

**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**

**TESIS DOCTORAL**

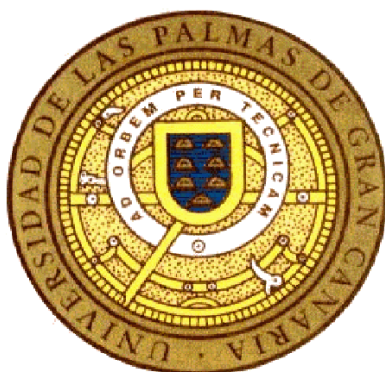
**RELACIÓN DE LAS PESQUERÍAS ARTESANALES VASCAS DE ATÚN  
BLANCO *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788) CON LAS CONDICIONES  
OCEÁNICAS OBTENIDAS A PARTIR DE SATÉLITES ARTIFICIALES**

**JOSEP COCA SÁEZ DE ALBÉNIZ  
2005**



**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
DOCTORADO EN CIENCIAS DEL MAR  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA  
PROGRAMA DE ECOSISTEMAS LITORALES**

**RELACIÓN DE LAS PESQUERÍAS ARTESANALES VASCAS DE ATÚN  
BLANCO *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788) CON LAS CONDICIONES  
OCEÁNICAS OBTENIDAS A PARTIR DE SATÉLITES ARTIFICIALES**



**Tesis Doctoral presentada por Josep Coca Sáez de Albéniz  
Dirigida por el Dr. D. Antonio Juan González Ramos**

**Dr. Antonio Juan González Ramos  
Director**

**Josep Coca Sáez de Albéniz  
Doctorando**

**Las Palmas de Gran Canaria, a 21 de julio de 2005**

# ***Als meus pares***

---

## Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda, apoyo y colaboración de numerosas personas e instituciones. La contribución de cada una de ellas es de lo más diversa, va de lo personal a lo científico, de lo anímico a lo técnico, pero todas han aportado algo que ha permitido la consecución de este trabajo, a todas ellas mi más sincero agradecimiento:

En primer lugar a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en general, universidad de realización de mis estudios de Licenciatura en Ciencias del Mar. Me gustaría, además, agradecer al Departamento de Biología, en el seno del cual, se desarrolló este trabajo y mis estudios de tercer ciclo.

Al Dr. Antonio Juan González Ramos, jefe, director de tesis, compañero y amigo a lo largo de estos años. Él me dio la oportunidad de dedicarme a este tipo de disciplinas y me inició en ellas. Ha sido mi mentor y guía en este trabajo.

Al Dr. José María Lorenzo Nespereira por su valiosa aportación en la estructuración y la presentación de este trabajo.

Al Dr. José Mario Pajuelo González por su inestimable colaboración y asesoramiento en el desarrollo de los tratamientos estadísticos realizados en este trabajo.

Al Dr. José Juan Castro Hernández por sus comentarios y reflexiones sobre la adecuación de la base de datos de pesca a este trabajo.

A Alexandre Redondo Arolas, compañero de trabajo, por su apoyo logístico, su colaboración y su amistad.

A AZTI (Instituto Tecnológico, Pesquero y Alimentario) por la fenomenal base de datos de pesca facilitada para la realización de este trabajo. Me gustaría agradecer especialmente a Iñaki Artetxe por sus pacientes respuestas a mis preguntas y dudas sobre la base de datos.

A los Doctores Michel Petit y Jean Michel Stretta responsables de mis estancias en los centros del IRD (*“Institut pour la Recherche et le Developpement”*), de Isla Réunion y Montpellier, de vital importancia para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Andry William Ratsimandressi y al Dr. Martin Desruisseaux por las discusiones y el trabajo realizado en la programación del cálculo del bombeo de Ekman.

Al JPL (*“Jet Propulsion Laboratory”*) y al DAAC (*“Disributed Active Archive Center”*) laboratorios de la NASA (*“National Aeronautics and Space Administration”*), por su servicio de distribución de datos de temperatura superficial del mar y viento, y la concentración de clorofila-a.

AL CLS-AVISO *“Collecte, Localisation, Satellite - Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data”* que facilitó los datos de anomalías del nivel de mar.

---

A mis amigos Pocha, Quiqui, Raquel, María, Paloma, Alberto, Eduardo, Carlos, Mateo y José Manuel.

A mis padres y hermanos (Agnès, Teresa, Marina, Montse y Jordi) por su apoyo incondicional a no se sabe muy bien qué y su paciencia en la distancia.

---

# Índice

Resumen.....	3
1 Introducción.....	5
1.1 Generalidades .....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.3 La especie .....	7
1.3.1 El atún blanco .....	7
1.3.2 Consideraciones fisiológicas y anatómicas de los túnidos .....	14
1.4 El área de estudio.....	18
1.5 La pesquería vasca de atún blanco en el Atlántico nororiental .....	21
1.6 La teledetección y las pesquerías de atún blanco .....	23
2 Metodología.....	25
2.1 Bases de datos.....	25
2.1.1 Datos de capturas y esfuerzos.....	25
2.1.2 Datos de satélite.....	25
2.2 Proyección de las capturas sobre las imágenes .....	55
2.3 Pretratamiento de las bases de datos.....	56
2.4 Tratamiento de las bases de datos.....	58
2.4.1 Histogramas de frecuencia y gráficos de dispersión .....	59
2.4.2 Correlaciones .....	59
2.4.3 Análisis factorial de correspondencias múltiples .....	59
2.4.4 Regresión lineal múltiple.....	60
2.4.5 Análisis discriminante .....	61
2.4.6 Regresión logística binaria .....	62
2.4.7 Mapas de probabilidad.....	64
3 Resultados.....	67
3.1 Proyección de las capturas sobre las imágenes .....	67
3.2 Histogramas de frecuencia y gráficos de dispersión .....	83
3.3 Correlaciones .....	90
3.4 Análisis factorial de correspondencias múltiples .....	92
3.5 Regresión lineal .....	95
3.6 Análisis discriminante .....	97
3.7 Regresión logística binaria .....	100
3.8 Mapas de probabilidad.....	103
3.8.1 Primer modelo de regresión lineal.....	104
3.8.2 Segundo modelo de regresión lineal.....	105
3.8.3 Primer modelo de análisis discriminante.....	107
3.8.4 Segundo modelo de análisis discriminante.....	109
3.8.5 Primer modelo de regresión logística .....	109
3.8.6 Segundo modelo de regresión logística .....	110
3.8.7 Coherencia de los mapas de probabilidad .....	111
4 Discusión .....	117
4.1 La respuesta coherente.....	119
4.1.1 Temperatura superficial del mar.....	119
4.1.2 Clorofila-a.....	121
4.1.3 Anomalía del nivel del mar .....	122
4.1.4 Bombeo de Ekman .....	122
4.2 La respuesta retardada .....	124

4.2.1 Temperatura superficial del mar .....	124
4.2.2 Clorofila-a.....	124
4.2.3 Anomalía del nivel del mar .....	125
4.2.4 Bombeo de Ekman .....	125
4.3 La respuesta predictiva .....	125
5 Conclusiones.....	129
6 Bibliografía.....	131
Anexo I: Capturas sobre las variables de teledetección .....	145
Anexo II: Mapas de probabilidad .....	183



## Resumen

Las características fisiológicas del atún blanco, relacionadas con la endotermia, determinan un comportamiento selectivo del pez frente al entorno oceánico. El presente trabajo caracteriza un medioambiente oceánico a partir de cuatro variables geofísicas medidas por satélite (la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila-a, la anomalía del nivel del mar y el bombeo de Ekman). Este medioambiente se relaciona con las pesquerías artesanales vascas de atún blanco (curricán y cebo vivo) que se desarrollan en el Atlántico nororiental y en el Mediterráneo.

El análisis visual de las capturas sobre los mapas correspondientes a las diferentes variables geofísicas permitió establecer de forma preliminar las relaciones con éstos y resultó de gran ayuda a la hora de decidir que variables extraer de los datos de satélite. Los gráficos de dispersión entre capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) y el valor de las diferentes variables extraídas en los puntos de captura, y de los histogramas de las variables extraídas en los puntos de captura, permitió establecer los rangos de las diferentes variables sobre los que se producen las capturas. Estos dos tipos de gráficos también se utilizaron para agrupar las diferentes variables en tres niveles (según la CPUE obtenida) para posteriores análisis multivariantes.

Las correlaciones de Spearman entre la CPUE y las variables extraídas fueron por lo general muy bajas, las más altas correspondieron a variables relacionadas con las anomalías de nivel del mar las cuales se acercaron a valores de 0,3 (en valor absoluto). En cambio, los métodos de regresión lineal múltiple permitieron explicar el 62 % de la CPUE a partir de modelos obtenidos con las variables de teledetección y variables derivadas. El análisis discriminante permitió obtener funciones que distinguían bien los niveles de CPUE altos y bajos pero no los rangos correspondientes a las CPUEs medias. La regresión logística binaria fue capaz de clasificar bastante bien (80 %) entre las CPUEs agrupadas en altas y bajas. En los modelos se utilizaron variables extraídas a diferentes lapsos de tiempo, lo que indicaba un efecto de retardo entre el medio ambiente y las CPUEs.

A partir de modelos obtenidos de la regresión lineal múltiple, el análisis discriminante y la regresión logística binaria, se construyeron mapas de probabilidad utilizando los datos de teledetección. Los modelos se aplicaron a toda el área exceptuando las zonas cuyos valores de las variables geofísicas excedían los rangos sobre los cuales se distribuyeron las capturas. Esta forma de proceder se basó en que los modelos estadísticos fueron creados usando la variabilidad de las extracciones de datos en los puntos de captura no pudiéndose aplicar a zonas en las que ésta era excedida. Se asumió que las zonas donde se exceden esos rangos no eran adecuadas para la pesca del atún blanco. La generación de mapas de probabilidad usando los modelos, enmascarando las zonas que excedían los rangos y dibujando las capturas reales sobre ellos, dió lugar a resultados coherentes tanto desde un punto de vista espacial como temporal, en relación a las capturas, periodos y áreas de pesca.



# 1 Introducción

## 1.1 Generalidades

Prácticamente, todo aquél que observa un atún vivo se ve cautivado por la belleza de una vida tan activa y todavía misteriosamente ocultada por el océano. Los atunes despiertan un profundo interés que pocas criaturas engendran. Han inspirado la prosa de Aristóteles, la pintura de Dalí y la poesía de Neruda, literatura contemporánea, diplomacia internacional, alguno de los precios más altos pagados por un animal, amargas discusiones políticas, pleitos y peleas (Safina, 2001). Especialmente, han inspirado a la ciencia; su vida aún permanece desconocida, atrayendo nuestra fascinación.

En el País Vasco, la pesquería artesanal de atún blanco constituye una actividad comercial con muchos años de historia. Se trata de una pesquería estacional que se desarrolla fundamentalmente de junio a septiembre, ligada a la migración que la especie realiza en estos meses, desde las aguas tropicales hasta la zona de convergencia del giro subtropical con el giro ártico.

Con el fin de amortiguar la tendencia decreciente en la rentabilidad que esa pesquería presenta en los últimos años, se pueden adoptar dos posibles estrategias: aumentar la producción, siempre que la situación de explotación del recurso lo permita, y/o reducir los costes de la actividad. En relación con esto, la teledetección por satélite se presenta como una herramienta de gran utilidad para aumentar la rentabilidad de la pesca de atún blanco.

Se sabe, por los datos de captura y en las últimas décadas por la asociación entre éstos y las imágenes de satélite, que los túnidos tienden a agregarse en estructuras y discontinuidades oceanográficas (Sharp, 1976, 1978; Laurs y Lynn, 1977; Laurs, 1997; Santiago *et al.*, 1993; Ramos *et al.*, 1996; Gunn y Block, 2001). El uso de la teledetección visible e infrarroja en pesquerías está ampliamente documentado y su aplicación comercial es una realidad desde hace ya bastantes años. El presente trabajo, se enmarca en el desarrollo de nuevas técnicas de teledetección aplicadas a las pesquerías. Los sensores activos que operan en el rango de las microondas, como el radar de apertura sintética o SAR, el altímetro y el dispersómetro de viento, abren un amplio abanico de aplicaciones, de las cuales, algunas están contrastadas y otras se encuentran en fase de desarrollo. El objetivo que se persigue aquí no es presentar técnicas alternativas sino complementarias a las ya disponibles, evaluando la utilidad de los datos de bombeo de Ekman y los de anomalía del nivel del mar, ya que no existen trabajos publicados al respecto.

La tendencia actual en todos los campos donde se utiliza la teledetección como herramienta es la combinación de diferentes productos para un mismo objetivo. La proliferación de satélites y sensores en la última década, la mayor accesibilidad a sus datos y la reducción de los costes de los sistemas para tratarlos hacen que los usuarios no se conformen con estudiar un fenómeno considerando un solo tipo de datos; la combinación de datos procedentes de diferentes fuentes produce, como resultado, un efecto sinérgico en la información que puede extraerse.

Para comprender el uso de variables oceanográficas derivadas de satélite y su relación con las pesquerías de túnidos es preciso conocer las peculiaridades biológicas de estas especies. Las características biológicas de los túnidos explican el patrón de comportamiento de estas especies con relación al medio que las rodea.

Este trabajo se aborda desde una perspectiva multidisciplinar, involucrándose en él materias tan diversas como la teledetección, la oceanografía y la pesca. A lo largo del documento se tratarán aspectos biológicos y ecológicos, pasando por consideraciones físicas, sin descuidar las ineludibles cuestiones técnicas.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general que persigue este trabajo es conocer la respuesta de una determinada especie frente al medio que le rodea, caracterizado mediante diferentes variables geofísicas obtenidas por satélite. Para lograr este objetivo general se persiguen los siguientes objetivos particulares:

- 1) Construir mapas de bombeo de Ekman a partir de datos de dispersómetro de viento del QuikSCAT como variable nueva descriptora de las condiciones oceánicas a partir de teledetección espacial.
- 2) Establecer las relaciones entre las capturas de atún blanco obtenidas por la flota atunera artesanal vasca sobre las diversas variables oceánicas medidas en el Atlántico nororiental mediante teledetección.
- 3) Identificar las relaciones cualitativas entre los eventos visualizados en las imágenes y las capturas.
- 4) Definir y calcular variables derivadas de los datos originales de teledetección que sean susceptibles de ser relacionadas con las capturas.
- 5) Obtener modelos, mediante técnicas estadísticas multivariantes, que relacionen las capturas con las variables de teledetección.
- 6) Generar mapas de probabilidad de pesca a partir de los modelos obtenidos en el análisis multivariante.
- 7) Comprobar la coherencia de los mapas de probabilidad de pesca generados con las zonas y periodos de captura reales.

## 1.3 La especie

### 1.3.1 El atún blanco

#### 1.3.1.1 Nomenclatura

##### Nombre científico

*Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788)

##### Nombres comunes

Español: atún blanco

Inglés: albacore

Francés: germon

##### Sinonimias

*Scomber alalunga* Bonnaterre, 1788; *Scomber germo* Lacepède, 1800; *Orcynus germon* Cuvier, 1817; *Orcynus alalunga* Risso, 1826; *Thynnus alalunga* Cuvier, 1831; *Thynnus pacificus* Cuvier, 1831; *Orcynus alalunga* Gill, 1862; *Thunnus alalunga* South, 1845; *Thynnus pacificus* South, 1845; *Orcynus pacificus* Cooper, 1863; *Orcynus germo* Lütken, 1880; *Germo alalunga* Jordan, 1888; *Albacora alalunga* Dresslar y Fesler, 1889; *Germo alalunga* Jordan y Evermann, 1896; *Thynnus alalunga* Clarke, 1900; *Germo germon* Fowler, 1905; *Germo germo* Jordan y Seale, 1906; *Thunnus alalunga* Jordan, Tanaka y Snyder, 1913; *Thunnus germo* Kishinouye, 1923; *Germo germon steadi* Whitley, 1933; *Thunnus (Thynnus) alalunga* Fraser-Brunner, 1950.

#### 1.3.1.2 Posición taxonómica

Al atún blanco *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788) le corresponde la siguiente posición taxonómica (Collette y Nauen, 1983):

SUPERCLASE GNATOSTOMATA  
 CLASE OSTHEICHTHYES  
 SUBCLASE Actinopterygii  
 INFRACLASE Teleostei  
 SUPERORDEN Acanthopterygii  
 ORDEN Percomorphy  
 FAMILIA Scombridae  
 GÉNERO *Thunnus*

### 1.3.1.3 Descripción

El cuerpo es grueso y fusiforme, con la cabeza en forma de pirámide triangular y la boca pequeña en relación al cráneo (Figura 1). Las aletas pectorales son especialmente largas (treinta por ciento de la longitud furcal), alcanzando los cincuenta centímetros en los ejemplares grandes; el pedúnculo caudal es muy estrecho y la aleta presenta forma de luna; la aleta dorsal tiene de 11 a 14 espinas y de 12 a 16 radios blandos, las espinas delanteras son mucho más largas que las posteriores, lo que confiere a la aleta un contorno cóncavo; la aleta anal tiene de 11 a 16 radios blandos. La piel es dura y las escamas son muy pequeñas, poco evidentes y lisas. La superficie ventral del hígado es estriada, con el lóbulo central más grande. La vejiga natatoria se desarrolla al alcanzar la madurez. La coloración dorsal es azul oscuro, a medida que se acerca a la zona ventral se va aclarando hasta alcanzar un blanco plateado; las aletas son grises.



**Figura 1:** Atún blanco *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788).

### 1.3.1.4 Hábitat

Se trata de una especie oceánica pelágica y epipelágica, abundante en aguas superficiales a temperaturas entre 15,6 y 19,4 °C. Tiende a concentrarse en discontinuidades térmicas y los cardúmenes pueden estar asociados a objetos flotantes. Se han encontrado ejemplares grandes en aguas profundas con temperaturas entre 13,5 y 25,2 °C, incluso se han observado a 9,5 °C durante cortos periodos de tiempo (Collette y Nauen, 1983). Hasta la edad de 5 años, los individuos se encuentran sobretodo en aguas superficiales. Esta especie no se encuentra en superficie entre el 10° N y 10° S.

### 1.3.1.5 Distribución geográfica

Es una especie cosmopolita que habita en aguas tropicales y templadas de todos los océanos.

En el océano Atlántico existen dos poblaciones de esta especie separadas por el paralelo 5° N y en el Mediterráneo existe otra. Tras la última evaluación llevada a cabo en el año 2000 (ICCAT, 2002), se revisó la estructura de las poblaciones de atún blanco en el Atlántico y en el Mediterráneo en base a estudios de marcado y recaptura y a estudios genéticos. El análisis de la base de datos no presentó evidencias que permitieran descartar esta estructura de poblaciones, si bien se observó que el atún blanco puede cruzar el límite Atlántico norte-Mediterráneo, aunque la tasa de transferencia es muy baja. La distribución del atún blanco en el Atlántico norte comprende latitudes entre 5° y 50° N (Aloncle, 1973).

#### 1.3.1.6 Biología

Se considera que su longevidad es de 12 a 15 años, alcanzando una talla máxima de 120 cm y un peso máximo de 40 kg.

El tipo sexual es gonocorismo. La madurez se alcanza a los 4-5 años de edad, correspondiendo a una talla media de aproximadamente 90 cm (Le Gall, 1974; Bard, 1981). La fertilización es externa. El pico de puesta tiene lugar en los respectivos veranos de las aguas subtropicales, entre el 15° N y el 15° S, con una separación entre el 10° S y 10° N (Ueyanagi, 1969; Nishikawa *et al.*, 1985). El hábitat de puesta se caracteriza por una capa de mezcla de unos 50 m y una temperatura de unos 24 °C, además de no presentar una fuerte termoclina por encima de los 250 m (Ueyanagi, 1969). En el Atlántico, las zonas de reproducción se localizan en el mar de los Sargazos en el hemisferio norte y la parte central del giro subtropical en el hemisferio sur (Bard, 1981).

Se alimenta durante el día y la noche de peces (mictófidios, engráulidos, ...), crustáceos (anfípodos, decápodos, ...) y moluscos (calamares, ...).

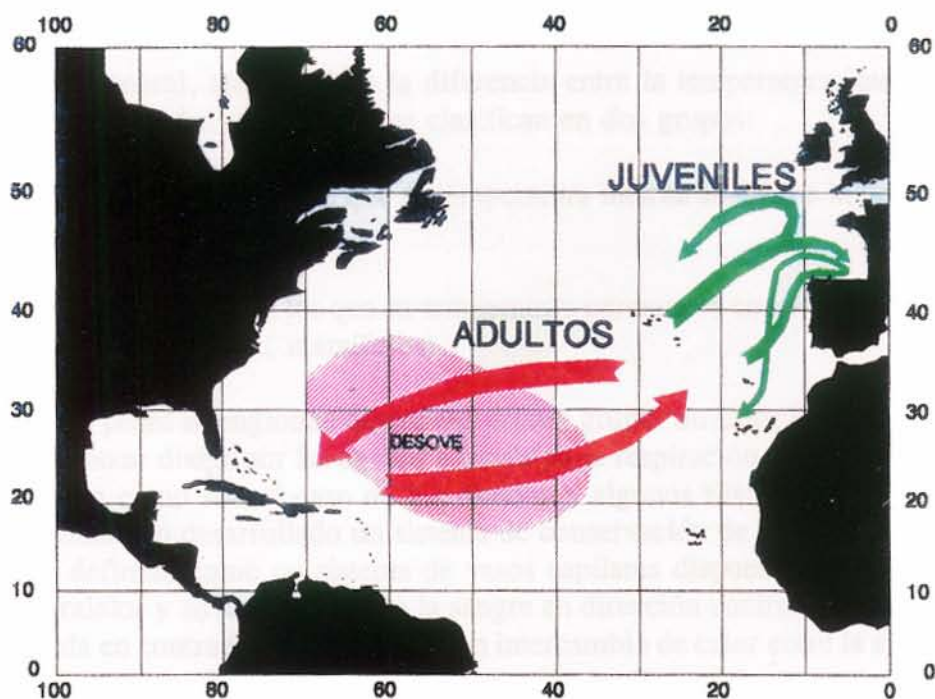
#### 1.3.1.7 Ecología

El atún blanco realiza importantes movimientos migratorios. En el Atlántico norte migra siguiendo dos rutas diferenciadas según se trate de la fracción inmadura o madura de la población. Así, los ejemplares de menos de 5 años, aún inmaduros sexualmente, efectúan una migración trófica durante la primavera-verano hacia aguas ricas en alimento del golfo de Vizcaya y suroeste de Irlanda, mientras los ejemplares maduros realizan una migración reproductiva de este a oeste del Atlántico, donde tiene lugar la freza en los meses de primavera-verano (Figura 2).

Los ejemplares inmaduros que migran al golfo de Vizcaya y suroeste de Irlanda realizan sus desplazamientos siguiendo dos vías, una denominada “azoriana” y otra llamada “cantábrica”. Estos ejemplares constituyen el objetivo fundamental de la pesquería vasca de atún blanco, que concentra su actividad sobre esta especie en los meses de junio a octubre.

La migración latitudinal del atún blanco se corresponde estrechamente con el calentamiento (en primavera-verano) o enfriamiento (en otoño-invierno) progresivo del agua derivado del desplazamiento en latitud de la Zona Intertropical de Convergencia

(ZITC). La Figura 3 muestra las isotermas superficiales del agua de mar en el Atlántico norte durante el invierno y verano de 1977 (Bard, 1981).



**Figura 2:** Esquema de migraciones del atún blanco en el Atlántico norte (Bard, 1981).

La asociación entre la dinámica oceanográfica y el desplazamiento del atún blanco, así como su disponibilidad y vulnerabilidad, viene determinada en gran medida por las características fisiológicas de la especie, especialmente con las relativas a la conservación del calor interno (Cayré, 1989; Ramos, 1992; Ramos *et al.*, 1996).

Las observaciones realizadas durante décadas desde barcos de pesca y desde varias plataformas oceanográficas han resultado de gran importancia para comprender las relaciones entre las variaciones oceánicas y las operaciones de pesca (Uda, 1927, 1957; Saito, 1973, 1975; Sharp, 1978, 1979; Sund *et al.*, 1981; Lehodey *et al.*, 1997, 1998).

