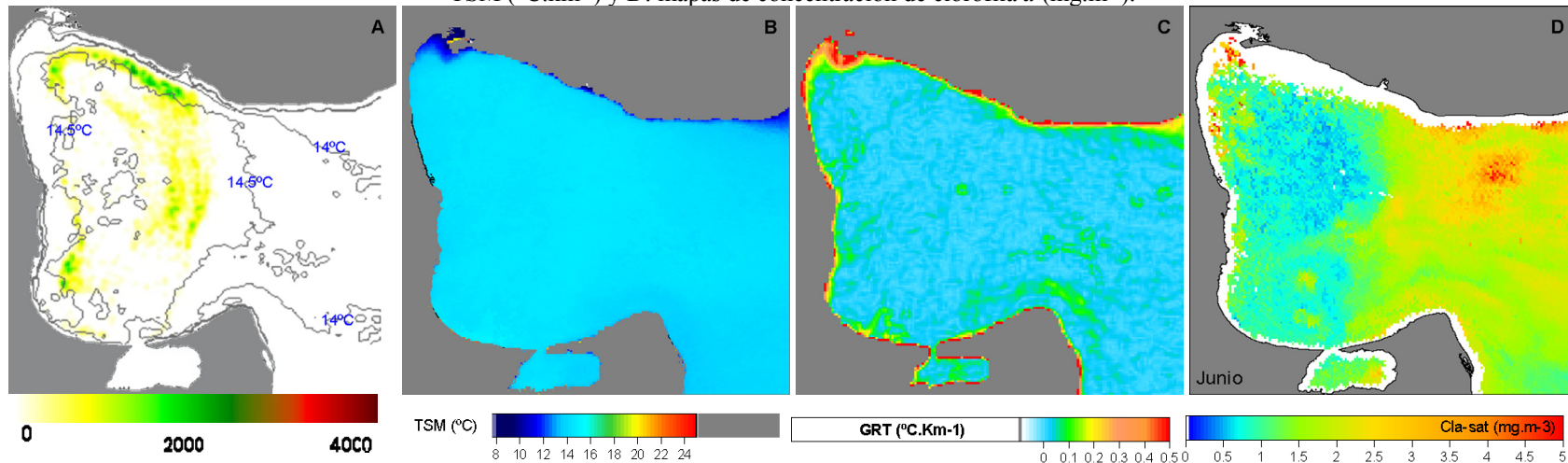


Figura 5.3. Junio. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera (CPUE_{corr.}.km⁻²), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM (°C); C: mapas de gradientes de TSM (°C.km⁻¹) y D: mapas de concentración de clorofila *a* (mg.m⁻³).

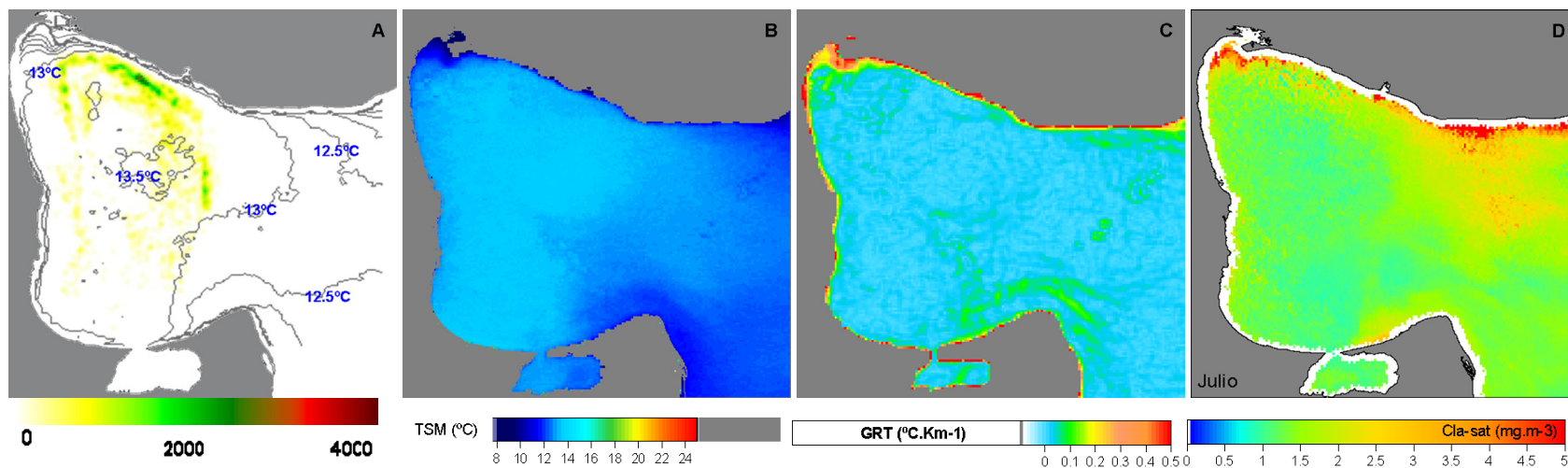


Figura 5.3. **Julio.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

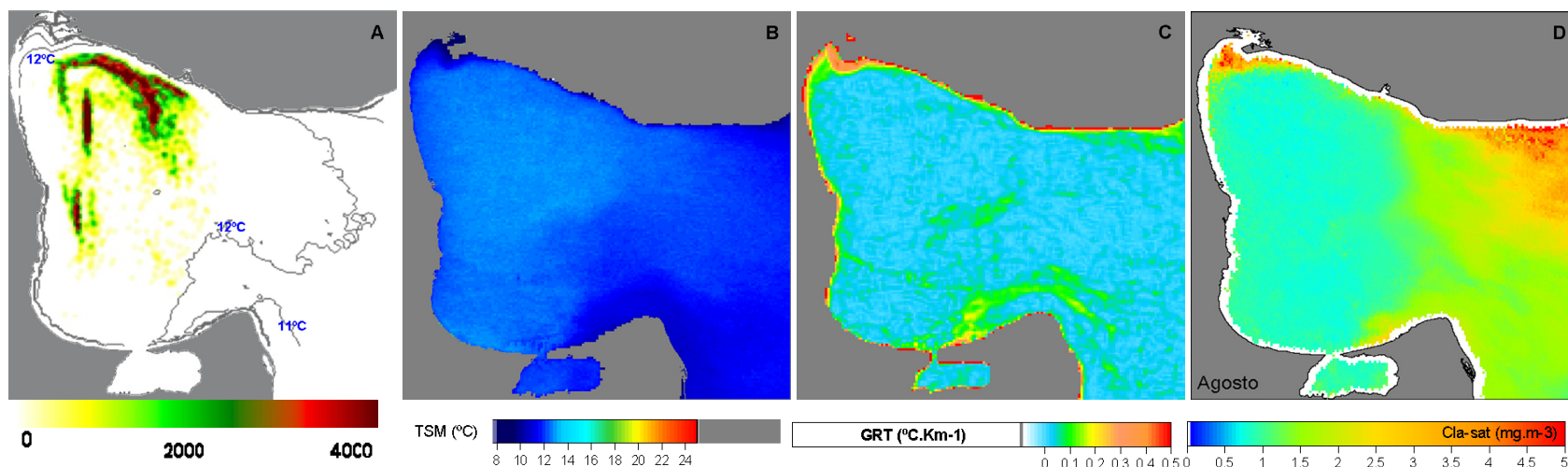


Figura 5.3. **Agosto.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila a ($mg \cdot m^{-3}$).

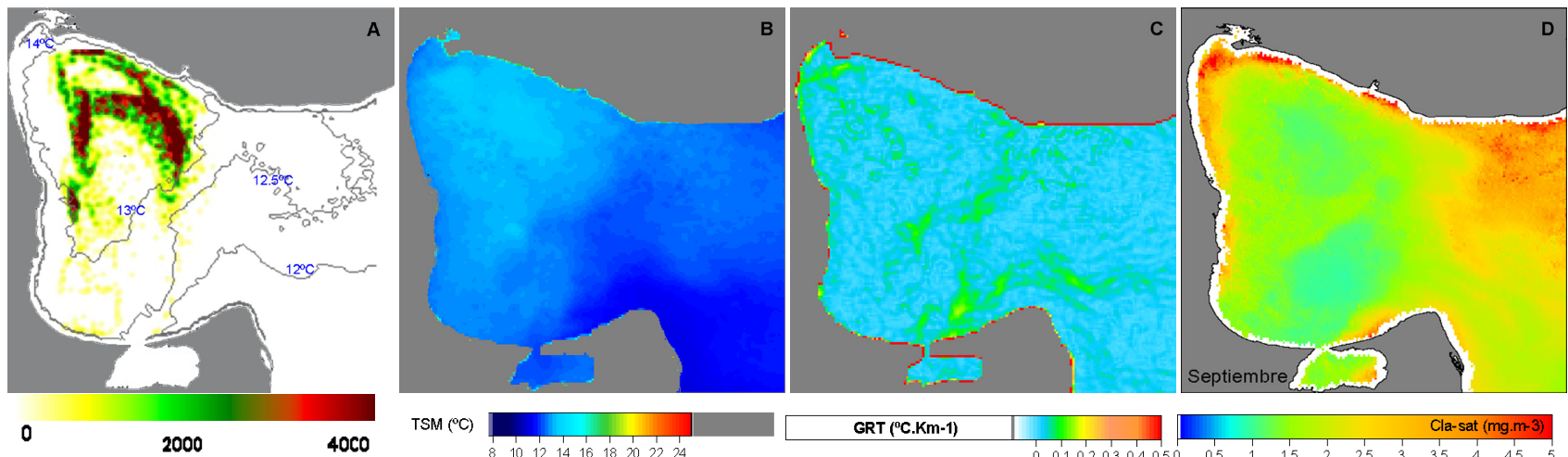


Figura 5.3. **Septiembre.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila *a* ($mg \cdot m^{-3}$).

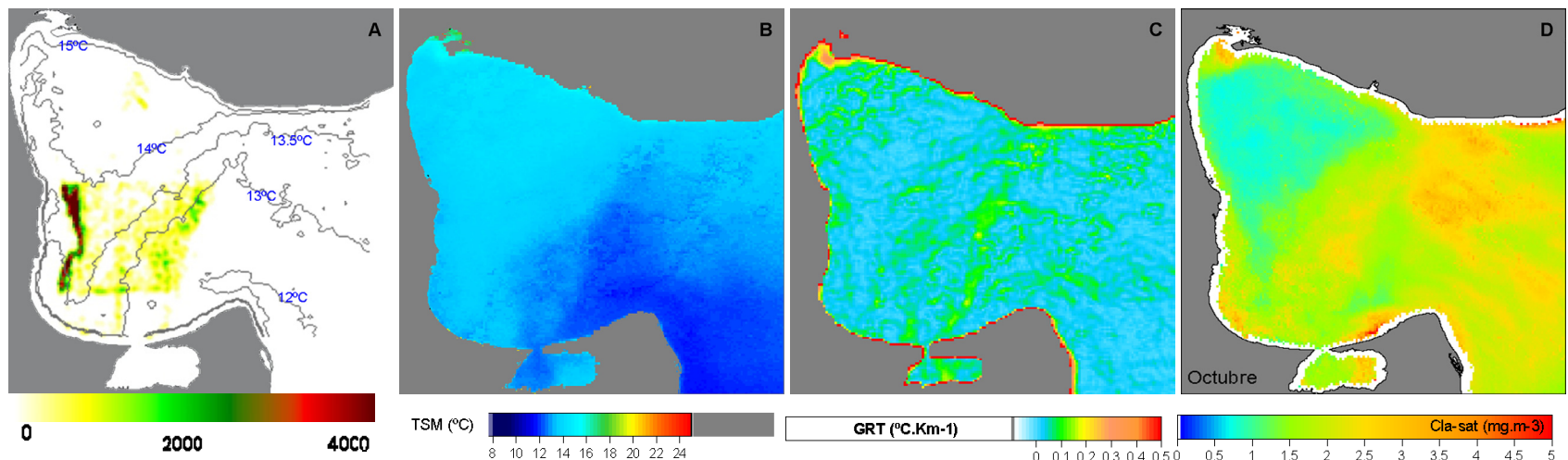


Figura 5.3. **Octubre.** A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera ($CPUE_{corr} \cdot km^{-2}$), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM ($^{\circ}C$); C: mapas de gradientes de TSM ($^{\circ}C \cdot km^{-2}$) y D: mapas de concentración de clorofila *a* ($mg \cdot m^{-3}$).

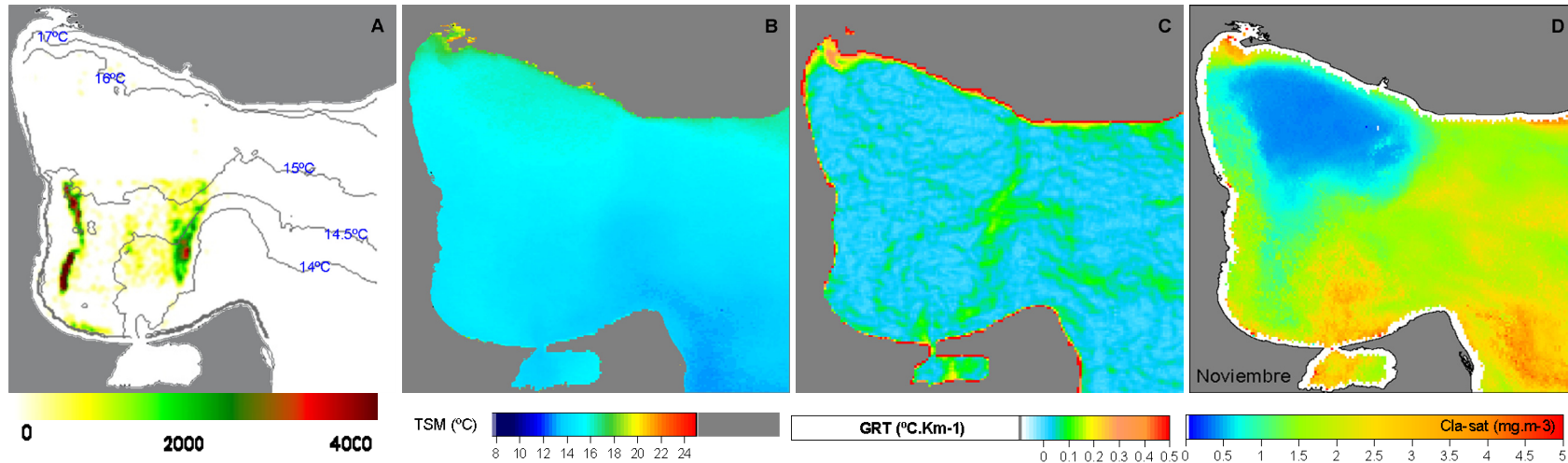


Figura 5.3. **Noviembre**. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera (CPUE_{corr.}.km⁻²), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM (°C); C: mapas de gradientes de TSM (°C.km⁻¹) y D: mapas de concentración de clorofila *a* (mg.m⁻³).

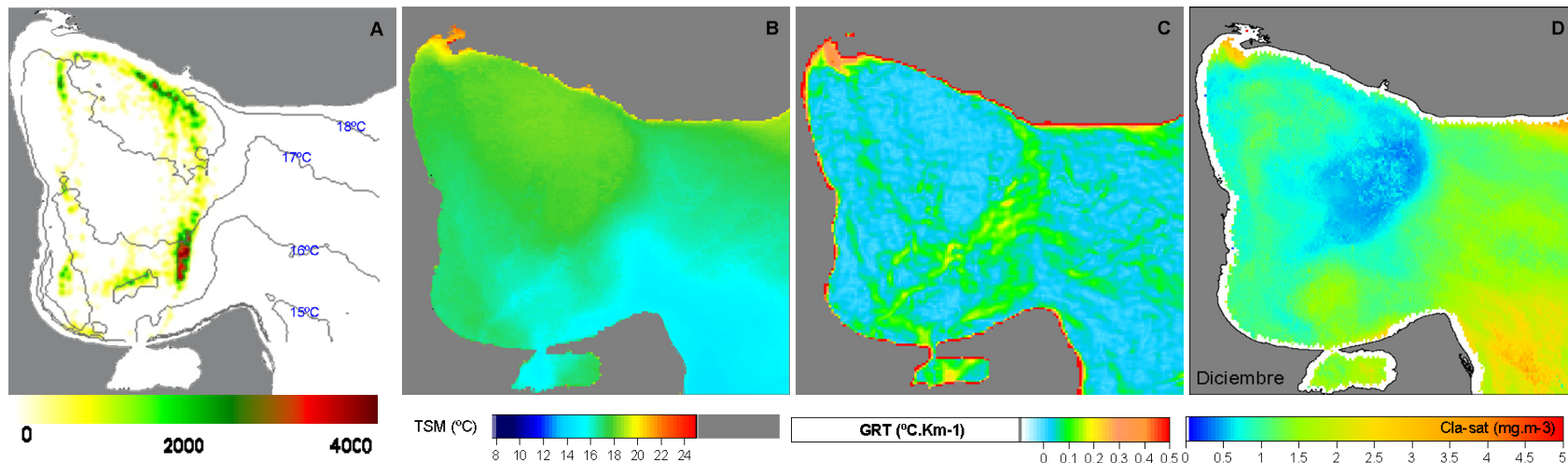


Figura 5.3. **Diciembre**. A: Mapas de densidad de registros de actividad pesquera (CPUE_{corr.}.km⁻²), B: mapas climatológicos (2004-2006) de TSM (°C); C: mapas de gradientes de TSM (°C.km⁻¹) y D: mapas de concentración de clorofila *a* (mg.m⁻³).

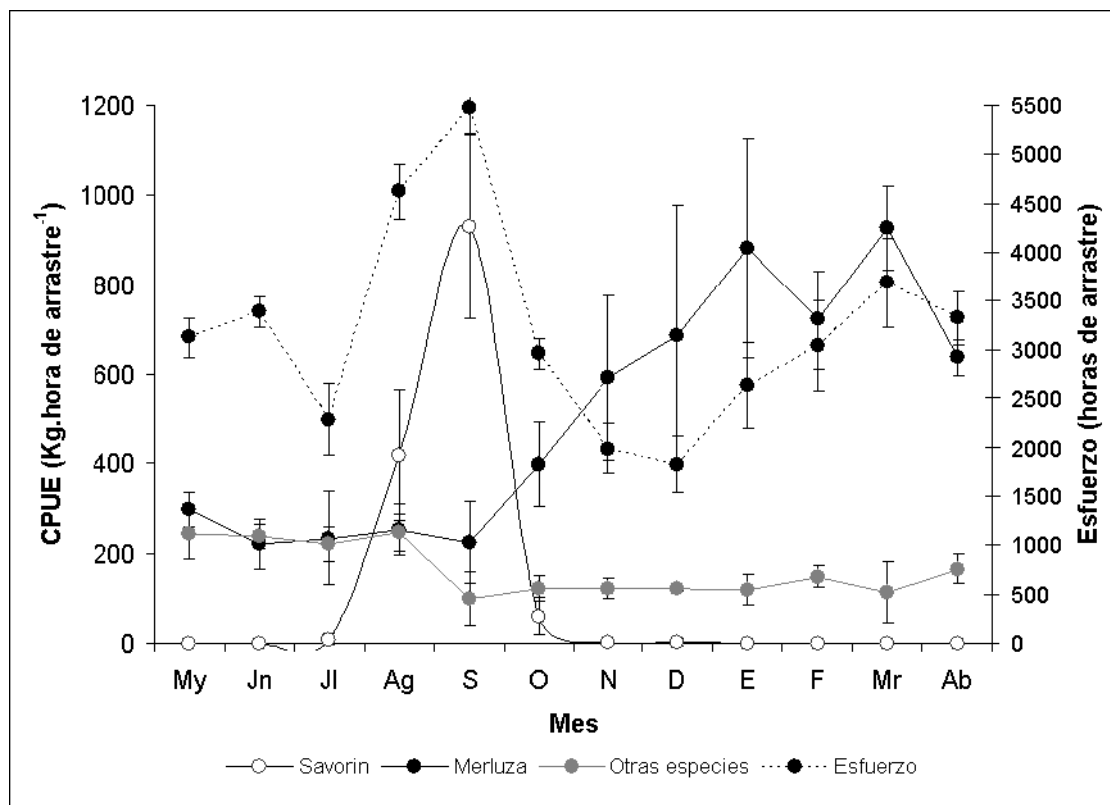


Figura 5.4: Progresión anual de del CPUE mensual (kg.h-arrastre⁻¹) de merluza, savorín y otras especies, agrupadas para los años 2004 a 2006.

Las hembras de merluza capturadas por la flota mostraron un ciclo de maduración gonadal creciente de enero a septiembre (principalmente se observaron los estadios 2 (premadurez) y 3 (maduración incipiente), hasta llegar a octubre y noviembre, cuando se producen los desoves (predominancia de estadios 4 y 5 de maduración avanzada y total) (Fig. 5.5). Hacia diciembre se observó un aumento de estadios de postdesove (estadio 6) o reversión ovárica (estadio 7) y la posterior recuperación (estadio 1) para comenzar el ciclo nuevamente (para una descripción detallada de los estadios gonadales ver Apéndice E).

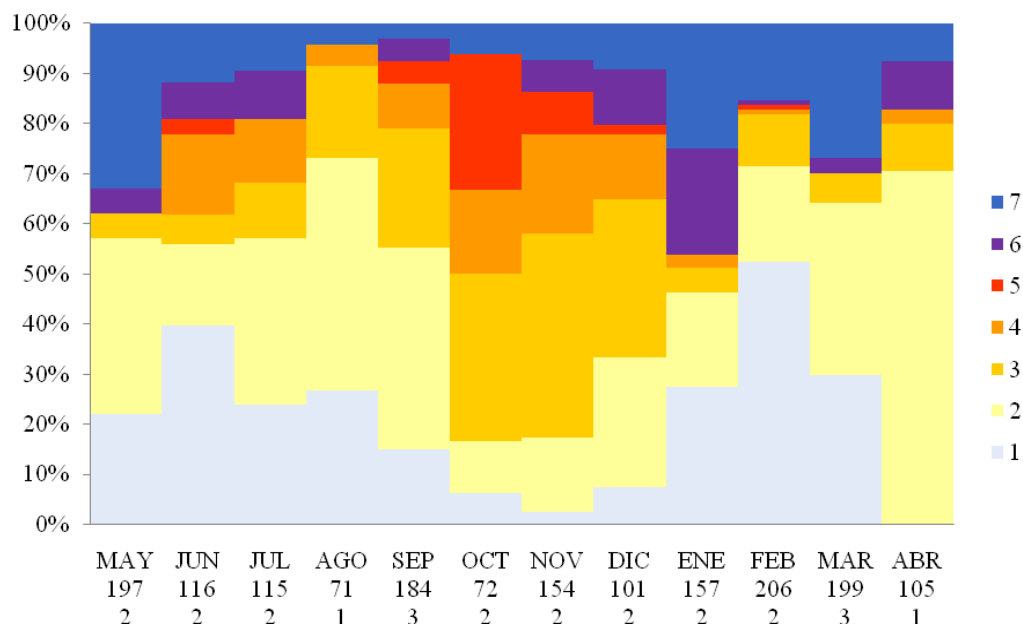


Figura 5.5: Estadios gonadales de hembras de merluza mayores a 27 cm de talla total, presentes en las capturas de la flota industrial. Las etiquetas del eje de la variable independiente indican el mes de captura, el número total de individuos muestreados y el número de lances de los que se obtuvieron, ya que la toma de datos fue discontinua entre 2004 y 2007 (adaptado de Ocampo-Reinaldo, 2010).

5.3.2 Evolución temporal de las capturas y variables ambientales.

Los máximos rendimientos (CPUE) de merluza ocurrieron en la estación cálida con TSM medias entre 16,33 °C y 17,66°C y concentraciones de Cla-sat relativamente bajas (0,9-1,2 mg.m⁻³) (Figura 5.6a). Es interesante notar que los máximos rendimientos de merluza comenzaron a registrarse a partir de noviembre luego de un máximo relativo de concentración de Cla-sat (1,4 mg.m⁻³). Se observó además una leve disminución de la CPUE en febrero volviendo a incrementarse en marzo en correspondencia con un leve incremento en la concentración de Cla-sat dentro la temporada de pesca (diciembre a abril). Los rendimientos disminuyeron y se observaron capturas dispersas espacialmente en el mes de abril junto con el comienzo del descenso de la TSM, el debilitamiento de la estructura frontal y concentraciones de Cla-sat intermedias (1,20 mg.m⁻³).

Los máximos rendimientos de savorín ocurrieron en los meses de agosto y setiembre en el área norte del Golfo. Esta temporada de pesca se desarrolló durante la estación fría del ciclo de TSM con temperaturas en el orden de los 11,0°C y concentraciones de Cla-sat en el orden de 1,0-1,3 mg.m⁻³ (Figura 5.6b). Nuevamente fue posible observar que las máximas capturas de savorín comenzaron luego de la ocurrencia de un máximo relativo de Cla-sat para esta área en los meses de julio (1,4 mg.m⁻³). En agosto se observó una disminución en la concentración de Cla-sat, seguido de un leve incremento

en setiembre ($1,3 \text{ mg.m}^{-3}$), en correspondencia con las máximas capturas de la especie blanco de esa temporada.

Estos resultados muestran que hay tres temporadas de pesca con características específicas (caracterizadas por diferente composición de especies), geográficas y ambientales particulares:

- la primera caracterizada por capturas predominantes de merluza en el área al sur de $41^{\circ}30'S$ entre los meses de noviembre y marzo;
- la segunda caracterizada por capturas de composición variable y en el orden de los $200 \text{ kg.h-arrastre}^{-1}$ (entre mayo y agosto) dispersas en toda el área del Golfo;
- la tercera caracterizada por capturas de savorín en la zona norte del Golfo en los meses de agosto y setiembre.

Se observó que estas temporadas de pesca ocurren en áreas específicas del Golfo (Figura 5.3):

- la primera temporada con altos valores de CPUE de merluza ($\sim 600 \text{ kg.h-arrastre}^{-1}$) se encontró al sur de $41^{\circ}30'S$;
- la segunda temporada se caracterizó por CPUE relativamente bajas ($200-400 \text{ kg.h-arrastre}^{-1}$) de merluza y otras especies acompañantes dispersas espacialmente;
- la tercera temporada se caracterizó por capturas relativamente altas de savorín ($400-800 \text{ kg.h-arrastre}^{-1}$) acompañadas de altos esfuerzos de búsqueda (1600 h^{-1}) de la especie blanco concentrados en la zona norte del Golfo.

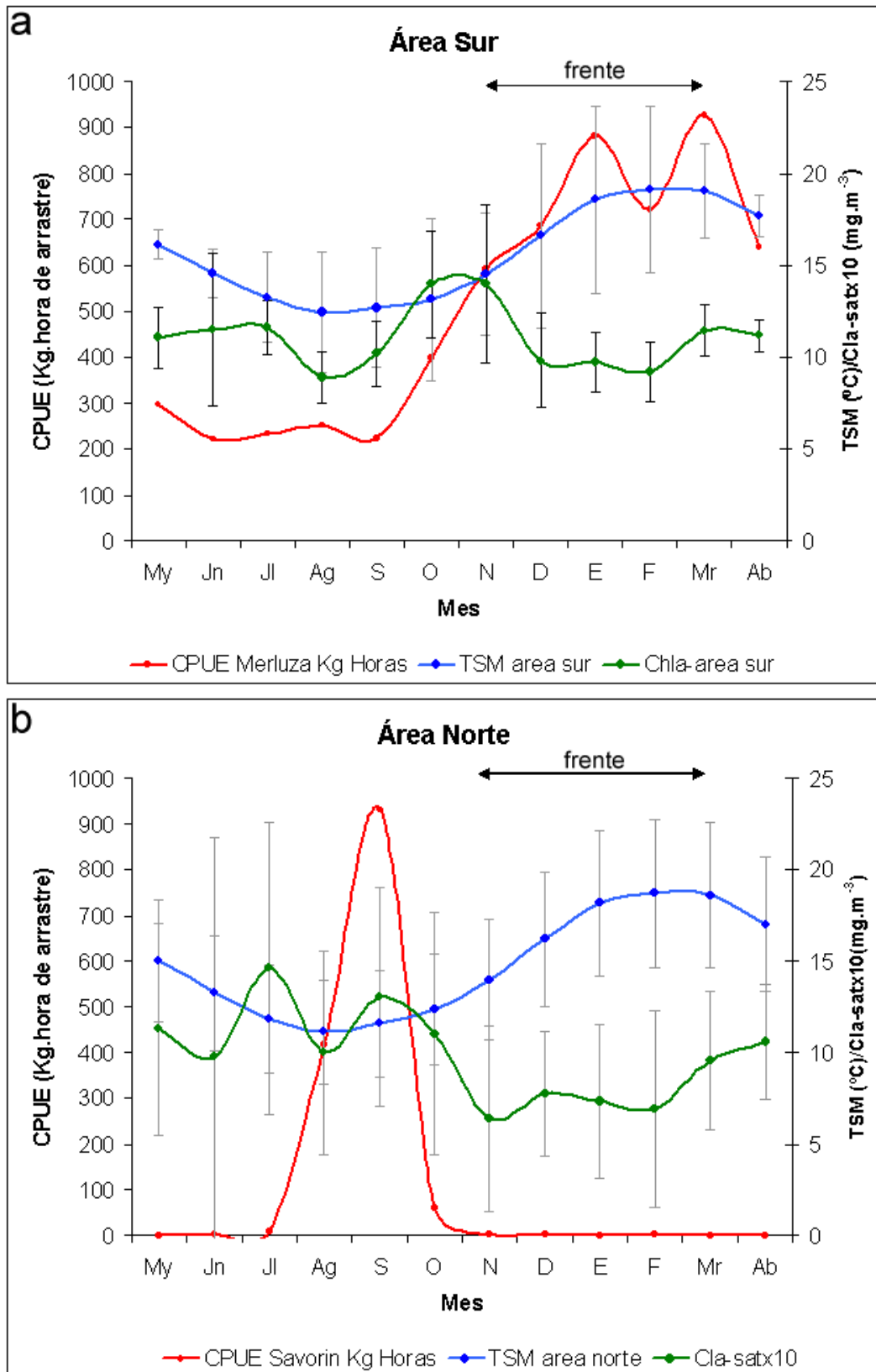


Figura 5.6: Evolución temporal de las capturas de merluza (a) y savorín (b) en relación a TSM y Cla-sat.