Estudios recientes, como el ECOTAP (*Etude du Comportement des Thonides par l'Acoustique et la Pêche*) (Abbes y Bard, 1999), desvelan que la producción y el régimen de alimentación constituyen los principios de atracción hacia esas estructuras (tanto en vertical como en horizontal). Gran parte del océano está más estructurado verticalmente que horizontalmente, lo que da lugar a características subsuperficiales. Estas características dinámicas, más las características topográficas, actúan probablemente como “estaciones de servicio” y “carreteras” en un ambiente relativamente carente de estructuras. Los grandes predadores, como los túnidos, han aprendido a identificarlas, con las ventajas que ello comporta en unas zonas que, a menudo, se describen como estériles. Examinando el *Atlas of Tropical Tuna Fisheries* (Fonteneau, 1997) se aprecia que prácticamente no existen áreas entre el 45° N y 45° S donde no existan capturas considerables de túnidos (en función de la estación). Esto



pone claramente de manifiesto que la capacidad para medir la producción primaria del ecosistema oceánico y, en consecuencia, su productividad está limitada y conduce a una subestimación. Welschmeyer *et al.* (1999) confirmaron, sobre un transecto entre la bahía de Monterrey y Hawai, que los métodos convencionales subestimaban la producción verdadera del orden de 1,7 a 2 veces. Tampoco se tiene en cuenta la biomasa de la capa epipelágica, sobre la cual predan los túnidos (Savinykh, 1993; Menard y Marchal, 2003). Menard *et al.* (2000) encontraron que las ondas largas ecuatoriales en el Atlántico este producen giros que hacen descender y ascender la termoclina, haciendo accesible la capa mesopelágica a los túnidos.

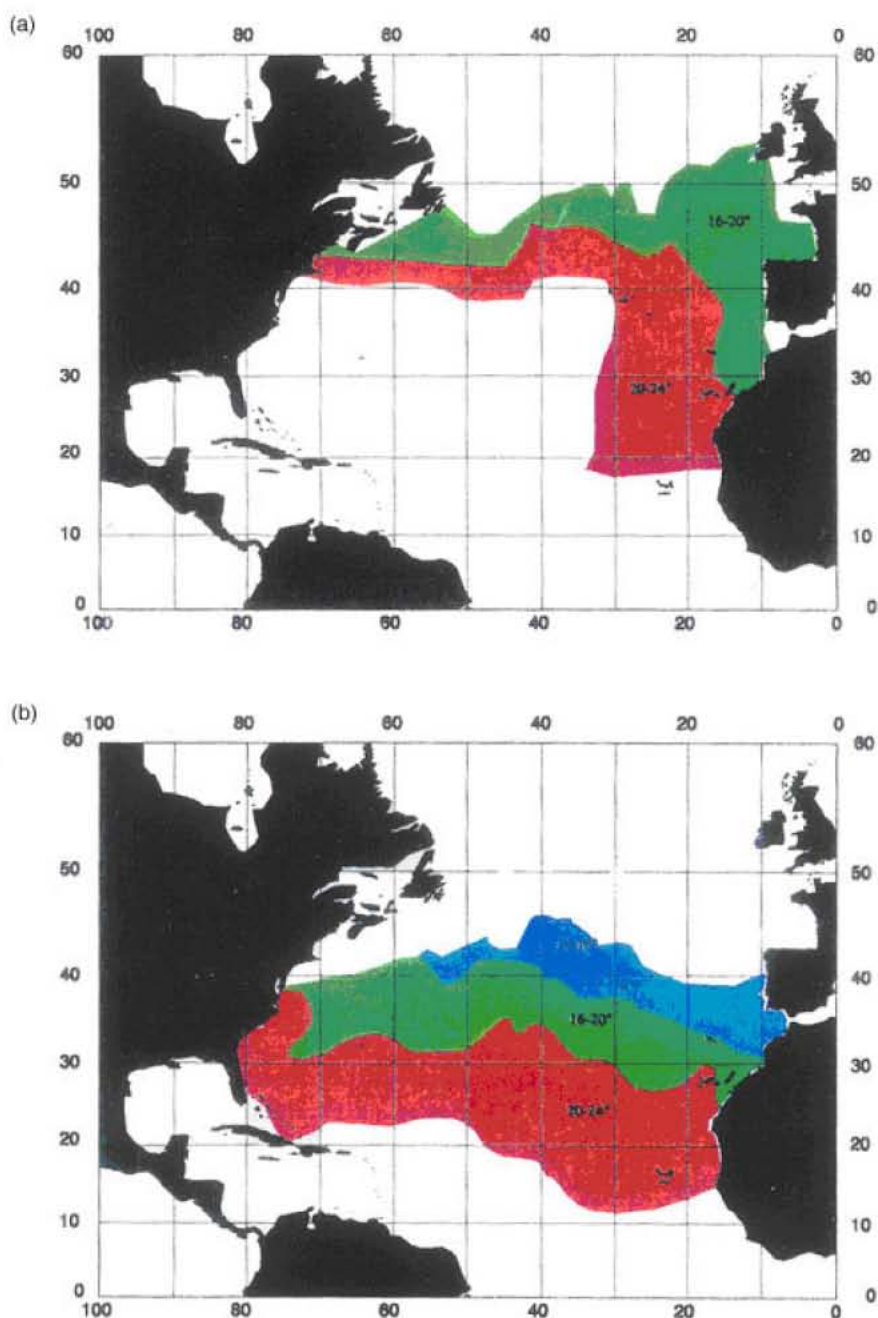
Ejemplares inmaduros y maduros de atún blanco, procedentes de aguas tropicales, se congregan estacionalmente en los márgenes continentales oeste con los *blooms* primaverales y de invierno y el consecuente pico en la producción. En la región subtropical atlántica, cerca de la costa, los picos de producción se producen en noviembre y abril (Longhurst, 1995). El alimento para los túnidos se incrementa con el tiempo después de los *blooms* iniciales. En el Atlántico norte y en el Ártico sur se producen picos de producción de junio a agosto, con la pincoclina completamente iluminada, generando una gran de producción (Gunn y Block, 2001).

En los túnidos con tendencias reproductivas temporal y espacialmente localizadas, como el atún blanco, la importancia y el impacto de la producción local frente a la oceánica no puede sobredimensionarse. Aunque todos los túnidos muestran puestas en serie, el atún blanco y las demás especies del género *Thunnus* con ciclos de vida más largos y lentos han tenido que ampliar su distribución más allá de los océanos subtropicales, hacia las zonas productivas subárticas. Su mayor tamaño y su menor capacidad para arreglárselas en la abarrotada capa superior del océano tropical les obligan a limitar su tiempo de residencia en estas áreas (Sharp, 2001).

Cuando los niveles de oxígeno descienden, los requerimientos de los atunes menores actúan excluyéndolos, mientras que las menores demandas de los ejemplares más viejos y de mayor tamaño les permiten nadar y explorar en esas áreas (Sharp, 1978; Brill, 1994). Cuando los niveles de oxígeno alcanzan umbrales de 3,5 y 2,0 ml/l, el medio no es apto para la mayoría de los túnidos. A pesar de esta limitación, las termoclinas profundas y los centros de producción dispersos atraen a los adultos de patudo y blanco a mayores profundidades, donde tienden a dispersarse, minimizando la competencia intraespecífica e interespecífica. Las pesquerías oceánicas de palangre se basan en esta distribución dispersa y profunda. Estos adultos se encuentran en gradientes físico-químicos, interfases, y las características ecológicas resultantes les hacen vulnerables a las pesquerías de palangre cerca de islas, montes submarinos y bancos, especialmente de noche. El comportamiento de los organismos de la capa de reflexión profunda explica este patrón diurno (Sund *et al.*, 1981; Bertrand *et al.*, 1999a, 1999b).

Científicos japoneses describieron las capturas de los diferentes túnidos en función de la profundidad de los anzuelos de los palangres (Saito, 1973; Hanamoto, 1975; Saito y Sasaki, 1975). Aunque se captura, el listado aparece menos que las otras especies en los palangres y los máximos aparecen cerca de la superficie. El rabil es abundante y los picos de captura de adultos tienen lugar a 125 m y no se captura con frecuencia por debajo de los 250 m. El atún blanco se captura por debajo del rabil joven y más frecuentemente entre el primer patudo, con picos alrededor de los 200 m. El

patudo va aumentando desde las primeras profundidades hasta los anzuelos profundos, donde el oxígeno cae por debajo de 1 ml/l.



**Figura 3:** Isotermas superficiales en el Atlántico norte durante el verano (a) y el invierno (b) (Bard, 1981).

El atún blanco, al principio de su ciclo de vida, muestra un comportamiento similar al atún rojo, con migraciones extensas de juveniles desde sus hábitats ecuatoriales de nacimiento hacia aguas subtropicales (16-20 °C). Cuando madura desarrolla la vejiga natatoria y adquiere la capacidad de llevar a cabo desplazamientos verticales (Bard, 1981), pudiendo sumergirse en las bien oxigenadas aguas a

profundidades medias de latitudes tropicales. No se producen capturas de ejemplares maduros grandes en las pesquerías superficiales. En las pesquerías de palangre del Atlántico, Pacífico e Índico se capturan ejemplares grandes (130 cm), aunque nunca llegan a los tamaños del rabil, el patudo o las tres especies de atún rojo.

Laurs *et al.* (1977) encontraron que esta especie hace frecuentes migraciones verticales, tanto durante el día como durante la noche. El atún blanco se mueve a lo largo de los frentes, predominantemente a temperaturas superiores a los 15 °C. Seguimientos recientes de atún blanco sugieren que tiene una presencia notable en la termoclina y parece estar fuera de la capa de mezcla la mayor parte del tiempo (Block, 2001).

Abbes *et al.* (1999) observaron que las profundidades de captura del atún blanco no eran diferentes de las de los rabiles grandes, pero sí de las del patudo, que se encuentra a profundidades mayores. Datos de captura realizadas con palangre a diferentes horas del día también muestran variaciones que se corresponden con los patrones de natación diurnos y nocturnos de cada especie, con el blanco comportándose de forma muy parecida al rabil.

En algunos casos, la distribución de los túnidos se corresponde con la de sus presas (Block *et al.*, 1997; Marcinek *et al.*, 2001), pero en otros se ve limitada por factores abióticos. La temperatura puede ser uno de estos factores (Brill *et al.*, 1993, 1999). El corazón de los túnidos no está protegido por el sistema de vasos en contracorriente, por lo que desciende su temperatura cuando desciende la del ambiente. Esto ocurre independientemente del tamaño del animal (Brill *et al.*, 1994), por lo que desciende el ritmo cardíaco pero no la demanda metabólica. Esto puede limitar la distribución vertical de los túnidos.

En las campañas de marcado y recaptura, el porcentaje de recaptura de los ejemplares de atún blanco es inferior al 1 %, mientras que en otras especies ronda el 10 %. La mortalidad debida al marcaje puede ser muy elevada. Los pescadores deben disminuir la velocidad de los barcos curricaneros porque pueden rasgar la boca de los juveniles de blanco. Bard y Josse (1996) documentaron la fragilidad inusual del atún blanco, señalando que, cuando se dejan en cubierta, normalmente sangran por las agallas o la garganta y mueren rápidamente en lugar de agitarse como las otras especies de túnidos. Esta fragilidad podría explicar su posición ecológica intermedia en la columna de agua.

El rango de distribución de los adultos de atún blanco es similar al de los adultos de rabil y se solapa con el de los patudos jóvenes. Los juveniles parecen crecer mejor en los márgenes de transición del océano subtropical (16-20 °C), donde la única competencia potencial la tienen con el atún rojo. Las migraciones del atún rojo y el atún blanco son considerables, llegando el primero a latitudes mayores. El hábitat de los adultos de atún blanco se sitúa más cerca del océano tropical que el atún rojo. El caso del atún rojo del sur es diferente al del Atlántico, ya que el atún blanco se superpone con los juveniles del rojo en el límite cálido de su hábitat. El atún blanco es ligeramente más abundante en la zona subtropical adyacente, hasta donde los adultos más viejos de atún rojo del sur empiezan sus migraciones de puesta, hacia las zonas con temperaturas superficiales más cálidas (Sharp, 2001). El atún blanco y el atún rojo se diferencian en que el segundo presenta hábitos más superficiales.

La elevada actividad metabólica, y su consecuente requerimiento alimenticio, hace que el atún blanco y los demás túnidos hayan desarrollado una capacidad evolutiva denominada de *respuesta coherente* (Petit, 1991). Esta respuesta hace referencia a la especial sensibilidad que presentan los individuos a la localización de anomalías en el medio en el que se desenvuelven (afloramientos, frentes oceánicos, remolinos, ...). Estas anomalías suponen núcleos locales de enriquecimiento hacia los que el animal se ve atraído para alimentarse. La capacidad de *respuesta coherente* trae como consecuencia una mayor eficiencia del gasto energético destinado a la localización de alimento, ya de por sí elevado, debido a su estrategia de búsqueda continua del mismo sobre grandes áreas. Dependiendo de la escala de las anomalías, la respuesta no es inmediata sino retardada en el tiempo (*respuesta retardada*, Stretta, 1991). Este retardo corresponde al lapso de tiempo que transcurre desde que se forma la anomalía hasta que ésta acumula los tipos de organismos sobre los que el animal se alimenta. El carácter no determinista de esta respuesta dificulta el establecimiento de un escenario físico ideal para el animal.

Sin embargo, son muchos los trabajos que han establecido escenarios ambientales ideales basados en el estudio de diferentes componentes que afectarían al atún blanco y otros túnidos (Uda, 1973; Laurs y Lynn, 1977; Evan *et al.*, 1981; Sund *et al.*, 1981; Laurs *et al.*, 1984; Ramos, 1992), a pesar de la dificultad que tiene el simplificar las condiciones ambientales reales del medio en el que se desenvuelven. Para el atún blanco, las variables consideradas determinantes son:

Factores de tipo abiótico:

- Temperatura superficial entre 16 y 20 °C.
- Concentración de oxígeno superior a 3,5 ml/l .
- Turbidez baja (condición de predador óptico), con niveles de profundidad del disco de *Secchi* a 15 m.

Factores de tipo biótico:

- Concentración de alimento elevada.
- Ausencia de predadores.
- Concentración de clorofila inferior a 0,8 mg/m<sup>3</sup>.

De cualquier manera, y a pesar de las limitaciones señaladas anteriormente relativas a la *respuesta coherente*, los conocimientos adquiridos sobre la pesquería de atún blanco, concernientes a las relaciones entre los rendimientos de pesca y las roturas en la homogeneidad del medio (objetivo fundamental de este trabajo), permiten perfectamente el uso de la teledetección (Uda, 1973; Laurs y Lynn, 1977; Laurs *et al.*, 1984; Fiedler y Bernard, 1987; Leroy, 1988; Petit, 1991; Stretta, 1991; Ramos *et al.*, 1996).

### **1.3.2 Consideraciones fisiológicas y anatómicas de los túnidos**

Los túnidos, en general, y el atún blanco, en particular, presentan una serie de peculiaridades desde los puntos de vista metabólico, fisiológico y anatómico que derivan en un especial comportamiento ecológico. Las características que diferencian a

los túnidos del resto de escómbridos y las que los hacen seres no ectotérmicos estrictos explican su respuesta específica frente al medio en el que se desenvuelven.

Los atunes nunca dejan de nadar generando continuamente calor en el músculo rojo. La natación sostenida y la capacidad para realizar esfuerzos explosivos son características fundamentales de los túnidos (Magnuson, 1973, 1978; Block *et al.*, 1993; Dewar y Graham, 1994). La selección de estas características marca la divergencia evolutiva de otros escómbridos hace unos 40 millones de años (Graham y Dickson, 2000). Desde un punto de vista ecológico, la natación continuada en cardúmenes es importante para el éxito alimentario en océano abierto, donde los recursos están distribuidos en manchas (Sund *et al.*, 1981). Esta característica capacita a los túnidos para realizar grandes migraciones, con el fin de aprovechar la abundancia estacional de los recursos y retornar a aguas cálidas para la puesta. También realizan rápidos desplazamientos en la vertical, en busca de presas, ajustándose a los cambios de luz, oxígeno, temperatura y presión.

En el cuerpo de los túnidos, el músculo está situado de forma diferente que en el de otros teleósteos, con la excepción del pez espada *Xiphias gladius*. En la mayoría de los teleósteos el músculo se sitúa a lo largo de la línea central del cuerpo, cerca de los bordes exteriores, mientras que en los túnidos está más cerca de la columna vertebral, completamente rodeado de músculo blanco (Kishinoue, 1923; Graham *et al.*, 1983). Esta posición del músculo está especializada en la unión con la aleta caudal, dando como resultado el modo particular de natación de los túnidos (locomoción tuniforme). Esta forma de natación consiste en una flexión lateral del cuerpo mínima y en cambios en las relaciones entre la activación del músculo y el ciclo de torsión (Graham *et al.*, 1983; Block y Finnerty, 1994; Elleberby *et al.*, 2000).

La *rete mirabile* que distingue al músculo rojo de los túnidos consiste en vasos circulatorios hacia y procedentes de éste en contracorriente. Funciona como un sistema intercambiador de calor consistente en vasos venosos y arteriales en paralelo e íntimamente yuxtapuestos. El diámetro de estos vasos se corresponde con el de arteriolas y vénulas de vertebrados (Moore, 1998). La difusión térmica se lleva a cabo rápidamente. Las paredes de los vasos tienen un grosor de varias células y únicamente se transfiere calor. La *rete* de los atunes tiene más arteriolas que vénulas, pero las vénulas, al ser mayores, componen la mayor parte de la estructura (Graham y Diener, 1978; Graham, 1983). Los vasos arteriales contienen dos o tres capas de músculo liso y los venosos una. Al variar la contracción de esos músculos vasculares probablemente se regula el intercambio de calor (Brill *et al.*, 1994).

La difusión molecular tarda diez veces más que la difusión térmica, provocando que la sangre alcance el equilibrio térmico con el agua en las branquias (Graham, 1983). En un pez no endotérmico, al aumentar el flujo sanguíneo aumenta el oxígeno que alimenta la producción de calor, pero también aumenta la pérdida de calor por convección. Por eso, para un pez no endotérmico resulta imposible aumentar la temperatura un grado por encima de la del agua en condiciones normales (Brill *et al.*, 1994).

Las *retia* presentan diferencias en cuanto a tamaño, complejidad y posición según las especies (Graham, 1975; Bushnell *et al.*, 1992). Muchos túnidos, como *Katsuwonus pelamis* o *Thunnus albacares*, tienen *rete* central. Todos los túnidos,

excepto el *Allothunnus fallai*, tienen *rete* lateral (Graham y Dickson, 2000). Entre los teleósteos, sólo los túnidos tienen esos vasos laterales.

Algunos túnidos tienen la capacidad de calentar otras regiones del cuerpo, localizándose las *retia* en posiciones estratégicas a tal efecto. *Katsuwonus pelamis* y las especies del género *Thunnus* tienen cerebros calientes debido a la presencia de *rete* en las arterias carótidas. La *rete* también conserva el calor de las vísceras en varias especies del género *Thunnus* como *T. albacares*, *T. alalunga*, *T. obesus* y *T. thynnus*. El atún blanco tiene muy bien desarrollado el sistema lateral de intercambio de calor, no presentando los sistemas central ni ventral.

La mayor parte de los investigadores están de acuerdo en que las relaciones térmicas son fundamentales en la biología de los túnidos (Graham y Dickson, 2001). El descubrimiento de que el atún rojo y otros túnidos tenían capacidad de termorregulación (Carey y Lawson, 1973), despertó el interés de los fisiólogos en la endotermia de los atunes. El interés residía en un sistema con similitudes al de los mamíferos, aunque sumergido y con respiración por branquias. Neill y Stevens (1974) sugirieron que, más que mantener una temperatura determinada, los túnidos simplemente tienen inercia térmica. El objetivo podría ser retardar la ganancia y la pérdida de calor, minimizando los cambios de temperatura. Sharp y Vlymen (1978) expusieron la idea de que los túnidos son prisioneros de su eficiente termorregulación, pudiendo sobrecalentarse en aguas calientes durante periodos de intenso ejercicio. La relación entre la temperatura del agua y la del músculo rojo caliente evidencia la existencia de termorregulación. El seguimiento por telemetría evidenció la capacidad de control del atún rojo sobre la temperatura del agua (Carey y Lawson, 1973; Gunn y Block, 2001); sin embargo, Neill y Stevens (1974) sugirieron, tras análisis por ordenador, que más que termorregulación fisiológica es inercia térmica. Esta inercia le sería útil al animal para evitar las pérdidas de calor cuando descienda a aguas más frías. Linthicum y Carey (1972) encontraron temperaturas similares en ejemplares pequeños y muy grandes de atún rojo y mayores que en listados y rabiles, a igual temperatura del agua. Estudios más recientes de telemetría han demostrado que existe termorregulación fisiológica en el *Thunnus obesus* (Holland *et al.*, 1992). Graham y Dickson (1981) sometieron a ejemplares de atún blanco a enfriamientos bruscos y observaron cómo podían modificar su tasa de enfriamiento. Dewar *et al.* (1994) demostraron lo mismo para el rabil.

Los atunes no pueden regular la temperatura corporal de la misma manera que los mamíferos, pero sí pueden regular sus ganancias y pérdidas de calor (Gunn y Block, 2001). Los túnidos son capaces de usar mecanismos fisiológicos para minimizar los cambios de temperatura en el músculo rojo y otros tejidos y no son prisioneros de sus sistemas de termorregulación (Brill *et al.*, 1994).

Los mecanismos fisiológicos de regulación no se conocen con claridad. Estudios anatómicos de la *rete* sugieren un control vía dilatación y contracción de los vasos. Parece que las especies de *Thunnus* que no poseen vena postcardinal ni sistema intercambiador central son capaces de variar la temperatura alterando el flujo relativo de la arteria dorsal y las arterias laterales. Las especies que tienen *rete* lateral y central, por donde presumiblemente circula toda la sangre, podrían ser capaces de ajustar su conductividad térmica modificando el flujo relativo entre las dos, asumiendo que tienen diferente eficiencia (Dickson *et al.*, 2000).

El efecto positivo de un aumento de temperatura sobre la velocidad de contracción, fuerza y energía está contrastado (Johnston y Brill, 1984). Altringham y Block (1997) encontraron que un aumento de diez grados duplica la capacidad de fuerza contráctil en el rabil.

La cavidad visceral de cuatro especies de túnidos es caliente y los cerebros de la mayoría también. Como consecuencia de este calentamiento, puede haber un efecto sobre la digestión, evacuación y asimilación. No hay datos del efecto de la temperatura sobre las capacidades sensoriales (Korsmeyer *et al.*, 1996a).

El impacto evolutivo de la endotermia podría ser la expansión del rango, tanto latitudinal como vertical, de los túnidos en relación al de los escómbridos ectotérmicos. Los estudios paleontológicos indican que los túnidos divergen de sus predecesores en los inicios del terciario (Bannikov, 1985). Esta divergencia coincide con el periodo de tiempo geológico en el que se produjeron un gran número de cambios: corrientes superficiales, estructuras térmicas o patrones de productividad. Cuando el cálido Tethys redujo su tamaño, hábitat de los predecesores de los túnidos, aparecieron las características de los océanos actuales (cuencas geográficas, circulación generada por el viento, estructuras térmicas y afloramientos). El cambio paleoceanográfico pudo generar la divergencia evolutiva de los túnidos. El detonante del desarrollo de la endotermia pudo haber sido la mayor capacidad natatoria para una migración y alcance de recursos alejados (Graham y Dickson, 2000). La endotermia pudo haber capacitado a los primeros túnidos sin adaptación para ambientes fríos a llegar por debajo de la termoclina y ser capaces de mantener o extender el volumen de agua a explotar.

*Allothunnus fallai* tiene músculo rojo en posición anterior e interior y presenta circulación central con *rete*; sin embargo, carece del sistema lateral presente en el resto de túnidos. Estudios recientes demuestran que solo los túnidos con distribución del músculo rojo claramente diferente al resto de escómbridos nadan de forma tuniforme. El músculo rojo situado en el interior produce mayor tensión, dando un mayor rendimiento natatorio (Shadwich *et al.*, 1999; Altringham y Shadwich, 2001). Graham y Dickson (2000) sugirieron una secuencia evolutiva en cuanto a los cambios locomotores y endotérmicos de los túnidos. Tal secuencia empezaría con el desplazamiento del músculo rojo hacia la parte interior del cuerpo y seguiría con el desarrollo de los vasos sanguíneos para irrigar el músculo rojo, primero el central y luego el lateral, con el fin de mantener la temperatura del músculo elevada.