5.1 Discusión

Los mapas de densidad de rendimientos pesqueros mostraron que la distribución espacial, los rendimientos y la composición de las capturas de la flota de arrastre del GSM fueron variables a lo largo del ciclo anual. Sin embargo, dichas variables presentaron un patrón interanual relativamente estable para los tres años de datos analizados. La asociación espacial y temporal de estos resultados con los mapas de TSM, GRT y *Cla-sat* mostró que la flota concentró su actividad e incrementó las capturas de merluza en la zona donde se detectó el frente térmico (máximos gradientes de temperatura y *clorofila-a*), durante los meses de verano (diciembre a marzo). En los meses de invierno (mayo a julio), las distribuciones espaciales de los parámetros ambientales fueron relativamente uniformes, al mismo tiempo que se observó que la flota presentó mayor dispersión espacial y una disminución en las capturas de merluza.

Como se ha mencionado previamente las áreas norte y sur del GSM se diferencian por presentar diferentes condiciones ambientales. En este trabajo fue posible observar que la actividad pesquera en estas áreas también fue diferente: el área sur se caracterizó por altos rendimientos de merluza entre los meses de diciembre a marzo, mientras que el área norte se caracterizó por altos rendimientos de savorín en agosto y septiembre. Mientras que el *stock* de merluza es característico y propio del GSM, las causas de la aparición estacional del savorín son desconocidas, así como lo son las de su aparente desaparición hacia fines de septiembre (Osovnikar & Ocampo Reinaldo, 2005). No obstante, se ha determinado que la mayor parte de los ejemplares de savorín capturados durante los meses de agosto y setiembre se encuentra en estado de madurez avanzada, dando lugar a especular que la masiva presencia estacional de dicha especie en el Golfo estaría relacionada con un proceso migratorio de carácter reproductivo (González R., com. pers.²).

El análisis espacio temporal de las CPUE de las especies explotadas en el GSM y distribuciones superficiales de TSM y *Cla-sat* arrojaron resultados consistentes con el patrón de temporadas de pesca identificadas por Romero *et al.* (2008b) para el período 2002-2006. Romero *et al.* (2008b) caracterizaron la primera temporada (noviembre a abril) por desembarcos dominados por merluza (> 80%); la segunda temporada (mayo a julio) compartida por merluza (40% a 60%) y otras especies (sin registrarse savorín) y la tercera temporada (agosto y septiembre) definida por la fuerte presencia del savorín (>

² Dr. Raúl . C. González. Instituto de Biología Marina y Pesquera “Almirante Storni”. Universidad Nacional del Comahue. Güemes 1030, San Antonio Oeste, Río Negro, Argentina.

80%). Los meses de agosto y octubre fueron tipificados como “de transición” entre temporadas.

La virtual desaparición del savorín en las capturas en los meses subsiguientes (octubre en adelante) soporta la hipótesis de que se trata de un *stock* migratorio que arriba estacionalmente al Golfo. La posibilidad de que esta especie se mantenga dispersa en la columna de agua el resto del año, inaccesible a las redes de arrastre de fondo debería ser descartada, ya que las embarcaciones palangreras, que operan con espineles a media agua, no registran capturas de la especie en el periodo octubre-julio (Millán, 2007; Ocampo-Reinaldo, 2010). Es importante destacar que el savorín arriba al GSM en meses en los cuales la temperatura superficial media en el sector noroeste (principal área del Golfo en la cual se registran las mayores densidades) se encuentra entre los 10,0-13,0°C. Este rango de temperatura ha sido citado como óptimo para la eclosión de los huevos de esta especie (Cousseau & Perrotta, 2000), sugiriendo que las condiciones ambientales de la zona norte del GSM son las adecuadas para producir el desove de esta especie.

Las máximas capturas de merluza y la concentración de la actividad de la flota en la zona sur del Golfo sugieren que las más densas agregaciones estivales de esta especie se encontrarían asociadas a la zona frontal, mientras que la dispersión de la flota hacia fines del otoño se debería a la reducción en los rendimientos e indicaría que con el desvanecimiento de la estructura frontal se dispersaría también la especie blanco (Ocampo-Reinaldo, 2010). Las merluzas adultas se alimentan activamente luego del desove (Hart, 1946; *sensu* Podestá, 1989), por lo que la formación del frente favorecería la producción de alimento y los cardúmenes de merluza podrían estar alimentándose en esta área, recuperando la energía y reservas previamente consumidas (Ocampo-Reinaldo, 2010). Se pudo observar que las capturas máximas de merluza comenzaron a ocurrir en la zona sur a partir del mes de noviembre luego de un máximo relativo de concentración de clorofila-*a*. La Cla-sat provee una estimación de la biomasa fitoplanctónica, la cual es la base de la cadena alimentaria del océano. La relación entre la concentración de clorofila-*a* y una población específica de peces depende del número de vínculos entre el fitoplancton y los niveles tróficos más altos (IOCCG, 2008). En el caso de especies como anchoita y sardina, que se alimentan de fitoplancton en los primeros estadios de su ciclo de vida, la relación puede ser directa (Ware & Thomson, 2005), sin embargo para especies como la merluza (de tipo predador) cuya dieta es diferente en estadios más avanzados la relación no es directa. En el caso de la población

de merluza del GSM se ha observado que la presencia de crustáceos pelágicos (eufáusidos) fue una parte importante de la dieta de la merluza en todas las etapas de vida (Ocampo-Reinaldo, 2010), por lo cual se podría sugerir que la presencia de cardúmenes de merluza estaría condicionada a la distribución de estos organismos, los que en ese caso se alimentarían de fitoplancton en la zona frontal (Sabatini & Martos, 2002).

Si bien pueden no existir conexiones espaciales y temporales entre las medidas satelitales de la superficie del océano y especies demersales (IOCCG, 2008), en este trabajo se observó claramente que las máximas capturas de merluza ocurrieron en proximidades del frente térmico y de mayor variación en la concentración de clorofila-*a*.

Asimismo, se ha observado que el pico máximo de desove de merluza ocurre en el mes de octubre en la zona norte (Ocampo-Reinaldo, 2010), mes en el que comienza a formarse el frente térmico. Como se ha mencionado en capítulos previos, en verano, el sector noroeste del Golfo se encuentra aislado de la plataforma continental argentina por la estructura frontal, en tanto la presencia de un giro ciclónico (Piola & Scasso, 1998, Tonini, 2010) de unos 70 km de diámetro centrado en la mitad norte del Golfo, determina las condiciones de su circulación general para esa época ambos fenómenos oceanográficos (el frente y el giro) contribuirían a los procesos de retención de partículas en suspensión en el dominio pelágico, entre la que se encuentran los estadios tempranos de desarrollo de la merluza y los organismos que conforman los eslabones inferiores de la cadena trófica marina, los cuales constituyen los alimentos principales de larvas y postlarvas de peces. Experimentos simulados con modelos hidrodinámicos han mostrado que partículas lanzadas en la zona norte del GSM durante los meses previos a la formación del frente, son atrapadas a partir de octubre por la circulación ciclónica y retenidas en su mayor parte (>40%) por más de 8 meses (250 días) en la zona del giro (Tonini, 2010). Estos resultados muestran con contundencia la influencia potencial que la acción combinada del giro ciclónico y el frente térmico producirían sobre el proceso de desove y retención de plancton (Tonini, 2010). De este modo las características de la zona noroeste del GSM sustentarían la hipótesis de áreas de retención larval (Illes & Sinclair, 1982), las cuales se caracterizan por presentar giros y se encuentran delimitadas por áreas de intensa mezcla vertical, como es el caso de la entrada del Golfo que además presenta altos niveles de disipación de energía mareal (Palma *et al.*, 2004; Tonini 2010). En este sentido es interesante citar que Vargas *et al.*

(1997) reportaron la existencia de áreas de retención larval para *Merluccius gayi* durante la época de desove (i.e septiembre) en la zona central de Chile (36°22'-37°10' S). Estos autores postulan que la baja intensidad del transporte de Ekman durante esta época del año conduciría a la estratificación de los primeros 20-30 m de la columna de agua y a un grado de estabilidad que contribuye a la formación y mantención de partículas de alimento. En coincidencia, el área noroeste del GSM también se caracteriza por la estratificación de la columna de agua desde fines de octubre como se ha visto en los Capítulos 3.2 y 4

La posibilidad de contar con el Sistema de Monitoreo Pesquero y Oceanográfico del IBMP Alte. Storni, que proveyó datos precisos de posición, rumbo, velocidad, capturas y esfuerzo de pesca de los buques de la flota industrial, permitió el análisis simultáneo con las imágenes satelitales de TSM y *Cla-sat* de alta resolución espacial y temporal. La comparación entre los datos ambientales y pesqueros permitió analizar cómo las variables ambientales afectan la distribución y abundancia de los recursos de interés pesquero en el GSM. De este modo se infiere que el frente térmico del GSM constituiría un área de agregación postdesove de los cardúmenes de merluza.

En diversos países, los datos satelitales han sido utilizados para incrementar la eficiencia en el esfuerzo pesquero (IOCCG, 2008), identificando procesos oceanográficos como frentes, meandros, giros y áreas de surgencia (Laurs *et al.*, 1984; Fiedler & Bernard, 1987; Chen *et al.*, 2005) y desarrollando metodologías para identificar probables zonas de pesca (*Probable fishing zones*, en inglés) (IOCCG, 2008), ya que generalmente los gradientes térmicos o de color del mar son sitios con alta productividad biológica.

En este capítulo en particular se ha mostrado que la detección de gradientes térmicos reveló y confirmó la presencia del frente en el GSM, cuya formación durante los meses de primavera y verano generaría condiciones ambientales adecuadas para la agregación de los cardúmenes de merluza. Sin embargo las imágenes de TSM no son siempre adecuadas para la identificación de potenciales zonas de pesca. El calentamiento de la superficie del mar, particularmente en aguas ecuatoriales y tropicales durante el verano, da lugar a una fuerte estratificación de la columna de agua, evitando el arribo de aguas frías ricas en nutrientes desde las capas más profundas a la superficie, lo que inhibe la aparición de gradientes de TSM en las imágenes de satélite. Otro problema con la detección de estructuras térmicas es que la superficie de las estructuras frontales puede ser perturbada por los vientos predominantes de superficie o incluso corrientes de

moderada magnitud (Dwivedi *et al.*, 2005). A diferencia de los sensores térmicos, los sensores de color del océano, pueden detectar señales sub-superficiales debido a la penetración de la radiación visible hasta una profundidad de atenuación (normalmente de metros a decenas de metros) y por lo tanto presenta ventajas sobre el enfoque basado en TSM para aplicaciones pesqueras (IOCCG, 2000). Una de las ventajas de la capacidad de penetración en el agua de la radiación visible, es que proporciona la capacidad para predecir la ocurrencia de características oceánicas, como frentes divergentes y remolinos.

Los gradientes térmicos identificados en el GSM junto con imágenes de *Cla-sat* podrían ser utilizados como indicadores de potenciales zonas de pesca. A diferencia de la TSM, las variaciones espaciales detectadas en las imágenes de concentración de clorofila-*a* constituyen verdaderos frentes biológicos y por tanto, de mayor relevancia en la exploración para la búsqueda de cardúmenes de peces.

El análisis espacio-temporal de distribución de la flota en función de la TSM y *Cla-sat* hubiera sido difícil de abordar mediante datos obtenidos en las tradicionales campañas oceanográficas y pesqueras debido a su limitada resolución espacial y temporal. La utilización de información satelital tanto ambiental (TSM y clorofila-*a*) como pesquera (SiMPO) ha permitido caracterizar el comportamiento de la flota pesquera en función de las características ambientales estacionales del GSM.

En investigaciones futuras sería interesante realizar análisis de comportamiento de la flota del GSM en escalas temporales más cortas (por ejemplo días), con el objetivo de observar cómo responde la flota a la formación de estructuras oceanográficas como surgencias, filamentos y giros observadas principalmente en imágenes de color en cortos períodos de tiempo. Asimismo, para corroborar la hipótesis de que el frente constituye un área de agregación de cardúmenes sería relevante realizar campañas específicas con métodos tradicionales (área barrida) o prospecciones hidroacústicas, incluyendo muestreos biológicos de edades, dieta y estadios reproductivos, como así también observaciones similares en otras áreas del Golfo de manera simultánea.

El análisis de series temporales de imágenes satelitales y de registros de capturas de mayor extensión a las utilizadas en la presente tesis (más de 10 años) permitiría analizar la correspondencia entre anomalías de TSM y *Cla-sat* y la producción pesquera.

Este trabajo constituye uno de los primeros estudios que relaciona la distribución espacio-temporal de la flota pesquera en relación a variables ambientales en el GSM, sin embargo se debe tener extremo cuidado al inferir o especular sobre los procesos

ecosistémicos que ocurren dentro del GSM basándose en estudios descriptivos de patrones ambientales.

Los procesos ecológicos que subyacen a las relaciones observadas entre el ecosistema físico y la dinámica poblacional de los principales recursos pesqueros del GSM deberán ser profundizados mediante la obtención de información sobre la distribución y abundancia de especies de niveles tróficos intermedios, mediciones de productividad primaria y consumo en la zona del sistema frontal. Asimismo el establecimiento del momento de desove y reclutamiento de las especies pesqueras y su relación con el momento y magnitud de florecimientos fitoplancónicos y anomalías de TSM podría ayudar a explicar fluctuaciones interanuales en la actividad pesquera.

CONCLUSIONES GENERALES

Esta tesis ha permitido el conocimiento en tiempo real de las condiciones oceanográficas de superficie del golfo San Matías, se han identificado áreas y procesos físicos clave para el desarrollo de procesos biológicos, se ha analizado la interrelación existente con la estructura vertical del mismo a través de campañas oceanográficas y se ha observado la coincidencia con los patrones de distribución de especies de interés pesquero a la luz del sistema de seguimiento satelital de la pesquería regional. Consideramos que es la suma de esta información la que contribuirá a la implementación de un Plan de Manejo Ecosistémico Pesquero (FMP) para el golfo San Matías.

Entre las conclusiones más importantes de este trabajo, se pueden citar:

➤ Los ciclos de temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila-*a* (Cla-sat), obtenidos mediante satélites, para toda el área del GSM siguen patrones característicos de aguas subtropicales.

➤ La distribución espacial de la temperatura superficial media en el área de estudio mostró la influencia que tiene la circulación en el área sur del GSM, en donde la advección horizontal es mayor, mientras que el área noroeste del GSM se encuentra relativamente aislada de la plataforma continental.

➤ Las distribuciones superficiales mensuales de temperatura y clorofila-*a* muestran que en primavera y verano las áreas noroeste y sudeste se encuentran bien diferenciadas, mientras que en otoño e invierno las distribuciones de estas variables son prácticamente homogéneas en toda el área del Golfo.

➤ El área noroeste presenta mayor amplitud térmica que el área sudeste. Del mismo modo el ciclo de clorofila-*a* es diferente entre ambas áreas: el área noroeste presenta un ciclo de clorofila-*a* de menor amplitud con valores máximos en otoño y primavera; mientras que el área sur-sudeste presenta un ciclo de mayor amplitud con concentraciones relativamente altas desde la primavera al otoño.

➤ La distribución espacial de los promedios de clorofila-*a*, mostró concentraciones relativamente altas y estables en la boca del GSM, asociadas a las características batimétricas e importantes índices de disipación de energía mareal en este sector que generaran resuspensión de nutrientes y sedimentos.

CONCLUSIONES GENERALES

➤ Los perfiles verticales de temperatura y de concentración de nutrientes evidenciaron la mayor tendencia a la estratificación que presenta el área noroeste en los meses de primavera y verano. El ciclo de clorofila-*a* en presentó un máximo de concentración en primavera y otro en otoño, indicando que sería característico de aguas estratificadas.

➤ En el área sur-sudeste, los perfiles verticales mostraron que este sector permanece relativamente homogéneo durante todo el año. El ciclo de clorofila-*a* responde a aguas que permanecen relativamente mezcladas durante todo el año; es decir, desde la primavera hasta el otoño se mantienen concentraciones de clorofila-*a* relativamente más altas que en invierno.

➤ La resolución espacial y temporal de la información satelital permitió describir las características térmicas y de concentración de clorofila-*a* de sectores particulares del Golfo, como ser la bahía San Antonio, el sector sudoeste (Puerto Lobos) y los sectores norte y sur de la entrada del Golfo. Los datos adquiridos podrán ser relacionados con las características biológicas de especies bentónicas de interés pesquero que se localizan en algunos de estos sectores.

➤ La resolución temporal y espacial de los sensores AVHRR y SeaWiFS permitió identificar, localizar y cuantificar la intensidad del sistema frontal del GSM en términos de gradientes de temperatura y concentración de clorofila-*a*. Los perfiles verticales calculados mediante datos oceanográficos de las mismas variables y de la concentración de nutrientes permitieron caracterizar la estructura vertical de la columna de agua en la zona frontal y confirmar la diversidad de condiciones oceanográficas que pueden observarse en el Golfo entre primavera y otoño.

➤ El sistema frontal presenta máximo desarrollo e intensidad en primavera y verano, aislando el área noroeste del GSM de la Plataforma Continental Argentina, al mismo tiempo que constituye el límite entre esta área y el sector sur-sudeste del GSM en la misma época.

➤ De acuerdo a las características hasta aquí mencionadas, los factores que modifican la estabilidad de la columna de agua y la disponibilidad de nutrientes y que en consecuencia, influyen en la capacidad productiva del GSM fueron: 1) la formación del sistema frontal en la estación estival, 2) el ingreso de aguas desde la Plataforma Continental por el sur de la boca del Golfo con concentraciones relativamente altas de

CONCLUSIONES GENERALES

nutrientes y 3) la formación y ruptura de la termoclina estacional en primavera e invierno, respectivamente, en el área noroeste del GSM.

➤ La comparación entre datos de temperatura y clorofila-*a* de superficie obtenidos en campañas oceanográficas, con los respectivos productos obtenidos mediante sensoramiento remoto, ha permitido confirmar que el uso de los campos medios mensuales obtenidos mediante esta última técnica es útil para describir la variabilidad anual e inter-anual de estos parámetros y del frente presente en el GSM.

➤ Sin embargo, en el caso de las estimaciones satelitales de concentración de clorofila-*a*, sería necesario realizar estudios *in-situ* específicos, incorporando datos bio-ópticos y de composición específica de las poblaciones fitoplanctónicas características del GSM, para determinar si estas variables afectan la estimación de *Chl-a*-sat.

➤ La comparación entre datos de concentración de clorofila-*a* aportados por los algoritmos de los sensores SeaWiFS (OC4v4) y MODIS (OC3M) ha demostrado una alta correlación entre ambas fuentes de datos, indicando que para el GSM, la serie temporal de clorofila-*a* obtenida mediante el sensor SeaWiFS puede ser continuada con datos del sensor MODIS.

➤ El análisis de la distribución espacio-temporal de la flota pesquera demostró que ésta concentra su actividad en los límites del sistema frontal en los meses de diciembre a marzo, obteniendo rendimientos relativamente altos de merluza con respecto a otras áreas del GSM.

➤ El análisis de la composición específica de las capturas en relación a las características ambientales mostró que existen tres temporadas de pesca en el GSM, la primera caracterizada por capturas máximas de merluza en primavera-verano en el sector sur-sudeste del GSM, la segunda, en los meses de otoño, caracterizada por bajas capturas de diferentes especies en toda el área del Golfo y la tercera por capturas máximas de savorín a fines de invierno en el área noroeste del GSM.

➤ La ausencia de una estructura de masas de agua diferentes en los meses fríos, parece no promover los agrupamientos de especies, lo que se ve reflejado en los menores rendimientos, dispersión espacial de la flota y una composición específica de capturas más variable.

➤ La información ambiental obtenida mediante sensores remotos de alta resolución espacial y temporal junto con datos físicos y químicos de campañas oceanográficas y

CONCLUSIONES GENERALES

registros satelitales de posición y velocidad de los barcos pesqueros, permite concluir que la estacionalidad del frente térmico es uno de los principales factores que condiciona la pesquería del GSM, al afectar la distribución de especies de interés pesquero/comercial. Sería posible en consecuencia, evaluar alternativas de manejo que contemplen vedas móviles en relación al frente en determinado momento del año a fin de contribuir a una explotación sustentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acha E. M., H. W. Mianzan, R. A. Guerrero, M. Favero & J. Bava, 2004: Marine front at the continental shelves of austral South America Physical and ecological processes. *Journal of Marine Systems* 44: 83-105.
- Akaprahamyan R., 1991: Estudio de la circulación inducida por el viento en el Golfo San Matías aplicando el modelo COX/CIMA. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- Aminot A., J. Guillaud, & R. Kkrouel, 1998. Apports de nutrimente et developpement phytoplanktonique en baie de Seine. *Oceanologica Acta* 21 : 923-935
- Amoroso R. & D. A. Gagliardini, 2010: Inferring complex hidrographic processes using remote-sensed images: turbulent fluxes in the patagonian gulfs and implication for scallop metapopulation dynamics. *Journal of Coastal Research*, 2: 243-254.
- Amoroso R., 2004: Heterogeneidad especial en la dinámica de la metapoblación de vieira tehuelche (*Aequipecten tehuelchus*) del golfo San José. Chubut. Argentina. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Tesis de Licenciatura, 55p.
- Amoroso R., A. M. Parma, J. M. Orensanz, D. A. Gagliardini 2010 Medium resolution remote sensing in the coastal zone: a frame for small-scale fisheries assessment in Patagonia (Argentina). *ICES Journal of Marine Science*. doi: 10.1093/icesjms/fsq162
- Anderson D. M., 1997. Bloom dynamics of toxic *Alexandrium* species in the northeastern U.S., *Limnol. Oceanogr.*, 42: 1009-1022.
- Anding D., & R. Kauth, 1970: Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sens. Environ.* 1: 217-220.
- Angelescu V. & L. B. Prenski, 1987. Ecología trófica de la merluza común del Mar Argentino (Merlucciidae, *Merluccius hubbsi*). Parte 2. Dinámica de la alimentación analizada sobre la base de las condiciones ambientales, la estructura y las evaluaciones de los efectivos en su área de distribución. Contribución INIDEP 561. Mar del Plata, Argentina.
- Backhaus J.O., 1985: A three-dimensional model for simulation of shelf sea dynamics. *Deutsche Hydrogr. Z.*, 38(4): 165-187.
- Bailey S. & P. J. Werdell, 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of environment* 102: 12-23.
- Bailey S.W., C. R. McClain, P. J. Werdell & B. D. Schieber, 2000: Normalized water-leaving radiance and chlorophyll-a match-up analyses. In *SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series, Volume 10: SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 2*. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 10, S.B. Hooker and E.R. Firestone (Eds), pp. 45-52. (Greenbelt, MD: NASA/Goddard Space Flight Center).
- Baith K., R. Lindsay, G. Fu, C. R. McClain, 2000: SeaDAS: data analysis system for ocean color satellite sensors. *Eos*. 82(18):202.
- Bakun A. & R. H. Parrish, 1991: Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the anchovy (*Engraulis anchoita*) of the southwestern Atlantic, *ICES J. Mar. Sci.*, 48: 343-361.
- Ballance L., M. Pitman, S. B. Reilly, 1997. Seabird community structure along a productivity gradient: Importance of competition and energetic constraint. *Ecology* 78:1502-1518.
- Bava J., 2004: Metodologías de procesamiento de imágenes NOAA-AVHRR y su utilización en aplicaciones oceanográficas y biológico-pesqueras en el Atlántico

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Sudoccidental. Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 142p.
- Bava J., D. A. Gagliardini, A. I. Dogliotti, C. A. Lasta, 2002: Annual distribution and variability of remotely sensed sea surface temperature fronts in the Southwestern Atlantic Ocean. 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 8-12 de Abril, 2002, Buenos Aires, Argentina.
- Behrenfeld M. J. & P. G. Falkowski, 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42(1): 1-20.
- Behrenfeld M., W. Esaias, K. Turpie, 2002. Assessment of Primary Production at the Global Scale. *Journal of Geophysical Research* 107(C12): 4107-4119.
- Behrenfeld M., P. Falkowski, 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1-20.
- Bernstein R. L., 1982: Sea surface temperature estimation using the NOAA-6 advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research* 87: 9455- 9465.
- Beron-Vera F.J., P. Ripa, 2000. Three-dimensional aspect of the seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 105(C5): 11441-11457.
- Bertolotti M. I., N. E. Brunetti, J. I. Carreto, L. B. Prenzki, R. P. Sanchez, 1996. Influence of shelf-break fronts on the shellfish and fish stocks off Argentina. *ICES CM-1996/S:41*. 11p.
- Bezzi S., M. Cañete, M. Pérez, M. Renzi, & H. Lassen, 1994. Report of the INIDEP working group on assessment of hake (*Merluccius hubbsi*) north of 48 °S (Southwest Atlantic Ocean). INIDEP Documento Científico 3. Mar del Plata, Argentina.
- Bianchi A. A., & S. Garzoli, 1997: Variability and motion of the Brazil-Malvinas Front. *Geoacta* 22: 74-90.
- Bianchi A. A., L. Bianucchi, A. R. Piola, D. Ruiz Pino, I. Schloss, A. Posisson & C-F. Balestrini, 2005: Vertical stratification and air-sea CO₂ fluxes in the Patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research*, 110, c07003.
- Bonilla Ruíz J., Fermín, J. S. & Castro González, 1998. Análisis Estadístico Multivariante aplicado al grado textural y a los aspectos geoquímicos de los sedimentos del ecosistema marino costero de José, Estado Anzoátequi, Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela, Univ. Oriente*, 37 (1 y 2): 53-62.
- Brandhorst W. & J. P. Castello, 1971. Evaluación de los recursos de anchoita (*Engraulis Anchoita*) frente a la Argentina y Uruguay I: Las condiciones oceanográficas, sinópsis del conocimiento actual sobre la anchoita y el plan para su evaluación, *Proy. Des. Pesq. Ser. Inf. Tec.* 29, 63 pp.
- Bricaud A., M. Babin, A. Morel & H. Claustre, 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research* 100 (7): 13321-13332.
- Brown C. W. & G. P. Podesta, 1997: Remote sensing of coccolithophore blooms in the western Atlantic Ocean. *Remote Sensing of Environment* 60: 83-91.
- Bryan, K., 1969: A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J. Comput. Physics*, 4: 347-376.
- Caimi E. A., 1979: La energía radiante en la atmósfera. Cuadernos de EUDEBA. Buenos Aires. AR. 1979. 67 p.
- Campbell J.W., 1995: The lognormal distribution as a model for bio-optical variability in the sea. *Journal of Geophysical Research* 100 (C7): 13237-13254.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Carreto J. I. C. A. Verona, A. B. Casal & M. A. Laborde, 1974: Fitoplancton, pigmentos y condiciones ecológicas del Golfo San Matías: II, Noviembre de 1971. Anal. Inf. Com. Inv. Cient. (La Plata): 49-76.
- Carreto J. I. & C. A. Verona, 1974: Fitoplancton, pigmentos y condiciones ecológicas del Golfo San Matías: I, Marzo de 1971. Anal. Inf. Com. Inv. Cient. (La Plata): 1-20.
- Carreto J. I., 1989: Mareas Rojas. Ciencia Hoy, Vol. 1, 4: 28-36.
- Carreto J. I., C. E. El Busto, H. Sancho, M. Carignan, D. Cucchi Colleoni, S. De Marco, 1995. An exploratory analysis of the Mar del Plata shellfish toxicity area (1980–1990). In Smayda, T. J. & Shimizu, Y (eds), Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea. Elsevier Science Amsterdam, pp. 377–382.
- Carreto J. I., H. R. Benavides, R. M. Negri, P. D. Glorioso, 1986. Toxic red-tide in the Argentine Sea. Phytoplankton distribution and survival of the toxic dinoflagellate *Gonyaulax excavate* in a frontal area, J. Plankton Res., 8: 15– 28.
- Carreto J.I., M. O. Carignan, N. G. Montoya, D. A. Cuchi Colleoni, 2006. Dinámica del fitoplancton en el sistema frontal del golfo San Jorge. En VI Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar y XIV Coloquio de Oceanografía, 4-8 Diciembre 2006, Puerto Madryn, Argentina.
- Charpy L.J., C.J. Charpy-Roubaud & M. J. Pizarro, 1980: La production primaire des aux du Golfe San José (Péninsule Valdés, Argentine). I. Parametres physiques et teneurs en sels miéraux. Hidrobiologia, 75 (3): 209-214.
- Charpy-Roubeaud C. J., L. J. Charpy, S. Maestrini & M. Pizarro, 1978: Etude de la production primaire des eaux des golfes Nord-Patagoniques (Argentine). Estimation de la fertilité potentielle au moyen de test biologiques. C.R. ACD. SC. Paris, Serie D, Tomo 287: 1031 –1034.
- Chen I.-C., P.-F. Lee & W.-N. Tzeng, 2005. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors. Fish. Oceanogr. 14: 71-80.
- Ciocco N. F., M. L. Lasta, M. Narvarte, C. Bremec, E. Bogazzi, J. Valero & J. M. Orenzan, 2006. Argentina. In: Shumway, S. & Parsons, G.J. (eds.), Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture, 2nd edition. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, pp. 1251-1292.
- Cole J. F. T. & J. McGlade, 1998. Temporal and Spatial Patterning of Sea Surface Temperature in the Northern Benguela Upwelling system: Possible Enviromental Indicators of Clupeoid Production. In: Benguela Dynamics. Vol19 (Eds: Pillar. SC Moloney. CL Payne. AIL Shillington) S Afr J Mar Sci 19:143-157.
- Cosseau B., R. Perrotta, 2000. Peces Marinos de Argentina. Biología, distribución, pesca. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero. Mar del Plata Argentina. [cd].
- Cousseau M. B., L. Forciniti, G. Ubaldi, 1993. Species of the Genus *Serirolella* (Centrolophidae) in Southwest Atlantic waters. Japan J. Ichthyol. 40 (2): 183-187.
- Cousseau, M. B. & Perrotta, R.G. 2004. Peces Marinos de Argentina. Biología, distribución, pesca. Publicaciones Especiales INIDEP. Mar del Plata, Argentina.
- Cox M. D., 1984. A primitive equation three-dimensional mode of the ocean. Report, GFDL Oceano Group, NOAA, Princeton Univ., Princeton, NJ.
- Dato C. V., M. F. Villarino & G.R. Cañete. 2000. El descarte de merluza (*Merluccius hubbsi*) en el Mar Argentino. Periodo 1990-1997. Informe Técnico 7 INIDEP. Mar del Plata, Argentina.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Di Giácomo, E. E. & M. R. Perier. 1993: Abundancia, estructura poblacional y zona de desove de la merluza, *Merluccius hubbsi*, en el golfo San Matías, Argentina. Frente Marítimo 12, Sec. A: 47-52.
- Di Giácomo, E., J. Calvo, M. R. Perier & E. R. Morriconi, 1993. Spawning aggregations of *Merluccius hubbsi*, in patagonian waters: evidence for a single stock? Fisheries Research 16: 9-16.
- Dogliotti A. I., 2007: Estimación de la biomasa fitoplanctónica mediante el sensoramiento remoto del color del mar y datos de campo en la Plataforma Patagónica. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 142p.
- Dogliotti A. I., I. R. Shloss, G. O. Almandoz & D. A. Gagliardini, 2009: Evaluation of SeaWiFS and MODIS chlorophyll-a products in the Argentinean Patagonian Continental Shelf (38°S-55°S). International Journal of Remote Sensing 30(1): 251-273.
- Duysens L. M. N., 1956. The flattening effect of the absorption spectra of suspensions as compared to that of solutions. Biochimica et Biophysica Acta, 19:1-12
- Dwivedi R.M., H. U. Solanki, S. Nayak, D. Gulati & V. S. Sonvanshi, 2005. Exploration of fishery resources through integration of ocean colour and sea surface temperature. Ind. J. Mar. Sci. 34(4):430-440.
- Eppely R. W., Peterson B. J. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. Nature 282: 677-680
- Ernst B., G. Aedo, R. Roa, L. Cubillos, P. Rubilar, A. Zuleta, L. Castro & M. Landaeta, 2005. Evaluación del reclutamiento de la merluza de cola entre la V y X regiones: Revisión metodológica. Informe final del proyecto del fondo de investigación pesquera 2004-12. Universidad de Concepción, Chile.
- Esteves J. L., N. Santinelli, V. Sastre, R. Diaz & O. Rivas, 1992: A dinoflagellate bloom and P.S.P. production associated with upwelling in Golfo Nuevo, Patagonia, Argentina. Hydrobiologia, 242: 115-122.
- Esteves, J. L., M. Solís, M. Gil., M. Commendatore, V. Sastre, N. Santinelli, L. Curtolo, M. Montes y R. Reinoso, 1995: Golfo San Matías: Estudio Oceanográfico y Biológico. VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Mar del Plata (Argentina). pp. 75.
- Esteves, J. L., M. Solís, V. Sastre, N. Santinelli, M. Gil, M. Commendatore, C. González Raies, 1996. Evaluación de la contaminación urbana de la bahía de San Antonio. Informes técnicos del Plan de Manejo Integrado de la Zona Costera Patagónica. Fundación Patagonia Natural (Puerto Madryn, Argentina). N° 20: 1-26
- Falkowski P, R. Barber, V. Smetacek, 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science 281: 200–206.
- Feldman G. C., N. Kuring, C. Ng, W. Esaias, C.R McClain, J. Elrod, N. Maynard, D. Endres, R. Evans, J. Brown, S. Walsh, M. Carle & G. Podesta, 1989: Ocean color: Availability of the global data set. EOS Trans. Amer. Geophys. Union 70: 634-641.
- Fiedler P.C. & H.J. Bernard, 1987. Tuna aggregation and feeding near fronts observed in satellite imagery. Cont. Shelf Res. 7: 871-881.
- Forciniti L., R. G. Perrotta, 1994. Estudio preliminar sobre la edad y el crecimiento del savorín (*Seriolaella porosa*). Frente Marítimo, 15, Sec. A: 111-115.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Framiñan M. B., C. F. Balestrini, A. A. Bianchi, G. Demilio & A. R. Piola, 1991: Datos CTD y series temporales de velocidad, temperatura, y conductividad en el golfo San Matías. Servicio de Hidrografía Naval, Informe Técnico N°63/1991, Argentina.
- Friedland K.D., D.W. Ahrenholz, J.F. Guthrie, 1996. Formation and seasonal evolution of Atlantic Menhaden Juvenile Nurseries in Coastal Estuaries. *Estuaries* 19, 105-114.
- Frouin R., M. Schwindling & P. Y. Deschamps, 1996: Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared - in situ measurements and remote sensing implications. *Journal of Geophysical Research* 101: 14361-14371.
- Fuentes-Yaco C., E. Devred, S. Sathyendranath, T. Platt, L. Payzant, C. Caverhill, C. Porter, H. Maass, G. N. White, 2005. *Indian Journal of Marine Sciences*. 34 (4): 341-355.
- Gagliardini D. A. & A. L. Rivas, 2004: Environmental characteristics of San Matías gulf obtained from Landsat – TM and ETM+ data. *Gayana*, 68(2), T I, 186-193.
- Gagliardini D. A., A. I. Dogliotti, H. Karszenbaum & F. Grings, 2004, Comparison of bathymetric features detected by ERS2 SAR and Landsat TM data over San Matías Gulf, Argentina. *Gayana* 68(2):201-208
- García V.M.T, C.A.E. García, M.M. Mata, R. C. Pollery, A.R. Piola, S.R. Signorini, C.R. McClain, M. D. Iglesias-Rodríguez, 2008. Environmental factor controlling the phytoplankton blooms at the Patagonia shelf-break in spring. *Deep-Sea Research* 55:1150:1166.
- Gayoso A. M. & G. P. Podestá, 1996: Surface hydrography and phytoplankton of the Brazil-Malvinas currents confluence. *Journal of Plankton Research* 18: 941-951.
- Glorioso P. D. & A. Flather, 1995: A barotropic model of the currents off SE South America, *J. Geophys. Re.*, 100, 13: 427-440.
- Glorioso P. D. & A. Flather, 1997. The Patagonian Shelf tides, *Prog. Oceanogr.*, 40, 263-283.
- Glorioso P. D. & R. A. Simpson, 1984: Numerical modeling of the M2 tide on the northern Patagonian Shelf. *Cont. Shelf Res.*, 14: 267-278.
- Goñi G., S. Kamholz, S. Garzoli, D. Olson, 1996: Dynamics of the Brasil-Malvinas Confluence based on inverted echo sounders and altimetry. *Journal of Geophysical Research* 101: 16273-16289.
- Gonzales R. C., & R. E. Woods, 1992. *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- González R. 2003. Propuesta de medidas de manejo complementarias para una gestión sustentable de la pesquería de merluza común *Merluccius hubbsi* y otras especies demersales del Golfo San Matías. Informe Técnico IBMP N° 06/03: 5pp.
- González R., C. Gaspar, L. Curtolo, I. Sangiuliano, P. Osovník P. & N. Borsetta, 2004: Fishery and Oceanographic Monitoring System (FOMS): a new technological tool based on remote sensing, with application in ecosystem management of coastal fisheries in Patagonia. *Gayana* 68 (2), Tomo 1: pp 234-238.
- González R., E. Morsan & M. Narvarte, 2000: Las pesquerías de pequeña escala del Golfo San Matías y su contribución al desarrollo del sector pesquero en Río Negro. Resúmenes IV Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar. 11 al 15 de septiembre de 2000.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- González R., G. Caille & M. Narvarte, 2007. "An assessment of the sustainability of the hake *Merluccius hubbsi* fishery at San Matías gulf, Patagonia, Argentina". *Fisheries Research* (Elsevier) 87 (1): 58-67.
- González R., M. Narvarte & E. Morsan, 2004: Estado de situación de los recursos pesqueros del Golfo San Matías, sus pesquerías, especies asociadas y ambiente: informe *ad-hoc* para la evaluación preliminar de las pesquerías marinas de Río Negro con vistas a la certificación de su sustentabilidad. Informe Técnico IBMP N°03/04: 51 pp.
- Gordon H. R., D. Clark, J. L. Mueller & W. A. Hovis, 1980: Phytoplankton pigments derived from the Nimbus-7 CZCS: initial comparisons with surface measurements, *Science*, 210: 63-66.
- Gordon H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans & W. W. Broenkow, 1983: Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics* 22(1): 20-36.
- Gordon H.R. & M. Wang, 1992: Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors. I: The Rayleigh-scattering component. *Applied Optics* 31: 4247-4260.
- Gordon H.R. & M. Wang, 1994a: Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics* 33: 443-452.
- Gordon H.R. & M. Wang, 1994b: Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of ocean-color sensors. *Applied Optics* 33:7754-7763.
- Gordon H.R. & W. R. McCluney, 1975: Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics* 140: 413-416.
- Gordon H.R., J. W. Brown & R. H. Evans, 1988: Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner. *Applied Optics* 27: 862-871.
- Greenan B. J. W., B. D. Petrie, W. G. Harrison & N. S. Oakey, 2004: Are the spring and fall blooms on the Scotian Shelf related to short-term physical events? *Continental Shelf Research* 24: 603 -625.
- Gregg W. W. & N. W. Casey, 2004: Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set. *Remote Sensing of Environment* 93: 463-479.
- Gregor J. B. & B. Marsálek, 2004. Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods. *Water Res.* 38: 517-522.
- Guerrero R. A. & A. R. Piola, 1997: Masas de agua. El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Argentina, 1: 107-118.
- Guerrero- Sánchez Guerreo E., 2010. Zooplankton gelatinoso (hidromedusas, sifonóforos y ctenóforos) del golfo San Matías y zonas adyacentes; Patagonia, Argentina. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Barcelona. 81p.
- Guinder V. A, Popovich C. A., Perillo G.M.E. 2009. Particulate suspended matter concentrations in the Bahía Blanca Estuary, Argentina: Implication for the development of phytoplankton blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 85:157-165.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Hart T. J., 1946. Report on trawling surveys on the Patagonian continental shelf. *Discovery Reports* 23:227-408.
- Herut B., A. Almogi-Labin, N. Jannink, I. Gertman, 2000. The seasonal dynamics of nutrient and chlorophyll-*a* concentrations on the SE Mediterranean shelf slope. *Oceanologica Acta*. 23 771-782.
- Hoffmann J. A. J., M. N. Nuñez & M. C. Piccolo, 1997. Características climáticas del océano Atlántico Sudoccidental. *El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros*, 1: 163-193
- Höfllich O., 1984. Climate of the South Atlantic Ocean. In: H. van Loon (Ed.). *Climates of the oceans. World survey of climatology* 15: 1-195. Amsterdam: Elsevier.
- Hooker S.B., & C.R. McClain, 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data. *Prog. Oceanogr.*, 45(3-4): 427-465.
- Hovis W. A., D. K. Clark, F. Anderson, R. W. Austin, W. H. Wilson, E. T. Baker, D. Ball, H. R. Gordon, J. L. Mueller, S. Y. E. Sayed, B. Strum, R. C. Wrigley & C. S. Yentsch, 1980: Nimbus 7 coastal zone color scanner: System description and initial imagery, *Science*, 210: 60-63.
- Huot Y., M. Babin, F. Bruyant, C. Grob, M. S. Twardowski & H. Claustre, 2007. Relationship between photosynthetic parameters and different proxies of phytoplankton biomass in the subtropical ocean. *Biogeosciences Discussions* 4:853-868. doi:10.5194/bg-4-853-2007.
- Iles T. D. & M. Sinclair. 1982. Atlantic herring: Stock discreteness and abundances. *Science* 215: 627-633.
- IOCCG 2000. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal and Other Optically-Complex Waters. Sathyendranath, S. (eds.), Report of the International Ocean Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- IOCCG 2008. Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology. T. Platt, N Hoepffner, V. Stuart & C. Brown, (eds.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 7, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- IOCCG 2009. Remote sensing in Fisheries and Aquaculture. M.-H. Forget, V. Stuart & T. Platt, (eds.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 8, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jain A. K., 1989. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, first edition.
- Jaquet N., H. Whitehead, M. Lewis, 1996. Coherence between 19th century sperm whale distributions and satellite-derived pigments in the tropical Pacific. *Marine Ecology Progress Series* 145:1-10.
- Jaureguizar A. J., J. Bava, C. R. Carozza C. A. Lasta, 2003. Distribution of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* in relation to environmental factors at the Río de la Plata estuary, South America. *Marine Ecology Progress Series*. 255: 271-282
- Jickells T. D., 1998. Nutrients Biogeochemistry of the Coastal Zone. *Science*. 281(5374) : 217-222.
- Jones S., Corcuera J., Trebilcock P., Cañete G., González R., Pullen S., 2004. Stakeholder collaboration in national waters and the high seas for reconciling fisheries with conservation – a joint perspective for institutional designs from representatives of the international catching sector and a global conservation NGO. *World Fisheries Congress, Vancouver, May 2-6 2004*.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Joumel A. G. & CH. I. Huiybnegts, 1978. Mining Geostatistics. Academic Press, 600pp.
- Kahru M., B. Hakansson, O. Rud, 1995. Distributions of sea-surface temperature fronts in the Baltic Sea as derived from satellite imagery. *Continental Shelf Research* 15 (6): 663-679.
- Kelly K. A., 1985. Separating clouds from ocean in infrared images. *Remote Sensing of Environment* 17: 67-83.
- Kim H. H. & G. Linebaugh, 1985. Early evaluation of thematic mapper data for coastal process studies. *Advances in Space Research* 5: 21-29.
- Kirk J. T. O., 1994: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. University Press, Cambridge.
- Krepper C. M. & A. A. Bianchi, 1982. Balance calórico del mar Epicontinental Argentino. *Acta Oceanographica Argentina*, 3(1): 119-134.
- Kress N., S. Leon Coto, C. L. Brenes, S. Brenner, G. Arroyo, 2002. Horizontal transport and seasonal distribution of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll-*a* in the Gulf of Nicoya, Costa Rica: a tropical estuary. *Continental Shelf Research* 22:51-66.
- Lafond E. C. & K. G. Lafond, 1971. Oceanography and its relation to marine organic production. In *Fertility of the Sea*. John D. Costlow Duke University Marine Laboratory, Beaufort, North Carolina. pp. 157-185.
- Lalli C. M. & T. R. Parsons, 1997. Phytoplankton and primary Production, In: *Biological Oceanography an Introduction.*, Cap. 3:39-73 2nd. Ed., The Open University. Inc. Great Britain.
- Largier J. L., 1993. Estuarine fronts: How important are they? *Estuaries* 16(1): 1-11.
- Laurs R.M., P. C. Fiedler, D. R. Montgomery, 1984. Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellite. *Deep Sea Research* 31(9): 1085-1099.
- Le Fèvre J., 1986. Aspects of the biology of frontal systems. *Adv. Mar. Biol.* 23: 163-299.
- Legeckis R. & A. Gordon, 1982. Satellite observations of the Brasil and Falkland Currents – 1975 to 1976 and 1978. *Deep-Sea Research* 29: 375-401.
- Legeckis R., 1978. A survey of worldwide sea surface temperature fronts detected by environmental satellites. *Journal of Geophysical Research* 83: 4501-4512.
- Legendre P. & L. Legendre (Ed), 1979. *Numerical Ecology*. Second English Edition. 853 pp. (Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scienc. B.V.).
- Levine N. 2004. *CrimeStat III: A Spatial Statistics Program for the Análisis of Crime Incident Locations*. Ned Levine y Associates, Houston, TX, and the National Institute of Justice, Washington.
- Llewellyn-Jones D. T., P. J. Minnett, R. W. Saunders, A. M. Zavody, 1984: Satellite multichannel infrared measurements of sea-surface temperature of the N E Atlantic Ocean using AVHRR/2 Q J R. *Met Soc.* 100: 613-631.
- Lluch-Cota S. E., 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*. 23:731-740.
- Longhurst A., 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Progress in Oceanography* 36: 77-167.
- Longhurst, A. R., 1998. *Ecological Geography of the Sea*. Academic Press, San Diego, California, USA. 398 pp.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Lucas A. J., R. A. Guerrero, M. W. Mianzan, E. M. Acha, & C. A. Lasta, 2005. Coastal oceanographic regimes of the Northern Argentine Continental Shelf (34-43°S), Estuarine Coastal and Shelf Science. 65: 405-420, oi:10.1016/j.ecss.2005.06.015.
- Lutz V. A., V. Segura, A. I. Dogliotti, D. A. Gagliardini, A. A. Bianchi & C. F. Balestrini, 2010. Primary production in the Argentine Sea during spring estimated by field and satellite models. Journal of Plankton Research 32(2): 191-195.
- Macchi C.J., M. Pájaro & M. Ehrlich. 2004. Seasonal egg production pattern of the Patagonian stock of Argentine hake (*Merluccius hubbsi*). Fisheries Research 67: 25–38.
- Mann K. H. & J. R. N. Lazier, 1996. Dynamics of Marine Ecosystems. Biological- Physical Interactions in the Oceans (Second Edition), (Cambridge USA: Blackwell Science) pp. 394.
- Mann K. H., 1992. Physical influences on biological processes: how important are they? South African Journal of Marine Sciences 12: 107-121.
- Martos P. & M. C. Piccolo, 1988. Hydrography of the Argentine continental shelf between 38° and 42° S. Continental Shelf Research 8(9): 1043-1056.
- McArdle B. H., 1988. The structural relationship: Regression in biology. Canadian Journal of Zoology 66: 2329–2339.
- McClain C.R., R. H. Evans, J. W. Brown & M. Darzi, 1995. SeaWiFS quality control masks and flags: initial algorithms and implementation strategy, in: SeaWiFS Technical Report Series, Vol. 28, SeaWiFS Algorithms, Part 1, edited by S.B. Hooker, C.R. McClain, and J.G. Acker, (NASA Technical Memo.-104566), pp. 3-7.
- McClain E. P., W. G. Pichel, C. C. Walton. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. Journal of Geophysical Research 90: 11587-11601.
- McClain *et al.*, 2000, En SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series, Vol. 10, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 2, editado por S. B. Hooker y E. R. Firestones (NASA Tech. Memo. 2000-2-6892), pp. 45-52
- McMillin L. M. & D. S. Crosby, 1984. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique. Journal of Geophysical Research 89: 3655-3661.
- Menni R. C. & H. L. López, 1984. Distributional patterns of Argentine marine fishes. Physis 42(103) Sec.A: 71-85
- Mercado L., M. Pose, G. Tesolin & C. Villar, 1993. Análisis de la distribución y abundancia del icfitoplancton y zooplancton acompañante en el Golfo San Matías en septiembre de 1993. Seminario el curso Oceanografía Biológica, FCEyN (UBA)-INIDEP. 45 pp.
- Millán D., 2007. Anuario de Estadísticas Pesqueras de la Provincia de Río Negro. Dpto. Policía de Pesca, Dirección de Pesca 153pp.
- Millero F. J., Sohn, M.L., 1991: Chemical oceanography. Chapter 7, CRC, Press, p. 531.
- Minnett P. J., 1991. Consequences of sea surface temperature variability on the validation and applications of satellite measurements. Journal of Geophysical Research 96: 18475-18489.
- Moore K. D., K. J. Voss & H. R. Gordon, 2000. Spectral reflectance of whitecaps: their contribution to water-leaving radiance. Journal of Geophysical Research 105: 6493–6499.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Moreira D., C. G. Simionato, W. C. Dragani & M. N. Nuñez, 2009. Tidal and residual currents observations at San Matías and San José gulfs, Northern Patagonian, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 08-1035.
- Morel A. & B. Gentili, 1991. Diffuse reflectance of oceanic waters: Its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution. *Applied Optics*, 30, 4427–4438.
- Morel A. & B. Gentili, 1996. Diffuse reflectance of oceanic waters: III. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem. *Applied Optics*, 35, 4850–4862.
- Morel A. & D. Antoine, 2007. ATBD 2.9: Pigment index retrieval in case 1 waters, ESA, Noordwijk, The Netherlands, ESA Doc. no. PO-TN-MEL-GS-0005. Available online at: http://envisat.esa.int/instruments/meris/pdf/atbd_2_09.pdf (accessed 17 January 2007).
- Morel A. & L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22: 209-722.
- Morel, A. & B. Gentili, 1993. Diffuse reflectance of oceanic waters: II. Bidirectional aspects. *Applied Optics*, 32, 6864–6879.
- Morel, A., & J. M. André, 1991. Pigment Distribution and Primary Production in the Western Mediterranean as Derived and Modeled From Coastal Zone Color Scanner Observations, *J. Geophys. Res.*, 96(C7), 12,685–12,698, doi:10.1029/91JC00788.
- Morrison J., 1976. *Multivariate Statistical Methods*. Mc Graw Hill Kogakusha Ltda. 415pp.
- Morsan E. & N. F. Ciocco, 2004. Age and growth model for the southern geoduck, *Panopea abbreviata*, off Puerto Lobos (Patagonia, Argentina). *Fisheries Research* 69:343-348.
- Morsan E.M. 2003. Spatial analysis and abundance estimation of the southernmost population of purple clam, *Amiantis purpurata* in Patagonia (Argentina). *Journal of the Marine Biological Association U.K.* 83 (5): 1115: 1128.
- Muelbert J. H., C. Sique, 1996. Distribution of bluefish (*Pomatomus Saltatrix*) larvae along the continental shelf off southern Brazil. *Marine and Freshwater Research*, v.47, 311-314.
- Narvarte M. & M. Pascual. 2003. Fertilization, larval rearing and post-larval growth of the tehuelche scallop *Aequipecten tehuelchus* D'Orb., 1846. *Aquaculture (Elsevier)* 217: 259-274.
- Narvarte M. A., 2001. Settlement of larvae of the tehuelche scallop, *Aequipecten tehuelchus* D'Orb., on artificial substrata in San Matías Gulf (Patagonia, Argentina). *Aquaculture (Elsevier)* 196 (1-2), 55-65.
- Narvarte M., González R. & P. Filippo, 2007. “Artisanal mollusc fisheries in the San Matías Gulf (Patagonia Argentina): an appraisal of the factors contributing to unsustainability”. *Fisheries Research (Elsevier)* 87 (1): 68-76.
- NASA/NOAA, 1995. AVHRR Weekly Global Gridded MCSST (data set documentation). PO.DAAC MCSST. Data Team. http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/DATASET_DOCS/avhrr_wkly_mcsst.html.
- Negri R. M., R. A. Akselman, H. R. Benavidez, 1992. Floración excepcional de un dinoflagelado en aguas de Argentina y Uruguay. *Frente Marítimo*. 11: 115-122.
- O'Reilly J.E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahry & C. R. McClain, 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 24937-24953.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ocampo-Reinaldo M., 2010. Evaluación pesquera integral de la merluza común (*Merluccius hubbsi* Marini, 1933) del Golfo San Matías y efectos de la explotación de esta especie sobre otros componentes de la trama trófica. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 156pp.
- Olson D. B. & R. H. Backus, 1985. The concentrating of organisms at fronts: a cold-water and a warm-core Gulf Stream ring. *Journal of Marine Research*, 43: 113-137.
- Olson D. B., G. P. Podestá, R. H. Evans, O. B. Brown, 1988. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas. *Currents Deep-Sea Research* 35: 1971-1990.
- O'Reilly J.E., S. Maritorena, D. Siegel, M. O'Brien, D. Toole, B. Greg Mitchell, M. Kahru F. Chavez, P. Strutton, G. Cota, S. Hooker, C. McClain, K. Carder, F. Muller-Karger L. Harding, A. Magnuson, D. Phinney, G. Moore, J. Aiken, K. Arrigo, R. Letelier and M. Culver, 2000. Ocean color chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: O'Reilly, J. E., and 24 Coauthors, 2000: SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 9-23.
- Orensanz J. M., A. M. Parma, T. Turk & J. Valero, 2006. Dynamics, Assessment and Management of Exploited Natural Population. En: *Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture*. 109 pp (2nd Edition). S. Shumway (ed.). Elsevier.
- Orensanz J. M., M. Pascual & M. Fernández, 1991. Argentina. En: SE Shumway (ed) *Scallops: Biology, ecology and aquaculture*, pp 981-999. Elsevier, Amsterdam.
- Osovník F. P. & M. Ocampo Reinaldo, 2005. Campaña de Prospección de la Zona de Veda ubicada al norte del paralelo 41° 30' S del Golfo San Matías - Octubre de 2005 – Resultados de los muestreos realizados por el Programa de Observadores Pesqueros. Informe Técnico 25 IBMPAS. San Antonio Oeste, Argentina.
- Palma E. D., R. P. Matano & A.R. Piola, 2004a. Three dimensional barotropic response of the Southwestern Atlantic shelf circulation to tidal and wind forcing, *J. Geophys. Res.*, 109, C08014, doi: 10.1029/2004JC002315.
- Palma E. D., R. P. Matano & A.R. Piola, 2004b. A comparison of the circulation patterns over the Southwestern Atlantic Shelf driven by different wind climatologies, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24303, doi: 1029/2004GL021068.
- Paparazzo F. E., 2011. Distribución espacio temporal de nutrientes en el Mar Argentino, Pasaje de Drake y Península Antártica. Tasa de incorporación por fitoplancton. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 171p.
- Paparazzo F. E., L. Bianucci, I R. Schloss, G. O. Almandoz, M. Solís & J. L. Esteves, 2010. Cross-frontal distribution of inorganic nutrients and chlorophyll-a on the Patagonian Continental Shelf of Argentina during summer and fall. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (45(1): 107-119.
- Parsons T. R., Y. Maita & C. M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press.
- Patt F.S., 2002. Navigation algorithms for the SeaWiFS mission. NASA Tech. Memo., vol. 206892. Greenbelt, MD: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center.
- Patt F.S., R. A. Barnes, R. E. Eplee, J. Franz, B. A., Robinson, W. D., Feldman, G. C., et al., 2003. Algorithm updates for the fourth SeaWiFS data reprocessing. NASA Tech.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Memo., vol. 206892. Greenbelt, MD: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center.
- Pérez Comas, J. A., 1990. Biology and distribution of the Argentine hake (*Merluccius hubbsi*). Consideration on its stock structure, migrations and dynamics of its nursery ground at San Jorge Gulf (Argentine). Master Thesis. University of Washington, 179 pp.
- Perrier M.R. & E.E. Di Giacomo. 2002. El savorín *Serirolella porosa* como un recurso estacional en el Golfo San Matías, República Argentina. *Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero INIDEP* 15: 15-26. Mar del Plata, Argentina.
- Perrota R. G., M. D. Viñas, D. R. Hernancez & L. Tringali, 2001. Temperature conditions in the Argentine chub mackerel (*Scomber japonicus*) fishing ground: implications for fishery management. *Fisheries Oceanography* 10 (3): 275-283.
- Piccolo M. C., 1998. Oceanography of the western South Atlantic Continental Shelf from 33° to 55°S, In: *The Sea: The Global Coastal Ocean. Regional Studies and Synthesis*. Allan Robinson and K. H. Brink (eds.). Volume 11, Chapter 9: 253-271.
- Pingree R. D., P. M. Hollogan, G. T. Mardell, 1978. The effects of vertical stability on phytoplankton distributions in the summer on the northwest European shelf. *Deep Sea Research* 25: 1011-1028.
- Piola A. R. & A. L. Rivas, 1997. Corrientes en la Plataforma Continental, en *El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros*, Editor: E. E. Boschi, INIDEP, Tomo 1: 119-132.
- Piola A. R. & L. M. Scasso, 1988. Circulación en el Golfo San Matías, *Oceanologica Acta* 15(1): 33-51.
- Pitcher G. C., A. J. Boyd, D. A. Horstman, B. A. Mitcherl-Innes, 1998. Subsurface dinoflagellate populations, frontal blooms and the formation of red tide in the southern Benguela upwelling system. *Marine Ecology Progress Series*. 172: 253-264.
- Podestá G. P., & W. E. Esaias, 1988. Satellite-derived phytoplankton pigment concentrations along the shelf-break off Argentina. 1970-1980. *EOS*. 69: 1144.
- Podestá G. P., 1990. Migratory pattern of Argentine hake *Merluccius hubbsi* and oceanic processes in the southwestern Atlantic Ocean. *Fishery Bulletin*, 88, 167-177.
- Podestá G. P., O. B. Brown, R. H. Evans, 1991. The annual cycle of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Climate* 4: 457-467.
- Podestá, G. P., 1997. Utilización de datos satelitales en investigaciones oceanográficas y pesqueras en el océano Atlántico Sudoccidental. En: *El Mar Argentino y sus recursos pesqueros, TOMO 1: Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales* (Editado por E. E. Boschi). Inst. Nac. Investigaciones y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Mar del Plata, Argentina. Pp:195-222.
- Popovich C. A., Spetter C. V., Marchovecchio J. E. & Freije R. H., 2008. Dissolved Nutrient Availability during Winter Diatom Bloom in a Turbid and Shallow Estuary (Bahía Blanca, Argentina). *Journal of Coastal Research* 24(1): 95-102
- Prabhakara C., G. Dalu, V. G. Kunde, 1974. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11- to 13-mm window region. *Journal of Geophysical Research* 79: 5039-5044.
- Preisendorfer R. W., 1961. *Hydrologic optics, Vol 1: Introduction*. Springfield: National Technical Information Service.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Price J. C., 1983. Estimating Surface Temperatures from thermal infrared data - A simple formulation for the atmospheric effect. *Remote Sensing Environment* 13: 353-361.
- Provost C., C. Garcia, V. Garçon, 1992. Analysis of satellite sea surface temperature time series in the Brazil-Malvinas current confluence region: dominance of the annual and semiannual periods. *Journal of Geophysical Research* 97(17): 841-858.
- Radiarta I. N., S.-I. Saitoh, 2008. Satellite-derived measurements of spatial and temporal chlorophyll-a variability in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79: 400-408.
- Ramírez F. C., 1996. Composición, abundancia y variación estacional del zooplancton de red del Golfo San Matías. *Frente Marítimo* 16 (Sec. A): 157-167.
- Reddy R., V. Lyne, G. Randall, A. Eston & S. Clarke, 1995. An application of satellite-derived sea surface temperatures to southern bluefin tuna and albacore off Tasmania, Australia. *Scientia Marina* 59 (3-4): 445-45.
- Rees W. G. 2001. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press, Cambridge, 343p
- Riebesell U., 1991. Particle aggregation during a diatom Bloom. II. Biological aspects. *Marine Ecology Progress Series* 69:281-291.
- Riley J. P., G. Skirrow, 1975. *Chemical Oceanography*. Volume 2. Second Edition, Academic Press Inc. (London) Ltd., 647 pp.
- Rivas A. & E. Beier, 1990. Temperature and salinity fields in the Northpatagonic Gulfs. *Oceanologica Acta* 13: 15-20.
- Rivas A. L. & A. Frank Langer. 1996. Mass and heat transport in the Argentine continental shelf, *Cont. Shelf Res.*, 16: 1283-1285.
- Rivas A. L. & P. Ripa, 1985. Seasonal heat and fresh water budget in Golfo Nuevo, Argentina. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 66(18): 288. Washington D.C.
- Rivas A. L., 2010. Spatial and temporal variability of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. *Continental Shelf Research* 30:752-760.
- Rivas A. L., P. Dell'Arciprete, 2000. Frentes térmicos en la plataforma Patagónica inferidos a partir de datos satelitales. *IV Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Resúmenes*, p. 107.
- Rivas, A. L., A. Dogliotti & D. A. Gagliardini, 2006. Seasonal variability in satellite-measured surface chlorophyll in the Patagonian Shelf. *Continental Shelf Research* 26(6): 703-720.
- Rivas, A., 1994. Heat balance and annual variation of mean temperature in the North-Patagonian gulfs. *Oceanologica Acta* 13: 265-272.
- Robinson I. S., 1994. *Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. Chichester: Wiley-Praxis.
- Robinson I. S., 2004. *Measuring the Oceans from Space. The principles and methods of satellite oceanography*. Praxis Publishing Ltd., Chichester. UK. 669pp
- Robinson W. D., B. A. Franz, F. S. Patt, S. W. Bailey & P. J. Werdell, 2003: "Masks and Flags Updates." In: Patt, F. S., R. A. Barnes, R. E. Eplee, Jr., B. A. Franz, W. D. Robinson, G. C. Feldman, S. W. Bailey, J. Gales, P. J. Werdell, M. Wang, R. Frouin, R. P. Stumpf, R. A. Arnone, R. W. Gould, Jr., P. M. Martinolich, V. Rasibrahmanakul, J. E. O'Reilly & J. A. Yoder, 2003. Algorithm Updates for the