La endotermia se adquiere durante la fase juvenil (Dickson, 1994). La transición hacia la endotermia va acompañada tanto del desarrollo de la capacidad de retener el calor metabólico como de cambios en la forma del cuerpo (disminución de la relación superficie volumen e incremento del diámetro). Todas las especies de túnidos ponen en aguas cálidas (Nakamura, 1969; Bayliff, 1980) y los juveniles pueden necesitar aguas cálidas para un crecimiento y alimentación óptimos; podrían no ser capaces de explotar aguas más frías hasta ser endotérmicos. El concepto inicial que tenían muchos investigadores, en relación a que los túnidos de menor tamaño no se encuentran normalmente en el mismo rango térmico que los individuos mayores, ha cambiado algo. Datos de rastreo recientes muestran que atunes pequeños, patudos de 3 a 5 kg por ejemplo, se introducen en aguas realmente frías (Lowe *et al.*, 2000; Gunn y Block, 2001). La producción relativa de calor en atunes grandes es menor, pero al aumentar su grosor también aumenta su masa térmica, lo que implica que en los túnidos grandes

cuesta más tiempo modificar el equilibrio térmico. Téngase en cuenta que su relación superficie volumen es menor y su aislamiento mayor (grasa subcutánea); por eso, aunque la producción relativa de calor sea menor, la inercia térmica de un cuerpo mayor es más alta (Brill *et al.*, 1994).

## 1.4 El área de estudio

La disposición general de las corrientes superficiales del océano Atlántico viene determinada por grandes giros anticiclónicos, en el hemisferio norte, y ciclónicos, en el hemisferio sur. Esta generalidad se explica, fundamentalmente, por el esquema de circulación de los vientos, de este a oeste (vientos alisios) y de oeste a este sobre los 40° de latitud.

El esquema general de la circulación superficial en el Atlántico norte, según diversos autores, se representa en la Figura 4 (Tchernia, 1980; Pickard y Emery, 1982; Sy, 1988).

Al oeste del meridiano 40° W, la corriente Norecuatorial que se dirige hacia el oeste, junto a una extensión de la Surecuatorial, fluye, en parte, hacia el noreste, por fuera del arco antillano y, en parte, hacia el Caribe y el golfo de Méjico. Aquí se forma un apilamiento de agua que va a circular entre Florida y Cuba para formar la corriente de Florida. A esta corriente se une otra, la exterior de las Antillas, para conjuntamente alejarse de la plataforma americana formando la corriente del Golfo. La corriente del Golfo transporta aguas cálidas de procedencia ecuatorial a zonas frías del norte, donde fluye la corriente del Labrador que transporta aguas frías de procedencia ártica hacia el sur. El encuentro de ambos sistemas de circulación da origen a estructuras frontales muy intensas.

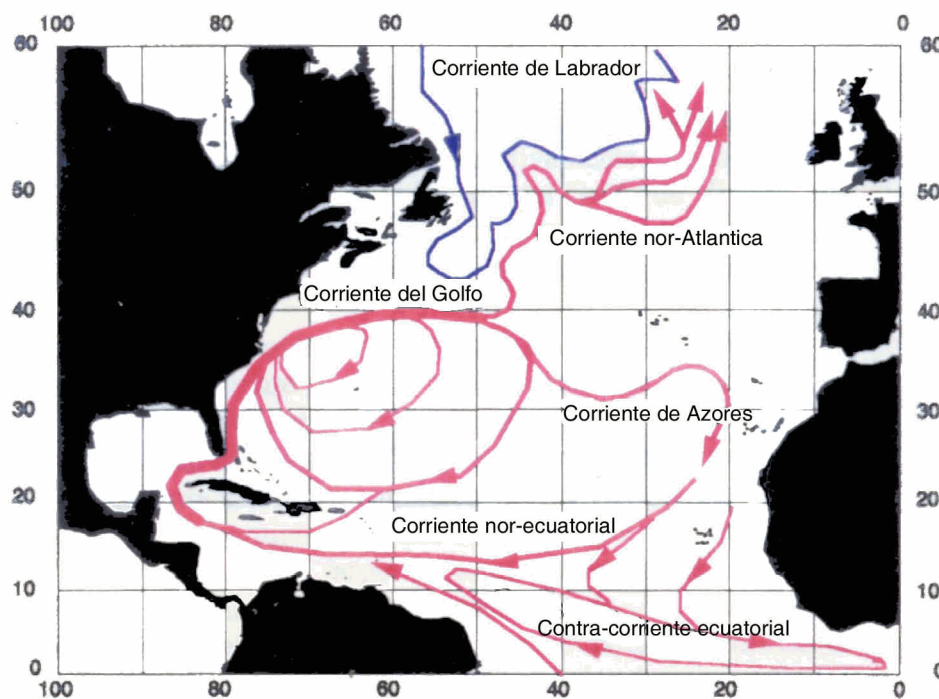
El sistema de circulación al este del meridiano 40° W, de menor intensidad que el que tiene lugar al oeste, es objeto aún hoy en día de controversia. Según Sy (1988) todo parece indicar que la corriente del Golfo se bifurca en dos ramas, una que va hacia el nordeste, la corriente Noratlántica, y otra que se dirige hacia el sureste, la corriente de Azores. Entre ambas ramas queda una amplia franja oceánica hasta el occidente europeo que constituye el escenario principal de la pesca del atún blanco.

La zona donde se desarrolla la pesquería de atún blanco se caracteriza por unas condiciones de flujo medio particularmente débiles, de ahí la dificultad de desarrollar un modelo de circulación de la misma. Pingree (1993) propuso un esquema de flujo basándose en el análisis de datos procedentes de boyas Argos (Figura 5). Según este autor, cerca del 51° N–20° W, el flujo se bifurca hacia el noreste y hacia el sureste, con un desplazamiento relativamente rápido en la primera dirección (5 cm/s). En Porcupine y en la zona del golfo de Vizcaya, el flujo es mucho más débil (1-2 cm/s) y está dirigido hacia el sureste; y en el sur del golfo de Vizcaya, el flujo está dirigido hacia el oeste, pudiendo sugerir una débil circulación anticiclónica.

Sin embargo, como apunta Pingree (1993), el patrón general de flujo en la zona cantábrica no es muy claro y parece estar sometido a variaciones estacionales. Las condiciones de flujo en superficie en el cantil portugués dependen de la persistencia de



las componentes del viento norte o sur. La intensificación del anticiclón de las Azores conlleva vientos del norte frente a las costas portuguesa y norafricana, lo que provoca afloramiento de aguas profundas y una corriente hacia el sur a lo largo de estas costas, particularmente en verano. El debilitamiento del anticiclón de las Azores en invierno, y consecuentemente del viento de componente norte, permite el desarrollo en superficie de una corriente de agua cálida hacia el norte a lo largo de la costa portuguesa.



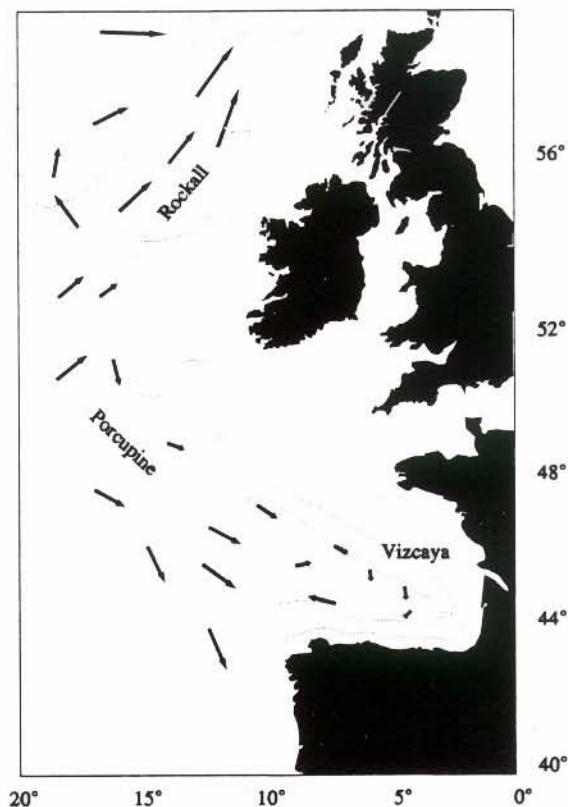
**Figura 4:** Esquema de circulación en superficie en el Atlántico norte.

Estas circunstancias hacen que el flujo en superficie en la parte occidental del golfo de Vizcaya sea marcadamente estacional, pudiendo extenderse dentro del mismo la corriente cálida de invierno. Estas diferencias estacionales han sido igualmente encontradas por Ríos *et al.* (1987) y Botas *et al.* (1990) en el Cantábrico central, señalando la existencia de una corriente costera hacia el este durante la primavera, que se torna imprecisa y forma torbellinos en verano, y de otra en sentido opuesto en otoño con producción de afloramiento costero.

Dentro de este escenario general, en el golfo de Vizcaya se producen una serie de eventos oceanográficos, cuya importancia reside en el hecho de que constituyen núcleos de enriquecimiento y, por lo tanto, de posible agregación de biomasa. Estos eventos oceanográficos son:

- Afloramiento en el noroeste ibérico y sistema frontal cantábrico. La aparición del afloramiento en la costa gallega ocurre durante el verano, coincidiendo con la dominancia de vientos del norte. Este afloramiento se extiende pronto por el Cantábrico, con mayor o menor intensidad, para remitir en el mes de octubre.

- Frente costero francés. Este frente se establece en invierno, apareciendo fragmentado en los meses de verano.



**Figura 5:** Corrientes superficiales en el golfo de Vizcaya y al oeste de Gran Bretaña (Pingree,1993).

- Afloramiento en el talud céltico. Este afloramiento se forma también durante los meses de verano.

- Remolinos. La corriente cálida que se dirige hacia el norte, a lo largo de la costa portuguesa, durante el invierno, al inyectarse dentro de las aguas profundas del golfo de Vizcaya provoca la formación de remolinos, estructuras de gran interés (Pingree y Le Cann, 1992a, b). De acuerdo con estos autores, la vida de estos remolinos puede alcanzar el año. Estos remolinos tienen grandes implicaciones desde el punto de vista biológico, ya que la elevación de la termoclina estacional dentro de esta estructura hace que la evolución de la producción biológica sea probablemente mayor dentro del giro que en el agua circundante.

La determinación de la situación, extensión y evolución de este tipo de estructuras, afloramientos, frentes y remolinos, es de gran interés para la localización de los bancos de peces.

## 1.5 La pesquería vasca de atún blanco en el Atlántico nororiental

Los túnidos son objeto de explotación por parte de la flota vasca desde tiempo inmemorial. El atún blanco es una de las especies de mayor interés comercial para la flota vasca de bajura, constituyendo una de las especies objetivo fundamental de dicha flota.

Los sistemas de pesca utilizados por la flota de bajura vasca que pesca atún blanco son dos, el curricán o cacea y el cebo vivo. El curricán consiste en remolcar a una cierta velocidad, inferior a seis nudos, un anzuelo con un engaño. En la actualidad, cada barco utiliza hasta quince aparejos de cacea, que suelen ir dispuestos en cuatro tangones o varas, dos a proa y dos a popa, en las aletas y en el centro de la popa. Cada aparejo de curricán consiste en líneas de nailon trenzado de diferente grosor, más delgados hacia el extremo del anzuelo, con una puntera de nylon monofilamento al que va empatao un anzuelo doble con señuelo artificial. Antiguamente, se construían señuelos con paja de maíz; hoy en día, se construyen señuelos de caucho, de colores variados, imitando a pulpos de pequeño tamaño. La pesca con la modalidad de cebo vivo se realiza utilizando cañas sobre cardúmenes que son atraídos y mantenidos próximos a la embarcación arrojando al agua repetitivamente peces vivos. El cebo se captura con una red de cerco de pequeñas dimensiones y se mantiene vivo a bordo en grandes viveros, entre cuatro y doce unidades de cuatro mil a ocho mil litros de capacidad. Cada vivero suele albergar entre cien y doscientos kilos de pescado. El agua de mar es constantemente bombeada para el mantenimiento adecuado de la carnada, consistente en pequeños pelágicos, fundamentalmente anchoa, sardina y chicharro. Las cañas utilizadas son de bambú o fibra, de longitud variable entre dos y cinco metros, a cuyo extremo va una línea monofilamento de nailon de grosor entre 0,1 y 0,22 mm. Cada hombre maneja una caña cuando se capturan ejemplares juveniles; cuando se trata de grandes ejemplares, el número de cañas es menor, debido a la necesidad de usar poleas para el izado del pescado a bordo (Santiago, 1992).

Actualmente, en la pesquería vasca de atún blanco participan unos 110 barcos que pescan con curricán y 95 que pescan al cebo vivo. Las características de las embarcaciones que utilizan el curricán son, por término medio, las siguientes: antigüedad de 25 años, eslora de 18 m, arqueado de 47 TRB y potencia de 273 HP. El número de tripulantes habitual oscila entre 4 y 8 hombres. Las características medias de las embarcaciones de cebo vivo son, también por término medio, las siguientes: antigüedad de 35 años, eslora de 25 m, arqueado de 118 TRB y potencia de 572 HP. A pesar de su elevada edad media, el grado de conservación de las embarcaciones es adecuado y están, por lo general, equipadas de forma óptima en cuanto a aparatos de navegación y telecomunicaciones. El número de tripulantes oscila entre 14 y 17 hombres, si bien problemas de falta de personal impide en algunos casos completar las tripulaciones (Santiago, 2004).

Esta pesquería, de carácter estacional, se desarrolla entre finales de primavera y otoño. Las capturas se realizan principalmente en el golfo de Vizcaya y aguas adyacentes, alejándose en ocasiones más allá de los 25° W. Fuera de la época de “campaña”, parte de la flota también acude regularmente a aguas del Mediterráneo, sudoeste de Portugal, Canarias y Azores ([www.azti.es](http://www.azti.es)).

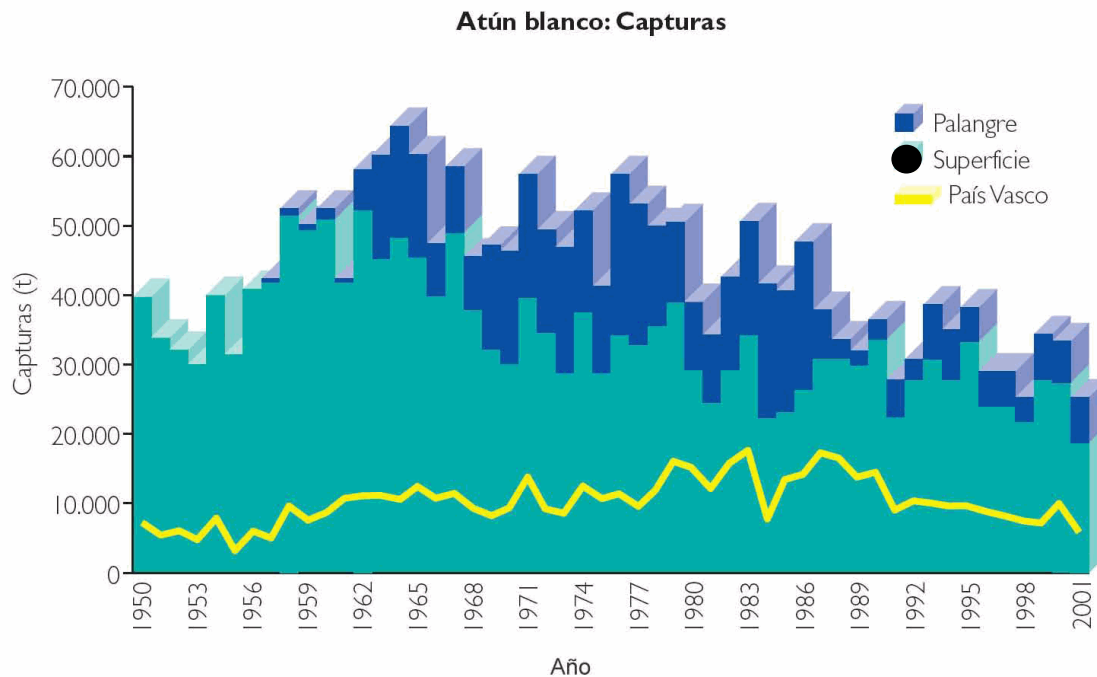


**Figura 6:** Barco artesanal vasco faenando al cebo vivo (Santiago, 1993).

Las capturas de atún blanco que se descargan en los puertos vascos suponen, por término medio, alrededor del cincuenta por ciento de las capturas del estado español y el treinta por ciento de las capturas internacionales sobre el stock de atún blanco del Atlántico norte. En el año 2000, las capturas de esta pesquería supusieron más del sesenta por ciento de la captura española y el treinta por ciento de las capturas internacionales. En el año 2001, estas capturas supusieron el cuarenta y cinco por ciento de las capturas españolas y el dieciséis por ciento de las internacionales. En 2002, las capturas vascas fueron pobres en relación a la media de años anteriores y se caracterizaron por la tardía llegada de los atunes a aguas del Cantábrico, lo cual se ha reflejado en capturas tardías no sólo para la flota de bajura vasca, sino también para las flotas francesa e irlandesa.

Las capturas de atún blanco han seguido una tendencia decreciente desde el año 1965 (60000 t) hasta el año 2001 (25000 t), debido al descenso de la flota tradicional de superficie francesa (y la española en los últimos años), como se aprecia en la Figura 7. La captura y esfuerzo de las flotas de arrastre pelágico y de red de deriva aumentaron de forma importante desde su introducción en 1987. En el periodo 1995-1997, las capturas con red de deriva mostraron una trayectoria descendente, derivada de las distintas limitaciones establecidas en la Unión Europea; sin embargo, a partir de 1997,

las capturas con este tipo de arte volvieron a ser ascendentes y posteriormente, dejaron de producirse, al prohibirse su uso a partir del 1 de enero de 2002 ([www.azti.es](http://www.azti.es)).



**Figura 7:** Capturas de atún blanco en el Atlántico norte entre los años 1950 y 2001.

## 1.6 La teledetección y las pesquerías de atún blanco

La asociación entre la temperatura del agua de mar y la presencia de atún blanco ha sido ampliamente descrita (Aloncle, 1973; Bard, 1981; Leroy, 1988). Igualmente, está bien documentada la relación entre la presencia de frentes oceánicos y la presencia de atún blanco (Uda, 1973; Laurs y Lynn, 1977; Percy y Mueller, 1970; Laurs *et al.*, 1977; Ramos *et al.*, 1996).

Laurs *et al.* (1984), usando datos de AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) para obtener temperatura superficial del mar y CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) para obtener concentración de clorofila describieron la distribución de las capturas de atún blanco a lo largo de las zonas más cálidas y claras de los frentes. La condición de predadores ópticos, común para todos los túnidos (Magnuson, 1963), y su incapacidad para capturar presas móviles en aguas turbias (Murphy, 1956) queda reflejada en su ubicación en las aguas claras y cálidas de los frentes. Fiedler y Bernard (1987), usando datos de los sensores AVHRR y CZCS e información relativa a los contenidos estomacales de atún blanco, estudiaron el carácter oportunista de esta especie en cuanto a sus hábitos alimenticios. El tipo de presas sobre las que se alimenta el atún blanco varía en función de la distancia al filamento de agua aflorada, dependiendo la presencia de las presas de su situación dentro de la estructura del afloramiento.

Leroy (1988) demostró que la teledetección satelitaria infrarroja puede aportar una ayuda precisa para la localización de estructuras frontales, que favorecen la concentración de atún blanco inmaduro en superficie. Santiago *et al.* (1993) y Ramos *et al.* (1996) estudiaron la aplicabilidad de la teledetección infrarroja a la pesquería de atún blanco. En ambos estudios quedó patente una relación entre los frentes, filamentos y giros y los rendimientos pesqueros, destacando la regularidad con la que se producían capturas en los bordes de las zonas cubiertas de nubes. Polovina *et al.* (2001) encontraron relación del frente entre los giros árticos muy productivos y los subtropicales pobres con las pesquerías de atún blanco mediante el uso de datos de concentración de clorofila obtenidos del sensor SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*). Coca *et al.* (2001) calcularon el bombeo de Ekman a partir de datos procedentes del dispersómetro de viento del ERS-1 y lo relacionaron con la pesquería de atún blanco. Aunque los resultados se vieron limitados por la baja cobertura espacial de este sensor, se apreció una predisposición del atún blanco a situarse en zonas de convergencia cercanas a zonas de cambio de signo en el bombeo de Ekman (zonas frontales).

## 2 Metodología

### 2.1 Bases de datos

#### 2.1.1 Datos de capturas y esfuerzos

El Instituto de Investigación y Tecnología para la Oceanografía, Pesca y Alimentación del Gobierno Vasco (AZTI) facilitó la base de datos de capturas de la flota vasca de bajura dedicada a la pesca artesanal de atún blanco. Los datos suministrados correspondieron a las campañas de pesca de 1999, 2000 y 2001. El área donde opera esta flota se extiende desde las Azores al Cantábrico; también en el Mediterráneo occidental.

En la base de datos facilitada por AZTI se detalla fecha, barco, latitud, longitud y aparejo (curricán o cebo vivo), además de la captura en número de individuos según categorías comerciales de tallas (talla 1: individuos de peso total inferior a cuatro kg; talla 2: individuos de peso comprendido entre cuatro y siete kg; talla 3: individuos de peso superior a siete kg).

A partir de las tallas se estimaron las biomásas correspondientes considerando pesos medios de 2, 5,5 y 11 kg para las categorías de tallas 1, 2 y 3, respectivamente. Seguidamente, se estimó la captura en peso por barco y día. El poder de pesca de estos barcos es muy similar y las capturas se detallaron por barco y día. Ello permitió estimar la captura por unidad de esfuerzo (CPUE), tomando como unidad de tiempo un día y de esfuerzo el barco. Así se pudo usar la biomasa calculada como CPUE.

La relación entre las capturas y las variables oceánicas observadas mediante teledetección se estableció con los datos de captura correspondientes a una coordenada concreta. La presencia del atún en ese punto estará asociada a unas características del medio que no se describen únicamente con el punto de captura. La estructura espacial del medio determinará la presencia del túnido y la extensión de ésta es prácticamente imposible de determinar si se utilizan cuatro variables derivadas de los satélites, por eso se propone otra forma de evaluar la CPUE sobre un área de influencia. Para un área de influencia determinada, la CPUE se calculó como la suma de todas las capturas en el área dividida por el número de barcos. La particularidad de la determinación del área de influencia es que se hizo de forma dinámica. Se tomó un punto de captura como centro de una ventana de  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  y otra de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  de extensión, se sumaron las capturas de cada barco para ese día dentro de ésta y se dividieron por el número de barcos. Al resultado de la primera ventana se le denominó CPUE3 y al de la segunda CPUE5. Se hizo lo mismo para cada punto de captura de la base de datos. Esta metodología provocó que las ventanas se solaparan y los mismos puntos de captura se utilizan en el cálculo de diferentes CPUE.

#### 2.1.2 Datos de satélite

Todos los tratamientos de síntesis, extracción de subimágenes, promedios, reproyección, extracción de datos, generación de mapas, visualizaciones, ... utilizados en este trabajo se realizaron mediante programas sobre IDL<sup>®</sup> (*Interactive Data*

*Language*) en su versión 5.5 y ENVI-IDL® (*ENvironment for Visualizing Images*) en su versión 3.5.

### 2.1.2.1 Temperatura superficial del mar (SST)

La medida de la temperatura superficial del mar puede hacerse a partir de dos tipos de sensores radicalmente diferentes. Unos trabajan en el rango de las microondas y los otros en el infrarrojo térmico. Los primeros, como el SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*), presentan una resolución muy pobre y sus resultados son bastante inexactos. Los otros presentan una buena resolución y sus resultados son muy precisos. Los sensores operacionales útiles operan en el infrarrojo térmico. Los satélites NOAA, cuyo programa se inició en los años setenta y continuará al menos hasta el 2008, se caracterizan por la órbita simultánea de al menos dos satélites, un amplio campo de visión (2700 km), lo cual da lugar a una alta repetitividad temporal, y una buena resolución espacial (1,1 km en el nadir).

En el infrarrojo térmico, la hidrosfera se comporta como un cuerpo negro, esto es un cuerpo teórico que, a una temperatura dada, absorbe la totalidad de la radiación que recibe y la reemite en su totalidad. Los cuerpos reciben energía de su medioambiente (por ejemplo, del Sol) y la radiación que reciben la pueden absorber en mayor o menor medida. La fracción absorbida modifica la energía del cuerpo, pudiendo ser reemitida en forma de radiación a otra longitud de onda. Así, el cuerpo juega el papel de fuente, transformando parte de la energía térmica en energía radiativa.

La radiancia emitida por la superficie del mar es medida por el sensor y se convierte en temperatura de brillo o temperatura aparente, que se relaciona con la temperatura real del océano por la emisividad. La radiancia medida por el sensor atraviesa la atmósfera, donde la radiación se ve alterada. La principal perturbación que sufre es debida a la presencia de vapor de agua, que absorbe parte de la radiación. Por esta razón, la temperatura de brillo y la absoluta difieren en varios grados. Las correcciones pueden realizarse a partir de modelos analíticos que piden gran cantidad de datos o a partir de modelos empíricos. En el segundo caso, sólo se precisa de medidas *in situ* de calidad.

Las propiedades del vapor del agua en el infrarrojo han sido estudiadas ampliamente, sobretudo la transmisión diferencial según la banda espectral. El método *multi-window* utiliza esta propiedad para reducir el efecto del contenido atmosférico. Consiste en una combinación lineal de las medidas de temperatura de brillo hechas en varios canales. El método *split-window* es un método particular del *multi-window* usando los canales 4 y 5 del AVHRR.

Los datos de temperatura utilizados provienen del programa NOAA/NASA AVHRR *Ocean Pathfinder Sea Surface Temperature Products*, desarrollado por el JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) de la NASA. Este programa consiste en una base de datos de temperatura superficial del mar obtenida por el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) que llevan a bordo los satélites operacionales de la serie NOAA.

El algoritmo utilizado para la obtención de la temperatura superficial del mar fue el MCSST, propuesto por McClain *et al.* (1985):



$$SST = \alpha_1 + \alpha_2 T_4 + \gamma(T_4 - T_5),$$

donde:  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes obtenidas por mínimos cuadrados en base a datos tomados *in situ*,  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de brillo del canal 4 y 5 del sensor, y  $\gamma$  es un factor basado en el conocimiento de los coeficientes de absorción (Emery *et al.*, 1994). En esta fórmula no se contempla corrección alguna por atenuación debida al vapor de agua.

Posteriormente, se introduce un algoritmo no lineal, denominado NLSST, que incorpora una estimación inicial de la temperatura superficial del mar, donde los coeficientes se calculan para diferentes regímenes de vapor de agua definidos por la diferencia entre  $T_4$  y  $T_5$ . La forma final del algoritmo NLSST utilizado en el programa *Pathfinder*, según esta particularidad, se formula de la siguiente manera:

$$SST = \alpha_1 + \alpha_2 T_4 + \alpha_3 (T_4 - T_5) T_{surf} + \alpha_4 (\sec(\theta) - 1)(T_4 - T_5),$$

donde:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  y  $\alpha_4$  son constantes obtenidas por mínimos cuadrados en base a datos tomados *in situ*,  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del sensor,  $T_{surf}$  es el primer valor de temperatura superficial calculado, y  $\theta$  es el ángulo de visión del radiómetro. Los coeficientes del algoritmo se calculan para  $T_4$  y  $T_5 \leq 0,7$  y  $T_4$  y  $T_5 \geq 0,7$ . Esta forma del algoritmo ha sido la aprobada por el *AVHRR Oceans Science Working Group* para el reprocesamiento de los datos MCSST porque es la que tiende al menor error por efecto de las condiciones ambientales (Podesta *et al.*, 1995). La no-linealidad proviene de los coeficientes calculados para diferentes condiciones de vapor de agua. Estos coeficientes se recalculan anualmente para tres tramos de diferencias entre  $T_4$  y  $T_5$ .

Para la calibración de las medidas se utiliza la medida puntual de una sonda en los primeros decímetros de la superficie y se compara con una medida integrada en más de 1 km<sup>2</sup> sobre los primeros micrómetros de la superficie del mar. Si las capas inferiores son homogéneas, las medidas serán significativas (presencia de viento y ausencia de sobrecalentamiento superficial); por el contrario, si las capas inferiores están muy estratificadas, las dos medidas serán diferentes. Con mucho viento, sin embargo, puede producirse una subestimación de la temperatura debido a la espuma.

En la ecuación se introduce el ángulo zenital para tener en cuenta que las medidas alejadas del nadir han recorrido una capa más larga de atmósfera. Además, debido al ángulo de visión, cubren una superficie hasta cinco veces mayor que las correspondientes al nadir.

Un tercer tipo de error lo producen las nubes que contaminan fuertemente las medidas. Las nubes producen subestimaciones de la temperatura. La máscara de nubes elimina las radiancias demasiado bajas para corresponder a temperaturas de la superficie del mar.

Para la obtención de las imágenes de temperatura superficial del mar, se dispuso de datos diarios de 9 km de resolución aproximadamente (0,087890625°) en una proyección equidistante cilíndrica correspondiente a los productos SMI (*Standard Mapped Image*) de la NASA. Con la finalidad de minimizar el problema de la cobertura

nubosa se realizaron síntesis de cinco días. Se generaron imágenes diarias en las que se utilizó la imagen del día, las de los dos días anteriores y las de los dos posteriores. Para la obtención de la temperatura superficial del mar, se realizó síntesis utilizando el píxel más caliente. Se partió de los datos diarios de AVHRR disponibles en el JPL de la NASA y se seleccionó el producto correspondiente a la mejor temperatura superficial del mar para pases de noche (a fin de evitar el sobrecalentamiento diurno). Se realizó la petición de los datos en formato binario sobre la ventana geográfica de interés. En la Tabla 1 se detallan las características geográficas, tamaño, resolución y transformación del valor digital (DN) al producto geofísico en grados centígrados. El periodo de tiempo de los datos utilizados comprendió los meses de junio a octubre de los años 1999 y 2001 y el año 2000 completo.

**Tabla 1:** Características de los datos de temperatura superficial del mar.

Columnas	796
Líneas	455
Longitud mínima	-29,9707
Latitud máxima	50,0097
Longitud máxima	39,9902
Latitud mínima	10,0195
Resolución (longitud)	0,087890625
Resolución (latitud)	0,087890625
Datos	8 bits
Transformación	$SST=0,15 \cdot DN(x,y)-3.0$

### 2.1.2.2 Color del océano

El primer sensor para medir el color del océano fue el CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) situado a bordo del Nimbus-7. Su fallo prematuro en 1987 dejó sin datos de este tipo durante muchos años a la comunidad científica. En agosto de 1997, se puso en órbita el Orbview-2 con el sensor SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*). Su resolución espacial en el nadir es de 1 km y el campo de visión es de 2800 km. Sus ocho canales, que van desde el verde hasta el infrarrojo cercano, analizan con gran precisión los componentes del agua de mar y su concentración. El canal 1 se utiliza para distinguir la sustancia amarilla; los canales 2, 3 y 4 para calcular la concentración de clorofila; y los canales 5, 6, 7 y 8 para evaluar la turbidez y corregir los efectos atmosféricos. Regularmente, se hace una calibración doble del sensor en dirección al sol y a la luna, afinando el ajuste de sus radiancias. Otra particularidad de la plataforma es permitir una inclinación rápida ( $\pm 20^\circ$ ) a lo largo de la traza del satélite (*tilt*), lo que evita la reflexión especular. El inconveniente es la pérdida de datos en varias decenas de millas en la zona intertropical durante la maniobra, que tarda algunos segundos.

En el rango del espectro visible, las longitudes de onda lo suficientemente pequeñas penetran en el agua y se absorben de manera rápida hasta una cierta profundidad. En el visible, el rojo (aproximadamente 750 nm) se absorbe más rápidamente que el azul (aproximadamente 350 nm). La profundidad de absorción total de la luz es función de la composición del agua. Las aguas naturales dulces y saladas contienen una mezcla de materias disueltas, ópticamente activas, variables en naturaleza

y concentración; en consecuencia, sus propiedades ópticas varían mucho en el espacio y en el tiempo. Se distinguen dos categorías de materia en el agua: la materia disuelta y la particulada. De manera arbitraria, se considera materia disuelta toda aquella cuyo tamaño es inferior a 0,47  $\mu\text{m}$ . La materia orgánica disuelta comprende los ácidos húmicos y fúlvicos productos de la descomposición de la materia vegetal conocidos con el término alemán *gelbstoff*. En el caso de aguas abiertas corresponde a la descomposición de zooplancton y fitoplancton al final de los *blooms*. En mar abierto, la materia particulada se compone también de zooplancton y fitoplancton vivo. Las concentraciones no suelen superar los 0,5  $\text{mg}/\text{m}^3$ , aunque pueden ser muy variables. Estas variaciones, debidas a *blooms* de fitoplancton, son muy importantes para las cadenas tróficas pelágicas. Cerca de la costa puede sumarse arena o sedimentos cuya concentración varía con la profundidad y el movimiento del mar (desde algunos  $\text{mg}/\text{m}^3$  a centenas de  $\text{mg}/\text{m}^3$ ). En los estuarios, los aportes llegan al orden de 1  $\text{gr}/\text{m}^3$ , además de la resuspensión de sedimentos hacia la columna de agua (por ejemplo, debido a la marea).

El cálculo se reduce a las aguas caso 1, donde el color se relaciona directamente con el fitoplancton. Se trata de relacionar las magnitudes medidas con el satélite con las cantidades reales medidas en el terreno. El satélite mide radiancias, magnitud que depende de las propiedades del medio y de la atenuación, y que puede explicarse en función de la reflectancia. La reflectancia es una propiedad óptica aparente (*Apparent Optical Properties*, AOP).

Las propiedades ópticas aparentes se definen en contraposición a las propiedades ópticas inherentes (*Inherent Optical Properties*, IOP). Las propiedades ópticas inherentes de una masa de agua dependen únicamente de su composición y no de las condiciones de atenuación. Por ejemplo, los coeficientes de absorción y de dispersión forman parte de las propiedades ópticas inherentes.

Localmente, la atenuación varía rápidamente (presencia de nubes, ángulo de incidencia y estado de la superficie del mar). Con el fin de evitar esta limitación, se pretende utilizar las propiedades inherentes de la masa de agua. La radiancia medida por un satélite se explica en función de múltiples variables, como la atenuación extra-atmosférica, pero también de la reflectancia bajo la superficie que contiene la información del color del agua. La radiancia reflejada medida por el satélite ( $L_{wn}$ ) se calcula como:

$$L_{wn} = F_0 \frac{(1-\rho)(1-\rho')R}{n^2(1-rR)Q}$$

donde:  $F_0$  es la atenuación extra-atmosférica,  $n$  es el índice de refracción del agua de mar,  $R$  es la reflectancia debida a la transferencia radiativa función de la luz incidente y de las propiedades ópticas inherentes,  $\rho$  es la reflectancia de Fresnel por incidencia normal,  $\rho'$  es la reflectancia de Fresnel por el sol y el cielo,  $r$  es la reflectancia del aire-agua, y  $Q$  es la constante que relaciona la atenuación ascendente bajo la superficie con la radiancia ascendente bajo la superficie.

En la ecuación, el cociente tiene en cuenta los procesos de interfaz entre miles de índices de refracción diferentes ( $R$ ). Varía poco en función de las longitudes de onda y su valor es 0,545. Además, la reflectancia debida a la transferencia radiativa puede

expresarse en función de las propiedades ópticas inherentes, como los coeficientes de absorción y de retrodispersión.

$$R(\lambda) = G(\mu_0 \lambda) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)},$$

donde:  $G(\mu_0 \lambda)$  es el campo de luz descendente,  $a(\lambda)$  el coeficiente de absorción, y  $b_b(\lambda)$  el coeficiente de retrodispersión.

Los coeficientes de absorción y de retrodispersión dependen de las concentraciones de los diferentes componentes ópticamente activos y de sus respectivos coeficientes por unidad de concentración. Estos últimos se calculan en base a medidas tomadas sobre el terreno o en el laboratorio.

La técnica más utilizada para calcular la concentración de clorofila o de otros constituyentes es la relación entre radiancias. Se elige una banda en la que su radiancia sea muy sensible y se normaliza eligiendo la radiancia a una longitud de onda a la que es poco sensible. La clorofila-a absorbe fuertemente en la banda del azul y su reflectancia es débil; en el verde, el pigmento absorbe poco y refleja mucho. La relación entre radiancias ( $L_{\text{azul}}/L_{\text{verde}}$ ) permite eliminar los efectos de un ambiente particular sobre la luz incidente y calcular la concentración de clorofila.

En las longitudes de onda del visible, la radiancia medida por el sensor se ve afectada de manera importante por la atmósfera. Las partículas (agua, aerosoles) absorben fuertemente la radiación y la dispersan, por tanto la corrección atmosférica de los datos es fundamental.

En aguas abiertas, el color del agua depende fundamentalmente de la concentración de clorofila. Por el contrario, en aguas caso 2 (aguas costeras), la interpretación de las medidas radiométricas es más compleja, debido a la presencia simultánea de materia orgánica disuelta, materia particulada y pigmentos clorofílicos. La cuantificación de esos tres constituyentes requiere numerosos datos de tierra y lo que se obtiene son modelos locales.

En cuanto a la combinación de canales, es necesario realizar la elección óptima para la relación de radiancias en el algoritmo.

Las medidas *in situ* son fundamentales para la calibración del sensor, pero su toma no es evidente. Los radiómetros se colocan debajo de la superficie del agua y están influidos por la presencia de nubes, espuma, ... . Además, la profundidad de integración depende de la región.

Para la obtención de las imágenes de clorofila, se dispuso de datos diarios de 9 km de resolución aproximadamente ( $0,087890625^\circ$ ) en una proyección equidistante cilíndrica formato SMI de la NASA. Con la finalidad de minimizar el problema de la cobertura nubosa se realizó síntesis de cinco días. Se generaron imágenes diarias en las que se utilizó la imagen del día, las de los dos días anteriores y las de los dos posteriores. Para la clorofila se realizaron promedios con los valores correspondientes a los cinco días, partiendo de los datos diarios de SeaWiFS disponibles en el DAAC

(*Distributed Active Archive Center*) de la NASA y se seleccionó el producto correspondiente a la concentración de clorofila diaria nivel L3m (*Level 3 mapped*). Los datos en formato HDF (*Hierarchical Data Format*) tienen cobertura global, por lo que se realizó una extracción de los datos de la ventana de interés y se guardaron en formato TIFF (*Tagged Image File Format*). En la Tabla 2 se detallan las características geográficas, tamaño, resolución y transformación del valor digital (DN) al producto geofísico en miligramos por metro cúbico. El periodo de tiempo de los datos utilizados comprendió los meses de junio a octubre de los años 1999 y 2001 y el año 2000 completo.

**Tabla 2:** Características de los datos de concentración de clorofila.

Columnas	796
Líneas	512
Longitud mínima	-29,9707
Latitud máxima	50,0097
Longitud máxima	39,9902
Latitud mínima	5,0098
Resolución (longitud)	0,087890625
Resolución (latitud)	0,087890625
Datos	8 bits
Transformación	$Chl=10^{(0.015 \cdot DN(x,y)-2.0)}$

### 2.1.2.3 Anomalías del nivel del mar (SLA)

El satélite GEOSAT de la marina estadounidense se lanzó el 12 de marzo de 1985 y falló en enero del año 1990. Un año y medio después de su lanzamiento, se emplazó a una órbita repetitiva de 17 días para seguir las variaciones del nivel del océano durante más de dos años. Sus datos están disponibles para la comunidad científica a través de la NOAA. Fue reemplazado por el satélite GFO (*Geosat Follow-On*) lanzado sobre la misma órbita en febrero de 1998. En agosto de 1992, se lanzó el satélite TOPEX/POSEIDON, fruto de la cooperación franco-estadounidense, con el objetivo de observar y comprender la circulación oceánica. Quince meses después, se lanzó el JASON con un altímetro que funciona a dos frecuencias, la primera a 13,575 GHz (banda Ku), prácticamente igual que el POSEIDON-1, y la segunda a 5,3 GHz (banda C), la misma que el ERS. Este altímetro dual permite corregir el efecto producido por los electrones ionosféricos. Durante los primeros seis meses, orbitó 60 segundos por delante del TOPEX/POSEIDON a efectos de calibración. Posteriormente, se dispusieron en órbitas paralelas. El JASON además lleva a bordo un radiómetro en el rango de las microondas (18,7, 28,8 y 34 GHz) que le permite calcular el contenido de agua de la atmósfera para eliminar su efecto sobre el pulso del altímetro.

El centro AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*) analiza, valida, archiva y distribuye datos altimétricos del TOPEX/POSEIDON y JASON, así como de otras misiones altimétricas (ERS). El TOPEX/POSEIDON se compone de dos altímetros, el TOPEX y el POSEIDON, que parten de la misma antena, por lo que sólo puede hacerse funcionar uno a la vez. El

POSEIDON es experimental, siendo el TOPEX el que funciona el 90 % del tiempo. A partir del ciclo 130 (marzo de 1996), se observó una degradación del rendimiento del TOPEX y su función fue sustituida por el POSEIDON a partir del ciclo 236 (diciembre de 1999). Sus medidas son coherentes con las realizadas por los altímetros del ERS.

La órbita del TOPEX/POSEIDON está inclinada  $66^\circ$  en relación al eje norte-sur de la tierra. Cubre una latitud entre  $66^\circ$  N y  $66^\circ$  S. La órbita se repite cada diez días y es el resultado del compromiso entre diversas necesidades. Cubre la mayor parte de los océanos que no están cubiertos por hielo y está lo suficientemente alto para minimizar los efectos de la fricción atmosférica, lo cual ayuda a determinar con precisión la órbita. La distancia media entre trazas es igual a la semidiagonal latitudinal. En el ecuador, esta distancia es de 300 km para el TOPEX/POSEIDON y 85 km para el ERS. En los dos casos, el altímetro efectúa una medida por segundo (cada 7 km a lo largo de la traza. El muestreo espacial del TOPEX/POSEIDON es peor que el del ERS. Si embargo, la duración del ciclo del TOPEX/POSEIDON es de diez días, por lo que el muestreo temporal es más de tres veces mejor (35 días). Combinando los datos de los dos satélites se optimizan los resultados.

La masa líquida de los océanos no presenta una superficie homogénea, al contrario “valles” y “colinas” se suceden y además se desplazan. Estas deformaciones se deben a muchos fenómenos físicos. En principio, la atracción terrestre determina la topografía estática, pero el océano se desvía de ésta con la rotación terrestre y los vientos que, sin tregua, arrastran la superficie del mar. Es lo que se llama topografía dinámica de la superficie, que es del orden de dos metros como máximo. Del conocimiento preciso de esta topografía puede extraerse la dirección e intensidad de las corrientes. Los altímetros del ERS y sobretodo del TOPEX/POSEIDON tienen la precisión suficiente para medir la distancia altimétrica del orden de un centímetro.

El altímetro funciona enviando una serie de pulsos radar hacia la tierra y midiendo el tiempo que tardan en volver al sensor después de haber sido reflejados por la superficie del mar. La distancia obtenida es la distancia altimétrica y el nivel del mar es la diferencia entre la altitud del satélite y la distancia altimétrica.

El nivel del mar se mide en relación a un elipsoide de referencia. Las medidas del nivel del mar son particulares ya que dependen del elipsoide elegido. Las medidas altimétricas de las que se dispone utilizan un elipsoide de referencia específico del proyecto TOPEX/POSEIDON. La anomalía de la altura del nivel del mar se define en relación a una media, de aquí su nombre. Existen varias medias, que pueden ser anuales o estacionales. Las anomalías, por tanto, dependen de los criterios elegidos para determinar la media.

La topografía dinámica se mide en relación al geoide. El geoide, la altura que tendría el mar en ausencia de toda perturbación (mareas, vientos, corrientes, ...), se corresponde con una superficie equipotencial del campo gravitacional terrestre. La topografía dinámica provee información de las corrientes, que son una de las causas de las desviaciones entre la altura real del mar y el geoide. Las corrientes se dividen en una parte estacionaria, que depende de la rotación de la Tierra y de vientos permanentes, y una parte fuertemente variable, que depende de la marea y de las condiciones meteorológicas.

Con el fin de paliar el conocimiento insuficiente del campo gravitacional terrestre, se utilizan las anomalías de las alturas del nivel del mar antes que la topografía dinámica. Este campo afecta a las predicciones de la órbita de los satélites, así como al geode terrestre. Ya que la gravedad no varía con el tiempo, afecta de la misma manera a cada pase de satélite por encima del mismo punto. Suprimiendo la altura media del agua se suprime este error, pero se hace también desaparecer de golpe la circulación oceánica media. Sin embargo, los mapas de anomalías son útiles para observar las corrientes que varían sobre cortos periodos de tiempo y distancia en función de los remolinos, del viento y de los cambios de temperatura en la capa superficial del agua.

Se identifican tres tipos de fuentes de error: los errores debidos al viaje de la onda, los errores debidos al ruido de otros fenómenos (que constituye, por otra parte, también información) y los errores debidos a las manipulaciones técnicas.

Para obtener una estimación precisa del nivel del agua es necesario conocer bien la velocidad de propagación del pulso. La propagación de la onda se ve afectada por numerosos factores que cambian la velocidad de propagación de la onda. Un signo positivo significa que el error conduce al altímetro a sobreestimar la distancia que le separa de la superficie del mar. La importancia de corregir estos errores reside en que la precisión que se desea es del orden de 2 cm.

La velocidad de propagación del pulso de radar disminuye por efecto de los gases y la cantidad de vapor de agua en la atmósfera terrestre. La influencia de la masa total de la atmósfera es bastante previsible (troposfera seca, 230 cm), pero la influencia del vapor de agua es más variable y más difícil de determinar (troposfera húmeda, de -6 a -30 cm). El número de electrones libres en la ionosfera influye sobre la velocidad de propagación del pulso (de 0,2 a 20 cm). La cantidad de electrones varía entre el día y la noche y entre el invierno y el verano y es función del ciclo solar.

Para calcular la topografía dinámica del mar hace falta tener en cuenta perturbaciones no deseadas, como la marea. Los errores pueden provenir de las olas, ya que el sensor recibe más ondas reflejadas en los valles que en las crestas. La altura media de la onda reflejada es más baja que la altura media del nivel del mar. Este error se puede corregir si se conoce la altura de ola significativa ( $\xi_{1/3}$ ). Esta altura se puede determinar a partir de la forma del pulso retornado al altímetro. Un mar en calma devuelve un pulso estrecho mientras que un mar agitado devuelve un pulso estirado. Las ondas reflejadas en las crestas llegan antes que las reflejadas en los valles. Los pulsos emitidos por el altímetro tienen una extensión y un espesor determinados. La curvatura del pulso combinada con la curvatura de la Tierra hace que toda la onda no llegue a la superficie al mismo tiempo. La región en la que la onda no se retarda más de un dz (espesor del pulso) se llama "primera zona de Fresnel". La medida de la altura de ola significativa ( $\xi_{1/3}$ ) sólo se puede tomar si la altura de ésta es superior al espesor del pulso (dz).

La altura del mar también responde a la presión atmosférica. Un aumento de la presión atmosférica de un mbar baja el nivel del mar un cm. La respuesta del océano a los cambios de presión atmosférica es todavía objeto de estudio. Los valores de los efectos barométricos están separados de los valores corregidos en los ficheros de datos.

Después de haber obtenido una medida precisa de la distancia que separa el altímetro de la superficie del mar hace falta tener en cuenta las mareas. Las fuerzas gravitacionales externas no solo generan las mareas oceánicas, también deforman la tierra sólida. La respuesta de la Tierra es lo suficiente rápida para suponer un estado de equilibrio. La superficie de la marea de tierra es por tanto paralela a la superficie equipotencial. Existe entonces una constante de proporcionalidad entre la altura de la marea sólida y el potencial gravitacional. Esta constante es casi independiente de la frecuencia de la marea, salvo una frecuencia cercana a ella de la componente K1 que produce una resonancia del manto líquido.

El eje de rotación de la Tierra oscila con periodos aparentes de doce y catorce meses. Desde el punto de vista del observador terrestre, eso da lugar a una fuerza centrífuga suplementaria cuyo efecto no se distingue del de las mareas. Este fenómeno se conoce como marea polar y se considera que su periodo es lo suficientemente largo como para permitir un equilibrio, a la vez, con el océano y la tierra sólida.