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- fourth SeaWiFS Data Reprocessing, NASA Tech. Memo. 2003-206892, Vol.22, S.B. Hooker y E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland: 34-40.
- Romero M. A., R. González, M. Ocampo Reinaldo, 2010. When conventional fisheries management measures fails to reduce the catch and discard of juvenile fish: a case study of Argentine hake trawl fishery in San Matías Gulf. *North American Journal of Fisheries Management* 30:702-712.
- Romero M. A., R. A. González & M. Ocampo Reinaldo, 2008a. Análisis histórico de la composición por especie de los desembarcos de la pesquería de arrastre demersal del Golfo San Matías: identificación y caracterización de ciclos productivos. *IBMP Serie Publicaciones* 7: 67-91.
- Romero M. A., R. A. González & M. Ocampo Reinaldo, 2008b. Patrón temporal en la composición específica de los desembarcos de la pesquería de arrastre demersal del Golfo San Matías. *IBMP Serie Publicaciones* 7: 1-12.
- Romero S. I., 2008. Estimaciones satelitales de clorofila y los frentes oceánicos del Atlántico Sudoccidental. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 202p.
- Romero S. L., A. R. Piola, M. Charo & C. E. García, 2006. Chlorophyll-*a* variability off Patagonia base on SeaWiFS data, *J. Geophys. Res.*, 111, C05021, doi: 10.1029/2005JC003244.
- Sabatini M. & P. Martos, 2002. Mesozooplankton features in a frontal area off northern Patagonia (Argentina) during spring 1995 and 1998. *Scientia Marina* 66(3): 215-232.
- Sánchez R., A. Remeslo, A. Madirolas, J. D. de Ciechowski, 1995. Distribution and abundance of post-larvae and juveniles of the Patagonian sprat, *Sprattus fueguensis*, and related hydrographic conditions. *Fisheries Research* 23: 47-81.
- Sánchez R., J. D. de Ciechomsky, 1995. Spawning and nursery grounds of pelagic fish species in the sea-shelf off Argentina and adjacent areas. *Scientia Marina* 59(3-4): 455-478.
- Sánchez, F. & S. B. García de la Rosa, 1999. Alimentación de merluza (*Merluccius hubbsi*) e impacto del canibalismo en el área comprendida entre 34°47'- 47°S del Atlántico Sudoccidental. *INIDEP Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero* 12: 77-93.
- Santinelli N., V. Sastre & J. L. Esteves, 2002. Episodios de algas nocivas en la Patagonia Argentina. Capítulo 8: 197 - 208. En: *Floraciones Algales Nocivas en el Cono Sur Americano*. ISBN: 84-95877-01-5. : (E. A. Sar, M. E. Ferrario & B. Reguera, eds.). Inst. Esp. Oceanogr. Madrid, España. 307 pp.
- Santos A. M. P., 2000. Fisheries oceanography using satellite and airborne remote sensing methods: a review. *Fisheries Research* 49: 1-20.
- Santos A. M. P., M. F. Borges & S. Groom, 2001. Sardine and horse mackerel recruitment and upwelling off Portugal. *ICES Journal of Marine Science*, 58: 589-596.
- Santos, B.A. & F. C. Ramírez, 1995. Distribución y abundancia de copépodos en el sistema frontal de Península Valdés, durante florecimientos fitoplanctónicos. *Thalassas* 11: 133-142.
- Sastre A. V., N. H. Santinelli & J. L. Esteves, 1997. Fitoplancton del Golfo San Matías de tres campañas de muestreo (Noviembre de 1992, Septiembre de 1993, Marzo de 1994). *Physis* (Buenos Aires). Sec. A 53 (124-125): 7-12.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Sastre V., N. H. Santinelli, J. L. Esteves & M. Ferrario, 2001. Aspectos ecológicos de especies de *Pseudonitzschia* en aguas costeras patagónicas (Argentina). pp. 217 - 235. En: Sustentabilidad de la biodiversidad: un problema actual bases científico-técnicas, teorizaciones y proyecciones. ISBN: 956-227-257-5. Alveal K. & T. Antezana eds. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 896 pp.
- Sathyendranath S., G. Cota, V. Stuart, H. Maass & T. Platt, 2001. Remote Sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches, *Int. J. Remote Sens.*, 22: 249-273.
- Sathyendranath S., L. Lazzara, & L. Prieur, 1987. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 32 (2): 403-415.
- Scarabino V., 1977. Moluscos del Golfo San Matías (Provincia de Río Negro, República Argentina). Inventario y claves para su identificación. *Comunicaciones de la Sociedad Malacológica del Uruguay* 4: 177-285.
- Scasso L. & A. Piola, 1988. Intercambio neto de agua entre el mar y la atmósfera en el Golfo San Matías, *Oceanologica Acta* 15(1): 13-31.
- Schneider C. F., 2009. Ayuda de Uso ArcMap 9.3 para su utilización en el Sistema de Composición Cartográfica del Instituto de Biología Marina y Pesquera Alte. Storni. IBMPAS. San Antonio Oeste, Río Negro, Argentina. 72pp.
- Servicio de Hidrografía Naval, 1999. Carta Náutica H-214, De Faro Segunda Barranca a Faro Punta Bajos. Esc. 1: 275.000. Argentina.
- Servicio de Hidrografía Naval, 2010. Tablas de marea. Predicciones de las bajamares y las pleamares (en línea). http://www.hidro.gov.ar/Oceanografia/Tmareas/R_Mareas.asp. [Consulta: 21 de Octubre de 2010].
- Shaw A. G. P. & R. Vennel, 2000. A Front-Following Algorithm for AVHRR SST Imagery. *Remote Sensing of the Environment*. 72: 317-327
- Shettle E. P. & R. W. Fenn, 1979. Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties, Rep. AFGL-TR-79-0214, (U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Mass., 1979).
- Simionato C. G., W. Dragani, M. Nuñez & M. Engel, 2004: A set of 3-D Nested Models for Tidal Propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary – Part I. M2, *Journal of Coastal Research* 20 (3): 641-936.
- Simpson J. H. & J. Hunter, 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature* 250: 404-406
- Simpson J. H., 1981. The Shelf-sea fronts: Implications of their existence and behavior. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, A302: 531-546.
- Simpson J. J., 1990. On the accurate detection and enhancement of oceanic features observed in satellite data. *Remote Sensing of Environment* 33: 17-33.
- Simpson J. J., 1992. Remote sensing and geographical information systems: their past, present and future use in global marine fisheries. *Fisheries Oceanography* 1: 238-280.
- Simpson J. J., 1994. Remote sensing in fisheries: a tool for better management in the utilization of a renewable resource. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51: 743-759.
- Skalar Analytical V.B. 2005a, b, c. Skalar Methods – Analysis: Nitrate + Nitrite - Catnr. 461-031+DIAMOND issue 081505/MH/99235956. Breda The Netherlands)
- Sneath P. H. & R. R. Sokal, 1973. *Numerical taxonomy*. W. H. Freeman, San Francisco. 235 pp.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Sokal R. R., F. J. Rohlf, 1995. Biometry. W. H. Freeman and Company (eds.), New York, 408 pp.
- Spencer C. P., 1975. The Micronutrient Elements, In Chemical Oceanography (J.P. Riley and G. Skirrow, eds.), pp. 245-300. Academic Press Inc. 647pp.
- Strickland J.D.H., & T. R. Parsons, 1972. A practical handbook of seawater analysis. Second Edition. Bulletin 167, Fisheries Research Board of Canada, Ottawa 311pp.
- Strong A. E. & E. P. McClain, 1984. Improved ocean surface temperatures from space - comparison with drifting buoys. Bulletin of American Meteorologic Society 85: 138-142.
- Sverdrup, H.U., 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J. Cons. Perm. Int. Exp. Mer.* 18: 287-295.
- Teer Braak C. J. F., 1988. A Fortran program for canonical community ordination by partial detrended canonical correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis. Agricultural Mathematics Group, Ministry of Agriculture and Fisheries. Ithaca. New York. 95p.
- Templ M., P. Filzmoser, C. Reimann, 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry* 23: 2198-2213.
- Tomczak M., 2000. An Introduction to Physical Oceanography (en línea). Flinders University of South Australia, Adelaide. Thermohaline processes; water mass formation; the seasonal thermocline (Oceanography\IntroOc\lecture07.html). [Consulta: 8 de octubre de 2004].
- Tonini M. H., 2010. Modelado Numérico del Ecosistema del los Gofos Norpatagónicos. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 255p.
- Tonini M., E. Palma, A Rivas, 2007. Simulación numérica de la circulación y frentes térmicos de los golfos norpatagónicos. En: Sergio Elaskar, Elvio Pilotta, Germán Torres (Eds.). Mecánica Computacional. Volumen XXVI: 3757-3768.
- Tonini M., E. Palma., A. Rivas, 2006. Modelo de alta resolución de los golfos patagónicos. En: Alberto Cardona, Norberto Nigro, Victorio Sonzogni, Mario Storti. (Eds.). Mecánica Computacional. Volumen XXV: 1441-1460. 42.
- Ullman D. S. & P. C. Cornillon, 1999. Satellite-derived sea surface temperature fronts on the continental shelf off the northeast US coast. *Journal of Geophysical Research* 104 (C10): 23459-23478.
- UNESCO, 1999. World Heritage List [on line] <http://whc.unesco.org/en/list> [7 de Noviembre 2011].
- Valentin J. L., 1996. Aguas de Surgencia. *Ciencia Hoy*. Vol. 6, N° 34.
- Valiela I., 1995. Marine ecological processes.
- Vargas C.A., G. Valenzuela, S. Núñez & D. F. Arcos, 1997. Role of oceanographic and topographic factors in the retention of hake (*Merluccius gayi gayi* Guichenot 1848) larvae in the upwelling system off central-southern Chile. *Archive of Fisheries and Marine Research* 45 (3): 201 – 222
- Verona C. A., J. I. Carreto & A. Hinojal, 1974. Fitoplancton, pigmentos y condiciones ecológicas del Golfo San Matías II., mayo de 1971. *Anal. Inf. Com. Inv. Cient. (La Plata)*: 23-48.
- Walton C. C., 1988. Nonlinear Multichannel Algorithms for Estimating Sea Surface Temperature with AVHRR Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology* 27: 115-124.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Waluda C. M., P. G. Roudhouse, G. P. Podestá, P. N. Trathan, G. J. Pierce, 2001. Surface oceanography of the inferred hatching grounds of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) and influences on recruitment variability. *Marine Biology* 139: 671-679.
- Wang M., 1999. A sensitivity study of SeaWiFS atmospheric correction algorithm: effects of spectral band variations. *Remote Sensing of Environment* 67: 348-359.
- Wang M., B. A. Franz, R. A. Barnes, & C. R. McClain, 2001. Effects of spectral bandpass on SeaWiFS-retrieved near-surface optical properties of the ocean. *Applied Optics* 40(3): 343-348.
- Ware D.M. & R. E. Thomson, 2005. Bottom-Up Ecosystem Trophic Dynamics Determine Fish Production in the Northeast Pacific. *Science* 308: 1280-1285.
- Warton D. I., I. J. Wright, D. S. Falster & M. Westoby, 2005. Bivariate line fitting methods for allometry. Available online at: <http://www.bio.mq.edu.au/ecology/SMATR/>
- Wehrtmann I.S., 1994. Larval production of the caridean shrimp, *Crangon septemspinosa*, in waters adjacent to Chesapeake Bay in relation to oceanographic conditions. *Estuaries* 17: 509-518.
- Williams G. N. 2004. ¿Cuáles son las Fuentes de nutrientes para mantener la productividad del golfo San Matías? Seminario de Licenciatura en Ciencias. Biológicas. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Puerto Madryn. 100p.
- Williams G. N., M. Sapoznik, M. Ocampo-Reinaldo, M. Solís, M. Narvarte, R. González, J. L. Esteves, D. A. Gagliardini, 2010. Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and in-situ data in San Matias Gulf, Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. 31(17-18): 4531-4542. Print ISSN: 0143-1161 Online ISSN: 1366-5901. Taylor & Francis Ltd.
- Windom H. L., R. Smith, L. F. Niencheski. L.F. & C. Alexander, 2000: Uranium in rivers and estuaries of globally diverse, smaller watersheds. *Marine Chemistry* 68: 307-321.
- Wyrski K., 1965. The annual and semiannual variation of sea surface temperature in the North Pacific Ocean. *Limnol. and Oceanogr.* 10: 307:313.
- Yañez E., A. González & M. A. Barbieri, 1995. Estructura Térmica Superficial del Mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1922. *Investigaciones Marinas Valparaíso* 23: 123-147.
- Yañez E., V. Catasti, M. A. Barbieri, G. Böhm. 1996. Relaciones entre la distribución de recursos pelágicos pequeños y la temperatura superficial del mar registrada con satélites NOAA en la zona central de Chile. *Invest. Marinas. Valparaíso* N° 24:107-122.
- Yang H. & H. R. Gordon, 1997. Remote sensing of ocean color: assessment of water-leaving radiance bidirectional effects on atmospheric diffuse transmittance. *Applied Optics* 36: 7887-7897.

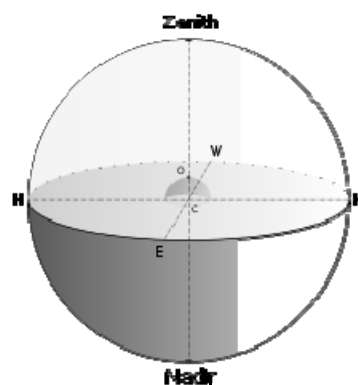
APENDICE A

Glosario de términos

Forzantes oceánicas y atmosféricas: La circulación oceánica de gran escala está forzada por el esfuerzo de los vientos y por los flujos de calor y agua en la superficie

Órbitas diurna: es la trayectoria que realiza un objeto alrededor de otro mientras está bajo la influencia de una fuerza centrípeta, como la fuerza gravitatoria. En el caso de los satélites es la trayectoria que éste realiza alrededor de la Tierra (órbita geocéntrica) y que esta en sincronía con el sol. Una órbita sincrónica al sol es una órbita geocéntrica combinando altitud e inclinación para lograr que un objeto en esa órbita pase sobre algún punto determinado de la superficie terráquea a un mismo tiempo solar local.

Nadir: en astronomía se denomina nadir a la intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste. Es decir: si imaginamos una recta que pasa por el centro de la Tierra y por nuestra ubicación en su superficie, el nadir se encuentra sobre esa recta, por debajo de nuestros pies. En sentido contrario se encuentra el cenit.



Componente de mareas M2: marea semidiurna lunar.

ERDAS Imagine v8.7.

ERDAS Imagine Imagine es un potente programa de tratamiento digital de imágenes y un sistema de información geográfica raster integrable con sistemas vectoriales. ERDAS posee un módulo de pseudoprogramación “Model Maker) el cuál permite realizar numerosas tareas de pseudo-programación de un modo relativamente sencillo para el usuario y posee una simbología simple para los distintos componentes que pueden tomar parte de un algoritmo, como imágenes de entrada y salida, unidades de procesamiento, matrices, etc. La unidad central del módulo está dado por las “unidades de proceso”, en donde específicamente se incluyen las ecuaciones que permiten genera una nueva imagen o parámetro global a partir de los componentes de entrada (imágenes, matrices y/ó parámetros globales).

SeaDAS: El sistema de análisis de datos SeaWiFS

SeaDAS es un paquete de programas especialmente diseñado para el análisis de imágenes (SeaWiFS, MODIS, CZCS y otras), y también para su procesamiento, despliegue, y control de calidad de datos. SeaDAS permite cargar una o varias imágenes y trabajar con ellas en forma interactiva y generar "scripts" en modo comando para automatizar un proceso y aplicarlo a varias imágenes. El SeaDAS está disponible gratis en http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadascgi/seadas_online_install.pl.

Conceptos y marco teórico de la teledetección satelital aplicada al estudio del mar

Espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro (Caimi, 1979). A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío.

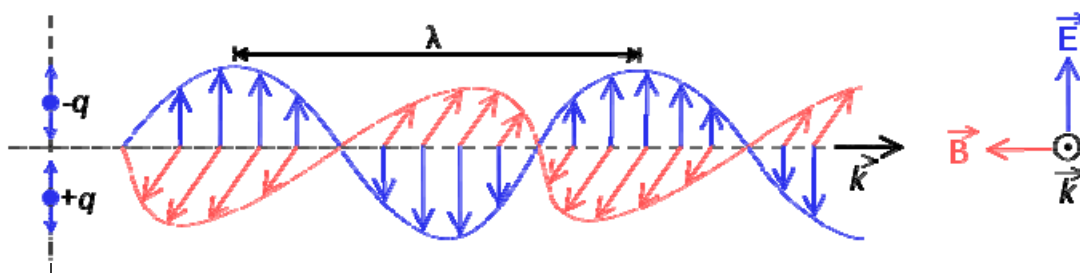


Figura 2.1.1: Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación (E: campo eléctrico, B: campo magnético, k: dirección de propagación, λ : longitud de onda, q: amplitud de onda).

La radiación electromagnética se propaga en forma de ondas (Figura 2.1.1) a través del espacio, y sus aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse; es decir, pueden desplazarse por el vacío. El espectro electromagnético (Figura 2.1.2) representa la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético o simplemente espectro de una sustancia u objeto se refiere a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) dicha sustancia u objeto. Los espectros se pueden observar mediante

espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda (λ), la frecuencia (ν) y la intensidad de la radiación (q). El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

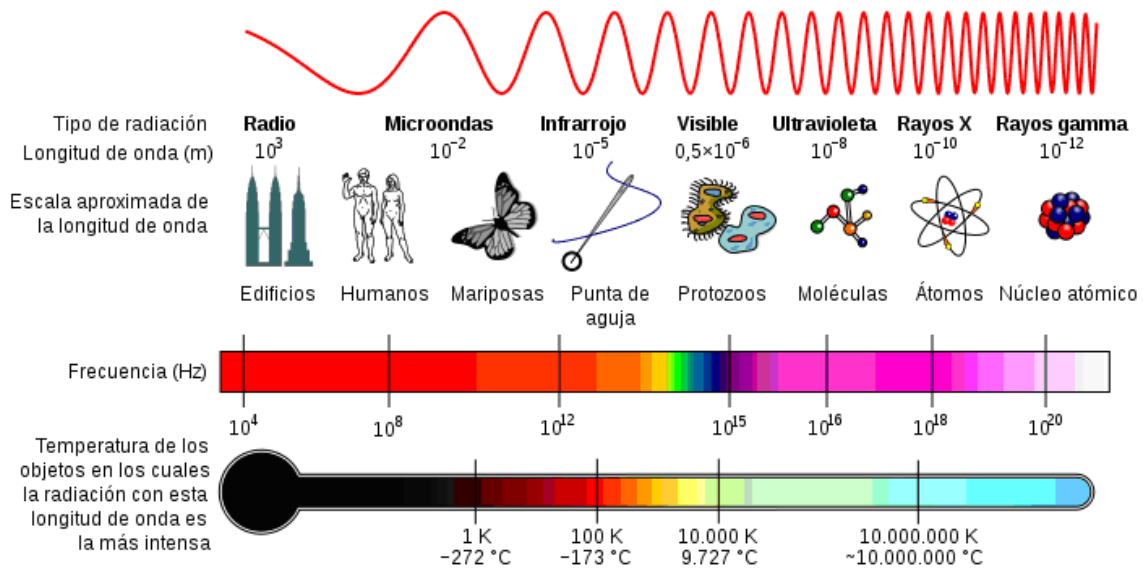


Figura 2.1.2: Espectro electromagnético.

Conceptos físicos y unidades de medida

La REM es una forma de energía, por lo que la cantidad de REM por unidad de tiempo es el flujo radiante (Φ) que se mide en unidades de potencia, Joules por segundo [J s⁻¹] o Watts [W]. El flujo radiante o incidente por unidad de área es la irradiancia (E), con unidades de Watts por metro cuadrado [W m⁻²]. La irradiancia puede dividirse en una componente ascendente (E_u) y otra descendente (E_d), siendo estas la medida de toda la REM que sale y de toda la que llega a una superficie, respectivamente. Se miden con un radiómetro plano o colector coseno (Figura 2.1.3).

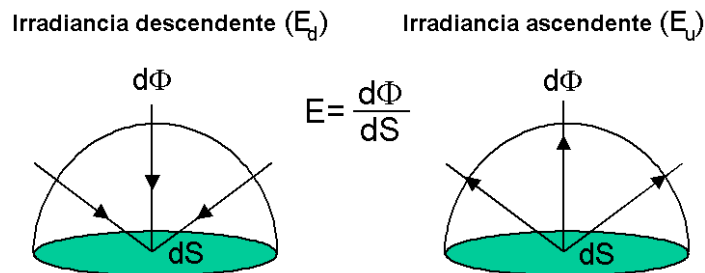


Figura 2.1.3: Geometría asociada a la definición de irradiancia descendente (E_d) y ascendente (E_u), donde $d\Phi$ es el flujo radiante que llega a la superficie dS .

Los sensores remotos tienen un campo limitado de observación y no reciben toda la irradiancia emitida por una superficie debido a que la forma del detector y su geometría de observación limitan la señal a una pequeña fracción del flujo. Por lo tanto es necesario tener una descripción de la variación del flujo en función de la dirección. La radiancia (L), que mide el flujo por unidad de área por unidad de ángulo sólido [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$], describe dicha variación. Así como la irradiancia, la radiancia también puede dividirse en una componente ascendente (L_u) y una descendente (L_d). En la figura 2.1.4 se muestra la geometría asociada a la radiancia ascendente.

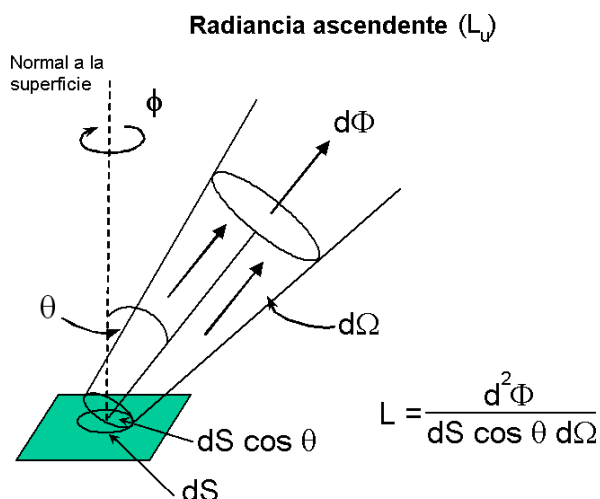


Figura 2.1.4: Geometría asociada a la definición de radiancia superficial ascendente (L_u), donde dS es el área de un elemento de la superficie, $L(\theta,\phi)$ es la radiancia que sale de dS con un ángulo cenital θ (relativo a la normal de la superficie) y un ángulo acimutal ϕ . Su valor es definido por el flujo radiante que sale de dS dentro del ángulo sólido $d\Omega$, centrado en la línea definida por θ y ϕ .

El ángulo sólido (Ω u ω) está definido por el área de superficie esférica (A) dividida por el cuadrado del radio de la esfera (r) y tiene unidades de esteradios [sr] (Figura 2.1.5).

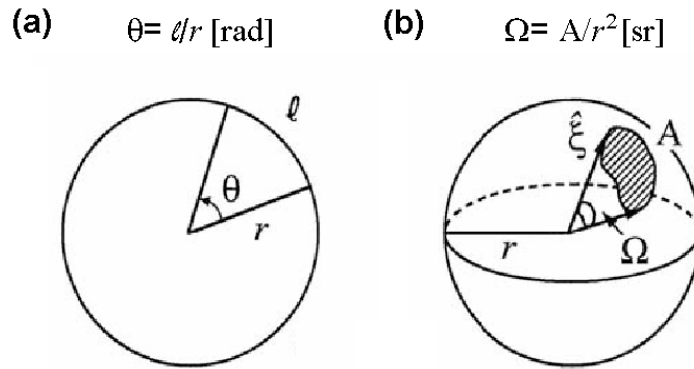


Figura 2.1.5 Geometría asociada a la definición de (a) ángulo plano y (b) ángulo sólido. (Modificado de Mobley 1994).

Entonces, el sensor satelital responde a la radiancia que llega a él integrada sobre la banda espectral en la cual se está midiendo la energía (ecuación 2.1.1)

Radiancia al tope de la atmósfera,
$$\bar{L}_i = \int_0^{\infty} d\lambda \phi_i \cdot L(\lambda) \quad (2.1.1)$$

donde,

$d\lambda \phi_i$, es la función de respuesta espectral del instrumento

$L(\lambda)$, es la radiancia espectral recibida

La figura 2.1.6 muestra un diagrama esquemático de la geometría relacionada con la observación e iluminación de una superficie y los símbolos utilizados en esta tesis.

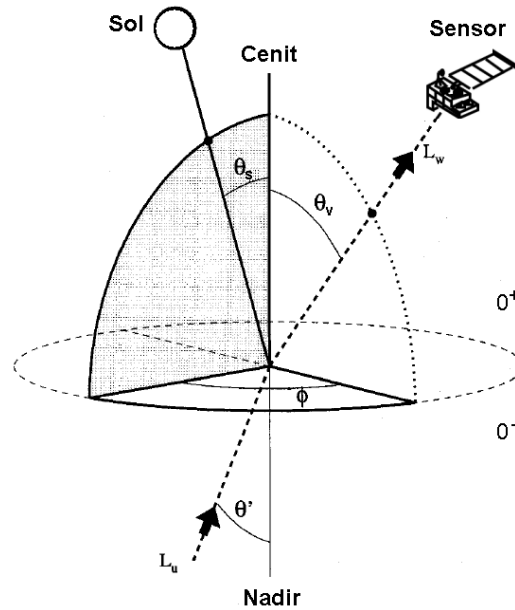


Figura 2.1.6: Vista esquemática de la geometría y símbolos utilizados en este trabajo. Los ángulos polares que caracterizan las radiancias (L_w y L_u) corresponden a la dirección en la que viaja la REM, medidos desde el cenit (ángulo cenital de vista del sensor θ_v) y del nadir (θ') en los semiespacios superior (0^+) e inferior (0^-) respecto a la superficie, respectivamente. θ_s es el ángulo cenital solar y ϕ el ángulo acimutal relativo entre el satélite y el sol ($\phi_s - \phi_v$) (Modificado de Antoine y Morel 1999).

Si $L(\theta, \phi)$ es la radiancia en la dirección definida por el ángulo cenital θ y acimutal ϕ , se puede calcular la irradiancia de interés (E_u o E_d) mediante la integración de la radiancia (L_u o L_d) en los ángulos apropiados. Por ejemplo, se puede obtener la irradiancia descendente (E_d) integrando la radiancia en todo el hemisferio superior (Figura 2.1.6).

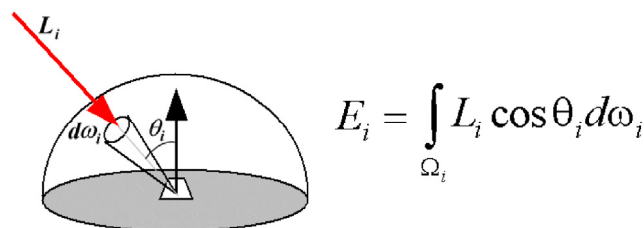


Figura 2.1.7. Geometría asociada a la definición de irradiancia y su relación con la radiancia. La irradiancia total descendente (E_d) en un punto se obtiene integrando respecto al ángulo sólido en todo el hemisferio superior.

Si la superficie fuese un difusor perfecto, o sea una superficie que emite o refleja la energía con la misma intensidad en todas las direcciones independientemente del ángulo con el que incide la radiación, la irradiancia sería igual a

$$E = \pi L \tag{2.1}$$

A este tipo de superficies se las llama *lambertianas* ya que reflejan la radiación en forma isotrópica (la radiancia es reflejada uniformemente en todas las direcciones, figura 2.1.7a). Ninguna superficie es perfectamente difusora, pero muchas superficies, especialmente las opacas, se aproximan bastante. Como caso opuesto a una superficie *lambertiana* puede mencionarse a la superficie especular. En este tipo de superficie la energía es reflejada con un ángulo igual al incidente pero en sentido opuesto (figura 2.1.7b). Las superficies naturales en general se comportan de forma intermedia (figura 2.1.7c).