A 1330 Km de altura, donde orbita el satélite TOPEX/POSEIDON, la fricción de la atmósfera es todavía suficiente para hacerla bajar lentamente. Las variaciones en el campo gravitacional terrestre y los cambios en la presión de la radiación solar causan otras perturbaciones. Cada cierto tiempo son necesarias maniobras para mantener la órbita del satélite. La frecuencia de estas maniobras depende principalmente del flujo solar y varía entre 40 y 200 días. Estas maniobras duran de 20 a 60 minutos y se efectúan mientras el satélite sobrevuela los continentes. Durante estas maniobras no se toma medida científica alguna. La precisión media instantánea de los datos es inferior a 5 cm y la precisión media sobre un mes es inferior a 2 cm.

**Tabla 3:** Características de los datos de anomalía del nivel de mar.

Columnas	161
Líneas	181
Longitud mínima	-30,125
Latitud máxima	55,125
Longitud máxima	10,125
Latitud mínima	9,875
Resolución (longitud)	0,25
Resolución (latitud)	0,25
Datos	16 bits
Transformación	Lectura directa

Los datos de anomalías del nivel del mar, que fueron suministrados por el CLS-AVISO, se generaron para periodos de siete días interpolando los valores disponibles para cada periodo. Los datos fueron facilitados en formato binario con cobertura global. La proyección original es mercator, por lo que se re proyectaron a equidistante cilíndrica con una resolución espacial de 0,25° para homogenizar las cuatro variables de teledetección disponibles. Se procedió a la extracción de una subventana sobre el área de interés. En la Tabla 3 se detallan las características de los datos, las unidades en milímetros. El periodo de tiempo de los datos disponibles comprendió los años 1999, 2000 y 2001.



#### 2.1.2.4 Bombeo de Ekman

El conocimiento del vector de viento tiene una importancia crítica en la comprensión y predicción de muchos fenómenos oceanográficos, meteorológicos y climáticos. El estrés de viento, que constituye la mayor fuente de momento sobre la superficie del océano, rige la dinámica oceánica, desde las ondas superficiales (oleaje y ondas superficiales) hasta los sistemas de corrientes a nivel de cuenca. El viento sobre el océano regula el crucial acoplamiento entre la atmósfera y el océano, el cual mantiene el clima a nivel global y regional y modula los flujos de calor aire-mar, humedad y sustancias químicas. Las medidas de viento superficial pueden alimentar modelos regionales y globales de predicción del tiempo, y de este modo amplían y mejoran nuestra capacidad de predecir futuros patrones de clima a diferentes escalas.

El viento es el principal factor responsable de la dinámica superficial oceánica. El forzamiento ejercido por el viento desplaza el agua, generando corrientes, que unido a otros factores como la rotación de la tierra, la batimetría o el efecto de la costa, determina la dinámica de las primeras capas del océano. El estrés que produce un campo de viento sobre la superficie del mar y su irregular forma de actuar sobre un área produce desplazamientos horizontales de las masas de agua que se ven compensados por descensos o ascensos, según sean zonas de convergencia o zonas de divergencia. El bombeo de Ekman (*Ekman pumping*) consiste en un ascenso o un descenso de la columna de agua según el efecto del campo de viento.

El bombeo de Ekman tiene implicaciones físicas, químicas y biológicas sobre los ecosistemas oceánicos (Peláez y McGowan, 1986; Abbot y Zion, 1987). En las zonas de divergencia se produce una elevación de las isotermas que puede ocasionar la entrada de nutrientes en la capa fótica, estimulando la producción primaria, con las implicaciones biológicas que esto conlleva. En las zonas de convergencia se produce un hundimiento de las isotermas que puede dar lugar a la acumulación de plancton, larvas, ... .

Todas las bases de datos de vector de viento disponibles son deficientes en cobertura y precisión. Los datos procedentes de barcos están sesgados tanto desde un punto de vista geográfico como fenomenológico. Además, estos datos son imprecisos debido a: observadores no entrenados, instrumentación pobre, anemómetros mal emplazados, corrección inadecuada de la velocidad del barco y transmisión y transcripción de los datos (Pierson, 1990). Las mediciones procedentes de boyas son precisas pero escasas y tienden a estar concentradas en regiones cercanas a la costa en el hemisferio norte (Gilhousen, 1987). Solo los instrumentos a bordo de satélites pueden obtener datos de viento con cobertura global, alta resolución espacial y con muestreo frecuente.

Hasta el lanzamiento de la serie ERS no se disponía de datos de viento, ni en resolución espacial ni en resolución temporal, comparables a los que ofrece el AMI (*Active Microwave Instrument*). Salvo en los escasos tres meses de vida del Seasat, que llevaba a bordo un dispersómetro de viento más rudimentario (dos antenas y 50 km de resolución), las evaluaciones de bombeo de Ekman se hacían a partir de datos de boyas y barcos. Los resultados obtenidos previamente a la disponibilidad de datos de dispersómetro de viento hacían uso de métodos de interpolación y se hacían para escalas temporales mayores de un mes y escalas espaciales de en torno a 1° (Bakun y Nelson,

1991). Saunders (1976) demostró que el aumento del tamaño de la celda de la malla produce la subestimación del estrés de viento. A partir de los datos del dispersómetro de la serie ERS se pueden efectuar estos cálculos a submesoescala ( $t=1,0:25$  km).

Los dispersómetros radar a bordo de satélites son actualmente los únicos sistemas de teledetección capaces de obtener mediciones precisas, frecuentes y con alta resolución de la intensidad y dirección del viento oceánico superficial. Prácticamente, actúan en cualquier situación meteorológica; sin embargo, las medidas de dispersómetro son altamente indirectas y requieren un procesamiento importante para estimar el vector de viento a partir de la energía retrodispersada medida directamente por el dispersómetro.

### *Fundamentos teóricos del dispersómetro de viento*

La medición del vector de viento superficial a partir de dispersómetros activos en las microondas es una técnica relativamente madura. Los dispersómetros son radares diseñados específicamente para obtener precisas y múltiples medidas de la sección eficaz de retrodispersión de la superficie oceánica. Las estimaciones del vector de viento y de otras magnitudes relacionadas, como el estrés de viento, se pueden obtener por combinación de la retrodispersión medida desde diferentes geometrías de visión. Los dispersómetros de viento transmiten pulsos hacia la superficie del océano y miden la energía retrodispersada recibida por el instrumento. Los movimientos atmosféricos no afectan de manera sustancial a la radiación emitida y recibida. El momento transferido desde el aire hacia el mar produce rugosidades (“ripples”) en la superficie del océano. Estas ondas modifican la sección eficaz de retrodispersión del océano ( $\sigma_0$ ) y, por lo tanto, la energía retrodispersada. Los dispersómetros miden la energía retrodispersada, permitiendo la estimación de la sección eficaz de retrodispersión de la superficie del mar.

Las características del viento se obtienen mediante el uso de un modelo empírico que relaciona la intensidad y la dirección del viento que corresponde a la reflectividad de radar de la zona iluminada por éste. En realidad, la relación directa se produce entre la sección eficaz de retrodispersión y el estrés de viento (Geernaert, 1988; Phillips, 1988; Blanc *et al.*, 1989), que depende de la velocidad del viento, de la estabilidad y de las características de la capa atmosférica que causa el estrés sobre la superficie del mar (Ross y Louis, 1990). La medida de viento obtenida se correspondería con el viento real si esa capa límite fuera de estabilidad neutra. Geernaert y Larsen (1993) resaltaron la importancia de la humedad sobre la sección eficaz de retrodispersión, sobretudo en aguas cálidas. Woiceshyn *et al.* (1986) y Donelan y Pierson (1987) incidieron en el efecto de la temperatura sobre la viscosidad del agua, en consecuencia sobre la generación de ondas de Bragg, que son en definitiva las que determinan la retrodispersión medida por el radar. Wentz *et al.* (1984), sin embargo, concluyeron que el efecto de la temperatura es muy pequeño y puede despreciarse. Otro efecto importante a tener en cuenta es la profundidad, debido a que el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) se ve afectado por efecto del fondo en aguas someras (Guymer y Zecchetto, 1993; Geernaert *et al.*, 1987). El coeficiente de arrastre determina el estrés de viento y, como resultado, la retrodispersión obtenida sobre aguas someras va a estar afectada por la fricción con el fondo.

Para cada posición iluminada en la Tierra, la energía total recibida ( $P_r$ ) es la suma de la energía retrodispersada ( $P_b$ ) y una contribución resultante del ruido del instrumento y de la emisividad natural del sistema Tierra-atmósfera a esa frecuencia ( $P_n$ ). Para determinar con precisión la energía retrodispersada  $P_b$ , el ruido  $P_n$  debe estimarse y sustraerse de la energía total recibida  $P_r$ . Esta sustracción, conducida por la necesidad de una precisión absoluta de las medidas de la sección eficaz de retrodispersión, es una característica singular de los dispersómetros, que los diferencia de otros instrumentos de teledetección en el rango de las microondas, como los altímetros y los radares de apertura sintética. La ecuación de radar formulada por Ulaby *et al.* (1981, 1982, 1986) puede usarse para calcular la sección eficaz de retrodispersión.

Para extraer el vector de viento de las medidas de sección eficaz de retrodispersión debe conocerse la relación entre ésta y el viento superficial. Aunque no es un algoritmo *per se*, la función modelo que relaciona la sección eficaz de retrodispersión con las condiciones ambientales y variables de radar (incluyendo la geometría) juega un papel crucial en el diseño de los dispersómetros de viento y el procesamiento de los datos adquiridos. De la misma manera, el tratamiento de la función modelo impone fuertes limitaciones y afecta de forma vital a la flexibilidad de los algoritmos de cálculo del viento.

En su forma general, la función modelo puede escribirse como:

$$\sigma_o = M(w, \chi, \dots, \theta, p, f),$$

donde:  $\sigma_o$  es la sección eficaz de retrodispersión normalizada de la superficie del mar,  $w$  y  $\chi$  son la velocidad del viento y la dirección del viento relativa respectivamente (el ángulo, medido en el plano horizontal, entre el viento y la dirección de iluminación del radar), ... la dependencia de otras variables no geofísicas subsidiarias, como la estratificación de la capa límite atmosférica, condiciones de oleaje, temperatura superficial del mar, ..., y  $\theta$ ,  $p$  y  $f$  el ángulo de incidencia, la polarización (generalmente vertical u horizontal) y la frecuencia del radar, respectivamente. Se denomina vector de viento, pero en realidad se refiere a las características de viento más probables para una sección eficaz de retrodispersión.

La capacidad de un dispersómetro de viento para medir el vector de viento radica en el hecho que la sección eficaz de retrodispersión es una función sensible a la dirección ( $\chi$ ) y a la intensidad del viento ( $w$ ). Hay una importante, aunque pequeña, diferencia en la sección eficaz de retrodispersión entre las direcciones a favor y en contra del viento (generalmente mayores en el segundo caso). Sin esta asimetría, los datos de viento procedentes del dispersómetro tendrían siempre una ambigüedad de  $180^\circ$  en dirección (sería imposible determinar si el viento sopla hacia o procedente de una dirección dada por una medida de dispersómetro). En principio, esta asimetría (a favor / en contra del viento) permite determinar un único vector de viento, pero los errores en la sección eficaz de retrodispersión hacen extremadamente difícil elegir la ambigüedad correcta basándose en las medidas de ésta para una celda de viento aislada.

En la actualidad, no se cuenta con el conocimiento suficientemente detallado de las relaciones entre las condiciones ambientales y la rugosidad de la superficie del mar a escalas desde milímetros a cientos de metros, ni se conocen los mecanismos por los cuales la radiación electromagnética es dispersada a ángulos de incidencia moderados

por las superficies oceánicas rugosas. Todo ello impide la derivación teórica de la función modelo. Ni la dependencia precisa del vector de viento de la sección eficaz de retrodispersión, ni su dependencia de variables ambientales, pueden describirse analíticamente; sin embargo, sí es posible expresar una dependencia de la velocidad del viento de la energía de radar en forma de serie de Fourier altamente truncada (por ejemplo,  $\sigma_0 = A_0 + A_1 \cos(\chi) + A_2 \cos(2\chi)$ ). La dirección puede utilizarse, a menudo, para aproximar la función modelo. La persistencia de datos fuera de la función y argumentos matemáticos contundentes ponen de relieve la naturaleza aproximativa de estas descripciones (Donelan y Pierson, 1987; Wentz, 1991). El vuelo del NSCAT e investigaciones teóricas, de laboratorio y de campo, condujeron a mejoras en la función modelo antes del lanzamiento de SWS (*Sea Winds Scatterometer*).

Naderi *et al.* (1991) demostraron esquemáticamente el método por el cual medidas múltiples de la sección eficaz de retrodispersión pueden combinarse con la función modelo para estimar el vector de viento. La función modelo define el lugar geométrico de cada sección eficaz de retrodispersión. En el caso de medidas libres de ruido y conocimiento perfecto de la función modelo, las intersecciones definen las soluciones consistentes con todas las medidas de la sección eficaz de retrodispersión. Si se tienen únicamente dos medidas a diferentes geometrías de radar se pueden encontrar hasta cuatro intersecciones, debido a la naturaleza casi simétrica de la función modelo respecto a la dirección. Cada una de esas intersecciones representa una posible solución del vector de viento, denominada ambigüedad en la bibliografía sobre dispersómetros. Medidas adicionales desde diferentes geometrías reducen el número de intersecciones y permiten la estimación de un único vector de viento en un caso idealizado. En la práctica, los errores en las estimaciones de la sección eficaz de retrodispersión y en la función modelo dan lugar a “casi intersecciones”, asimetría a favor / en contra del viento de la función modelo que genera dos ambigüedades con intensidad similar y aproximadamente 180° de diferencia en dirección.

### *Dispersómetros a bordo de satélites*

El primer dispersómetro a bordo de satélite fue el SASS (*Seasat-A Satellite Scatterometer*), que voló en la misión Seasat de junio a octubre de 1978, operando a una frecuencia de 14,6 GHz. El SASS utilizaba cuatro antenas dispuestas en forma de abanico para iluminar un campo de visión a cada lado del vuelo del satélite, con una huella de  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 135^\circ$  respecto a la trayectoria del satélite. Como únicamente obtenía dos mediciones azimutales para cada punto en los campos de visión, no era posible determinar una única dirección del viento sólo con los datos del dispersómetro.

En 1991, la Agencia Espacial Europea (ESA, *European Space Agency*) lanzó el ERS-1 llevando a bordo el AMI (*Active Microwave Instrument*), que opera en la banda C (5,3 GHz) y que funciona como SAR y como dispersómetro. En modo dispersómetro, el AMI ilumina un campo de visión de 500 km de ancho a estribor del satélite. Al igual que el SASS, el AMI usa antenas en forma de abanico para lograr una amplia iluminación. Dentro del campo de visión de medida, el AMI del ERS-1 ilumina huellas orientadas 45°, 90° y 135° con respecto a la trayectoria de fondo, cada posición se toma desde tres geometrías de visión diferentes. Esta estrategia reduce de cuatro casos a dos casos la ambigüedad para la mayoría de medidas, con direcciones de 180° de diferencia. Esta reducción simplifica el procesamiento para seleccionar una única dirección

consistente con la sección eficaz de retrodispersión y con la función modelo. El principal inconveniente del AMI es su estrecho campo de visión y la falta de sensibilidad de la banda C al viento (sobretudo a velocidades y ángulos de incidencia bajos). Su visión desde tres puntos de vista para cada posición supone una buena base para los algoritmos de eliminación de la ambigüedad. En 1995, se lanzó El ERS-2 llevando a bordo un AMI idéntico al del ERS-1. La órbita de los dos permitió la calibración entre los dos instrumentos.

En agosto de 1996, se lanzó el NSCAT (*NASA SCATterometer*) a bordo del ADEOS-I, que obtuvo casi 10 meses de datos (falló en junio de 1997). Aunque basado principalmente en su predecesor, el SASS, el NSCAT tuvo importantes mejoras en su diseño que permitían obtener medidas más precisas y numerosas de la sección eficaz de retrodispersión y del vector de viento. Al igual que el SASS, el NSCAT operaba en la banda Ku. Este dispersómetro permitía medir la sección eficaz de retrodispersión en dos campos de visión de 600 km de ancho (definidos por ángulos de incidencia de aproximadamente entre 20° y 60°) y una resolución espacial de 25 km. Para cada punto del campo de visión, el NSCAT obtenía tres vistas a tres ángulos distintos ( $\pm 45^\circ$ ,  $+65^\circ$ ,  $-115^\circ$  y  $\pm 135^\circ$ , en relación a la trayectoria). Para cada ángulo se hacen medidas de polarización vertical de la sección eficaz de retrodispersión, y para  $+65^\circ$  y  $-115^\circ$  se hacen mediciones adicionales con polarización horizontal. Aunque con modificaciones debidas a las diferencias en el diseño y misión entre el NSCAT y el *Sea Winds Scatterometer* (SWS), el algoritmo del NSCAT es la base fundamental para los algoritmos del SWS.

### *El Sea Winds Scatterometer*

El SWS del QuikSCAT, lanzado en junio de 1999, fue una misión de recuperación rápida para cubrir el vacío creado por la pérdida de datos del NSCAT, al perderse el ADEOS-I en junio de 1997. El QuikSCAT (Figura 8) se lanzó en una órbita solar sincrónica circular a 803 km, con un paso de ecuador de nodo ascendente de 6:00 A.M.  $\pm$  30 minutos.

El SWS es un instrumento en banda Ku, diseñado para obtener mediciones globales de la sección eficaz de retrodispersión a partir de las cuales se estima el vector de viento, en cualquier situación climática, sobre la superficie del océano libre de hielo. Los datos de este dispersómetro se usan, junto con otros datos convencionales y de teledetección, en diferentes estudios oceanográficos, meteorológicos y de interacción aire-mar.

El SWS es capaz de generar medidas de la sección eficaz de retrodispersión a diferentes resoluciones desde un punto a la huella de todo el haz. Su huella es una elipse de aproximadamente 25 km en azimut y 37 km en la dirección de visión o alcance. La resolución de la recuperación del vector de viento, que se define como la dimensión de la celda de vector de viento para la cual se han agrupado las medidas de sección eficaz de retrodispersión, es de 25 x 25 km. Mide vientos entre 3 y 30 m/s, con una precisión mayor de 2 m/s o 10 % en velocidad y 20° en dirección y una resolución espacial de 25 km.

El SWS es un dispersómetro que opera a 13,402 GHz y dispone de un sistema de toma de datos cónico con dos haces de transmisión en forma de lápiz. Usa una antena rotatoria con dos haces que barre un patrón circular y cubre un campo de visión de 1800 km de ancho centrado en el nadir del satélite. Obtiene alrededor de 1,1 millones de medidas de viento al día, cubriendo diariamente el 90 % de la superficie terrestre (Figura 9) y cada dos días la totalidad del océano. Aunque construido sobre la herencia de banda Ku del SASS y el NSCAT, el SWS es capaz de adquirir medidas de la sección eficaz de retrodispersión y del vector de viento con mayor utilidad científica que los sensores precedentes.

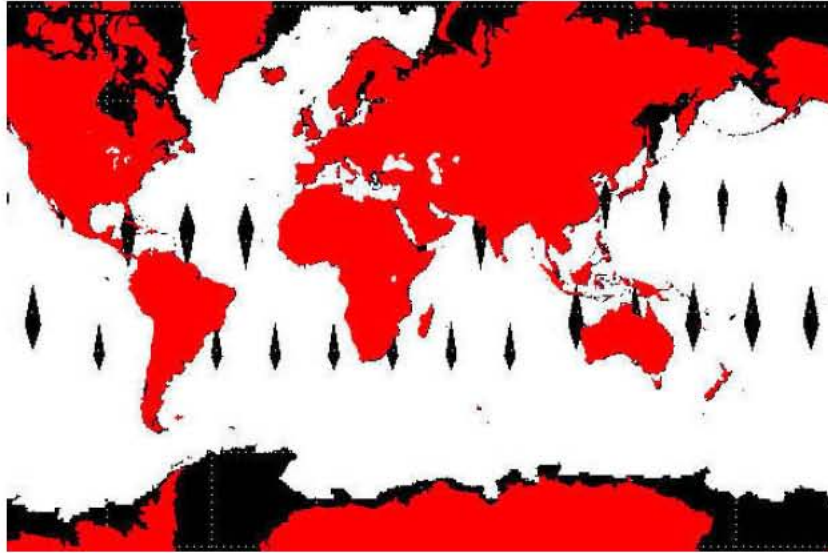


**Figura 8:** El satélite QuikSCAT.

El SWS fue el primer dispersómetro con haz de transmisión en forma de lápiz, ya que los anteriores tenían haces dispuestos en forma de abanico. El concepto de dispersómetro con toma de datos haz-lápiz fue publicado por primera vez por Kirimoto y Moore (1985). Los dispersómetros dispuestos en forma de abanico emplean un número fijo de antenas con una orientación constante en relación al satélite para realizar las mediciones mientras el satélite orbita. El SWS usa una antena parabólica con dos alimentadores para transmitir y recibir, barriendo patrones helicoidales sobre la superficie terrestre (Figura 10). Coordinando el patrón de iluminación de la Tierra, la repetición del pulso y la rotación de la antena se consigue un grupo de mediciones de la sección eficaz de retrodispersión espacialmente contiguas.

El diseño de toma de datos haz-lápiz tiene varias ventajas en relación al diseño en abanico. Como todas las medidas se toman a dos ángulos de incidencia fijos, la sección eficaz de retrodispersión es sensible al vector de viento para todas las posiciones perpendiculares a la trayectoria del satélite dentro del campo de visión de éste. En principio, el hueco de datos en el nadir, presente en todos los diseños en forma de abanico, puede ser eliminado; sin embargo, el grupo de ángulos azimutales sobre los cuales se toman las medidas de la sección eficaz de retrodispersión es función de su posición sobre la perpendicular del vuelo del satélite. Por lo tanto, la precisión del vector de viento puede variar con la distancia sobre esa perpendicular. Tanto el ángulo

de incidencia como las polarizaciones de los haces interno y externo pueden optimizarse para asegurar una alta modulación direccional de la sección eficaz de retrodispersión a la vez que se preserva la relación señal/ruido. Finalmente, la función modelo empírica necesita conocerse únicamente cerca de esos dos ángulos de incidencia correspondientes a los haces interior y exterior, y no para el amplio rango que se necesitaba en el caso de los sensores en forma de abanico.

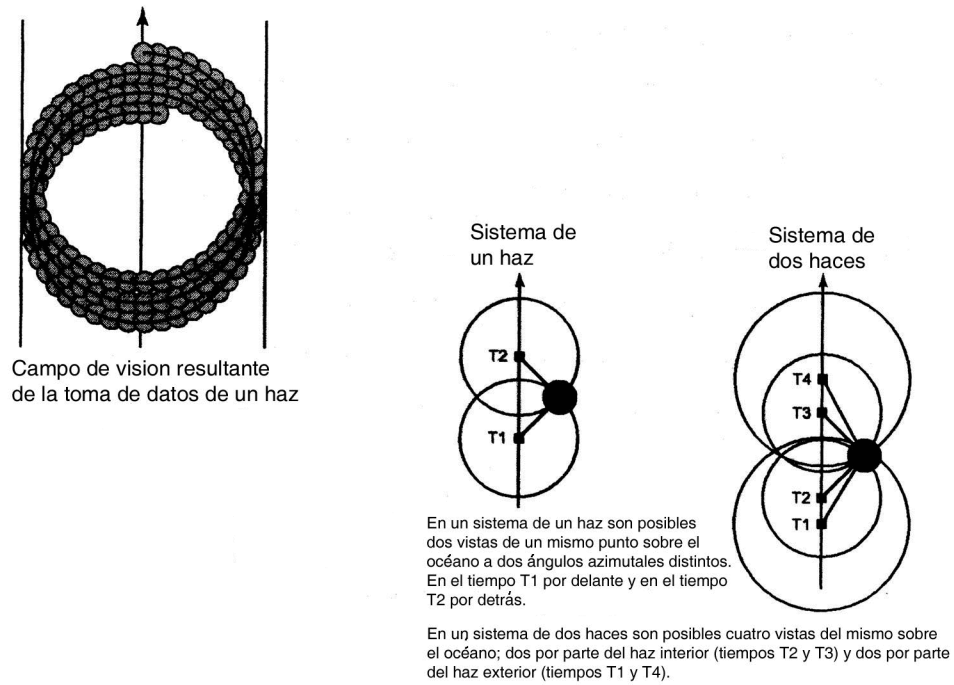


**Figura 9:** Ejemplo de cobertura diaria del SWS.

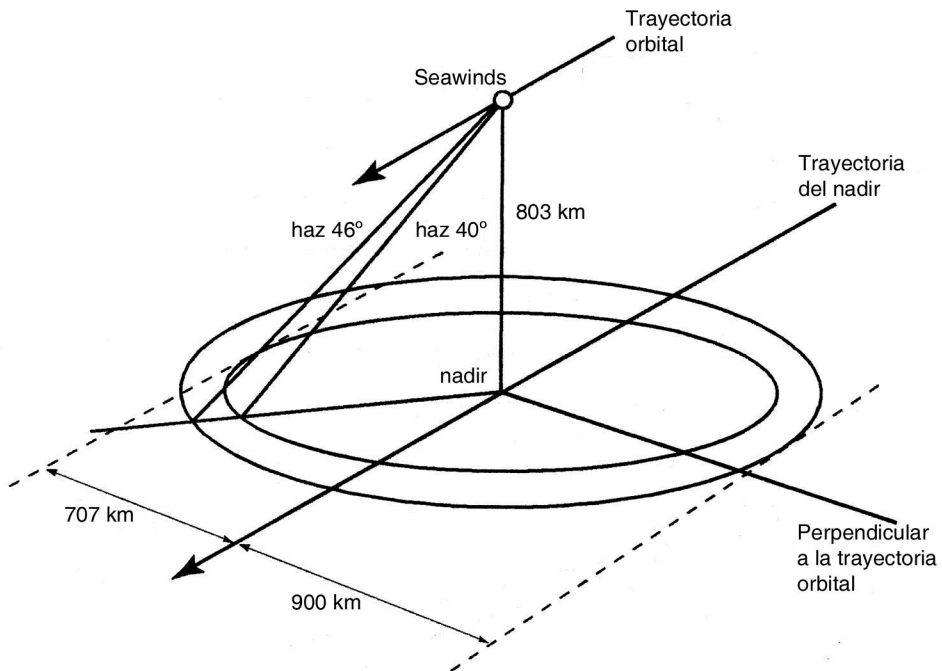
La geometría de medida para el SWS se muestra en la Figura 11. Una única antena parabólica de aproximadamente 1 m de diámetro, que rota aproximadamente a 18 rpm, proporciona la toma de datos básica. La alimentación compensada genera haces transmitidos y recibidos con ángulos de  $40^\circ$  y  $46^\circ$  (medidos con respecto al nadir del satélite). La altura nominal es de 803 km. Los dos haces trazan dos círculos en la superficie de la Tierra con radios de 710 y 900 km (Figura 12). Debido a la curvatura de la Tierra, los ángulos de incidencia en la superficie son de  $46^\circ$  y  $54^\circ$ . El ancho del haz (elevación x azimut) es de  $1,6^\circ \times 1,8^\circ$  para el haz interior y de  $1,4^\circ \times 1,7^\circ$  para el exterior, lo que se traduce en superficie en una elipse de  $25 \times 37$  km para ambos haces.

A distancias perpendiculares menores de 707 km (el radio del haz interior), las celdas de medida se muestrean desde cuatro geometrías. La primera por el haz exterior por delante del vuelo del satélite; la segunda por el haz interior por delante del vuelo del satélite; la tercera por el haz interior por detrás del vuelo del satélite; y la última por el haz exterior por detrás del vuelo del satélite. A mayores distancias perpendiculares al vuelo del satélite se obtienen únicamente dos medidas por el haz exterior. Estos resultados difieren en gran medida de la geometría de muestreo de los dispersómetros en forma de abanico. Incluso a pequeñas distancias perpendiculares a la trayectoria, las medidas de la sección eficaz de retrodispersión del SWS son sensibles a la velocidad del viento, ya que los ángulos son constantes y elevados, independientemente de la distancia en la perpendicular de la trayectoria. Sin embargo, como se muestra en la Figura 13, los ángulos azimutales (respecto a la trayectoria del satélite en el nadir) varían con la distancia en la perpendicular. Esto difiere de los dispersómetros en forma

de abanico, en los que los ángulos con respecto al azimut son constantes y lo que varía son los ángulos de incidencia.



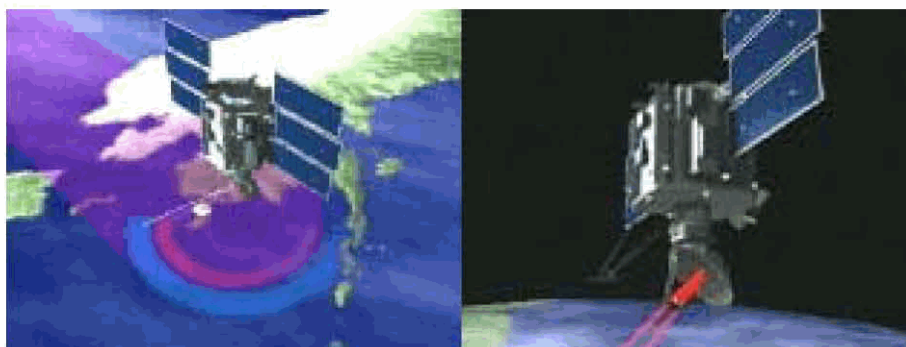
**Figura 10:** Patrones de iluminación de la superficie terrestre para el SWS.



**Figura 11:** Geometría del SWS.



La frecuencia de repetición del pulso (PRF, *Pulse Repetition Frequency*) y la rotación de la antena se eligen para que sean compatibles con la velocidad orbital de la plataforma espacial y el patrón de iluminación instantáneo de la antena. A 18 rpm, cada rotación de la antena tarda 3,33 segundos. En este periodo, el satélite se ha movido aproximadamente 22 km, iluminando celdas de 25 x 37 km, lo cual asegura que no hay huecos dentro del campo de visión de medida.



**Figura 12:** Iluminación de los dos haces del SWS sobre la Tierra.

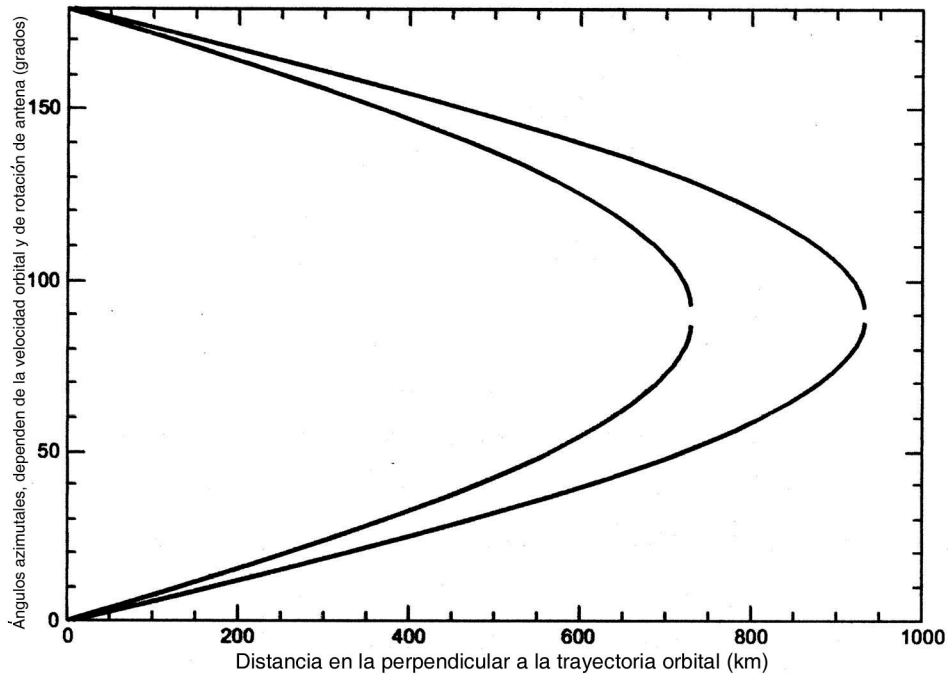
Los ángulos de incidencia y las polarizaciones del SWS se eligen para optimizar el funcionamiento de la medición del viento, la cobertura y la resolución espacial. La sensibilidad del vector de viento a la modulación en contra / perpendicular al viento y la asimetría en contra / a favor del viento aumentan con el ángulo de incidencia. En campos de visión amplios, ángulos de incidencia elevados dan lugar a aumentos en la cobertura espacial; sin embargo, las secciones eficaces absolutas disminuyen al aumentar los ángulos de incidencia como hace la resolución espacial. Además, aunque las modulaciones direccionales son mayores para las polarizaciones horizontales que para las verticales, las secciones eficaces son menores. Este problema se solventa en el SWS haciendo el haz interior con polarización horizontal y el exterior con polarización vertical.

### *Corrección atmosférica*

El objetivo de la corrección atmosférica es corregir la sección eficaz de retrodispersión aparente del efecto del sistema océano-atmósfera. Para ello hay que sustraer los efectos no procedentes del viento relacionados con la atenuación y dispersión de la señal de las microondas en su propagación a través de la atmósfera. El algoritmo debe identificar las condiciones de lluvia para las cuales no es posible calcular la sección eficaz de retrodispersión y poner bandera en esas condiciones para la celda correspondiente.

La atmósfera, aunque es extremadamente clara para la banda Ku a las frecuencias del dispersómetro SWS (13,4 y 14,6 GHz), no es totalmente transparente. Una pequeña cantidad de radiación es absorbida por el oxígeno gaseoso y el vapor de agua y absorbida y dispersada por el agua líquida presente, como nubes y lluvia. Las modificaciones atmosféricas de la intensidad de los pulsos emitidos y retornados se manifiestan como cambios en la sección eficaz de retrodispersión aparente del sistema

tierra-atmósfera. El cálculo de la velocidad superficial del viento a partir de dispersómetros está basado en las variaciones en la medida de la sección eficaz de retrodispersión. Las variaciones de la sección eficaz de retrodispersión (dadas por una geometría de visión fija) son el resultado de cambios en la geometría de la superficie del mar. Por lo tanto, siempre que sea posible, es importante identificar y corregir las medidas de la sección eficaz de retrodispersión que estén corrompidas por los efectos atmosféricos no relacionados con el viento superficial.



**Figura 13:** Variación de los ángulos azimutales en función de la distancia al nadir en la perpendicular a la trayectoria orbital para el SWS.

La climatología de Wentz se basa en ocho años de datos oceánicos de SSMI. Estas observaciones climatológicas se usaron para estimar la media mensual de vapor de agua que se convierte a atenuación de vapor de agua. Para obtener la atenuación atmosférica total, las atenuaciones por oxígeno y nube (ambas pequeñas) se añaden a la de vapor de agua. En esta corrección no se incluyen los efectos de la lluvia.

Cuando hay presencia de lluvia, las medidas de la sección eficaz de retrodispersión se contaminan por diversos motivos. Parte de la energía emitida es retrodispersada y nunca llega a la superficie del océano. La energía retrodispersada por la lluvia contribuye de forma significativa, aunque desconocida, al eco (aumenta). Otra parte es dispersada y / o absorbida por la propia lluvia y nunca llega al dispersómetro (disminuye). Finalmente, la rugosidad creada por la lluvia modifica la sección eficaz de retrodispersión (aumenta). Para tener en cuenta los problemas derivados de la lluvia en el procesamiento de QuikSCAT, se introduce el histograma multidimensional para poner banderas de lluvia (MUDH, *MULTIdimensional Histogram rain flag*). La idea del MUDH, desarrollada por Huddleston y Stiles (2000), es simple, identifica las variables que son sensibles a la lluvia y estima la probabilidad de lluvia en función de esas

variables usando datos de entrenamiento. La probabilidad de lluvia se usa para estimar las banderas de lluvia en los datos.

### *Recuperación del vector de viento*

El objetivo del algoritmo de recuperación es determinar el vector de viento (velocidad y dirección) que sea estadísticamente consistente, tanto con el grupo de medidas de la sección eficaz de retrodispersión como con la función modelo que relaciona la geometría del radar y el vector de viento.

La modulación azimutal de la sección eficaz de retrodispersión permite a los dispersómetros medir tanto la intensidad como la dirección de viento. Las mayores variaciones azimutales de la sección eficaz de retrodispersión son las modulaciones a favor o en contra del viento, que dan lugar a secciones eficaces de retrodispersión que son mayores a favor y en contra del viento y menores en la perpendicular al viento. Las secciones eficaces de retrodispersión son mayores en contra que a favor del viento. Esta asimetría permite recuperar un único vector de viento, en el caso de tener al menos tres secciones eficaces de retrodispersión con diferentes ángulos azimutales y / o de incidencia. El concepto de diversidad azimutal entre medidas hace referencia a las diferencias mínimas entre las medidas de la sección eficaz de retrodispersión para poder proceder a la recuperación del viento. Para el SWS se considera que esa diferencia tiene que ser mayor o igual a 20°.

Aunque la recuperación del vector de viento juega un papel crucial en el procesamiento del dispersómetro, se trata de un algoritmo de carácter más matemático que físico. Si las medidas de la sección eficaz de retrodispersión fueran perfectas y estuvieran perfectamente colocadas, si la función modelo se conociera con precisión y si la sección eficaz de retrodispersión fuera función únicamente del vector de viento y de los parámetros de radar, el vector de viento se podría recuperar a partir de tres o más medidas de la sección eficaz de retrodispersión. Sin embargo, en un caso real, se necesita un esquema de estimación estadístico. Las medidas de la sección eficaz de retrodispersión son ruidosas y no están situadas con precisión, la función modelo no se conoce con exactitud y no existe una única relación con la sección eficaz de retrodispersión. Incluso los parámetros de radar están corrompidos por errores (incidencia de antena y ángulos).

Desde un punto de vista estadístico, la recuperación del vector de viento representa un problema de estimación *a posteriori*. Las variables verdaderas de la distribución estadística deben estimarse de un grupo finito de observaciones. En el caso de la recuperación del vector del viento del dispersómetro, la dificultad reside en que las observaciones son ruidosas, la forma funcional de la distribución estadística de la cual se derivan no se conoce exactamente y el grupo de observaciones es reducido.

No existe un único método “correcto” para resolver el problema de estimación (Jenkins y Watts, 1968). Chi y Li (1988), quienes llevaron a cabo un estudio detallado de simulación con siete esquemas de aproximación *a posteriori* para el problema del dispersómetro, concluyeron que el estimador de máxima probabilidad (MLE, *Maximum Likelihood Estimator*) (Jenkins y Watts, 1968; Pierson, 1984; Freilich y Pawka, 1987) era la mejor aproximación. El algoritmo de recuperación del vector de viento MLE se

adoptó para el NSCAT, se usa para los datos procedentes del dispersómetro del ERS y es la base para el procesamiento del SWS. Primero se deriva una función de probabilidad aproximada para cada medida individual de la sección eficaz de retrodispersión y se relaciona con el vector de viento mediante la función modelo; luego la función de probabilidad se une a un grupo de medidas colocadas para dar lugar a la función de probabilidad para el estimador.

### *Eliminación de la ambigüedad*

El objetivo de la eliminación de la ambigüedad es elegir aquella solución, entre las soluciones potenciales  $(w, \Phi)$ , que maximiza la función modelo localmente, es decir el vector más cercano en dirección al viento verdadero. La anisotropía de la dispersión generada por las ondas de Bragg permite la extracción de la dirección del viento, aunque no de forma directa (Davison y Harrison, 1990).

El proceso de recuperación del vector de viento produce un grupo de soluciones potenciales conocidas como ambigüedades. A la solución más cercana al viento verdadero para cada celda se le llama correcta o más próxima; sin embargo, como las soluciones son vectores, incluso la definición de más próxima resulta ambigua. Como indican Naderi *et al.* (1991), entre otros autores, las ambigüedades generalmente tienen las mismas intensidades, pero varían ampliamente en dirección; por eso, se toma como solución más cercana aquélla cuya dirección es la más cercana al viento verdadero.

Desde el vuelo del SASS se han propuesto varias técnicas de eliminación de la ambigüedad, incluyendo aproximaciones (Wurtele *et al.*, 1982), asimilación de los datos de dispersómetro dentro de los modelos de circulación atmosférica y técnicas completamente objetivas que se basan únicamente en datos de dispersómetro (Schroeder *et al.*, 1985; Schulz, 1990). Todas las técnicas, explícita o implícitamente, asumen que los componentes del campo de viento están correlacionados sobre grandes distancias en comparación con la resolución de una celda de medida. Cuando existen cambios bruscos a lo largo de un eje (como en el caso de frentes), se asume que esas características son más o menos constantes cuando se mide a lo largo de otras direcciones.

Empleando datos simulados de NSCAT y SWS y datos del dispersómetro del ERS en banda C se demuestra que la aproximación basada en un filtro circular de mediana es efectiva y eficiente (Dunbar *et al.*, 1988; Schultz, 1990; Shaffer *et al.*, 1991). En el procesamiento de datos de SWS se usa un filtro circular de mediana modificado. Shaffer *et al.* (1991) presentaron un extenso tratado del filtro de mediana para la eliminación de la ambigüedad adaptado para el procesamiento de NSCAT. El filtro utilizado para el SWS es similar en muchos conceptos.

El campo vectorial ambiguo debe inicializarse antes de que se realice el filtro de mediana, y esta inicialización es crítica para el éxito de la aproximación. Como indican algunos autores, como Schultz (1990) y Shaffer *et al.* (1991), la mayoría de los fallos del algoritmo están asociados a inicializaciones pobres. Una aproximación obvia consiste en emplear como campo inicial el correspondiente a las ambigüedades más probables. Esta aproximación tiene la ventaja que es completamente autónoma y no precisa de información adicional; sin embargo, la casi simetría de la función modelo

produce dos ambigüedades de similar probabilidad pero que difieren en  $180^\circ$ . Errores en la función modelo y en las medidas de la sección eficaz de retrodispersión pueden invertir las probabilidades de esas soluciones. Si los errores están espacialmente correlacionados se pueden inicializar incorrectamente con casi  $180^\circ$  de error frente a la dirección correcta extensas áreas del campo de visión. El filtro de mediana se basa en la asunción de que los errores son aislados y que el verdadero viento está espacialmente correlacionado a lo largo de áreas relativamente extensas (al menos a lo largo de alguno de los ejes). Ello genera que los resultados del filtro de mediana sean incorrectos si el campo inicial presenta errores sistemáticos. Shaffer *et al.* (1991) y Schulz *et al.* (1992) cuantificaron este efecto basándose en simulaciones y concluyeron que una inicialización autónoma requiere una alta y casi uniforme corrección por parte del instrumento.

La corrección del instrumento no existe en los datos del ERS ni en los del SWS. La función modelo para la banda C con los ángulos de incidencia del ERS-1 tiene una asimetría muy baja. En el caso del SWS, la dificultad no reside principalmente en la función modelo, sino en la distribución azimutal de las medidas de la sección eficaz de retrodispersión. Como se indica en las secciones previas, el muestreo azimutal para el SWS varía sistemáticamente con la distancia perpendicular a la trayectoria, lo que genera resultados con variaciones sistemáticas del número de ambigüedades asociadas con las soluciones y en la capacidad del instrumento (el porcentaje de veces que la solución más probable es la solución más próxima). Por lo tanto, la capacidad del instrumento, por sí sola, no es suficiente para inicializar los datos del SWS.

Freilich y Dunbar (1993) desarrollaron una técnica de inicialización de eliminación de la ambigüedad para el ERS y el SWS. La técnica propuesta hace uso tanto de la capacidad del instrumento como de débiles limitaciones provenientes de información direccional derivada de los análisis operacionales (NWP, *Numerical Weather Prediction*). El análisis NWP se interpola en el espacio y en el tiempo a las posiciones de las soluciones del dispersómetro. El vector solución inicial para cada posición se elige como la solución que más se aproxime a la dirección interpolada entre las dos con mayor probabilidad. En este caso, la minimización se basa en las direcciones y no en la norma de los vectores. Para las distancias grandes en la perpendicular a la trayectoria, sólo muestreadas por el haz exterior (que suelen contener cuatro ambigüedades con la misma probabilidad), la solución elegida es la más cercana al análisis superficial.

Es importante indicar que en el filtro de mediana se introducen todas las ambigüedades y no únicamente las dos de mayor probabilidad que se usan para la inicialización. La experiencia con el ERS y las simulaciones con el SWS demostraron que el campo inicializado con NWP identifica la ambigüedad más próxima en más del 97 % de los casos (excluyendo situaciones que se discuten abajo). La inicialización limitada, en la cual sólo se usan las dos ambigüedades de mayor probabilidad, da lugar a mejores resultados que las que sólo usan una y el campo de NWP de análisis superficial (independientemente de la capacidad del instrumento). Esto es debido a que el análisis superficial es más homogéneo y el grupo de ambigüedades posibles abarca todo el espacio direccional de forma casi uniforme. Por lo tanto, el filtro de mediana sobre un campo inicializado completamente converge con rapidez en una solución, la cual se acerca mucho al análisis superficial usado para la inicialización. La inicialización limitada que se describe arriba combina la información del análisis NWP con la

información racionalizada contenida en las soluciones en sí mismas; por lo tanto, el resultado converge correctamente sobre el filtro de mediana, incluso con errores en el NWP.

Con la función modelo que se emplea para el SWS, denominada QSCAT-1, la ambigüedad elegida se corresponde con la más probable en el 60 % de los casos y con la opuesta en el 30 %. En el nadir, las incertidumbres pueden ser mayores debido al diseño del instrumento. En la región del nadir, la dirección más cercana puede estar más lejos de la verdadera, pero la verdadera dirección está generalmente dentro de un intervalo de incertidumbre del vector más cercano.

El filtro de mediana es propenso a fallar cuando el análisis operacional tiene errores sobre áreas grandes, dando lugar a errores sistemáticos en el campo de viento inicializado. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que los errores deben ser mayores de 90°-180° sobre distancias mayores de 1000-1500 km, tanto a lo largo de la trayectoria como perpendicularmente.

El algoritmo también puede fallar cuando en la ventana del filtro falta una fracción importante de los datos. Este efecto se produce con frecuencia cerca de los bordes del campo de visión y cerca de las costas. Cuando faltan datos, la capacidad del algoritmo es difícil de cuantificar y depende del porcentaje de datos disponibles, de su distribución, de las condiciones sinópticas verdaderas y de la precisión del campo inicializado. Cuando el número de datos disponibles está por debajo de un límite puede dar lugar a banderas.

### *Algoritmos DIRTH*

La precisión en la mayor parte del campo de visión y el gran tamaño de éste hacen que el QuikSCAT consiga los requerimientos científicos marcados, a pesar de las deficiencias en ciertas posiciones del campo de visión. En la parte más alejada del campo de visión, la capacidad del proceso de eliminación de la ambigüedad es menor debido a la ausencia de las medidas del haz interior, diversidad azimutal limitada y efectos de borde. Cerca del nadir, debido a una geometría de medida inadecuada (las medidas anterior y posterior difieren casi en 180°), existe un marcado descenso de la precisión direccional, incluso cuando la eliminación de la ambigüedad funciona correctamente. Se han desarrollado dos algoritmos: el intervalo de recuperación de la dirección (DIR, *Direction Interval Retrieval*), para tratar el funcionamiento en el nadir, y el umbral de salto (TN, *Thresholded Nuding*), para mejorar la eliminación de la ambigüedad en las zonas más extremas del campo de visión. Cada algoritmo funciona de forma independiente, pero los dos se usan para obtener las soluciones DIRTH (*Direction Interval Retrieval with THresholded nuding*) en las soluciones finales “*wind\_speed\_selection*” y “*wind\_dir\_selection*” de los productos L2B (Stiles, 1999).

El DIR es una técnica de estimación teórica. El algoritmo base se compone de dos partes: la estimación de máxima probabilidad y el filtro de mediana. El paso de la estimación de la máxima probabilidad es insuficiente para elegir el mejor vector. Para el QuikSCAT, la caída de la probabilidad a partir del máximo varía con la distancia a la trayectoria. El DIR es similar a la recuperación del viento convencional; primero, se determina una solución de viento consistente con los datos y, después, se usa el filtro de

mediana para seleccionar el vector de la solución. El DIR difiere del método convencional en que no usa un grupo finito de vectores, sino un grupo de curvas en el espacio de dos dimensiones (dirección e intensidad del viento). El DIR calcula la dirección incluyendo un rango de direcciones alrededor del máximo. El rango de dirección del viento abarcado por cada curva se determina por el análisis probabilístico del ruido en las medidas y su efecto sobre la información de discriminación direccional. El algoritmo opera sobre dos pasos, el primero selecciona el segmento que contiene el máximo local y el segundo selecciona la dirección dentro de ese segmento, usando el filtro de mediana  $7 \times 7$ .