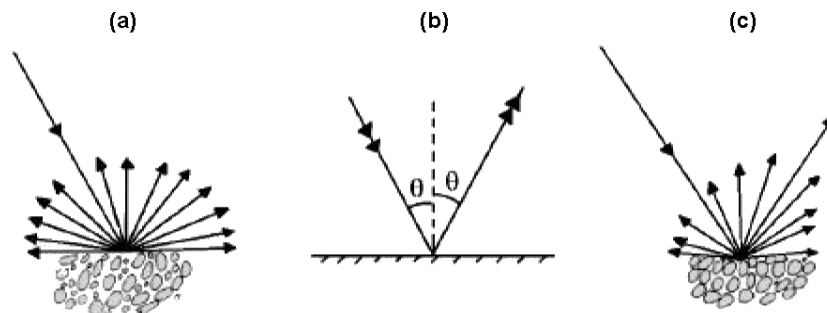


Figura 2.1.8. Diferentes tipos de reflexión: (a) difusa o *lambertiana*, (b) especular y (c) tipo mixta.

La relación entre la energía que recibe el sensor (L_i) y la energía que llega a la Tierra el tope de la atmósfera (E_0) se denomina **reflectancia** (R_i). Esta relación es básicamente un cociente de irradiancias (flujos de energía), donde se incorpora el coseno del ángulo cenital solar (θ) que tiene en cuenta el ángulo de incidencia de la luz solar sobre la Tierra. E_0 es constante para todo el año, pero depende de la longitud de onda (λ) considerada. Hay que tener en cuenta que si toda la energía incidente se reflejara hacia el sensor, entonces el valor de R_i sería igual a 1, es decir toda la energía incidente en la superficie se estaría reflejando, por eso el 100 es incorporado en la ecuación para obtener los valores en porcentaje de radiación reflejada.

Reflectancia direccional al tope de la atmósfera,
$$R_i = \frac{100 \cdot \pi \overline{L_i}}{E_{0(i)} \text{Cos } \theta_{sol}} \tag{2.1.2}$$

En los casos que nos interesan en este trabajo, los sistemas satelitales utilizados (NOAA-AVHRR, OrbView-SeaWiFS) tienen la capacidad de detectar la energía emitida o reflejada por la superficie del mar.

Ventanas atmosféricas

El principal problema para la teledetección satelital, en las regiones del EEM de interés para el presente trabajo, está representado por la interacción de la REM que transporta la información de interés con los distintos componentes atmosféricos. En este sentido, deben destacarse los siguientes puntos:

1. La atmósfera no es transparente para la REM, debido a dos procesos fundamentales, absorción y dispersión. El proceso de dispersión modifica la dirección de la señal original proveniente de la fuente y se produce en todas las longitudes de onda, aún en las regiones en donde es posible realizar teledetección (Figura 2.1.9). El porcentaje de REM transmitido a través de la atmósfera es lo

suficientemente alto como para poder efectuar un proceso de teledetección solamente en ciertas partes del EEM, las cuales se denominan "ventanas atmosféricas" (Figura 2.1.10). Las ventanas

atmosféricas están determinadas por la absorción, la cual está dada principalmente por el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O) y el ozono (O_3).

2. La REM en las longitudes de onda óptica e infrarroja no puede atravesar las nubes, por lo que resulta imposible la obtención de imágenes si el área de interés presenta cobertura nubosa. La correcta identificación y eliminación de las áreas cubiertas por nubes constituye un problema de particular importancia. Las perturbaciones indicadas en el punto 1 implican que no toda la radiación emitida llega al sensor, por lo que sus efectos deben ser estimados y considerados en el proceso de cálculo si se pretende que los valores de temperatura o clorofila-*a* finales presentes en la imagen sean representativos de las condiciones existentes en el área de interés.

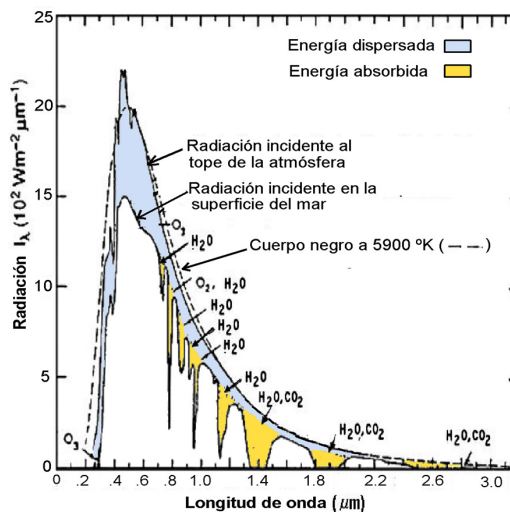


Figura 2.1.9. REM absorbida y dispersada en función de la longitud de onda y elementos reponsables de la absorción.

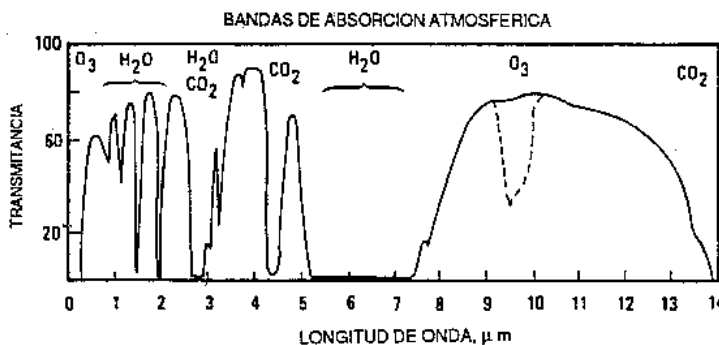


Figura 2.1.10. Ventanas atmosféricas.

Conceptos bioópticos

El *color* intrínseco del mar está determinado por la variación espectral de la reflectancia (R) superficial. La reflectancia irradiante está definida como la relación entre la irradiancia ascendente (E_u) y la irradiancia descendente (E_d), o sea:

$$R(\lambda, z) = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} \quad (2.2.1)$$

donde todas las propiedades dependen de la longitud de onda λ y la profundidad z . En el marco del sensoramiento remoto es común utilizar la reflectancia teledetectada (R_{RS}), con unidades de 1 sobre esteradio [sr^{-1}]. La misma se encuentra muy relacionada con la reflectancia superficial (R) y se define como

$$R_{RS}(\lambda, \theta, \phi, 0^-) = \frac{L_u(\lambda, \theta, \phi, 0^-)}{E_d(\lambda, 0^-)} \quad (2.2.2)$$

La dependencia de la radiancia con los ángulos θ y ϕ está indicando que la radiancia varía con la geometría de observación. La reflectancia teledetectada descompone la reflectancia R en las radiancias que la componen en función de los ángulos de observación θ y ϕ . Un factor de proporcionalidad $Q(\theta_s, \theta, \phi, \lambda)$ relaciona R_{RS} con R

$$Q(\theta_s, \theta', \phi, \lambda) = \frac{R(\lambda, 0^-)}{R_{RS}(\theta, \phi, \lambda, 0^-)} = \frac{E_u(\theta_s, \lambda)}{L_u(\theta_s, \theta', \phi, \lambda)} \quad (2.2.3)$$

donde θ' (ver figura 2.1.4) es el ángulo entre el nadir y la dirección de donde se origina la radiancia ascendente (dentro del agua). Dicho ángulo está relacionado con el ángulo cenital (θ) mediante la ley de Snell

$$\theta' = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen}\theta}{n}\right) \quad (2.2.4)$$

donde n es el índice de refracción del agua. El factor Q tiene unidad de esteradio [sr] y es un factor que tiene en cuenta el carácter anisotrópico o bidireccional del campo radiativo ascendente y relaciona la radiancia ascendente (L_u) con la irradiancia ascendente plana (E_u) a la misma profundidad y longitud de onda. Cuando el campo radiativo ascendente es isotrópico (L constante para todo θ y ϕ), Q es igual a π .

La dispersión molecular, también llamada dispersión Rayleigh, ocurre cuando las partículas responsables de la dispersión son más pequeñas que la longitud de onda del fotón, tal como ocurre con las moléculas de los gases atmosféricos mencionados. Este tipo de dispersión depende de la longitud de onda y es proporcional a λ^{-4} , o sea que a menor longitud de onda es mayor la dispersión (máxima dispersión en el azul). La

misma puede ser calculada exactamente mediante la ecuación de transferencia radiativa (Gordon *et al.* 1988). La distribución angular de la radiación dispersada es simétrica, tanto hacia adelante como hacia atrás respecto a la dirección de incidencia de la luz (Figura 2.1.18).

La dispersión debida a partículas de aerosoles, también conocida como dispersión Mie, ocurre cuando el tamaño de las mismas es comparable a la longitud de onda de la luz incidente. Esta dispersión puede originarse a partir de partículas de polvo erosionadas y transportadas por el viento, sales marinas, sulfatos y nitratos gaseosos que se convierten en partículas, materia orgánica y sustancias con carbono provenientes del quemado de vegetación y de la combustión industrial. La dispersión Mie depende del tamaño de la partícula, es muy variable y no es fácil de estimar. Las propiedades y especialmente la abundancia de los aerosoles son muy variables. Algunos parámetros ópticos no pueden medirse directamente, por lo que se utilizan modelos para estimarlos. Estos parámetros dependen de la distribución del tamaño de las partículas, de su índice de refracción, de la forma de las partículas (esféricas o no esféricas), y de la distribución espacial de la concentración de las partículas. La dispersión Mie, a diferencia de la dispersión Rayleigh, es asimétrica y la mayor parte de la radiación es dispersada hacia delante respecto a la dirección de incidencia de la luz (Figura 2.1.18).



Figura 2.1.18 Características de las dispersiones Rayleigh (simétrica) y Mie (asimétrica) según el tamaño de las partículas.

Cuadro comparativo de las resoluciones de distintos sistemas satelitales ópticos y térmicos utilizados en estudios realizados en el golfo San Matías.

Sistema Satelital	Resolución radiométrica		Res. Temporal (días)	Resolución espectral					Características espaciales				
	bits	valores		Nro. De canales (bandas)					Ancho de Barrido (km)	Resolución espacial (m)			
				Total	VIS	IR refl	IR term	Pan		VIS	IR reflej	IR term	Pan
Landsat TM	8	256	16	7	3	3	1	--	185	30	30	120	--
Landsat ETM	8	256	16	8	3	3	1	1	185	30	30	60	15
MODIS	12	4096	1	36	10	10	16	--	2330	250-1000	250-1000	250-1000	--
NOAA-AVHRR (datos LAC)	10	1024	0.5	4	1	1	3	--	2700	1100	1100	1100	--
SeaWiFS (datos LAC)	10	1024	1	8	6	2	--	--	2800	1100	1100	1100	--

Niveles de pre-procesamiento de los datos

Los niveles se denominan en general con números, por ejemplo Nivel 0, 1, 2, 3 etc. A mayor nivel, mayor nivel de preprocesamiento tiene la imagen que se distribuye. En general, se divide cada nivel en A y B, donde

Nivel 1A Spot: solo correcciones radiométricas.

Nivel 1B. Spot: correcciones radiométricas y geométricas

Aunque de todas formas esto puede variar de satélite en satélite dependiendo de la Agencia (espacial) que distribuya la información. Por ejemplo, considerando la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) tenemos para el caso de los datos Landsat:

4 Landsat (CONAE): datos con correcciones radiométricas

5 Landsat (CONAE): datos con correcciones radiométricas y geométricas.

Mientras que si se consideran datos AVHRR y SeaWiFS, en general podemos encontrar:

L1A. SeaWiFS: datos no calibrados.

L1B. AVHRR o SeaWiFS: datos calibrados.

L2 SeaWiFS: datos que ya representan valores de clorofila (no solo fueron calibrados sino que además se aplicó el algoritmo que permite obtener concentración de clorofila-a).

Para los datos MODIS, la CONAE distribuye datos en nivel L1B y un archivo geo.hdf, pero existen los siguientes niveles:

L1A MODIS

L1B-MODIS

L2 - MODIS

APENDICE B

APENDICE B: Imágenes mensuales de concentración de clorofila-*a* (SeaWiFS) correspondientes a los meses de septiembre a abril de las temporadas 2000-2001 a 2005-2006 y septiembre a diciembre de 2006.

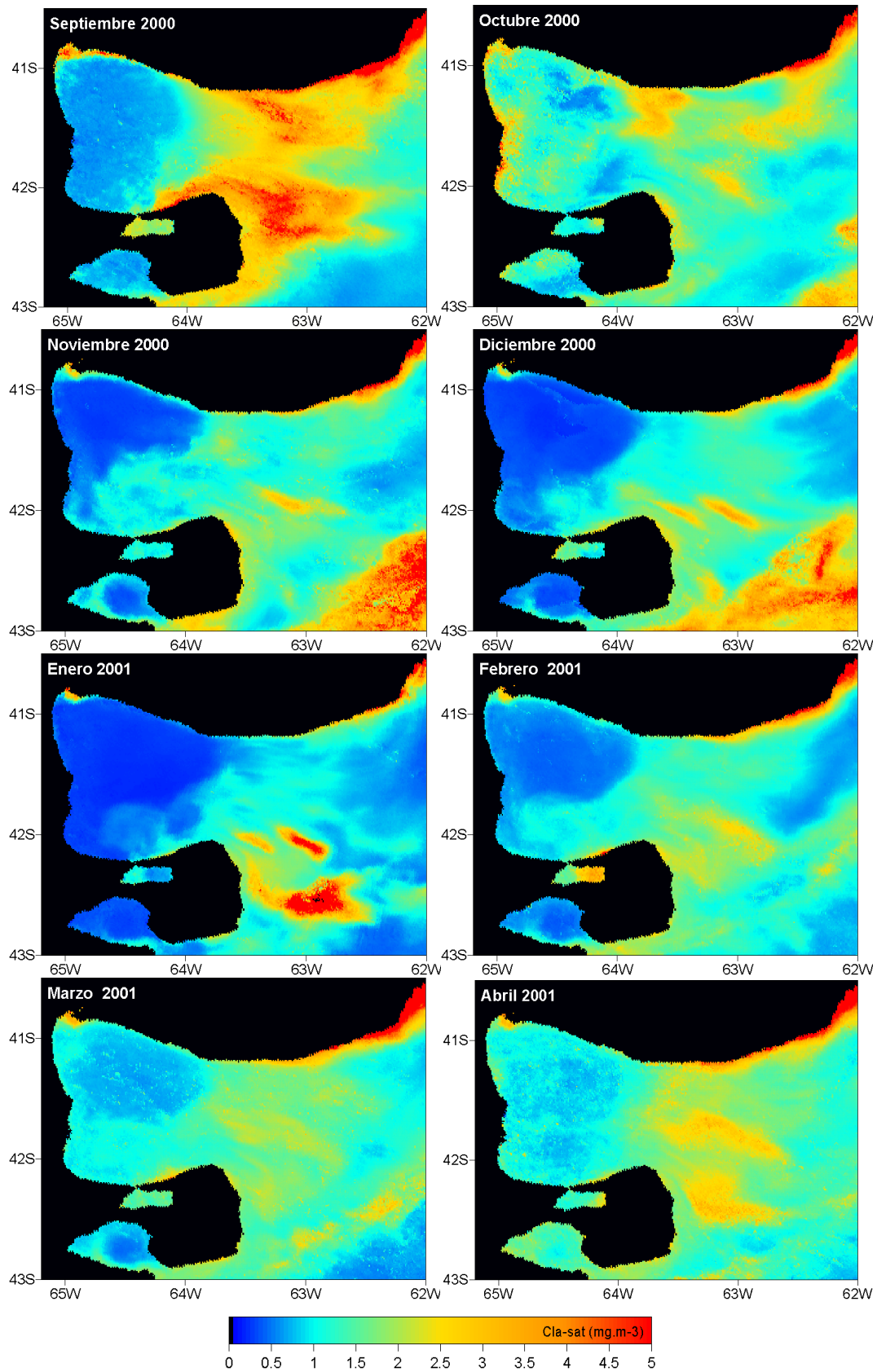


Figura 3.1.1: Medias mensuales de concentración clorofila-*a* ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para la temporada 2000-2001.

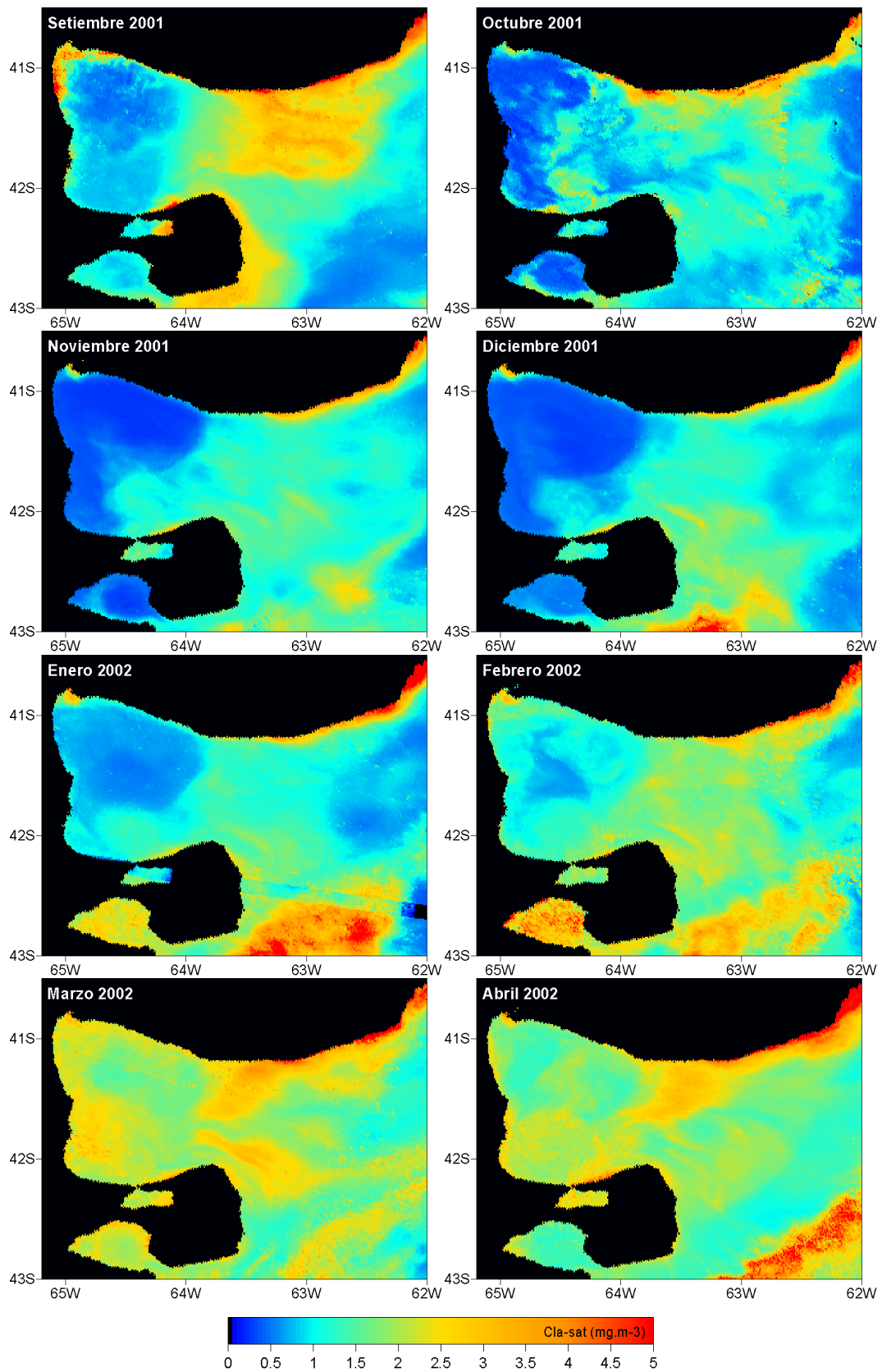


Figura 3.1.2: Medias mensuales de concentración clorofila-a (mg.m-3) para la temporada 2001-2002.

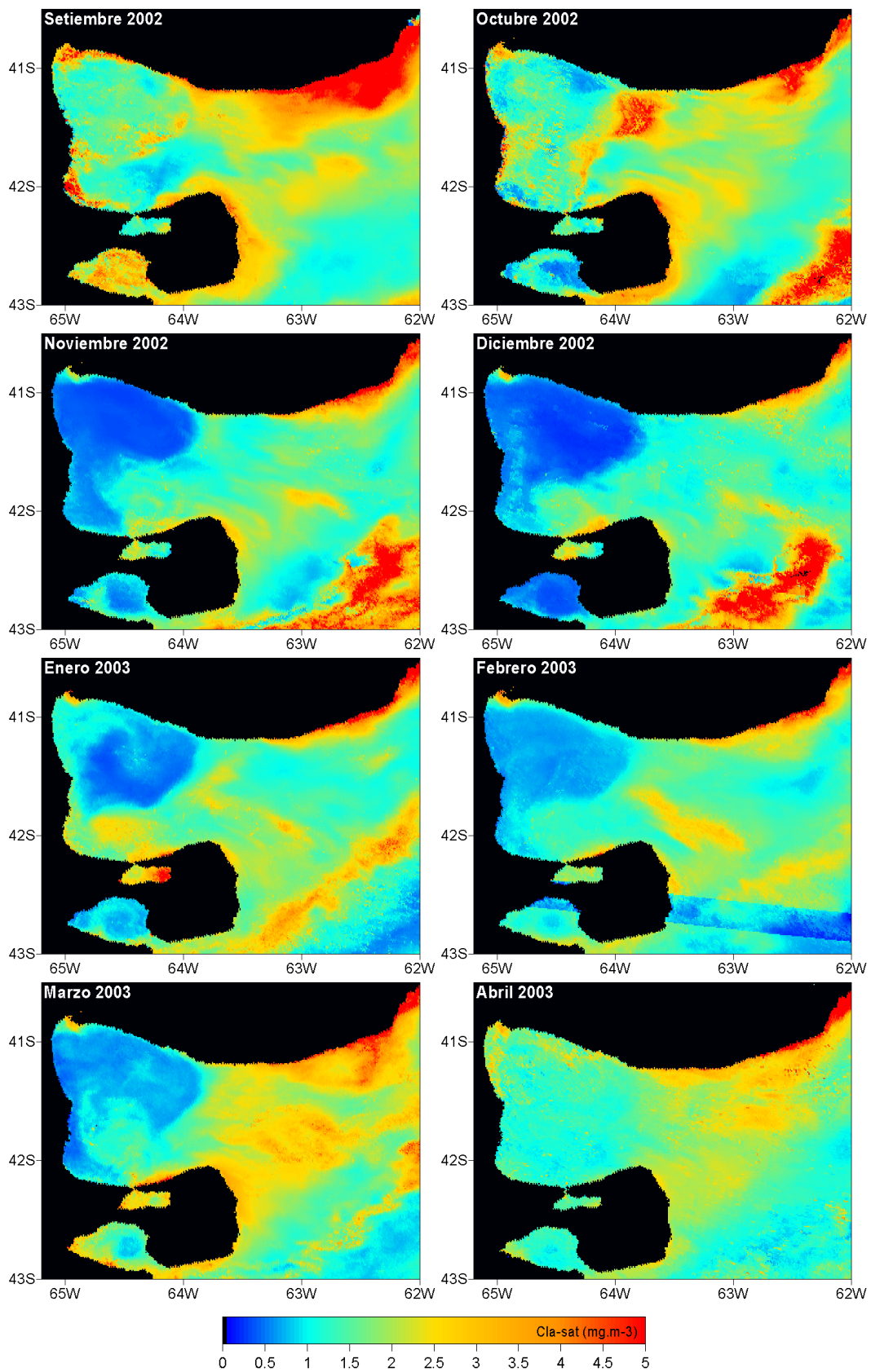


Figura 3.1.3: Medias mensuales de concentración clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para la temporada 2002-2003.

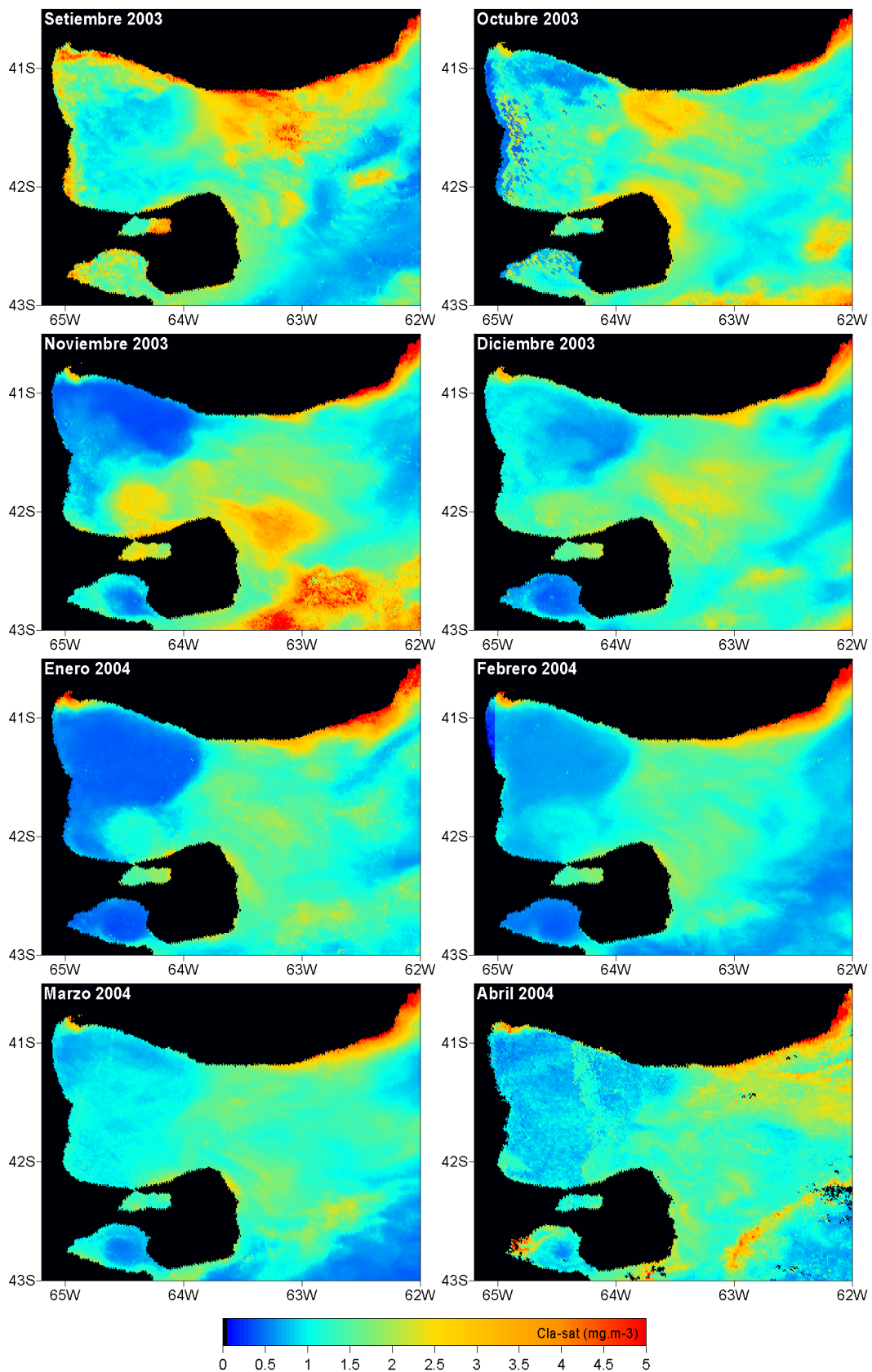


Figura 3.1.4: Medias mensuales de concentración clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para la temporada 2003-2004.

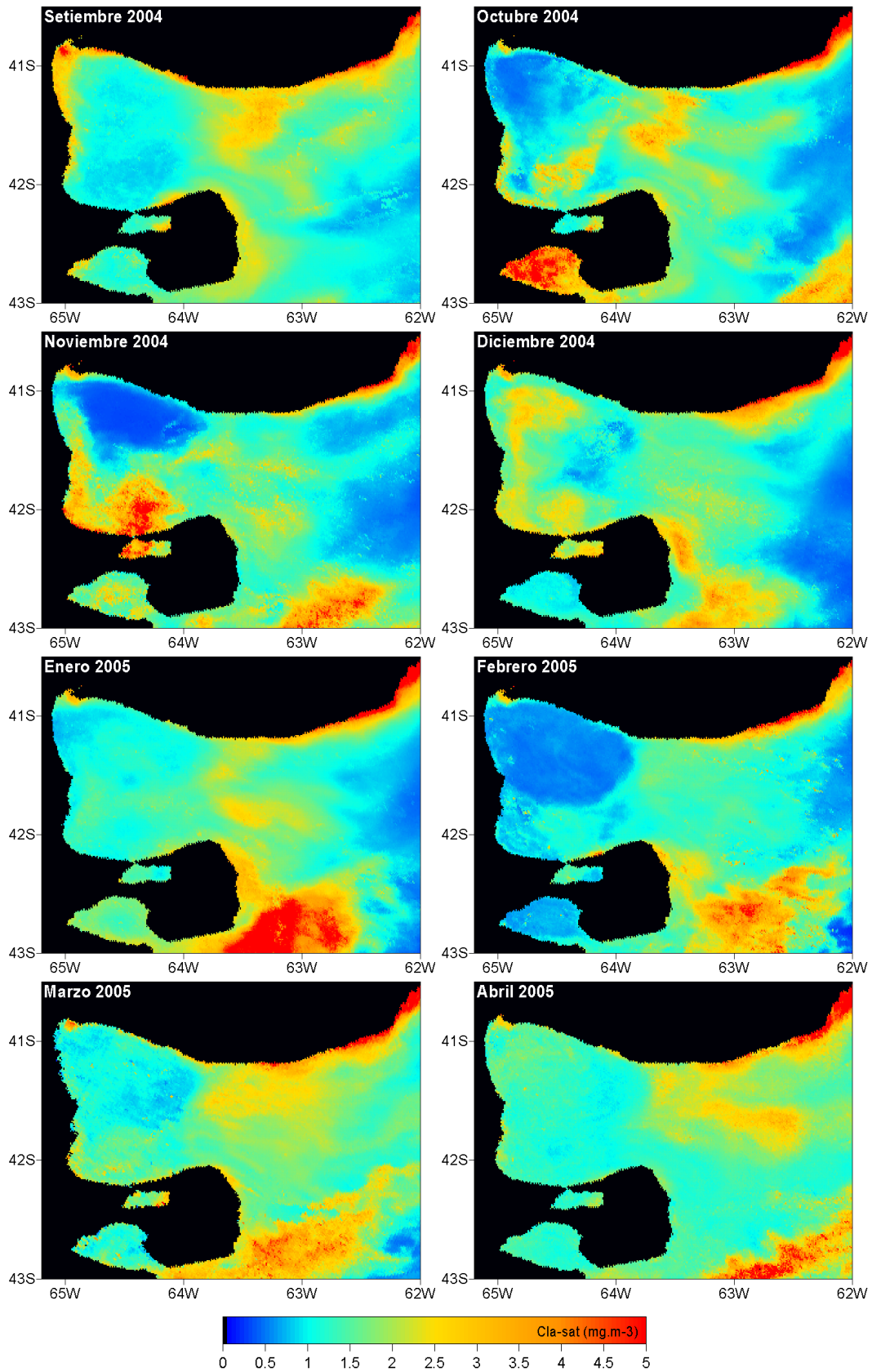


Figura 3.1.5: Medias mensuales de concentración clorofila-a (mg.m-3) para la temporada 2004-2005.