El TN es una técnica para optimizar la forma en la que se inicia la eliminación de la ambigüedad. En el algoritmo base se utiliza la ambigüedad más cercana de las dos más probables para su comparación con el NWP. En caso de celdas de viento en la parte más alejada del campo de visión un porcentaje significativo de las veces (10-15 %) la ambigüedad más cercana al viento verdadero es la tercera o la cuarta. Por eso, en las partes alejadas del campo de visión, se aplica el TN, que no se limita a las dos ambigüedades más probables, sino que se determina un umbral de probabilidades asociado a ellas. En regiones con alta capacidad del instrumento se eligen pocas ambigüedades y en regiones con baja capacidad se eligen más ambigüedades y el efecto del NWP se intensifica. El efecto de estas dos técnicas mejora significativamente la precisión en la dirección del viento.

#### Modelo y esquema en diferencias finitas

Para desarrollar un modelo para el cálculo del bombeo de Ekman a partir de los datos de dispersómetro se usa una idealización de un océano bicapa (Figura 14). La capa superior abarca desde la superficie (0) hasta una profundidad  $-h$  y se mueve con velocidad  $V_1$  (de componentes horizontales  $V_{1x}$ ,  $V_{1y}$ ). La capa inferior se extiende desde una profundidad  $-h$  hasta  $-\infty$ , y se mueve con una velocidad  $V_2$  (de componentes horizontales  $V_{2x}$ ,  $V_{2y}$ ). Se suponen velocidades uniformes (medias) para cada capa. Cada capa posee una densidad propia constante,  $\rho_1$  y  $\rho_2$  respectivamente, constantes. Se considera  $-h$  como la profundidad de la capa de mezcla, cuya dinámica viene determinada por la influencia atmosférica.

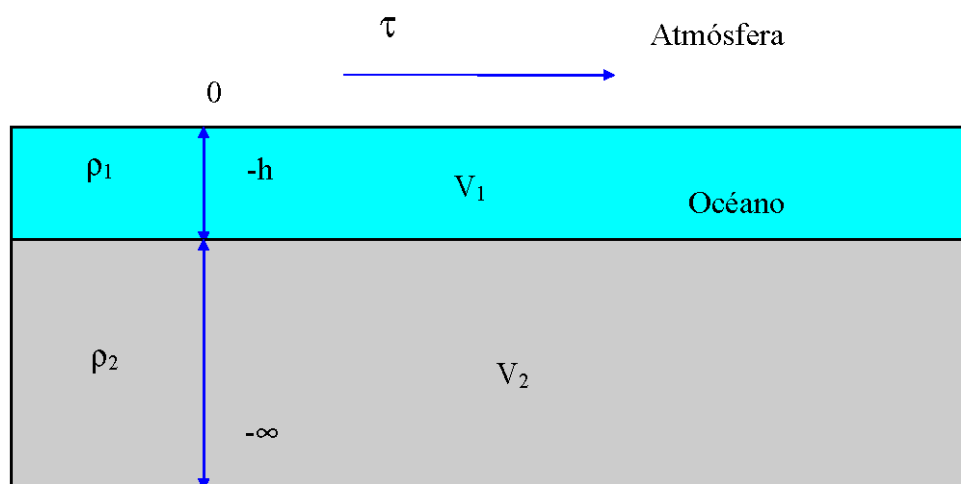


Figura 14: Representación de un océano bicapa idealizado.

En la capa inferior se asume comportamiento geostrófico puro y en la superior casi geostrófico. En la superior, la perturbación del flujo geostrófico será debida únicamente al efecto del estrés de viento ( $\tau$ ) sobre la capa.

Para la capa superior, las ecuaciones de partida son:

- Eje x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_x}{\partial z}. \quad (1)$$

- Eje y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_y}{\partial z}. \quad (2)$$

Estas ecuaciones en derivadas parciales representan una dinámica geostrófica, que se ve afectada por una fricción capa con capa, considerando un espesor diferencial  $\partial z$ .

Posteriormente, se hacen derivadas cruzadas de (1) y (2), de (1) con respecto a y y de (2) con respecto a x y se resta el eje x al eje y, obteniéndose la ecuación (3). Al hacer las derivadas cruzadas y restar desaparecen de la expresión los términos de gradiente de presión en la horizontal:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (fu) + \frac{\partial}{\partial y} (fv) \\ & = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \xi,$$

donde:  $\xi$  es la vorticidad relativa. Desarrollando las derivadas parciales se tiene:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} - \\ & v \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial f}{\partial y} + f \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial f}{\partial x} + f \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (4)$$



y reordenando la ecuación (4):

$$\begin{aligned} & \frac{u\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{v\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial u}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + f \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que:

$$a) \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \xi,$$

$$b) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \nabla V, \text{ y}$$

$$c) \frac{\partial f}{\partial x} = 0,$$

como el parámetro de Coriolis no depende de la longitud, la ecuación resultante queda:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + \nabla(V)\xi + f\nabla(V) + v \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right). \quad (6)$$

Aplicando el operador derivada total en un movimiento bidimensional se tiene:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y},$$

a) ya que la vorticidad planetaria ( $f$ ) no depende ni del tiempo ni de la longitud, solo de la latitud:

$$\frac{Df}{Dt} = v \frac{\partial f}{\partial y},$$

b) en el caso de la vorticidad relativa ( $\xi$ ):

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y},$$

se obtiene:

$$\frac{D(\xi + f)}{Dt} + \nabla V(\xi + f) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right). \quad (7)$$

Para la capa inferior, el desarrollo es el mismo y se llega a la misma expresión, pero sin el término de fricción, ya que se considera que el estrés no llega a afectar al océano profundo. Por eso, la profundidad  $-h$  es la profundidad a la que afecta la fricción, es decir la capa de Ekman:

$$\frac{D(\xi_2 + f)}{Dt} + \nabla V(\xi_2 + f) = 0. \quad (8)$$

Integrando las ecuaciones correspondientes a cada capa en el eje  $z$ , la capa superior entre  $0$  y  $-h$  y la inferior entre  $-h$  y  $-\infty$ , se tienen las ecuaciones que se muestran seguidamente.

Para la capa superior:

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^0 \frac{D(\xi_1 + f)}{Dt} dz + \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \nabla V_1(\xi_1 + f) dz = \frac{1}{\rho h} \int_{-h}^0 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) dz, \quad (9)$$

de donde:

$$\frac{D(\xi_1 + f)}{Dt} + \nabla V_1(\xi_1 + f) = \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial \tau_{y0}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{0x}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial \tau_{yEk}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xEk}}{\partial y} \right). \quad (10)$$

El término inicial del primer miembro no muestra dependencia con respecto a  $z$ , por lo que queda en la forma que muestra la ecuación (10).  $V_1$  es una velocidad media integrada en toda la capa. En el segundo miembro,  $\tau_{xEk}$  y  $\tau_{yEk}$  representan el estrés de viento a la profundidad de Ekman, por lo tanto son cero (por la definición de ésta). Se considera que la fricción es debida exclusivamente al forzamiento del viento. Al integrar la fricción en toda la capa se obtiene la componente  $z$  del rotacional del estrés de viento en superficie, que es la responsable de la fricción media obtenida para toda la capa:

$$\vec{k} \nabla_x \tau = \left( \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right).$$

Para la capa inferior, se obtiene una ecuación similar sin el término de fricción, donde  $V_2$  es una velocidad media para toda la capa. El modelo bicapa que se obtiene es:

- Capa 1:

$$\frac{D(\xi_1 + f)}{Dt} + \nabla V_1(\xi_1 + f) = \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial \tau_{0y}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{0x}}{\partial y} \right). \quad (11)$$

- Capa 2:

$$\frac{D(\xi_2 + f)}{Dt} + \nabla V_2(\xi_2 + f) = 0. \quad (12)$$

Si se desprecian las vorticidades relativas frente a la planetaria y se resta la ecuación (12) a la (11) se tiene:

$$f(\nabla V_1 - \nabla V_2) = \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right), \quad (13)$$

y pasando  $f$  al segundo miembro:

$$(\nabla V_1 - \nabla V_2) = \frac{1}{\rho h f} \left( \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right). \quad (14)$$

La divergencia de las velocidades va a ser debida al estrés de viento en superficie. Esta divergencia producida por el estrés de viento determina una tendencia del fluido a girar, es decir vorticidad, que tiene unidades de 1/tiempo. La vorticidad es una magnitud relacionada con el momento angular, que se usa en lugar de éste en geofísica, al considerar los efectos de rotación de la Tierra, y está asociada con la velocidad de cizalla. Si en la ecuación (14) se pasa  $h$  (profundidad de Ekman) al primer miembro, la ecuación resultante se expresa en términos de velocidad (espacio/tiempo), es decir bombeo Ekman. Esta tendencia de giro va a determinar una divergencia (afloramiento de agua) o convergencia (hundimiento del agua), según el sentido de rotación. En el hemisferio norte, un giro anticiclónico determina una convergencia y un giro ciclónico una divergencia.

Se desarrolla el esquema en diferencias finitas, partiendo de la ecuación (14). El parámetro de Coriolis  $f$  podemos expresarlo como:

$$f = 2\Omega \sin W, \quad (15)$$

donde:  $\Omega$  es la velocidad de rotación de la tierra ( $7,3 \cdot 10^{-5}$  m/seg) y  $W$  la latitud.

Hay que indicar que  $f$  es cero en el ecuador. Así, pues, el modelo se aplica en latitudes superiores a  $10^\circ$ , ya que para latitudes bajas la ecuación no tiene un comportamiento estable. Para latitudes menores a  $10^\circ$ , la dinámica es diferente y debe seguirse un tratamiento matemático adecuado.

Para la evaluación de  $\tau_x$  y  $\tau_y$  se usa la relación empírica:

$$\tau = C_d \rho_a v \bar{v}, \quad (16)$$

donde:  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $1,3 \text{ kg/m}^3$ ) y  $C_d$  el coeficiente de arrastre. Para la evaluación de este coeficiente se asume una relación lineal con  $v$  (Smith, 1980; Large y Pond, 1981):

$$C_d = (a + bv), \quad (17)$$

donde:  $a=0,0006$  y  $b=0,00006$  (Smith, 1980).

Se toma un sistema de coordenadas cartesianas en dos dimensiones, donde el eje OX se orienta con la longitud positiva hacia el este y el eje OY con la latitud positiva hacia el norte (Figura 15).

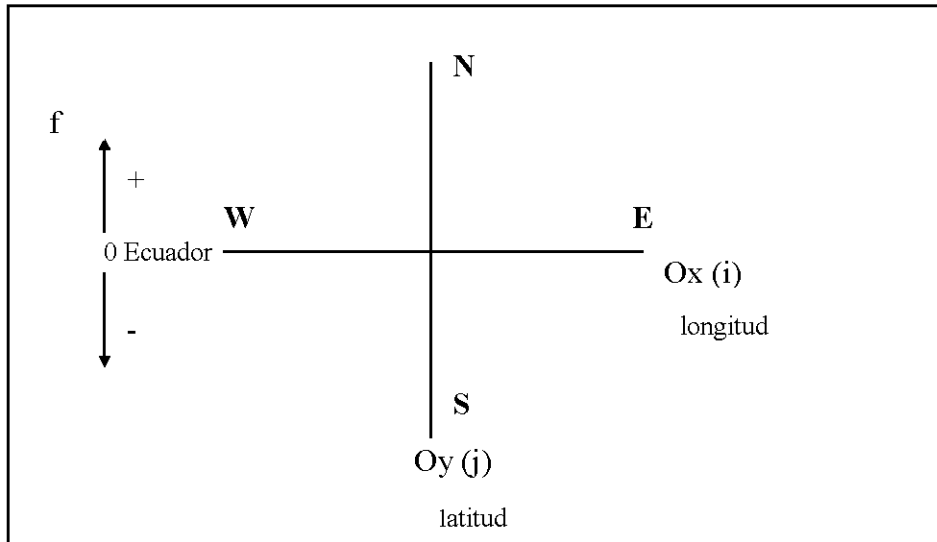


Figura 15: Sistema de coordenadas (x,y).

Sustituyendo valores y referenciando con respecto a las coordenadas se tiene:

$$\tau_{x(i,j)} = \left( 1,3 \left( 6,0 \cdot 10^{-4} + 6,0 \cdot 10^{-5} v_{(i,j)} \right) v_{(i,j)} v_{(i,j)} \sin \theta_{(i,j)} \right), \quad (18)$$

$$\tau_{y(i,j)} = \left( 1,3 \left( 6,0 \cdot 10^{-4} + 6,0 \cdot 10^{-5} v_{(i,j)} \right) v_{(i,j)} v_{(i,j)} \cos \theta_{(i,j)} \right), \quad (19)$$

y derivando  $\tau_y$  con respecto a  $x$  y  $\tau_x$  con respecto a  $y$ :

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial y_{(i,j)}} = \frac{\left( 1,3 \left( 6,0 \cdot 10^{-4} + 6,0 \cdot 10^{-5} v_{(i,j)} \right) v_{(i,j)} \left( v_{(i,j+1)} \sin \theta_{(i,j+1)} - v_{(i,j)} \sin \theta_{(i,j)} \right) \right)}{25000}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial x_{(i,j)}} = \frac{\left( 1,3 \left( 6,0 \cdot 10^{-4} + 6,0 \cdot 10^{-5} v_{(i,j)} \right) v_{(i,j)} \left( v_{(i+1,j)} \cos \theta_{(i+1,j)} - v_{(i,j)} \cos \theta_{(i,j)} \right) \right)}{25000}. \quad (21)$$

Se toman incrementos espaciales ( $\partial x$ ,  $\partial y$ ) de 25000 m, que se corresponden con la resolución del sensor, y densidad del aire de  $1,3 \text{ kg/m}^3$ . Como densidad de la capa 1 se toman  $1024,8 \text{ kg/m}^3$ . La expresión final completa de todo el modelo en diferencias finitas, que se obtiene sustituyendo en la ecuación (14), es (Ramos *et al.*, 1997):

$$h \left( \nabla V_{1(i,j)} - \nabla V_{2(i,j)} \right) = \frac{1}{1024,8 \cdot 2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-5} \sin W_j} \left( \frac{\partial \tau_y}{\partial x_{(i,j)}} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y_{(i,j)}} \right), \quad (22)$$

donde:

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial x_{(i,j)}} \text{ y } \frac{\partial \tau_x}{\partial y_{(i,j)}} \text{ son las ecuaciones (20) y (21).}$$

Finalmente, aplicando el modelo a los datos de QuikSCAT disponibles en el JPL de la NASA se obtienen los datos de bombeo de Ekman. Cada fichero de nivel L2B (vectores de viento recuperados más todos los parámetros de calidad e informaciones complementarias) contiene una órbita completa alrededor de la Tierra de polo sur a polo sur y se obtienen entre 14 o 15 ficheros por día. Promediando los datos de cinco días se generan las imágenes diarias. En el promedio se utilizan los datos del día y los de los cuatro días anteriores. La proyección, al igual que para la temperatura y la concentración de clorofila-a, es equidistante cilíndrica pero la resolución es mucho menor. Los datos se guardan en formato binario, en metros por segundo. En la Tabla 4 se detallan las características de los datos de bombeo de Ekman generados. El periodo de tiempo de los datos disponibles comprende desde finales de julio de 1999 hasta finales de 2001, debido a que los primeros datos de QuikSCAT disponibles corresponden a finales de julio de 1999.

La generación de los datos de bombeo Ekman se realizan mediante la implementación del modelo en un programa en lenguaje JAVA de *Sun Microsystems*<sup>®</sup>.

**Tabla 4:** Características de los datos de bombeo de Ekman.

Columnas	320
Líneas	200
Longitud mínima	-30,0
Latitud máxima	50,0
Longitud máxima	40,0
Latitud mínima	10,0
Resolución (longitud)	0,218750
Resolución (latitud)	0,2250
Datos	32 bits
Transformación	Lectura directa

## 2.2 Proyección de las capturas sobre las imágenes

Los puntos de captura se dibujaron sobre las variables de teledetección disponibles, asignando círculos pequeños a rendimientos menores de 400 kg, medianos a rendimientos entre 400 y 1000 kg y grandes a rendimientos mayores de 1000 kg. Estas representaciones permiten un análisis visual de la relación de las capturas respecto a las variables medidas por los satélites.

Cada imagen está dividida en cuatro recuadros, uno para cada variable de teledetección. En el recuadro superior izquierdo se representó el bombeo de Ekman, en

el superior derecho las anomalías del nivel del mar (SLA), en el inferior izquierdo la temperatura superficial del mar (SST) y en el inferior derecho la concentración de clorofila-a. Las imágenes que ilustran los periodos descritos en el apartado de resultados 3.1, se encuentran en el Anexo I: Capturas sobre variables de teledetección.

El análisis visual de las capturas sobre las imágenes ayuda a definir parte de las variables a extraer derivadas de las variables de teledetección incluidas en la base de datos pesca-teledetección.

## **2.3 Pretratamiento de las bases de datos**

En la elaboración de las bases de datos se consideraron dos tipos de datos principales, unos procedentes de la pesquería y otros obtenidos de satélites. Entre los datos de la pesquería se consideraron la CPUE, la CPUE3 y la CPUE5 descritas en el apartado 2.1.1, la fecha y la latitud y longitud del punto de captura. En la base de datos de satélites se registraron la temperatura superficial del mar (SST), la concentración de clorofila-a (CHL), el bombeo de Ekman (PUMP) y la anomalía del nivel del mar (SLA). El esquema de los datos disponibles se muestra en la Figura 16.

Las capturas se relacionaron con las variables geofísicas obtenidas mediante teledetección, teniendo en cuenta el valor puntual, la variación espacial de las variables y el posible efecto retardado en el tiempo. Para ello, de las imágenes de satélite en cada punto concreto de captura, definido por fecha, latitud y longitud, se extrajo el valor de las variables y otra serie de variables derivadas de éstas que se definen más adelante. Estas variables pretenden describir variaciones espaciales de interés de las variables de teledetección alrededor del punto de captura. El valor de las variables y de las variables derivadas se extrajo para el mismo punto 15, 10 y 5 días antes de la captura, para el día de la captura y para 5 días después de la captura, con el fin de evaluar un posible efecto temporal.

Con esta metodología se pretende reducir las dimensiones del problema. La extracción de valores para diferentes días elimina la dimensión tiempo, pero permite evaluar el posible efecto de las variables y variables derivadas con cierto retardo. La definición de variables que evalúan la variación espacial de las variables elimina las dimensiones latitud y longitud, pero permite considerar el efecto de la estructura espacial sobre el punto de captura. Esto genera una base de datos con un número elevado de variables, pero que simplifica la variación espacio-temporal del trabajo. La selección de las variables extraídas se hizo considerando el análisis visual de las capturas sobre las imágenes de temperatura, de clorofila-a, de bombeo de Ekman y de anomalía del nivel del mar.

A continuación se relacionan todas las variables extraídas o generadas:

- fecha
- CPUE
- CPUE3
- CPUE5
- SST-15, SST-10, SST-5, SST-0, SST\_5

- CHL-15, CHL-10, CHL-5, CHL-0, CHL\_5
- PUMP-15, PUMP-10, PUMP-5, PUMP-0, PUMP\_5
- SLA-15, SLA-10, SLA-5, SLA-0, SLA\_5
- batimetría
- PUMPd-15, PUMPd-10, PUMPd-5, PUMPd-0, PUMPd\_5
- SLAd-15, SLAd-10, SLAd-5, SLAd-0, SLAd\_5
- SST5d-15, SST5d-10, SST5d-5, SST5d-0, SST5d\_5
- SST7d-15, SST7d-10, SST7d-5, SST7d-0, SST7d\_5
- CHL5\_d-15, CHL5d-10, CHL5d-5, CHL5d-0, CHL5d\_5
- CHL7\_d-15, CHL7d-10, CHL7d-5, CHL7d-0, CHL7d\_5
- bat\_dif
- PUMPPr-15, PUMPPr-10, PUMPPr-5, PUMPPr-0, PUMPPr\_5
- SLAr-15, SLAr-10, SLAr-5, SLAr-0, SLAr\_5
- SSTs-15, SSTs-10, SSTs-5, SSTs-0, SSTs\_5
- CHLs-15, CHLs-10, CHLs-5, CHLs-0, CHLs\_5
- PUMPs-15, PUMPs-10, PUMPs-5, PUMPs-0, PUMPs\_5
- SLAs-15, SLAs-10, SLAs-5, SLAs-0, SLAs\_5

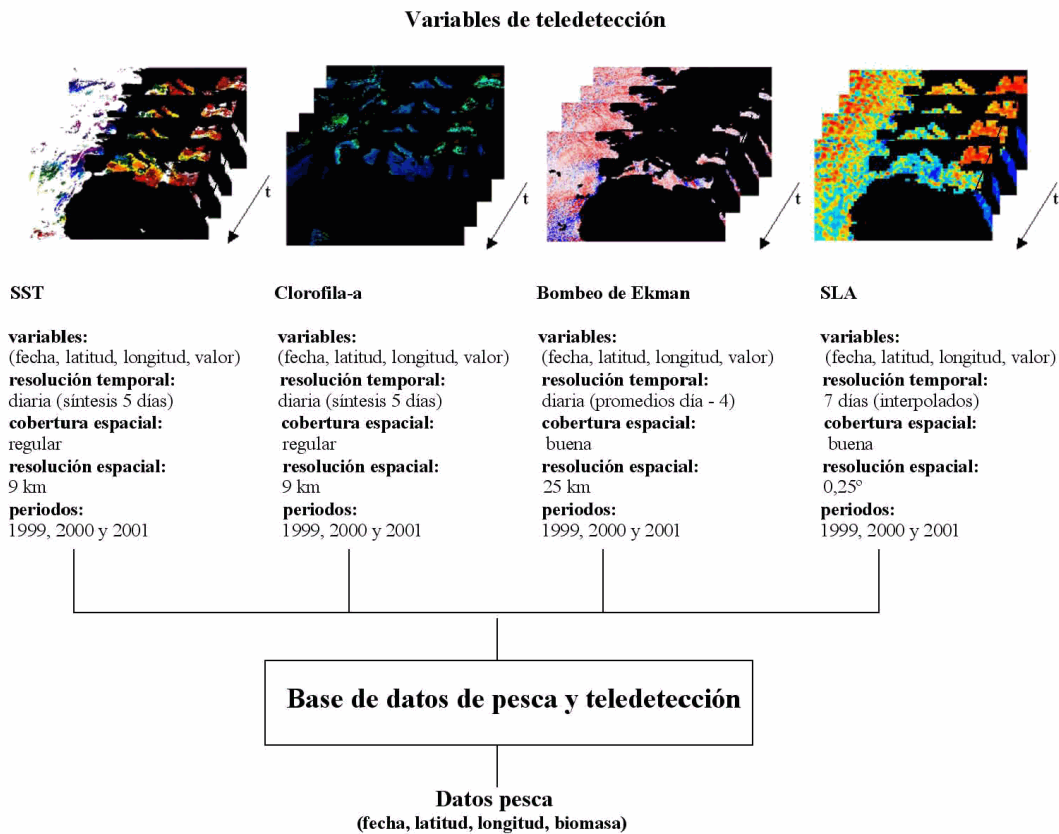


Figura 16: Esquema de datos disponibles.

La descripción de esas variables es como sigue:

- fecha: la fecha del día de captura con el siguiente formato AAAAMMDD (AAAA corresponde al año, MM al mes y DD al día).