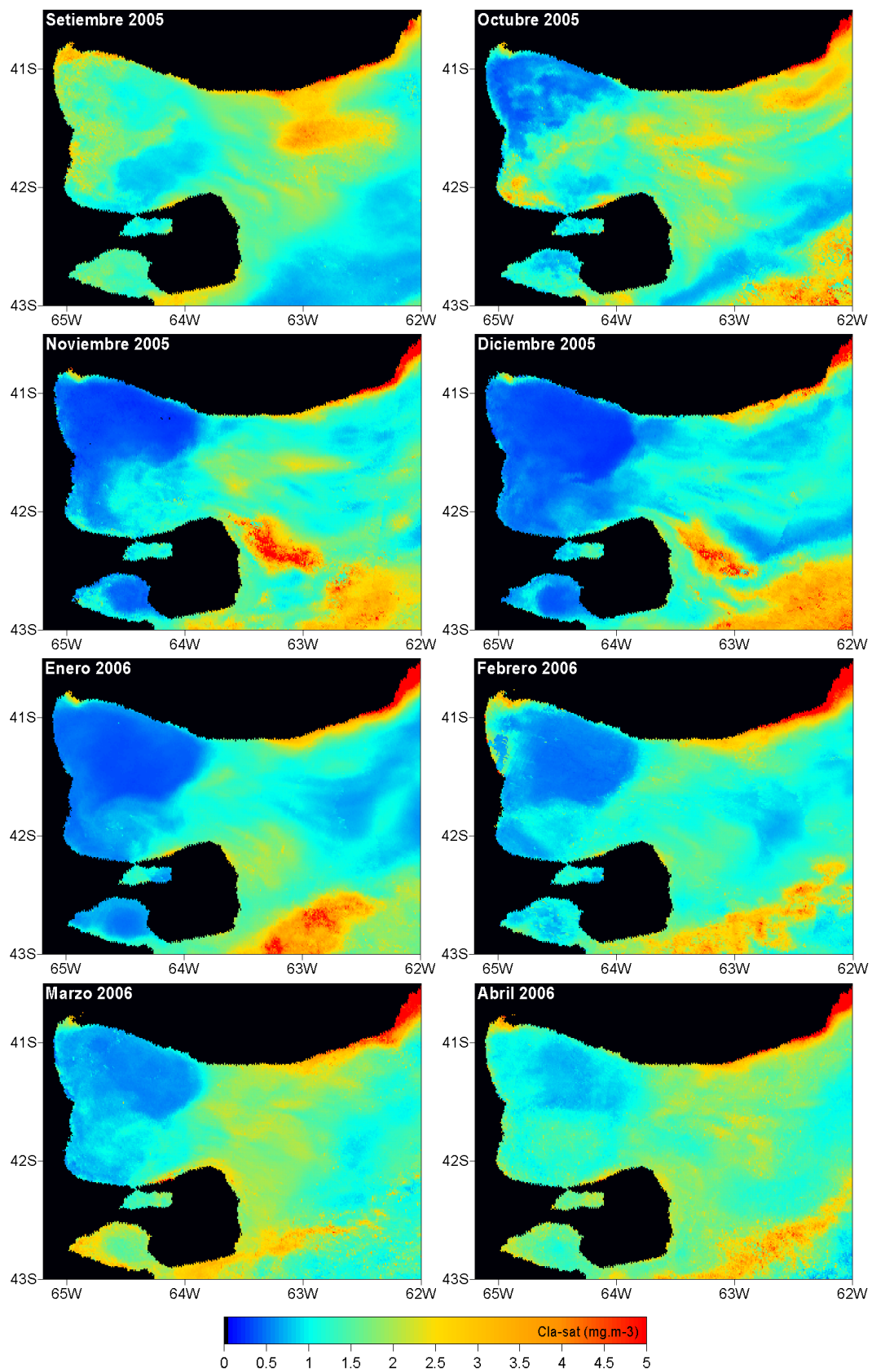


Figura 3.1.6: Medias mensuales de concentración clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para la temporada 2005-2006.

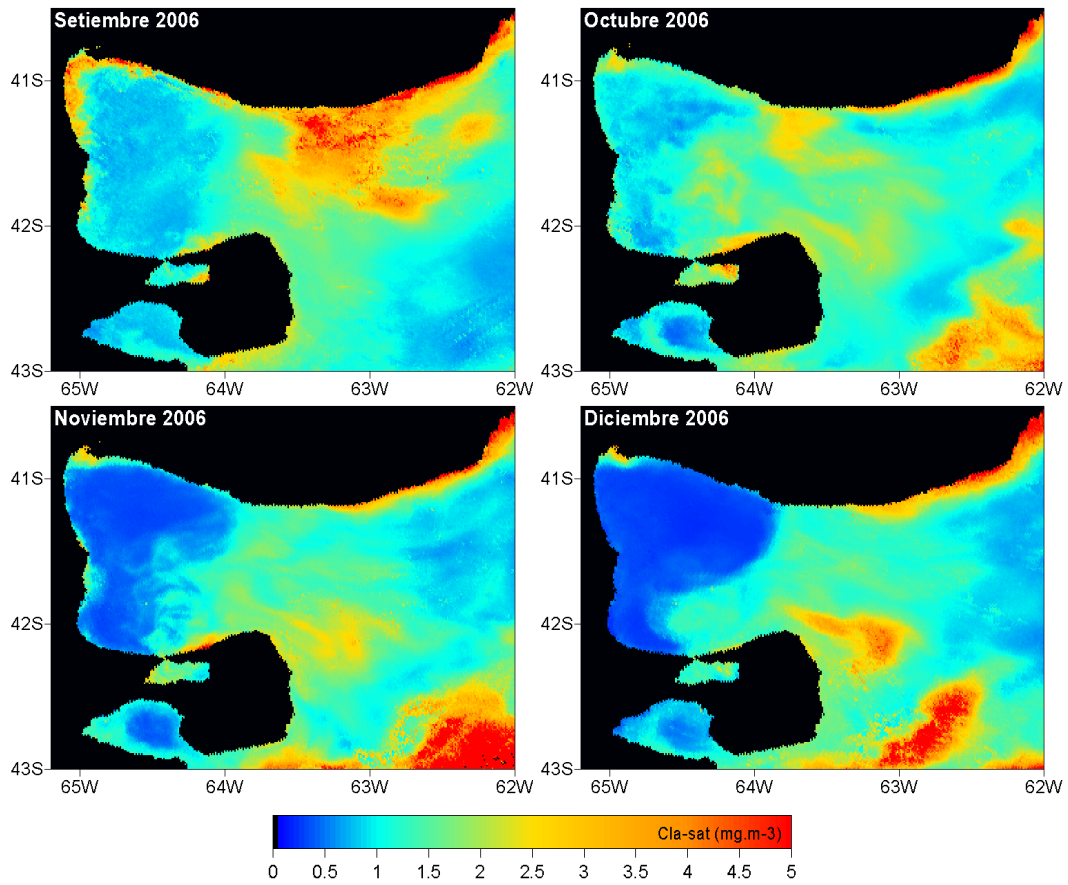


Figura 3.1.7: Medias mensuales de concentración clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) para la temporada 2006

APENDICE C

La forma matemática del algoritmo MCSST (°C) es la siguiente:

$$\text{MCSST} = B_1 (T_4) + B_2(T_4-T_5) + B_3(T_4-T_5)(\text{Secq} -1) - B_4$$

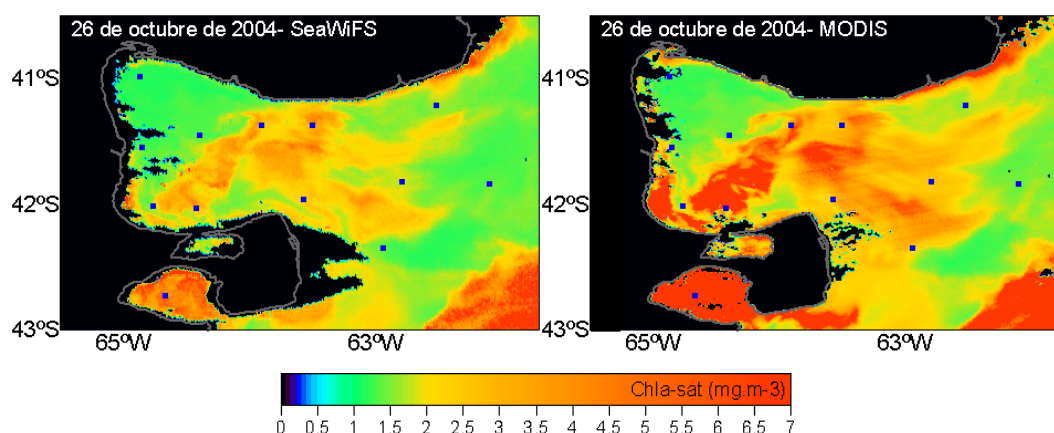
donde, T4 y T5 son las temperaturas de brillo en unidades Kelvin de los canales centrados en las longitudes de onda 11 y 12 μm; Secq es la secante del ángulo cenital satelital q; B1, B2, B3 y B4 son coeficientes constantes Tabla 1 (McClain *et al.*, 1985).

NOAA/AVHRR OPERATIONAL SST ALGORITHMS COEFFICIENTS

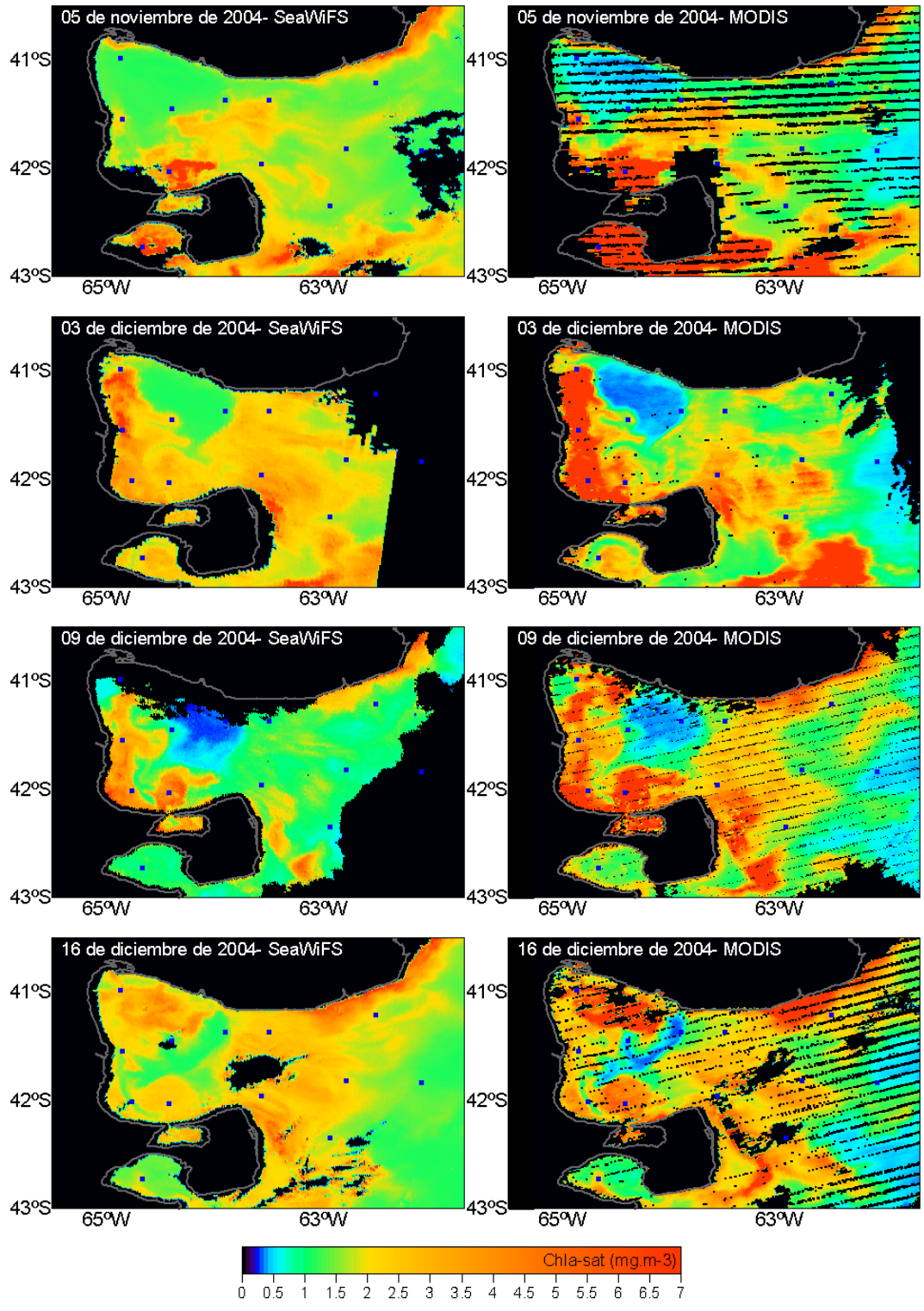
Tabla 1: coeficientes de los algoritmos de TSM del sistema NOAA/AVHRR.

Satelite		Coefficientes
NOAA-12	DAY	B ₁ =0.963563, B ₂ =2.579211, B ₃ =0.242598, B ₄ =263.006
NOAA-12	NIGHT	B ₁ =0.967077, B ₂ =2.384376, B ₃ =0.480788, B ₄ =263.940
NOAA-14	DAY	B ₁ =1.017342, B ₂ =2.139588, B ₃ =0.779706, B ₄ =278.430
NOAA-14	NIGHT	B ₁ =1.029088, B ₂ =2.275385, B ₃ =0.752567, B ₄ =282.240
NOAA-15	DAY	B ₁ =0.964243, B ₂ =2.71296, B ₃ =0.387491, B ₄ =262.443
NOAA-15	NIGHT	B ₁ =0.976789, B ₂ =2.77072, B ₃ =0.435832, B ₄ =266.290
NOAA-16	DAY	B ₁ =0.999314, B ₂ =2.30195, B ₃ =0.628976, B ₄ =273.768
NOAA-16	Day	B ₁ =0.995103, B ₂ =2.53657, B ₃ =0.753281, B ₄ =273.146
NOAA-16	NIGHT	B ₁ =0.995103, B ₂ =2.53657, B ₃ =0.753281, B ₄ =273.146
NOAA-17	NIGHT	B ₁ =0.995103, B ₂ =2.53657, B ₃ =0.753281, B ₄ =273.146
NOAA-17	DAY	B ₁ =0.992818, B ₂ =2.49916, B ₃ =0.915103, B ₄ =271.206

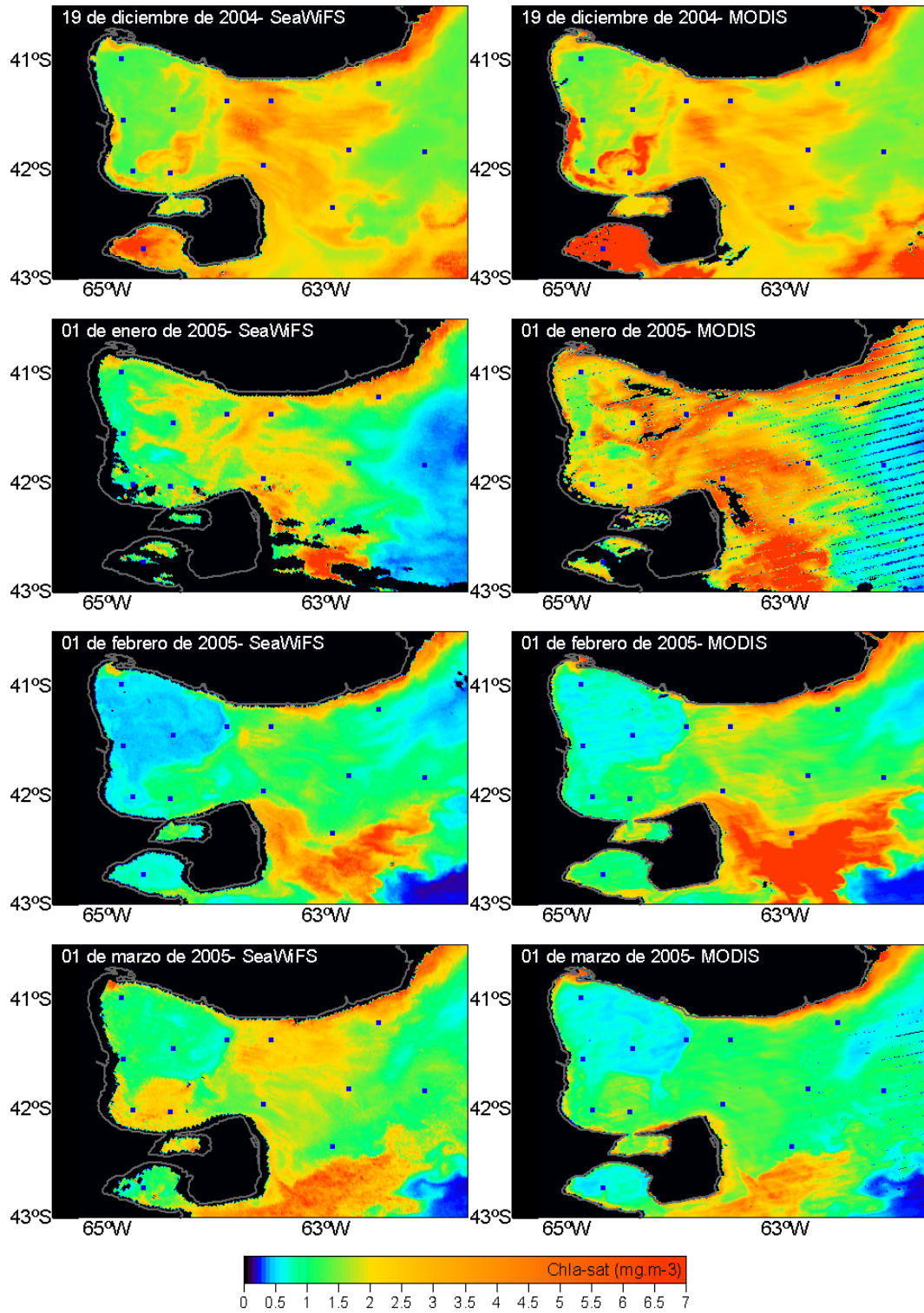
Pares de imágenes de concentración de clorofila-*a* SeaWiFS y MODIS correspondientes a una misma fecha utilizadas para evaluar la correspondencia en los valores de clorofila-*a* (Chla-sat) obtenidos mediante los algoritmos OC4v4 (SeaWiFS) y OC3M (MODIS).



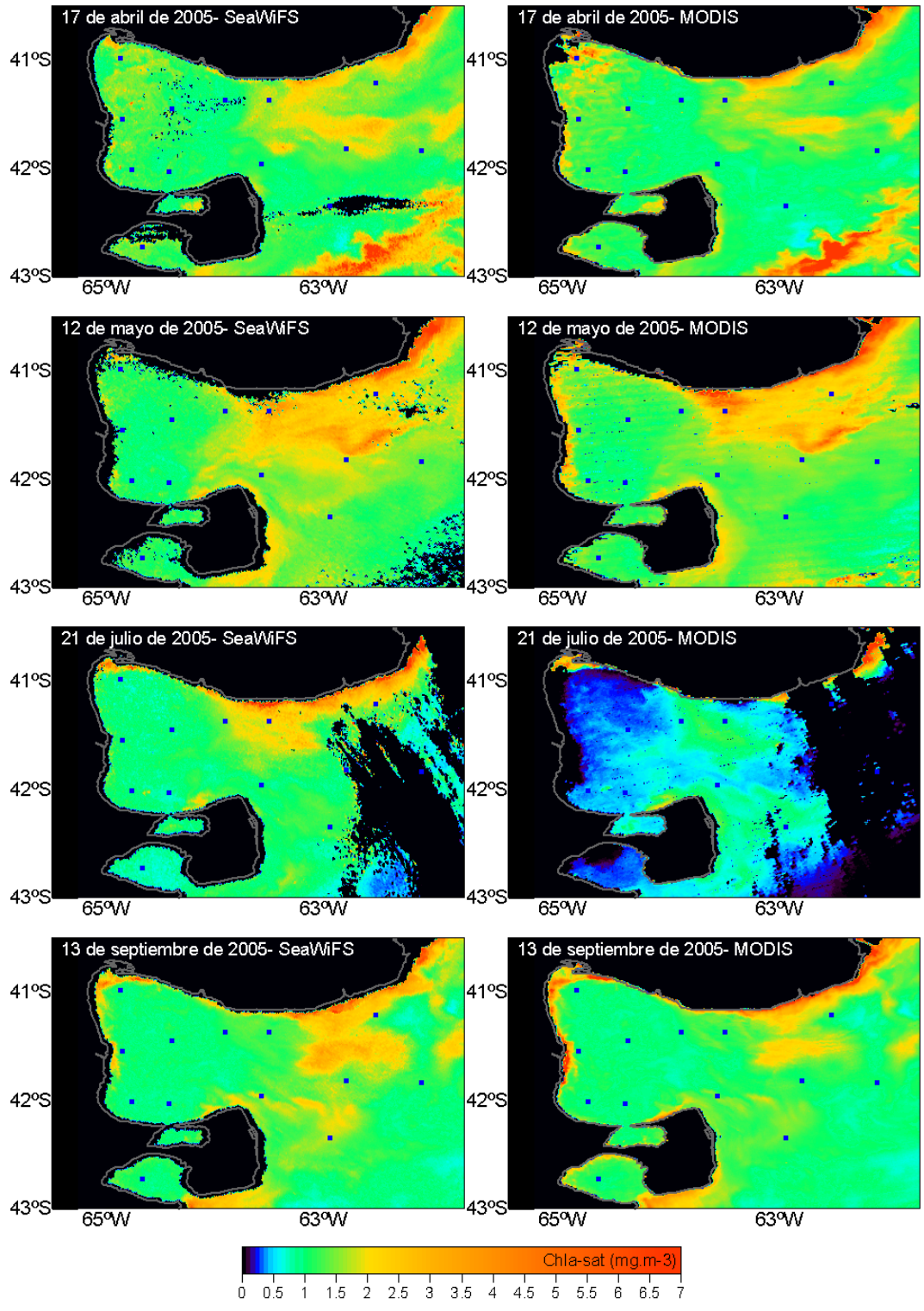
APENDICE C



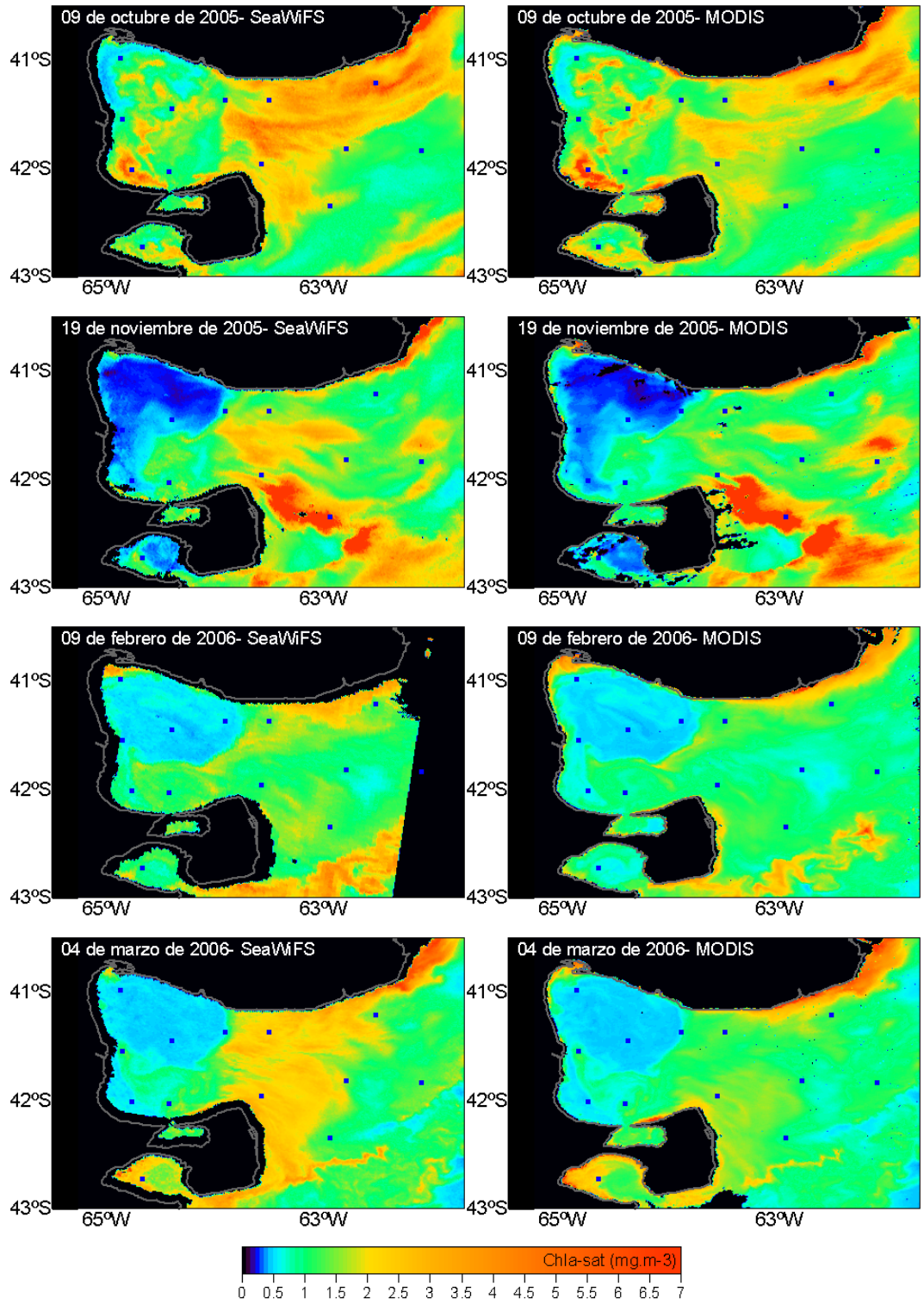
APENDICE C



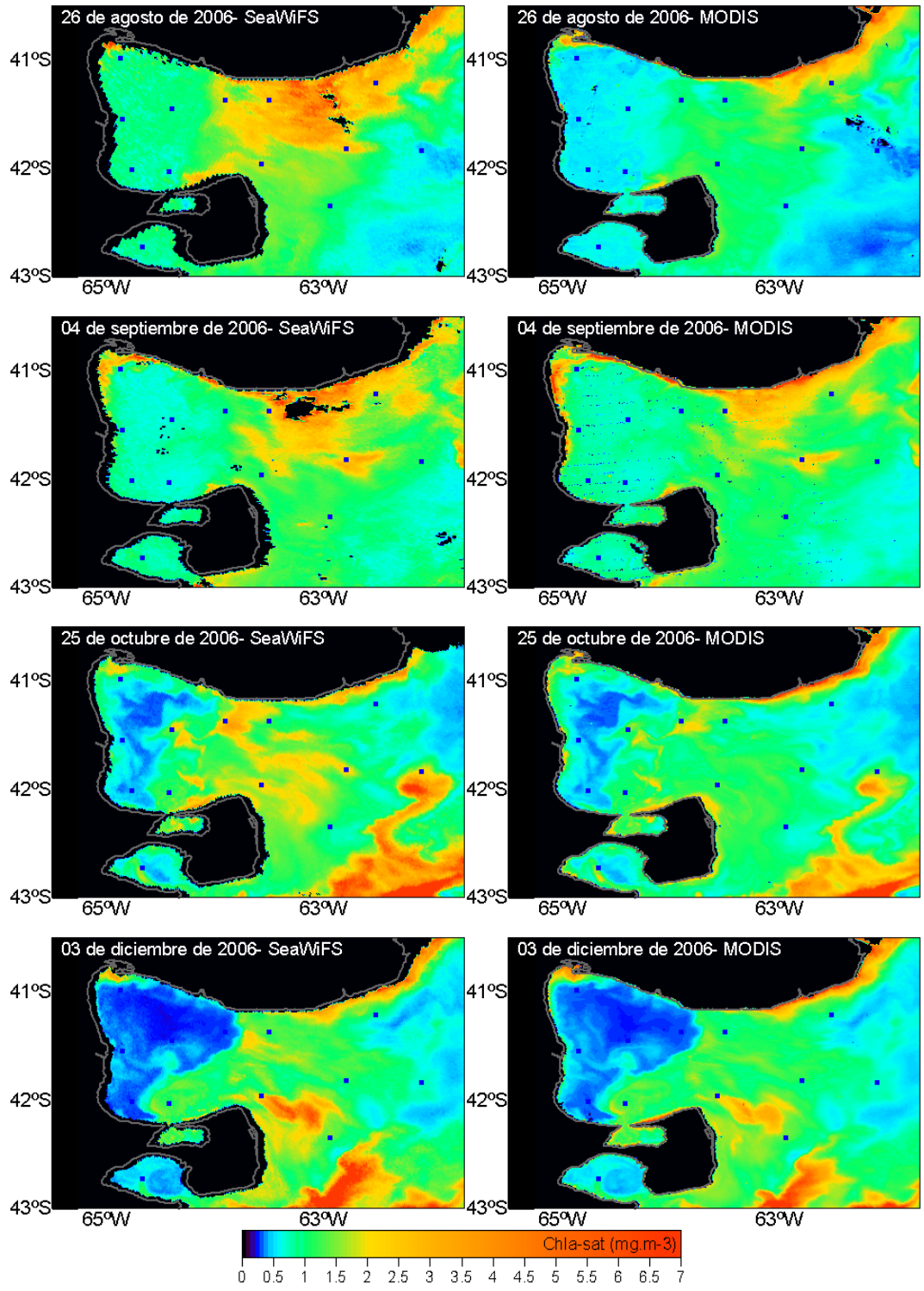
APENDICE C



APENDICE C



APENDICE C



APENDICE D

Análisis estadísticos Sección 3.1

1-Temperatura Superficial del mar (TSM)

1.1. Diferencias entre áreas del GSM. Los datos mensuales climatológicos de TSM correspondientes a cada área del GSM no ajustaron a una distribución normal, las pruebas *Kolmogorov-Smirnov*, *Chi-Square* y *Lilliefors* avalan esta conclusión (Fig. 1).

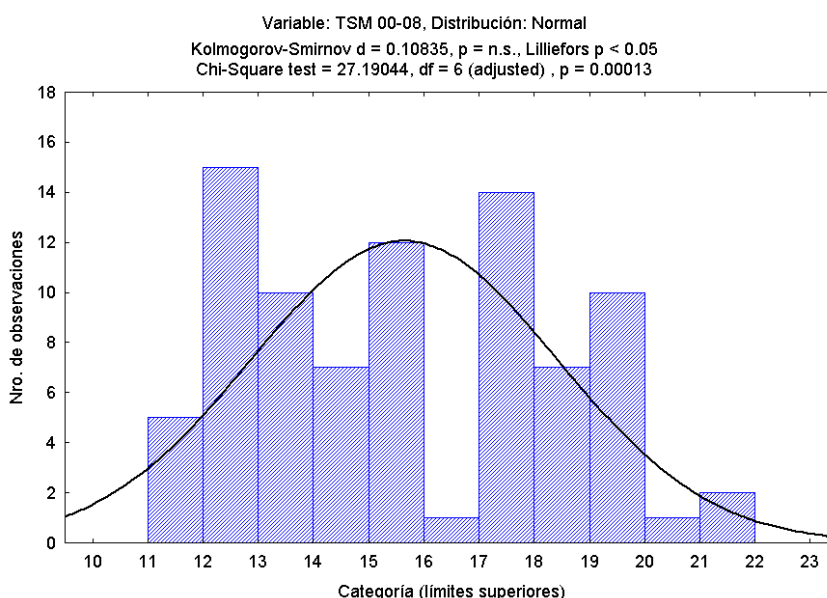


Figura 1: Resultados y gráficos de distribución observada (barras verticales) y distribución esperada para datos mensuales climatológicos de TSM (línea continua).

Variable	Bartlet (estadístico)	Grados de libertad	N	p	Valor crítico $(\chi^2_{(6)})$	Supuesto de homocedacia
TSM	4.97	6	84	0,54 (ns)	15,50	Se cumple.

(ns) no significativo

Tabla 1. Resultado de la prueba de Bartlet para probar la homogeneidad de varianza de los datos.

La prueba de Kruskal Wallis (Tabla 2) se utilizó para probar si existieron diferencias significativas entre las áreas consideradas ya que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, aunque sí el de homocedacia (Tabla 1).

APENDICE D

Variable	H	Grados de libertad	N	p	Valor crítico ² _(x,6)	Resultado de la prueba
TSM	0,79	6	99	0,99 (ns)	12,59	No existen diferencias estadísticas entre las áreas consideradas.

(ns) no significativo

Tabla 2. Resultado de las pruebas de Kruskal-Wallis entre áreas del GSM.

1.2. Diferencias entre años. Los datos mensuales de TSM correspondientes al período 2000-2008 para el área del GSM no ajustaron a una distribución normal, las pruebas *Kolmogorov-Smirnov*, *Chi-Square* y *Lilliefors* avalan esta conclusión (Fig. 2).

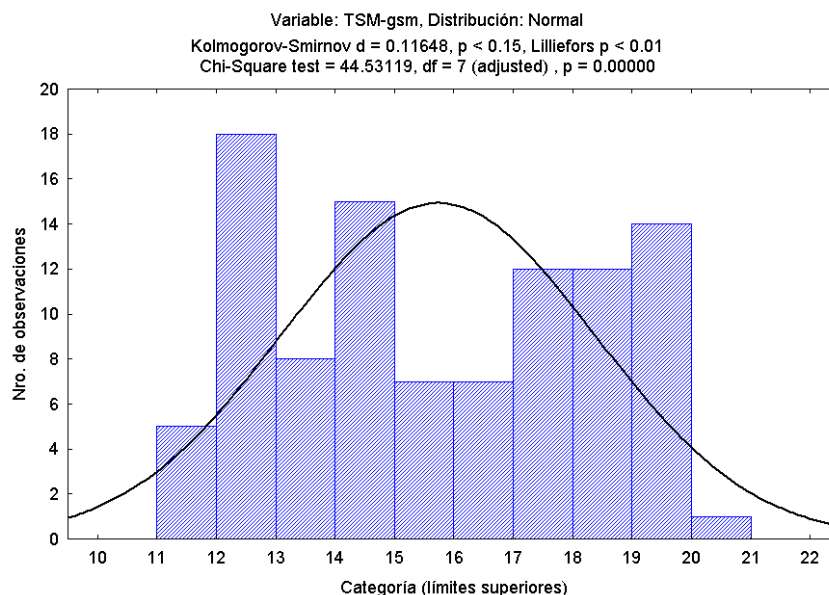


Figura 2: Resultados y gráficos de distribución observada (barras verticales) y distribución esperada para datos mensuales de TSM (2000-2008, línea continua).

Variable	Bartlet (estadístico)	Grados de libertad	N	p	Valor crítico ² _(x,8)	Supuesto de homocedacia
TSM	1.29	8	99	0,99 (ns)	15,50	Se cumple.

(ns) no significativo

Tabla 3. Resultado de la prueba de Bartlet para probar la homogeneidad de varianza de los datos.

APENDICE D

La prueba de Kruskal Wallis (Tabla 4) se utilizó para probar si existieron diferencias significativas entre los años consideradas ya que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, aunque sí el de homocedacia (Tabla 3).

Variable	H	Grados de libertad	N	p	Valor crítico ² _(x,8)	Resultado de la prueba
TSM	0,66	8	99	0,99 (ns)	15,50	No existen diferencias estadísticas entre los años considerados.

(ns) no significativo

Tabla 4. Resultado de las pruebas de Kruskal-Wallis entre años (2000-2008).

2- Clorofila-*a* satelital (Cla-sat)

2.1. Diferencias entre áreas del GSM. Los datos mensuales climatológicos de Cla-sat para cada una de las áreas presentaron distribución log-normal (Fig. 3), por lo cual se realizó el ajuste a la distribución normal aplicando la función logaritmo (Fig. 4).

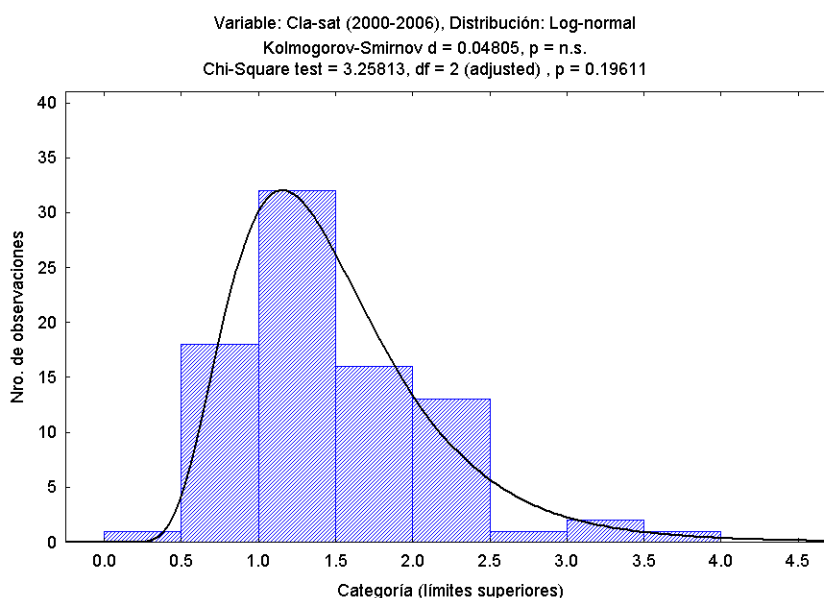


Figura 3. Resultados y gráficos de distribución observada (barras verticales) y distribución esperada para los datos mensuales climatológicos de Cla-sat.

APENDICE D

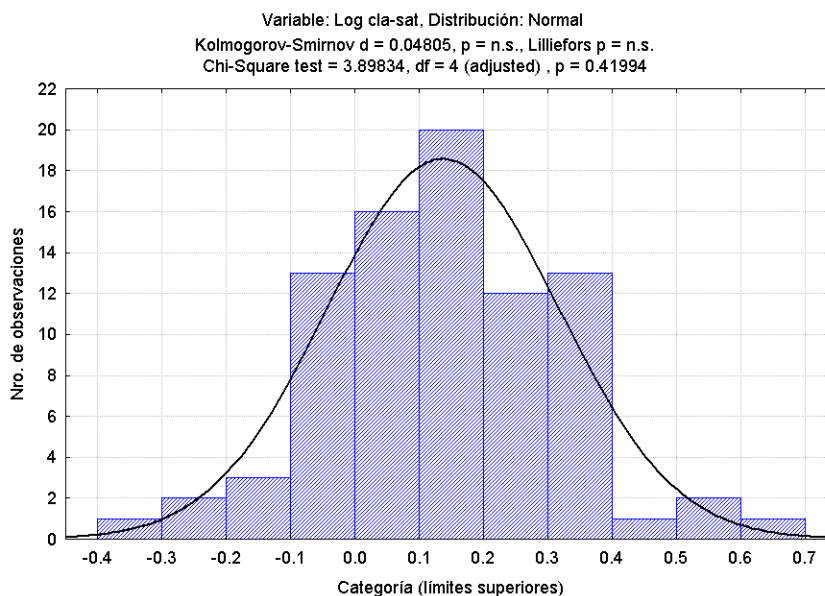


Figura 4. Resultados y gráficos distribución observada (barras verticales) y distribución esperada para datos mensuales climatológicos de Log [Cla-sat].

Variable	Bartlet (estad.)	Grados de libertad	N	p	Valor crítico $\chi^2_{(x,6)}$	Supuesto de homocedacia
Log [Cla-sat]	15.86	6	88	<0,05*	12,59	No se cumple.

*significativo

Tabla 4. Resultado de la prueba de Bartlet para probar la homogeneidad de varianza de los datos.

La prueba de Kruskal Wallis (Tabla 5) se utilizó para probar si existieron diferencias significativas entre las áreas consideradas ya que los datos no cumplieron el supuesto de homocedacia (Tabla 4), aunque sí se pudieron ajustar a una distribución normal (Fig. 4).

Variable	H	Grados de libertad	N	p	Valor crítico $\chi^2_{(x,6)}$	Resultado de la prueba
Cla-sat	47,33	6	88	<0,05*	12,59	Existen diferencias estadísticas entre las áreas consideradas.

*significativo

Tabla 5. Resultado de las pruebas de Kruskal-Wallis entre áreas (ZN, ZS, ZiS, ZiN, ZSO, GSM).

Contrastes a posteriori. El test de Mann Whitney fue utilizado para la comparación entre pares de áreas, con el objetivo de identificar entre que áreas del Golfo existieron diferencias o similitudes. En la tabla 6 se muestran los niveles de significación en las comparaciones.

	ZN	ZS	ZiS	ZiN	ZSO	BSA	GSM
ZN		p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05
ZS			p<0,05	p<0,05	p=0,60	p<0,05	p=0,08
ZiS				p=0,08	p<0,05	p<0,05	p<0,05
ZiN					p<0,05	p<0,05	p<0,05
ZSO						p<0,05	p=0,06
BSA							p<0,05
GSM							

Tabla 6. Resultados de la prueba de Mann Whitney (los resultados significativos se indican en rojo).

2. 2. Diferencias entre años. Los datos mensuales (2000-2006) de Cla-sat para el área del GSM ajustaron a la distribución normal, las pruebas *Kolmogorov-Smirnov*, *Chi-Square* y *Lilliefors* avalan esta conclusión (Fig. 5).

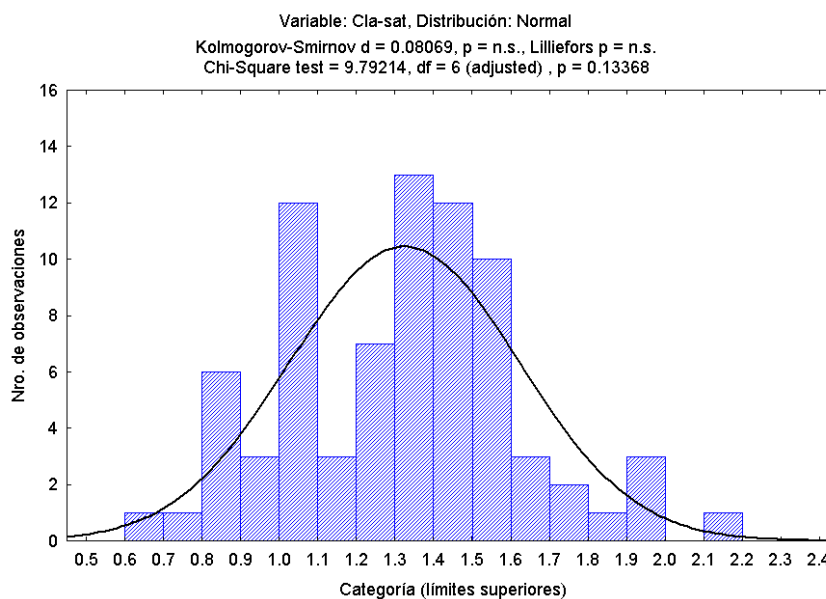


Figura 5. Resultados y gráficos de distribución observada (barras verticales) y distribución esperada para datos mensuales de Cla-sat para el área del GSM.

APENDICE D

Variable	Bartlet (estad.)	Grados de libertad	N	p	Valor crítico $(x^2,6)$	Supuesto de homocedacia
Log [Cla-sat]	13,57	6	78	p < 0,05*	12,59	No se cumple.

*significativo

Tabla 7. Resultado de la prueba de Bartlet para probar la homogeneidad de varianza de los datos.

La prueba de Kruskal Wallis (Tabla 8) se utilizó para probar si existieron diferencias significativas entre las áreas consideradas ya que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad (Fig. 5) pero no con el de homocedacia (Tabla 7).

Variable	H	Grados de libertad	N	p	Valor crítico $(x^2,6)$	Resultado de la prueba
Cla-sat	8,77	6	78	0,19(ns)	12,59	No existen diferencias significativas entre los años considerados.

ns= no significativo

Tabla 8. Resultado de las pruebas de Kruskal-Wallis entre años (2000-2006).

APENDICE E

Estadios gonadales de las hembras de merluza

La determinación de los estadios gonadales de las hembras de merluza se realizó utilizando una escala de siete estadios basada en la apariencia externa de las gónadas (modificado de Holden y Raitt 1975):

I) Virginal: ovarios pequeños, translúcidos, turgentes, de color rosado muy pálido.

II) Premadurez: ovarios turgentes, transparentes, en ocasiones la irrigación vascular es evidente. Corresponde a hembras que comienzan a madurar por primera vez.

III) Maduración incipiente: Ovarios aumentados de tamaño, de color amarillo pálido, ovocitos visibles a través de la túnica. Corresponde a hembras adultas que reanudan el ciclo.

IV) Maduración avanzada: ovarios considerablemente aumentados de tamaño, ocupan hasta 3/4 partes de la cavidad abdominal, color amarillo intenso, vascularización muy evidente. Tendencia a ser circulares en corte transversal. Ovocitos netamente visibles a través de la túnica.

V) Maduración total y liberación de ovocitos: ovarios ocupando gran parte de la cavidad abdominal. Color amarillo parduzco, no hay irrigación evidente. La túnica deja ver por transparencia ovocitos grandes, translúcidos, muy aglomerados.

VI) Postdesove: ovarios muy flácidos, sanguinolentos, túnica delgada y plegada, gran alteración estructural, lumen amplio. En algunos casos la vacuidad estructural es relativa por quedar remanentes considerables de ovocitos maduros correspondientes a las desovadas III y IV. Se pueden reconocer sin embargo por su flacidez y en ocasiones por tener restos sanguinolentos.

VII) Reversión ovárica: ovarios flácidos y opalescentes. Túnica en ocasiones engrosada pero lisa. Lumen amplio, bordeado por parénquima ovárico escaso.

Holden, M.J. & D.F.S. Raitt. 1975. Manual de Ciencia Pesquera Parte 2 - Métodos para Investigar los Recursos y su Aplicación. FAO Documentos técnicos de pesca T115 Rev.1. 255p.

APENDICE F

Nómina de proyectos que han financiado la presente tesis doctoral:

Características ambientales de los golfos San Matías y San José mediante datos de campañas oceanográficas e imágenes satelitales: identificación de áreas claves en el desarrollo de procesos biológicos, Subproyecto Competitivo de Innovación Tecnológica e Investigación Aplicada N° B-C-Del Proyecto GEF Contaminación y Biodiversidad de las Costas (GEF-PNUD ARG B-B-60) dirigido por Andrés Rivas.

Unidad de Ejecución: CENPAT

Institución de la que depende la Unidad de Ejecución: CONICET

Entidad Acreditadora y/o Financiadora: Subproyectos Competitivos de los Proyectos FMAM/BIRF 28385-AR y PNUD ARG 02/018

Desarrollo de un Marco Conceptual y Metodológico para el Manejo Ecosistémico de las Pesquerías Artesanales y Costeras del Golfo San Matías: Tomando Ventajas del Uso de Sensores Remotos y Otras Herramientas Tecnológicas (PID-371).

Investigador responsable: Raúl Gonzáles

Unidad de Ejecución: Instituto de Biología Marina y Pesquera "Alte Storni"

Institución de la que depende la Unidad de Ejecución: Ministerio de Economía de la Prov. de Río Negro

Entidad Acreditadora y/o Financiadora: gencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica/FONCYT

Determinación de Características Ambientales del Golfo San Matías Mediante Información Satelital y Datos de Campañas: Contribución al Manejo de los Recursos Pesqueros. Proyecto 2005-2007 (15221) Investigadores responsable: Domingo A. Gagliardini.

Unidad de Ejecución: IAFE

Institución de la que depende la Unidad de Ejecución: CONICET

Entidad Acreditadora y/o Financiadora: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica/FONCYT.

Base de imágenes satelitales: su aplicación en la caracterización de distintos ambientes y el estudio de recursos vivos del Mar Argentino. Proyecto PICT 06-649

Investigador responsable: Domingo A. Gagliardini.

Unidad de Ejecución: IAFE

Institución de la que depende la Unidad de Ejecución: CONICET

Entidad Acreditadora y/o Financiadora: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica/FONCYT.

Use of SAC-D observatory for supporting research in fisheries and ecosystem management in San Matías Gulf (Patagonia Argentina)

Investigador responsable: Maite A. Narvarte.

Unidad de Ejecución: IBMAS

Institución de la que depende la Unidad de Ejecución: Ministerio de Economía de la Provincia de Río Negro

Entidad Acreditadora y/o Financiadora: Ministerio de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) .

Trabajo de respaldo

Se adjunta la separata de: un artículo publicado en el "*International Journal of Remote Sensing*". Este trabajo representa una síntesis de la integración de los resultados obtenidos en la tesis (Capítulo 3.1 y Capítulo 5).

Williams, G. N., Sapoznik, M., Ocampo-Reinaldo, M. Solís, M. Narvarte, M., González, R., Esteves, J.L., Gagliardini, D.A., 2010: Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and in-situ data in San Matias Gulf, Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. 31(17-18): 4531-4542. Print ISSN: 0143-1161 Online ISSN: 1366-5901. Taylor & Francis Ltd.

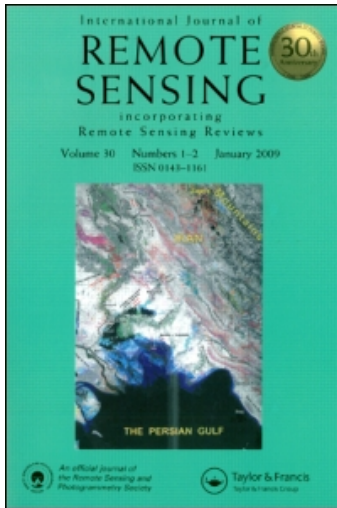
This article was downloaded by: [Brown University Library]

On: 6 October 2010

Access details: Access Details: [subscription number 915935598]

Publisher Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



International Journal of Remote Sensing

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713722504>

Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and *in situ* data in San Matías Gulf, Argentina

G. Williams^{ab}; M. Sapoznik^c; M. Ocampo-Reinaldo^{ad}; M. Solis^{ab}; M. Narvarte^{ad}; R. González^d; J. L. Esteves^{ab}; D. Gagliardini^{abc}

^a Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina ^b

Centro Nacional Patagónico (CENPAT), Puerto Madryn, Chubut, Argentina ^c Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Ciudad Universitaria, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina ^d

Instituto Multidisciplinario de Investigación y Desarrollo de la Patagonia Norte - Subsede San Antonia Oeste (IDEPA-CONICET), Argentina

Online publication date: 28 September 2010

To cite this Article Williams, G. , Sapoznik, M. , Ocampo-Reinaldo, M. , Solis, M. , Narvarte, M. , González, R. , Esteves, J. L. and Gagliardini, D.(2010) 'Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and *in situ* data in San Matías Gulf, Argentina', International Journal of Remote Sensing, 31: 17, 4531 — 4542

To link to this Article: DOI: 10.1080/01431161.2010.485218

URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.485218>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.informaworld.com/terms-and-conditions-of-access.pdf>

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Comparison of AVHRR and SeaWiFS imagery with fishing activity and *in situ* data in San Matías Gulf, Argentina

G. WILLIAMS^{†‡*}, M. SAPOZNIK[§], M. OCAMPO-REINALDO^{†¶}, M. SOLIS^{†‡},
M. NARVARTE^{†¶}, R. GONZÁLEZ[¶], J. L. ESTEVES^{†‡}
and D. GAGLIARDINI^{†‡§}

[†]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET),
Buenos Aires, Argentina

[‡]Centro Nacional Patagónico (CENPAT), Puerto Madryn, Chubut, Argentina

[§]Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Ciudad Universitaria, Ciudad
Autónoma de Buenos Aires, Argentina

[¶]Instituto Multidisciplinario de Investigación y Desarrollo de la Patagonia Norte – Subse-
de San Antonia Oeste (IDEPA-CONICET), Argentina

Seven years (January 2000 to December 2006) of AVHRR and SeaWiFS data were used to estimate monthly climatological means and to present SST and chlorophyll-*a* seasonal evolution in San Matías Gulf, located between 40° 47' S and 42° 13' S on the Argentine coast. SST and chlorophyll-*a* satellite maps corresponding to spring–summer showed two well differentiable sectors: the southern zone presented colder waters and higher chlorophyll-*a* concentration while the northern one showed warm water and lower chlorophyll-*a*. Hake (*Merluccius hubbsi*) is the most important resource in terms of landings and economic revenues of the San Matías Gulf. Fishing activity data gathered by a Vessel Monitoring System (2004–2006) were linked with SST and chlorophyll-*a* maps showing that the fishing vessels operated on the thermal front from November to March and had the maximum hake yields. In addition, AVHRR-SST and SeaWiFS-chlorophyll-*a* data were compared with temperature and chlorophyll-*a* measured in oceanographic surveys carried out in 2007.

1. Introduction

San Matías Gulf (SMG, figure 1(a)), located between 40° 47' S and 42° 13' S on the Argentine coast covers an area of approximately 20 000 km² being the second largest gulf in this country. Around 55% of the total area is deeper than 100 m, with a maximum of 180 m in the central area. The continental shelf on the eastern side forms an open basin with a mean depth of 70 m at the entrance. SMG has been studied through oceanographic surveys between 1971 and 1994. These studies identified the presence of two separated areas from November to March: the northern and western area has high temperature and salinity, a marked thermocline, limiting nitrate concentrations and lower renewal rate, and the southern and south-eastern area has lower temperature and salinity, lack of stratification and relatively higher nitrate concentration, being strongly influenced by the intrusion of cold water from the south (Carreto *et al.* 1974, Rivas and Beier 1990). Oceanographic data also showed a thermal front during the summer located near 41° 50' S, which separates both areas (Piola and Scasso 1988). Remote sensing studies using Advanced Very High Resolution Radiometer

*Corresponding author. Email: williams@cenpat.edu.ar

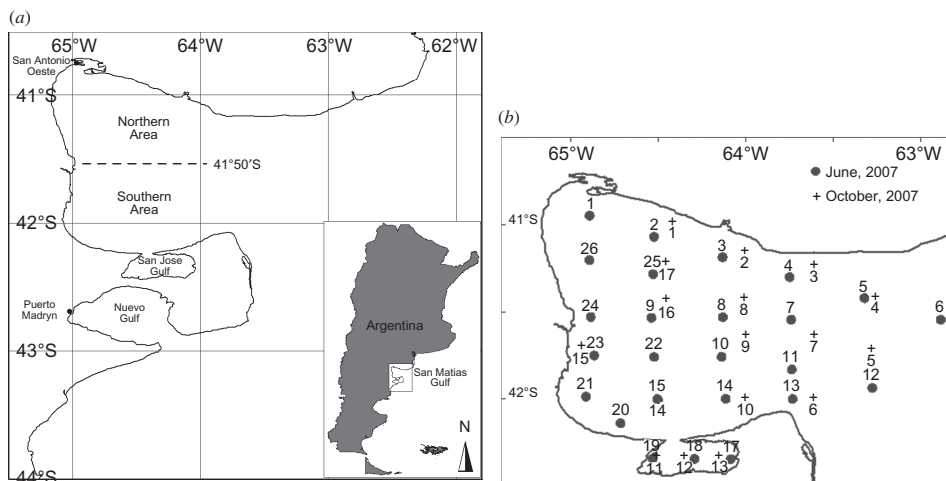


Figure 1. (a) Study area in San Matías Gulf showing the northern and southern areas (west of $63^{\circ} 45' W$). (b) Sampling stations of the oceanographic surveys.

(AVHRR) thermal data from National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) satellites confirmed the presence of the thermal front previously inferred by oceanographic surveys data (Rivas and Dell'Arciprete 2000, Bava *et al.* 2002). Brightness temperature maps from Landsat Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper (TM/ETM) images corresponding to spring–summer months also revealed a sea surface temperature (SST) distribution characterized by the presence of two zones with different temperatures. Satellite datasets showed an average difference in SST between both regions in the order of $1\text{--}3^{\circ}\text{C}$, except during winter when the thermal front vanishes (Piola and Scasso 1988, Gagliardini and Rivas 2004).

The common hake is the most important fishery in terms of landings and economic revenues in SMG (González *et al.* 2007). An integrated management of the fishery resources will be possible through the knowledge and understanding of biotic and abiotic factors that govern the distribution and abundance of exploited marine stocks (Santos 2000). The remote sensing methods, jointly with classical *in situ* measurements, constitute an efficient way to improve the environmental knowledge of fisheries ecosystems. They have been used in SMG with increasing success to confirm previous oceanographic findings. However, environmental and biological studies in this gulf have usually been conducted under independent schedules.

The aim of the present paper was to characterize environmental conditions of SMG (SST and chlorophyll-*a*) and their spatial and temporal distribution during the period 2000–2006. SST and thermal gradients were related to the spatial distribution of the hake inferred by fishing activities recorded between 2004 and 2006. Additionally, data of temperature and chlorophyll-*a* from two oceanographic cruises, carried out in 2007, were used to assess their fitting with satellite sensor data.

2. Material and methods

2.1 Remote sensing data

Data from the Daily Level 1B local area coverage (LAC) AVHRR onboard the NOAA-N polar orbiting satellites and Sea-Viewing Wide Field of view Sensor

Table 1. Number of images used in calculating the climatological means for the period 2000–2006.

	AVHRR	SeaWiFS
January	63	51
February	73	37
March	58	26
April	51	21
May	11	11
June	27	6
July	33	8
August	25	15
September	40	28
October	28	28
November	64	32
December	70	36
Total	543	299

(SeaWiFS) were acquired through the Argentine National Commission of Space Activities (CONAE) for the period 2000–2006.

Relatively cloud-free AVHRR and SeaWiFS scenes were processed applying the Multichannel Sea Surface Temperature (MCSST) (McClain *et al.* 1985) and OC4v4 algorithms (O'Reilly *et al.* 1998), respectively. AVHRR and SeaWiFS data were processed using Erdas Imagine and SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS) version 5.2 (update#4) software (Baith *et al.* 2001), respectively. SST and chlorophyll-*a* products were mapped to a Geographic (Lat Long)/WGS84 projection at 1.1 km spatial resolution at nadir and co-registered with respect to a reference landmask. Land and cloudy pixels were flagged to zero and were not considered for the computations. Variability was examined by creating seasonal composites from the daily images, resulting in four scenes per year. Average values for northern and southern areas were calculated using a 24×24 pixels window centred in $41^\circ 05' S$, $64^\circ 37' W$ and $42^\circ 03' S$, $64^\circ 25' W$, respectively with the goal of generating SST and chlorophyll-*a* climatological annual cycle for each area. The number of cloud-free pixels contributing to each monthly composite was spatially and temporally variable and it constituted a limitation for the interpretation of some data in the study area. Table 1 presents the total number of cloud-free images (approximately 80% of the study area) used to calculate the statistics mentioned before.

2.2 Comparison between SST and chlorophyll-*a* satellite and in situ data for oceanographic cruises in 2007

2.2.1 In situ data.

During 2007 water samples were collected on 23–27 June (26 stations) and 17–20 October (17 stations) during two oceanographic surveys (figure 1(b)) conducted with the vessel Río Paraná. Surface temperature was recorded with YSI[®] 556 multiparameter sensor ($\pm 0.15^\circ C$). Chlorophyll-*a* samples were filtered on board through Whatman GF/F glass-fibre filters and kept frozen at $-20^\circ C$ before lab analysis. Samples were extracted with 90% acetone for 20 h, and fluorescence measurements were made with a Turner[®] fluorometer following standard methodology (Strickland and Parsons 1972).

2.2.2 Satellite data. SST-AVHRR (LAC) and SeaWiFS-chlorophyll-*a* (GAC) images were selected and processed for the days in which the oceanographic surveys were carried out. The availability of SeaWiFS (LAC) images from CONAE was interrupted on 22 December 2006, then Global Area Coverage (GAC) images available were acquired through National Aeronautics and Space Administration (NASA) Ocean Colour web.

2.2.3 Statistical analysis. The coincidence between *in situ* and satellite data was defined through a 1×1 and 3×3 pixels window (SeaWiFS and AVHRR, respectively) focusing on the locations of *in situ* stations. Free-cloud pixels were averaged on the images corresponding to survey periods. Graphics and statistical criteria were used to assess the correlation between satellite and *in situ* data. Comparison was made calculating the root mean square (RMS, equation (1)); and the relative error (RE, equation (2)); as follows:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\text{RE})^2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{RE} = \frac{\text{SST}_{\text{sat}}/\text{Chla}_{\text{sat}} - \text{SST}_{\text{situ}}/\text{Chla}_{\text{situ}}}{\text{SST}_{\text{situ}}/\text{Chla}_{\text{situ}}} \quad (2)$$

where SST_{sat} and Chla_{sat} are SST value and chlorophyll-*a* concentration from satellite, SST_{situ} and $\text{Chla}_{\text{situ}}$ are temperature and chlorophyll-*a* measured *in situ* and n is the number of pairs data analysed. Bias, slope and the correlation coefficient (r^2_{SMA}) were calculated following a type II lineal regression model, Standard Major Axis (SMA) (McArdle 1988, Sokal and Rohlf 1995). Logarithmic transformations were applied to chlorophyll-*a* satellite and *in situ* data, since the bio-optical data usually have a log-normal distribution (Campbell 1995). The root mean square log-error (RMS_{\log} , equation (3)), the average error (EM_{\log} , equation (4)) recently used in literature (O'Reilly *et al.* 2000, Gregg and Casey 2004), were calculated by the following equations:

$$\text{RMS}_{\log} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log \text{Chla}_{\text{sat}} - \log \text{Chla}_{\text{situ}})^2} \quad (3)$$

$$\text{EM}_{\log} = \frac{1}{n} \sum (\log \text{Chla}_{\text{sat}} - \log \text{Chla}_{\text{situ}}) \quad (4)$$

2.3 Fishing activity data

Data of the bottom trawl fleet activity for the period 2004–2006 were obtained from two different information sources: hauls locations gathered by a vessel monitoring system (VMS, known as 'SiMPO') (González *et al.* 2004) and monthly hake landings, effort and yield ($\text{CPUE} = \text{catch per unit of effort}$, in kg h^{-1}) obtained from official logbook records of the Fishery Directorate of Rio Negro province (Millán 2007).

The VMS provided real-time data of vessel position, bearing and speed by on board Inmarsat D+ satellite transceivers. Criteria of speed were used to discriminate VMS records during catch activities. All VMS records lower than 2.5 knots and higher than 4.0 knots were excluded, as these were not associated with fishing activity. Fishing activity maps were obtained by calculating the density of the filtered position data on

a 0.01° grid. The plots were then mapped as topographic representations using a Geographic (Lat Long)/WGS84 projection, with Z giving the density of vessel position per unit area on a 0.01° grid (this corresponds approximately to a 1.11 × 1.11 km grid, approximately the same as for satellite images used in this work).

SST-AVHRR monthly maps were obtained for the same period to overlap with the corresponding monthly fishing activity map and to link with CPUE data. Furthermore, SST gradients (°C km⁻¹) were calculated from each monthly SST image by applying Sobel operator in a 5 × 5 window size (Simpson 1990).

3. Results

3.1 Spatial and temporal variability of SST and chlorophyll-a

In order to show the seasonal evolution of SST and chlorophyll-a in SMG, the temporal behaviour of the monthly mean values from northern and southern areas were drawn. SST climatological monthly data (figure 2(a)) showed a clear seasonal cycle, the warmer season being between December and March. During the study period the climatological SST ranged between 13.0 and 20.2°C and 12.7 and 18.6°C in northern and southern zones, respectively. Maximum temperature was reached in February and the minimum in August–September, for both zones. The SST annual cycle allowed quantification of differences between northern and southern areas showing slight differences between April and July, but it increased in August and reached its maximum of about 2.30°C in December and January (table 2).

The chlorophyll-a annual cycle obtained (figure 2(b)) also permitted quantification of differences between both areas. The southern area, with higher chlorophyll-a concentrations, presented two peaks of 1.30 mg m⁻³ in March and October/November (autumn and spring blooms, respectively). In the northern area, maximum values were lower and a minimum value of 0.30 mg m⁻³ was observed in November (table 2).

Seasonal climatological SST and chlorophyll-a maps confirmed that in summer and spring the gulf presents two areas with different environmental characteristics (figures 3 and 4). SST and chlorophyll-a spatial distribution presented good correspondence for the different seasons showing the presence of a frontal zone in summer and spring, and its absence in autumn and winter.

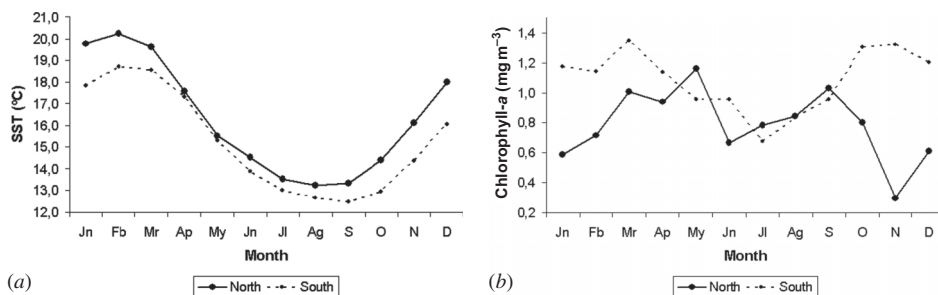


Figure 2. Monthly mean values for 2000–2006 of (a) SST-AVHRR and (b) chlorophyll-a-SeaWiFS.

Table 2. SST and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) average values for the 2000–2006 annual cycle period.

2000–2006	North _{sst} (°C)	South _{sst} (°C)	Difference _{sst} (°C)	North _{chl_a} (mg m ⁻³)	South _{chl_a} (mg m ⁻³)	Difference _{chl_a} (mg m ⁻³)
Mean	16.32	15.42	0.90	0.79	1.08	0.29
Min.	12.98	12.74	0.22	0.30	0.67	0.07
Month	Aug.	Sep.	Jun.	Nov.	Jul.	Aug.
Max.	20.24	18.59	2.30	1.16	1.35	1.02
Month	Feb.	Feb.	Dec.	May	Mar.	Nov.
Annual amplitude	7.26	5.85	–	0.87	0.68	–

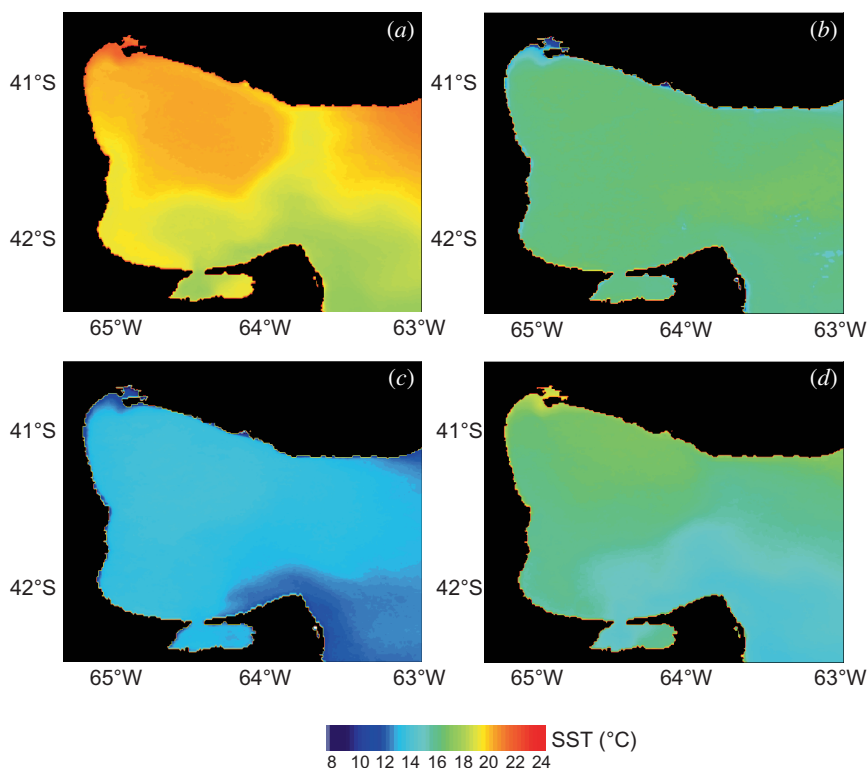


Figure 3. NOAA/AVHRR SST (°C). Seasonal climatological maps 1.1 km (2000–2006).

3.2 Comparison between SST and chlorophyll-*a* satellite and in situ data

Surface temperature measured in June and October (2007) reached values between 11.2 and 12.5°C and 9.8 and 12.4°C, while SST-AVHRR reached 11.9 and 13.4°C and 9.7 and 13.2°C, respectively. Chlorophyll-*a* *in situ* values ranged between 0.0 and 4.6 mg m⁻³ and 0.3 and 6.1 mg m⁻³ in June and October, while SeaWiFS sensor values varied between 0.9 and 1.8 mg m⁻³ and 0.3 and 3.1 mg m⁻³, respectively.

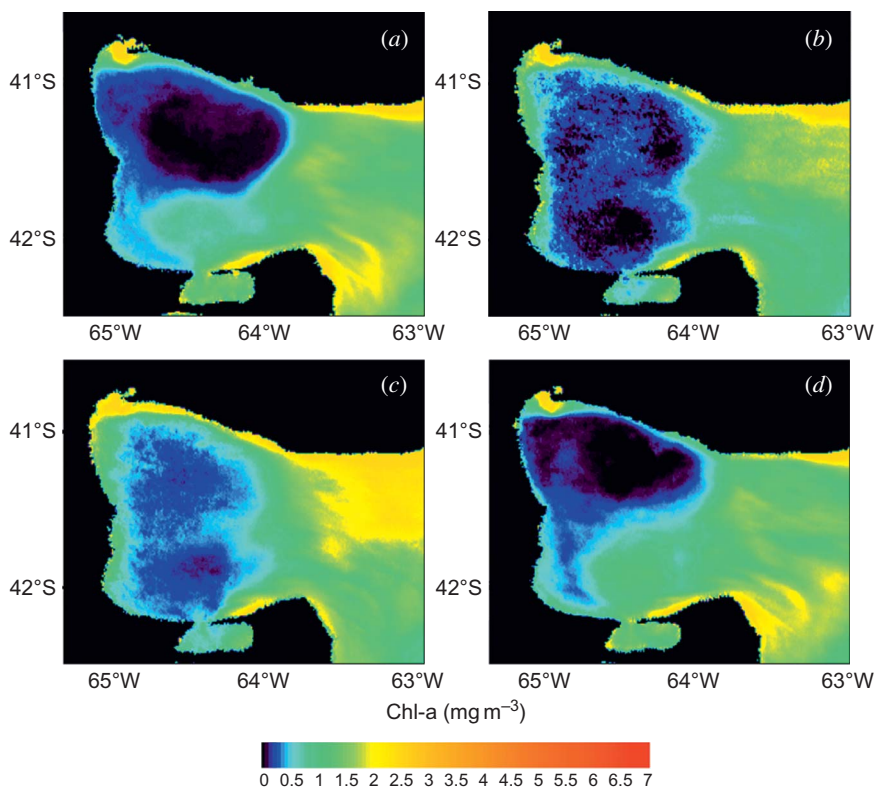


Figure 4. OrbView-SeaWiFS chlorophyll-*a* (mg m^{-3}). Seasonal climatological maps 1.1 km (2000–2006). (a) Summer, (b) autumn, (c) winter, (d) spring.

As a preliminary approach, the qualitative analysis revealed that AVHRR and SeaWiFS images reproduced the spatial distribution of SST and chlorophyll-*a* data measured *in situ* (figure 5). However, differences were observed in the SST and chlorophyll-*a* obtained from *in situ* and remote sensing data. AVHRR-SST were higher than *in situ* temperature in June, while in October were similar.

Variable differences in chlorophyll-*a* data were observed (figure 5(b)) for both cruises. In general, *in situ* estimates were higher (over 2 mg m^{-3}) than satellite values; however chlorophyll-*a* estimates from SeaWiFS were higher than *in situ* in June. Differences between *in situ* and satellite sensor data were not so clear in October.

Scatter plots of satellite sensor data versus *in situ* data were represented for temperature and chlorophyll-*a* correlation analysis (figure 6). A good correlation was observed for SST from AVHRR sensor and *in situ* data ($r^2 = 0.88$) with a root mean square error of 5%. Nevertheless a poor correlation was observed between chlorophyll-*a* from SeaWiFS sensor and the corresponding *in situ* data for both oceanographic surveys ($r^2 = 0.17$, $\text{RMS} = 73.32\%$, figure 6(b)). However, the slope was near 1 and bias to 0 ($b = 0.75$, $a = -0.12$, table 3).

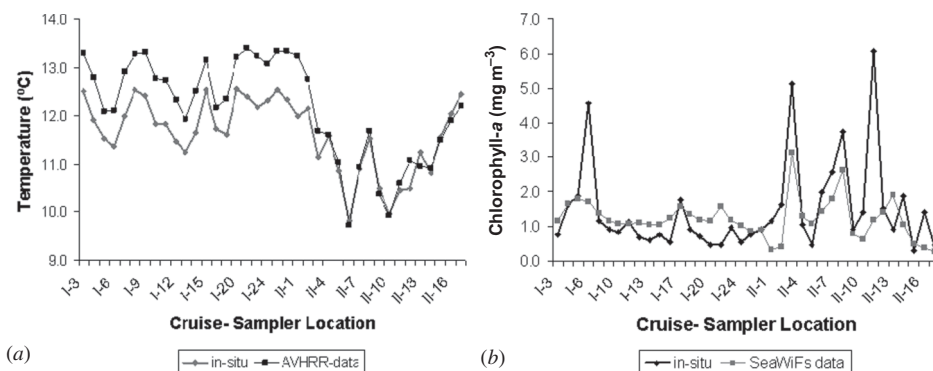


Figure 5. (a) AVHRR-SST and temperature *in situ* data in sampling stations from June (I) and October (II) 2007. (b) SeaWiFS-chlorophyll-*a* and *in situ* data, in sampling stations from June (I) and October (II) 2007.

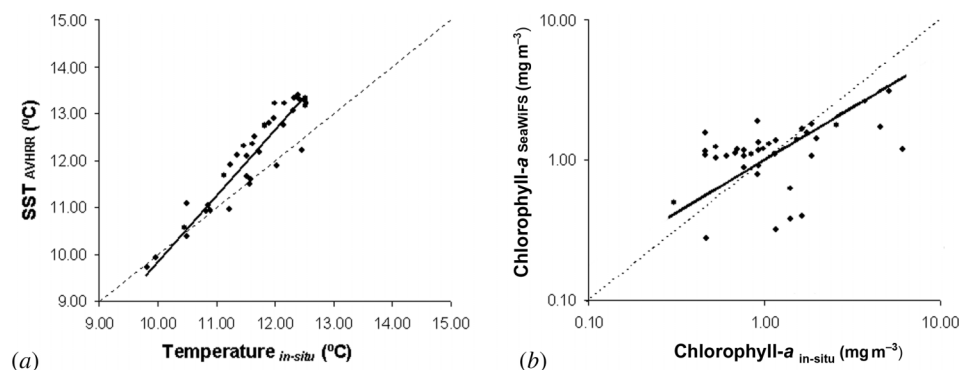


Figure 6. (a) Algorithm-derived estimates versus measured temperature for AVHRR algorithm analysed (MCSST). $y = 1.41x - 4.26$ $R^2_{SMA} = 0.88$ $RMS (\%) = 5.61$ $n = 38$. (b) Algorithm-derived estimates versus measured chlorophyll-*a* for the SeaWiFS algorithm (OC4v4). $y = 1.01x^{0.75}$ $R^2_{SMA} = 0.17$ $RMS (\%) = 73.32$ $n = 38$. The solid line is the linear relationship determined by model II least square regression. The dashed line represents a 1:1 relationship.

Table 3. Statistical results of the *in situ* and satellite sensor data comparison. All linear correlations were statistically significant ($p < 0.05$).

	b	a	r^2	n	RMS- log	RE- log	RMS (%)	RE (%)†	Sensor average value	<i>In situ</i> average value
SST (°C)	1.41	-4.26	0.88	38	—	—	5.61	5	12.14	11.62
Chl- <i>a</i> (mg m ⁻³)	0.75	-0.12	0.17	38	0.29	-0.01	73.32	9	0.04	0.05

†Median percentage error.

3.3 SST and fishing data comparisons

The bottom trawl activity for the common hake was concentrated between 64° 21' 56" and 64° 03' 10" W and 41° 40' 33" and 42°02' 33" S, from December to March. January clearly showed this situation, moreover the fleet activity was particularly localized between 18.0 and 19.5°C isotherms (figure 7(a)), corresponding with the frontal zone, characterized by 0.1 and 0.2°C km⁻¹ thermal gradients (figure 7(b)).

Catch per unit of effort (CPUE) averaged an annual cycle (2004–2006 period, figure 8), showing the maximum hake yields (CPUE) between December and March (700–900 kg h⁻¹), decreasing (to 200 kg h⁻¹) from March to September.

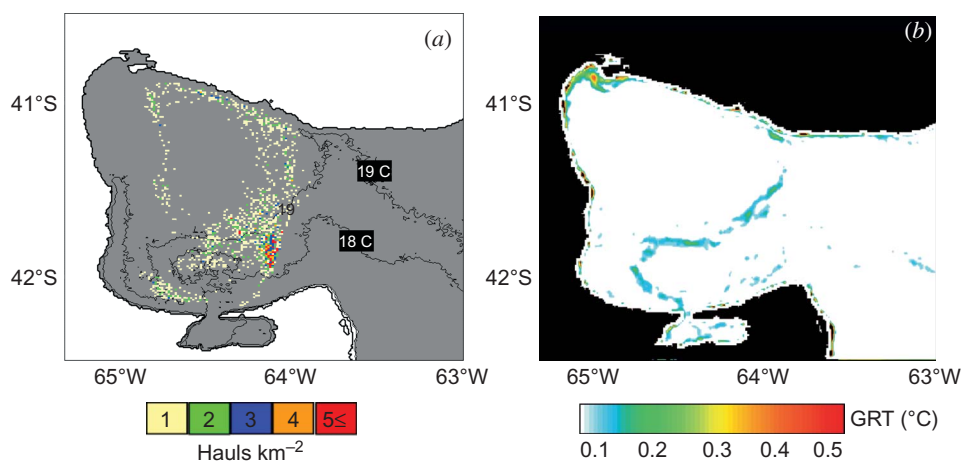


Figure 7. January (2004–2006): (a) fishing activity (density of hauls) and isotherms map (°C). Only isotherms related with fishing activity are shown; (b) SST gradients (°C km⁻¹).

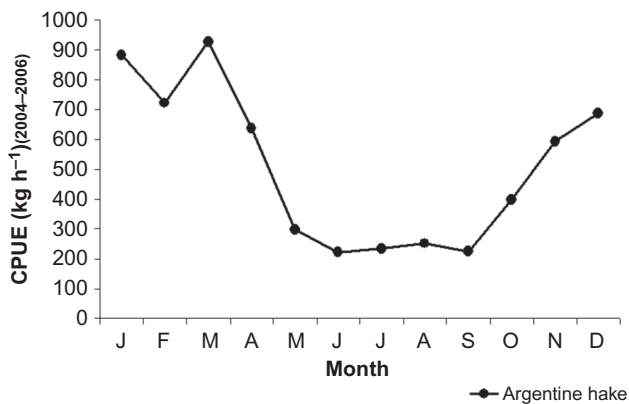


Figure 8. CPUE (kg h⁻¹) average annual cycle (2004–2006 period) for Argentine hake.

4. Discussion

Seven years of SST and chlorophyll-*a* analysis from AVHRR and SeaWiFS provided a broad and comprehensive vision of the average seasonal cycle of both parameters in SMG. SST and chlorophyll-*a* satellite maps showed two well differentiable sectors based on their physical and chemical/biological characteristics in spring–summer months: the southern zone presents colder waters and higher chlorophyll-*a* concentration while the northern one has warmer water temperatures and lower chlorophyll-*a* values. Also, the southern zone was characterized by a thermal cycle of lower amplitude. These results agree with previous studies (Carreto *et al.* 1974, Piola and Scasso 1988, Gagliardini and Rivas 2004, Williams 2004), which reported that both zones are separated by a thermohaline front most of the year. This front would be defined by maximum thermal gradients, which determine the boundary between northern and southern areas. From SST analysis, SMG waters could be identified as temperate waters (Mann and Lazier 1996) showing a clear seasonal behaviour with a warmer season from December to March.

The typical chlorophyll-*a* bimodal cycle of temperate waters (autumn and spring blooms) was observed in southern and northern areas; however, differences between both areas were also evident. The southern area showed higher chlorophyll-*a* values than the northern one. The minimum chlorophyll-*a* value in the southern area were recorded in July (0.67 mg m^{-3}), and may be responding to a limited phytoplankton production due to light availability (Greenan *et al.* 2004). The minimum value (0.30 mg m^{-3}) recorded in the northern area in November would be explained by the stratification of the water column (Williams 2004) and zooplankton and molluscs grazing (Mann and Lazier 1996).

High correlations were observed between SST from AVHRR sensor and *in situ* data indicating a good performance of AVHRR dataset.

Low correlation between SeaWiFS and the corresponding chlorophyll-*a* *in situ* data was observed. However, estimates obtained with SeaWiFS images reproduced the spatial distribution of *in situ* data. The differences between *in situ* and satellite data may be due to errors in the atmospheric correction process or the bio-optical properties of SMG. In coastal waters the optical properties can vary considerably over time and space, introducing an error associated with satellite estimates. Thus, it must be taken into account the temporal and spatial approach between *in situ* and satellite measurements. In this work, the clouds were a determining factor to obtain adequate images during the oceanographic surveys in SMG, so the data used were cloud-free pixels average values with 4 km of spatial resolution.

The ability to obtain satellite and *in situ* data simultaneously made it possible to compare both sources of information in the study area. However, frequent comparisons between *in situ* and satellite time series data would be important to perform validations in the future.

The overlap between SST and fishing activity density maps (hauls km^{-2}) for January showed that a large number of the trawl vessels targeting hake were concentrated around the front area. At the same time, the maximum hake catch rates were obtained between November and March, in which the SMG is characterized by the presence of the thermal front. The results obtained showed that between November and March the fishing fleet concentrates in the frontal zone operating on dense hake schools located in this area.

5. Conclusions

Environmental information of high temporal and spatial resolution, together with distribution of trawl fleet, both possible from satellites information, allowed us to conclude that the seasonality of the thermal front would be one of the main factors conditioning the fishery of SMG. The fishery production is higher when (and where) the thermal front is present, indicating the biological relevance of the oceanographic structure in SMG.

Studies describing the relationship between fish aggregations and environmental factors are common for pelagic fishes (Laurs *et al.* 1984, Yañez *et al.* 1996), but they are not usual for groundfish. In this work, we found strong evidence relating aggregations of the common hake, a demersal species, with environmental variables.

Finally, remote sensing technology could be an important tool to help management decisions to adjust fishing effort to the conditions of the fishing grounds and/or of the stocks, assuring a sustainable exploitation of the living marine resources in SMG. It should be important to perform studies focusing on the distribution, abundance, production and consumption of organisms of intermediate trophic levels in the front area. This would help to obtain a more comprehensive understanding of the ecological processes in this system and the relationships between them and the fishing activities.

Acknowledgements

The authors thank Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE) for the images provided, Ocean Biology Processing Group (Code 614.2) at the GSFC, Greenbelt, MD 20 771, for the distribution of the ocean colour data; and the financial support received from the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) and the Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

References

- BAITH K., LINDSAY, R., FU, G. and McCLAIN, C.R., 2000, SeaDAS: data analysis system for ocean color satellite sensors. *EOS*, **82**, 202.
- BAITH, K., LINDSAY, R., FU, G., and McCLAIN, C.R., 2001, SeaDAS: Data analysis system developed for ocean color satellite sensors. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, **82**, p. 82.
- BAVA, J., GAGLIARDINI, D.A., DOGLIOTTI, A.I. and LASTA, C.A., 2002, Annual distribution and variability of remotely sensed sea surface temperature fronts in the Southwestern Atlantic Ocean. In *29th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 8–12 April 2002, Buenos Aires, Argentina.
- CAMPBELL, J.W., 1995, The lognormal distribution as a model for biooptical variability in the sea. *Journal of Geophysical Research*, **100**, pp. 13237–13254.
- CARRETO, J.I., VERONA, C.A., CASAL, A.B. and LABORDE, M.A. (1974). Fitoplancton, pigmentos y condiciones ecológicas del golfo San Matías III. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires 237, Inst. Biol. Mar. de Mar del Plata. Informe, **10**, pp. 49–76.
- GAGLIARDINI, D.A. and RIVAS, A.L., 2004, Environmental characteristics of San Matías gulf obtained from Landsat-TM and ETM+ data. *Gayana*, **68**, pp. 186–193.
- GONZÁLEZ, R., GASPAR, C., CURTOLO, L., SANGIULIANO, I., OSOVNIKAR P. and N. BORSETTA, 2004, Fishery and Oceanographic Monitoring System (FOMS): a new technological tool based on remote sensing, with application in ecosystem management of coastal fisheries in Patagonia. *Gayana*, **68**, pp. 234–238.

- GONZÁLEZ, R., CAILLE, G. and NARVARTE, M., 2007, An assessment of the sustainability of the hake *Merluccius hubbsi* fishery at San Matías gulf, Patagonia, Argentina. *Fisheries Research*, **87**, pp. 58–67.
- GREENAN, B.J.W., PETRIE, B.D., HARRISON, W.G. and OAKEY, N.S., 2004, Are the spring and fall blooms on the Scotian Shelf related to short-term physical events? *Continental Shelf Research*, **24**, pp. 603–625.
- GREGG, W.W. and CASEY, N.W., 2004, Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set. *Remote Sensing of Environment*, **93**, pp. 463–479.
- LAURS, R.M., FIEDLER, P.C. and MONTGOMERY, D.R., 1984, Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellite. *Deep-Sea Research*, **31**, pp. 1085–1099.
- MANN, K.H. and LAZIER, J.R.N., 1996, *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological–Physical Interactions in the Oceans*, 2nd edn (Cambridge, MA: Blackwell Science).
- McCLAIN, E.P., PICHEL, W.G., and WALTON, C.C., 1985, Comparative performance of AVHRR - based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, **90**, pp. 11587–11601.
- McARDLE, B.H., 1988, The structural relationship: regression in biology. *Canadian Journal of Zoology*, **66**, pp. 2329–2339.
- MILLÁN, D., 2007, *Anuario de Estadísticas Pesqueras de la Provincia de Río Negro*. Dpto Policía de Pesca, Dirección de Pesca, pp. 153.
- O'REILLY, J.E., MARITORENA, S., MITCHELL, B.G., SIEGEL, D.A., CARDER, K.L., GARVER, S.A., KAHRU, M. and McCLAIN, C.R., 1998, Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, **103**, pp. 24937–24953.
- PIOLA, A.R. and SCASSO, L.M., 1988, Circulación en el Golfo San Matías. *Geoacta*, **15**, pp. 33–51.
- RIVAS, A.L. and BEIER, E.J., 1990, Temperature and salinity fields in the Northpatagonic Gulfs. *Oceanologica Acta*, **13**, pp. 15–20.
- RIVAS, A.L. and DELL'ARCIPRETE, P., 2000, Frentes térmicos en la plataforma Patagónica inferidos a partir de datos satelitales. IV. *Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Resúmenes*, pp. 107.
- STRICKLAND, J.D.H. and PARSONS, T.R., 1972, *a Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd edn. Bulletin 167, Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, pp. 311.
- SANTOS, A.M.P., 2000, Fisheries oceanography using satellite and airborne remote sensing methods: a review. *Fisheries Research*, **49**, pp. 1–20.
- SIMPSON, J.J., 1990, On the accurate detection and enhancement of oceanic features observed in satellite data. *Remote Sensing of Environment*, **33**, pp. 17–33.
- SOKAL, R.R. and ROHLF, F.J., 1995, *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*, 3rd edn (San Francisco, CA: W.H. Freeman).
- WILLIAMS, G., 2004, ¿Cuáles son las Fuentes de nutrientes para mantener la productividad del Golfo San Matías? Seminario de Licenciatura en Cs Biológicas, UNPSJB, sede Pto, Madryn.
- YAÑEZ, E., CATASTI, V., BARBIERI, M.A. and BÖHM, G., 1996, Relaciones entre la distribución de recursos pelágicos pequeños y la temperatura superficial de la mar registrada con satélites NOAA en la zona central de Chile. *Investigaciones Marinas. Valparaíso*, **24**, 107–122.