- CPUE: la captura por unidad de esfuerzo de cada barco correspondiente a la fecha de captura.
- CPUE3: captura por unidad de esfuerzo calculada para la ventana dinámica de tres grados correspondiente a la fecha de captura.
- CPUE5: captura por unidad de esfuerzo calculada para la ventana dinámica de cinco grados correspondiente a la fecha de captura.
- SST: temperatura superficial del mar, en grados centígrados.
- CHL: concentración de clorofila-a, en miligramos por metro cúbico.
- PUMP: bombeo de Ekman, en metros por segundo.
- SLA: anomalía del nivel de mar, en milímetros.
- batimetría: profundidad en el punto de captura, en metros.
- PUMPd: distancia al cambio de signo en el valor del bombeo de Ekman, en píxeles.
- SLAd: distancia al cambio de signo en el valor de anomalía del nivel del mar, en píxeles.
- SST5d: diferencias máximas de temperatura en una ventana de 5x5 píxeles centrada en el punto de captura.
- SST7d: diferencias máximas de temperatura en una ventana de 7x7 píxeles centrada en el punto de captura.
- CHL5d: diferencias máximas de concentración de clorofila-a en una ventana de 5x5 píxeles centrada en el punto de captura.
- CHL7d: diferencias máximas de concentración de clorofila-a en una ventana de 7x7 píxeles centrada en el punto de captura.
- bat\_dif: diferencia máxima de profundidad en una ventana de 0,5° centrada en el punto de captura.
- PUMP<sub>r</sub>: rango de bombeo de Ekman en una ventana de 5x5 píxeles centrada en el punto de captura.
- SLA<sub>r</sub>: rango de anomalía del nivel del mar en una ventana de 5x5 píxeles centrada en el punto de captura.
- SSTs: cálculo del gradiente de temperatura superficial del mar mediante el operador de Sobel.
- CHLs: cálculo del gradiente de concentración de clorofila-a mediante el operador de Sobel.
- PUMPs: cálculo del gradiente de bombeo de Ekman mediante el operador de Sobel.
- SLAs: cálculo del gradiente de la anomalía del nivel del mar mediante el operador de Sobel.

Los sufijos -15, -10, -5, 0 y \_5 hacen referencia al valor de la variable que los precede 15, 10, y 5 días antes, el mismo día y 5 días después del día de captura en el mismo punto. La generación de la base de datos conjunta de variables procedentes de teledetección y datos de pesca se realizó mediante programas en IDL<sup>®</sup> en su versión 5.5.

## **2.4 Tratamiento de las bases de datos**

La base de datos generada en la sección 2.3 se utilizó en los apartados 2.4.1 a 2.4.6 y para generar los mapas de probabilidad de pesca que se describen en la sección 2.4.7.



### 2.4.1 Histogramas de frecuencia y gráficos de dispersión

Se representaron los histogramas de todas las variables extraídas para 15, 10 y 5 días antes, para el día de captura y para 5 días después en las posiciones donde se registraron las capturas. Esto permitió ver la distribución de los valores de cada variable para los puntos donde se produjo captura definidos por la latitud y la longitud.

Se representaron los diagramas de dispersión de todas las variables extraídas para 15, 10 y 5 días antes, para el día de captura y para 5 días después en las posiciones donde se registraron las capturas frente a las CPUE obtenidas. Esto permitió ver la relación de la captura obtenida y el correspondiente valor de la variable extraída. La representación de los histogramas y los gráficos de dispersión se realizaron mediante programas realizados en IDL<sup>®</sup> en su versión 5.5.

Los histogramas y los gráficos de dispersión se utilizaron para definir los rangos de agrupación de las variables. Estas agrupaciones se hicieron en tres rangos distintos, bueno (rango 1), medianamente adecuado (rango 2) y poco adecuado (rango 3) para la presencia de atún blanco. Las CPUE se agruparon de dos maneras distintas, una en tres rangos y otra en dos. Todas estas agrupaciones se utilizaron en los tratamientos estadísticos posteriores.

### 2.4.2 Correlaciones

El grado de relación lineal entre las variables, tomadas dos a dos, se cuantificó mediante el coeficiente de correlación  $\rho$  de Spearman. Este coeficiente es el coeficiente de correlación de Pearson, pero aplicado después de transformar las puntuaciones originales en rangos. Toma valores entre -1 y 1 y se interpreta exactamente igual. Puede usarse como alternativa cuando las variables estudiadas son ordinales y / o se incumple el supuesto de normalidad. La prueba de significación ofrece la información necesaria para contrastar la hipótesis nula de que el valor poblacional del coeficiente es cero.

Se calcularon las correlaciones de Spearman entre todas las variables de la base de datos generada que se describe en la sección 2.3. Ello permitió determinar el grado de relación directa e individual entre las CPUE y las variables extraídas. El análisis de correlaciones también se utilizó para eliminar variables con niveles de correlación elevados en los posteriores tratamientos multivariantes.

Todos los tratamientos estadísticos que se describen en este apartado y en los siguientes se realizaron usando el paquete de análisis estadístico SPSS (*Statistical Product and Service Solutions*) en su versión 11.0.

### 2.4.3 Análisis factorial de correspondencias múltiples

Para describir la relación entre las variables consideradas se aplicó un análisis factorial de correspondencias múltiples, que también se conoce como HOMALS para el

caso de análisis de homogeneidad por medio de mínimos cuadrados alternantes. Éste cuantifica variables categóricas por medio de la asignación de valores a los diferentes casos y categorías. En el análisis factorial de correspondencias múltiples la interpretación de los resultados es más sencilla que en otros métodos de análisis de variables categóricas.

Este método describe las relaciones entre dos o más variables categóricas en un espacio de pocas dimensiones que contiene las categorías de las variables y los objetos en esas categorías. Los objetos en la misma categoría se dibujan cerca unos de otros, mientras que los objetos en diferentes categorías se dibujan lejos. Cada objeto se dibuja lo más cerca posible de su categoría correspondiente.

Las variables que se introdujeron en el análisis factorial de correspondencias múltiples fueron las variables de la base de datos agrupadas en rangos (ver sección 2.4.1) correspondientes al día de captura y la CPUE5.

#### **2.4.4 Regresión lineal múltiple**

A las variables consideradas en el estudio se les aplicó, además, un análisis de regresión múltiple. Se trata de una técnica que permite explorar y cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente o criterio y dos o más variables llamadas independientes o predictoras, así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos. El análisis de regresión lineal múltiple lleva asociado una serie de estrategias de diagnóstico (análisis de los residuos, puntos de influencia) que informan sobre la estabilidad e idoneidad del análisis y que proporcionan pistas sobre cómo perfeccionarlo.

La regresión lineal parte de los supuestos de linealidad, independencia, no-colinealidad y homocedasticidad y normalidad de los residuos.

Es frecuente encontrarse en situaciones en las que existe un número elevado de posibles variables independientes sin que nada oriente al analista sobre la selección de éstas. Este tipo de situaciones pueden afrontarse utilizando procedimientos diseñados para seleccionar un conjunto reducido de variables entre una gran cantidad de ellas, aquéllas que permiten obtener el mejor ajuste posible. En este trabajo, el número de posibles variables independientes es muy elevado; por ello, se opta por el análisis de regresión por pasos.

El criterio de significación de selección de variables se basa en la probabilidad de F. Una variable pasa a formar parte del modelo de regresión si el nivel crítico asociado a su coeficiente de correlación parcial, al contrastar la hipótesis de independencia, es menor que 0,05 (probabilidad de entrada); y queda fuera del modelo de regresión si ese nivel crítico es mayor que 0,10 (probabilidad de salida). Una vez superado el criterio de significación, una variable sólo pasa a formar parte del modelo si su nivel de tolerancia (que no haya colinealidad) es mayor que el nivel establecido (0,0001) y si, además, aún correspondiéndole un coeficiente de correlación parcial significativamente distinto de 0, su incorporación al modelo no hace que alguna de las variables previamente seleccionadas pase a tener un nivel de tolerancia por debajo del establecido.

Para introducir las variables en los modelos se emplea la selección por pasos sucesivos. Este método empieza seleccionando la variable independiente que, además de superar los criterios de entrada, se correlacione (en valor absoluto) con la variable dependiente; a continuación, selecciona la variable independiente que, además de superar los criterios de entrada, posea el coeficiente de correlación parcial más alto (en valor absoluto). Cada vez que se incorpora una nueva variable al modelo, las variables previamente seleccionadas son evaluadas nuevamente para determinar si siguen cumpliendo los criterios de salida o no, en cuyo caso son eliminadas.

Las variables que se introdujeron en los tratamientos de regresión lineal múltiple fueron la CPUE5, como variable dependiente, y las variables derivadas de los datos de teledetección presentes en la base de datos que se describe en el apartado 2.3, como independientes. No se introdujeron todas las variables disponibles a la vez, ya que se tuvo en cuenta el análisis de correlaciones con el fin de utilizar grupos de variables para las cuales los valores de la *rho* de Spearman entre ellas fueran inferiores a 0,5.

#### 2.4.5 Análisis discriminante

Otra técnica de análisis aplicada a las variables consideradas en el estudio fue el análisis discriminante, que permite aprovechar las relaciones existentes entre gran cantidad de variables independientes para maximizar su capacidad de discriminación y clasificación en diferentes grupos. Los supuestos de esta técnica son los mismos que los de la regresión múltiple.

La pertenencia a grupos, conocida de antemano, se utiliza como variable dependiente. El objetivo es encontrar una función o combinación lineal de variables independientes cuantitativas (función discriminante) que permita diferenciar a distintos grupos. Si los grupos no difieren en las variables independientes, el análisis será infructuoso. Sustituyendo el vector de las medias de cada grupo en las funciones discriminantes se obtiene el centroide para cada grupo.

El cociente entre la variación debida a las diferencias entre los grupos (medida mediante la suma de cuadrados inter-grupos) y la variación que se da dentro de cada grupo combinada en una única cantidad (mediante la suma de cuadrados intra-grupos) se denomina autovalor. Su interés principal radica en que permite comparar cómo se distribuye la dispersión inter-grupos cuando existe más de una función. Tiene un valor mínimo de cero, pero no tiene máximo, lo cual lo hace difícilmente interpretable por sí solo. Por eso se introduce el estadístico *lambda de Wilks*, que se encuentra estrechamente relacionado con los autovalores (Pardo y Ruiz, 2002).

Para construir las ecuaciones que permiten asignar un individuo a uno u otro grupo se consideran los coeficientes de las funciones lineales discriminantes de Fisher. A cada individuo se le aplican las funciones discriminantes de Fisher y se le asigna el grupo para el que se obtenga el valor más alto de entre todas las funciones.

El método de inclusión de variables por pasos permite construir una función utilizando aquellas variables que realmente son útiles para la clasificación y evaluar la importancia individual de cada variable en el modelo discriminante. El método de selección que se utilizó se basa en el cambio en la *lambda de Wilks* al incorporar cada

una de las variables al modelo, seleccionando la variable que produce un mayor cambio. La variable seleccionada se incluye en el modelo si cumple el criterio de entrada, que el valor del estadístico F sea mayor que 3,84 (valor de entrada), y se elimina si el valor del estadístico F es menor de 2,71 (valor de salida).

A priori, la probabilidad se considera igual para cada grupo; posteriormente, se aplica clasificación dejando una variable fuera (validación cruzada). Esto permite evaluar la capacidad predictiva de la función discriminante, generando tantas funciones como casos válidos tenga el análisis. Cada función se obtiene eliminando un caso, a continuación cada caso se clasifica utilizando la función discriminante en la que no ha intervenido. Para clasificar los casos se utiliza una función cuyos pesos se calculan a partir de la matriz de varianzas-covarianzas intra-grupo combinada. Esta estrategia se basa en la función de clasificación no estandarizada.

Las variables que se introdujeron en los tratamientos de análisis discriminante fueron la CPUE5 agrupada en 3 rangos (ver sección 3.2), como variable dependiente, y las variables derivadas de los datos de teledetección presentes en la base de datos que se describe en el apartado 2.3, como independientes. No se introdujeron todas las variables disponibles a la vez, ya que se tuvo en cuenta el análisis de correlaciones con el fin de utilizar grupos de variables para las cuales los valores de la *rho* de Spearman entre ellas fueran inferiores a 0,5.

#### **2.4.6 Regresión logística binaria**

También se aplicó un análisis de regresión logística binaria, con la finalidad de pronosticar la pertenencia a un grupo a partir de una serie de variables independientes. Su propósito es similar al del análisis discriminante pero, a diferencia de éste, permite utilizar variables independientes categóricas. Es necesaria una variable categórica que defina dos grupos. Esta variable dicotómica es la variable dependiente del análisis; las variables independientes o predictoras se supone que contienen la información necesaria para diferenciar los dos grupos.

El análisis de regresión logística consta de cuatro fases fundamentales, la selección de las variables, la estimación de los pesos o coeficientes de las variables seleccionadas, la clasificación de los casos y el análisis de los residuos. La selección de las variables se hace por pasos, como se describe más adelante. En un modelo no lineal, la estimación de pesos o coeficientes asociados a cada variable se realiza mediante un algoritmo iterativo de máxima verosimilitud. La clasificación de los casos se realiza a partir de los pronósticos del modelo estimado. El análisis de los residuos permite detectar posibles casos atípicos o predicciones anómalas.

La interpretación de los coeficientes del modelo no es tan simple como en el caso de la regresión lineal, sí lo es la de la probabilidad pronosticada para cada sujeto, puesto que su cálculo es directo. En la ecuación de regresión lineal, el valor del coeficiente de regresión asociado a una variable independiente representa la cantidad de cambio en los pronósticos por unidad de cambio en la variable independiente; en la logística no es así, se divide la probabilidad de uno de los sucesos por su probabilidad complementaria y a este cociente se le conoce como ventaja del suceso. La ventaja de un suceso es el cociente entre la probabilidad de que el suceso ocurra y la probabilidad

de que el suceso no ocurra. La transformación *logit* se obtiene tomando logaritmo de esta ventaja. En el modelo de regresión logística, el coeficiente de regresión asociado a una variable independiente representa el cambio asociado en la transformación *logit* por unidad de cambio en la variable independiente.

Razonar en términos de cambio en los logaritmos resulta poco intuitivo, es preferible interpretar directamente el cambio en las ventajas. La razón de las ventajas es el resultado de dividir dos ventajas y se interpreta en términos del cambio proporcional que se produce en la ventaja del suceso o evento de interés por cada unidad de cambio que se produce en la variable independiente. Si la razón de las ventajas vale 1 (y su coeficiente de regresión vale cero), una unidad de cambio en la variable independiente no produce ningún efecto sobre la ventaja del suceso; si la razón es mayor que 1 (y su correspondiente coeficiente de regresión es mayor que 0), el aumento de unidad de cambio en la variable independiente lleva asociado un aumento de la ventaja del suceso; y si la razón de las ventajas es menor que 1 (y su coeficiente de regresión es menor que 0), se produce una disminución de la ventaja del suceso cuando aumenta una unidad de cambio en la variable independiente.

Los métodos de selección por pasos permiten utilizar criterios estadísticos para, de forma automática, incluir en el modelo las variables que son significativas y dejar fuera las que no lo son. Estos métodos dan lugar a modelos que sólo incluyen variables significativas, pero tienen el inconveniente de que se pueden dejar fuera del modelo variables teórica o conceptualmente relevantes. Para decidir qué variables contribuyen al ajuste del modelo, todos los métodos de selección de variables utilizan el estadístico de puntuación de Rao; para la exclusión de variables, se puede elegir entre el estadístico de Wald, el cambio en la razón de verosimilitudes o el estadístico condicional.

Los métodos hacia adelante parten del modelo nulo (que no incluye ninguna variable independiente) y van incluyendo variables paso a paso hasta que no quedan variables significativas por incluir. Los métodos hacia atrás parten del modelo saturado (que incluye todas las variables seleccionadas) y van excluyendo variables paso a paso hasta que no quedan variables no significativas por excluir. Como método de selección hacia atrás se utiliza el RV, donde la exclusión de variables se basa en la razón de verosimilitudes y evaluando si la variable eliminada hace o no perder ajuste. El estadístico RV contrasta la hipótesis nula de que la variable eliminada tiene un coeficiente igual a cero. El valor de RV para una variable se obtiene dividiendo el valor de RV para el modelo sin esa variable entre el valor del modelo con esa variable.

Las variables que se introdujeron en la regresión logística binaria fueron la CPUE5 agrupada en 2 rangos (ver sección 3.2), como variable dicotómica, y las variables derivadas de los datos de teledetección presentes en la base de datos que se describe en el apartado 2.3, como variables independientes. No se introdujeron todas las variables disponibles a la vez, ya que se tuvo en cuenta el análisis de correlaciones con el fin de utilizar grupos variables para las cuales los valores de la *rho* de Spearman entre ellas fueran inferiores a 0,5.

## 2.4.7 Mapas de probabilidad

Las ecuaciones obtenidas en la regresión lineal múltiple, el análisis discriminante y la regresión binaria logística se aplicaron a los datos de teledetección sobre toda el área de pesca para generar mapas de probabilidad de pesca. Sobre ellos se dibujaron las CPUE reales obtenidas para la misma fecha mediante círculos de tamaño proporcional a la captura obtenida. Cabe destacar que, en este caso, se dibujaron las CPUE reales e individuales para cada barco, no las agrupadas en una ventana dinámica. Las CPUE obtenidas aplicando los modelos de regresión lineal se usaron para generar los mapas en tres niveles, alto, medio y bajo, según la separación en tres grupos usada en el análisis discriminante. En el caso del análisis discriminante se generaron los mapas según las clasificaciones directas del análisis. Finalmente, para los mapas de probabilidad derivados de la regresión logística, el resultado se clasificó en dos niveles, alto y bajo, según la separación en dos grupos que resulta de la aplicación del modelo resultante.

El gran problema de estos modelos es que se generaron extrayendo las variables relacionadas espacio-temporalmente con los puntos de captura, por lo que no contenían la variabilidad de los datos de teledetección sobre toda el área de estudio. En la generación de los mapas de probabilidad se asumió que los valores de las variables de teledetección (temperatura superficial del mar, concentración de clorofila-a, anomalías del nivel del mar y bombeo de Ekman) que quedaban fuera de los rangos que se apreciaron en los histogramas y gráficos de dispersión de la sección 3.2 no eran adecuados para la presencia de atún blanco. Si el valor de cualquiera de las cuatro variables de teledetección para un píxel el día de pronóstico quedaba fuera de rango no se aplicaba el modelo y se le asignaba el valor de fuera de rango o no evaluado en el mapa de probabilidad. Este criterio hizo que las áreas fuera de rango fueran iguales para todos los modelos. Con el objeto de comprobar si había diferencias entre las distribuciones de las variables extraídas en los puntos de captura respecto a toda el área de estudio, se procedió a la extracción para el mismo día de todas las variables extraídas para cada dato real de captura correspondientes a cinco posiciones al azar. Esta extracción al azar tiene la finalidad de comprobar si hay diferencias entre los datos extraídos al azar y los extraídos en los puntos de captura. Para comprobar la igualdad de las varianzas entre las variables en los puntos de captura y las extraídas al azar se utilizó la prueba de homogeneidad de las varianzas de Levene, que consiste en llevar a cabo un análisis de la varianza de un factor utilizando como variable dependiente la diferencia en valor absoluto entre cada puntuación individual y la media de su grupo. Si el nivel de significación es menor de 0,05 se rechaza la hipótesis nula de que las varianzas en las dos poblaciones son iguales. Las distribuciones de las variables utilizadas se alejaron de la normal, por lo que para la comparación de las medias se utilizó la prueba U de Mann-Whitney. Ésta es una excelente alternativa sobre la diferencia de medias cuando no se cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Si el nivel de significación es menor de 0,05 se rechaza la hipótesis nula de que las medias en las dos poblaciones son iguales.

Los datos de los que se dispuso corresponden únicamente a puntos de captura, por lo que los análisis realizados y los posteriores mapas que de ellos se derivaron se hicieron en relación al nivel de captura. La generación de los mapas se realizó mediante programas desarrollados en IDL<sup>®</sup>. Los mapas se generaron para todo el periodo de datos de captura disponibles, exceptuando el año 2000 para el que se generaron para todos los

días, con el objeto de generar mapas de probabilidad en periodos donde no se producen capturas.

De los mapas de probabilidad generados se extrajo, para cada modelo y día, una subventana del área de estudio correspondiente al Cantábrico ( $1^{\circ}$  W– $12^{\circ}$  W y  $43^{\circ}$  N–  $50^{\circ}$  N). Sobre esta ventana se calculó la proporción de píxeles con probabilidades altas pronosticadas por cada modelo para cada día en relación a los valores disponibles es decir no se contabilizaron los píxeles para los que, por cualquier motivo, no se calculó probabilidad. El mismo procedimiento se utilizó para extraer la proporción de valores fuera de rango. La evolución de estas proporciones a lo largo de cada temporada de pesca permite visualizar la coherencia de los mapas de probabilidad respecto a las capturas producidas a lo largo de la misma.

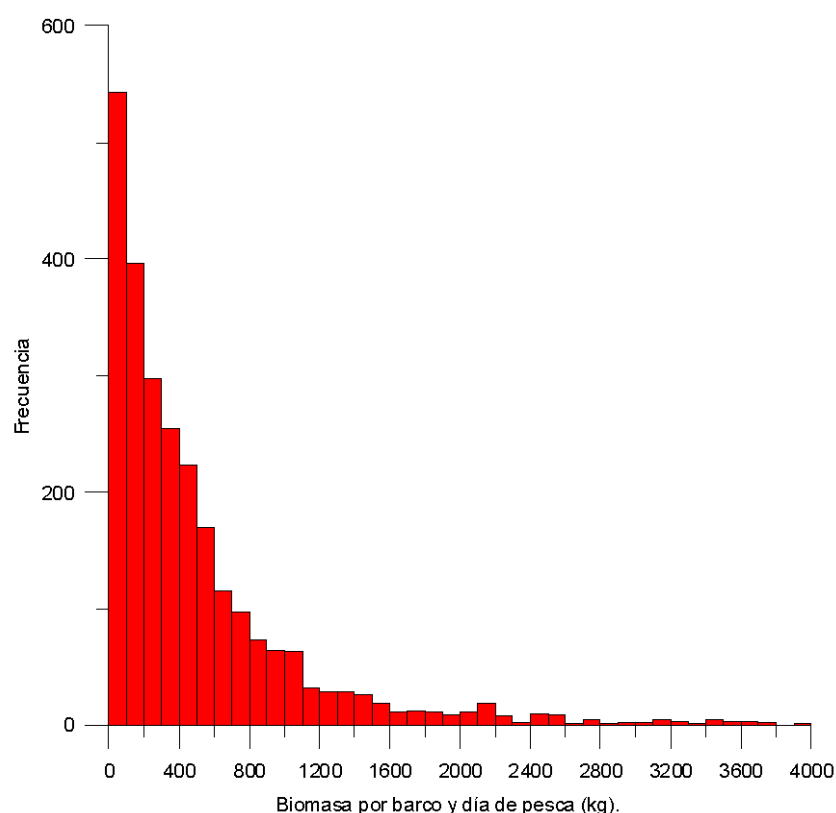




### 3 Resultados

#### 3.1 Proyección de las capturas sobre las imágenes

La mayoría de los datos de captura corresponden a juveniles de atún blanco, ya que los ejemplares adultos son poco accesibles a los dos sistemas de pesca utilizados en la pesquería (curricán y cebo vivo). En la Figura 17 se representa el histograma de frecuencias de biomasa por barco y día para el periodo correspondiente a los meses de junio a octubre de los años 1999, 2000 y 2001. En el gráfico se aprecia una mayor presencia de valores bajos de biomasa por barco y día.



**Figura 17:** Histograma de frecuencias de biomasa capturada por barco y día de pesca.

En la Figura 18 se muestra la localización de los puntos de captura por meses iguales en las campañas de pesca de 1999, 2000 y 2001. En las Figuras 19, 20 y 21 se muestran, por meses, los puntos de captura durante las campañas de pesca de los años 1999, 2000 y 2001, respectivamente. Los puntos de captura en el Mediterráneo son más numerosos en los años 1999 y 2001 que en el 2000. El número de puntos de captura cerca de las Azores es mayor en el año 2000 que en los años 1999 y 2001. El número de registros en el año 2001 es sensiblemente inferior al de los dos años anteriores debido a una mala campaña. El número de puntos en el interior del golfo de Vizcaya y en el talud continental, zona más explotada por la flota, es escaso durante el 2001.

Las áreas de captura se van desplazando con los meses. Este desplazamiento está relacionado con la migración estacional del atún blanco asociada al desplazamiento de la zona intertropical de convergencia en la banda subecuatorial. Al principio de la temporada (mayo-junio), las capturas se producen fuera del golfo de Vizcaya, entre Azores y la península Ibérica, siempre por encima del paralelo 40° N. Progresivamente, las capturas se desplazan hacia el golfo de Vizcaya; en agosto, se concentran en el golfo de Vizcaya y a lo largo del talud continental paralelo a la costa francesa. Hacia final de temporada (septiembre-octubre), algunas unidades se desplazan hacia el Mediterráneo, mientras otras permanecen en el golfo de Vizcaya.

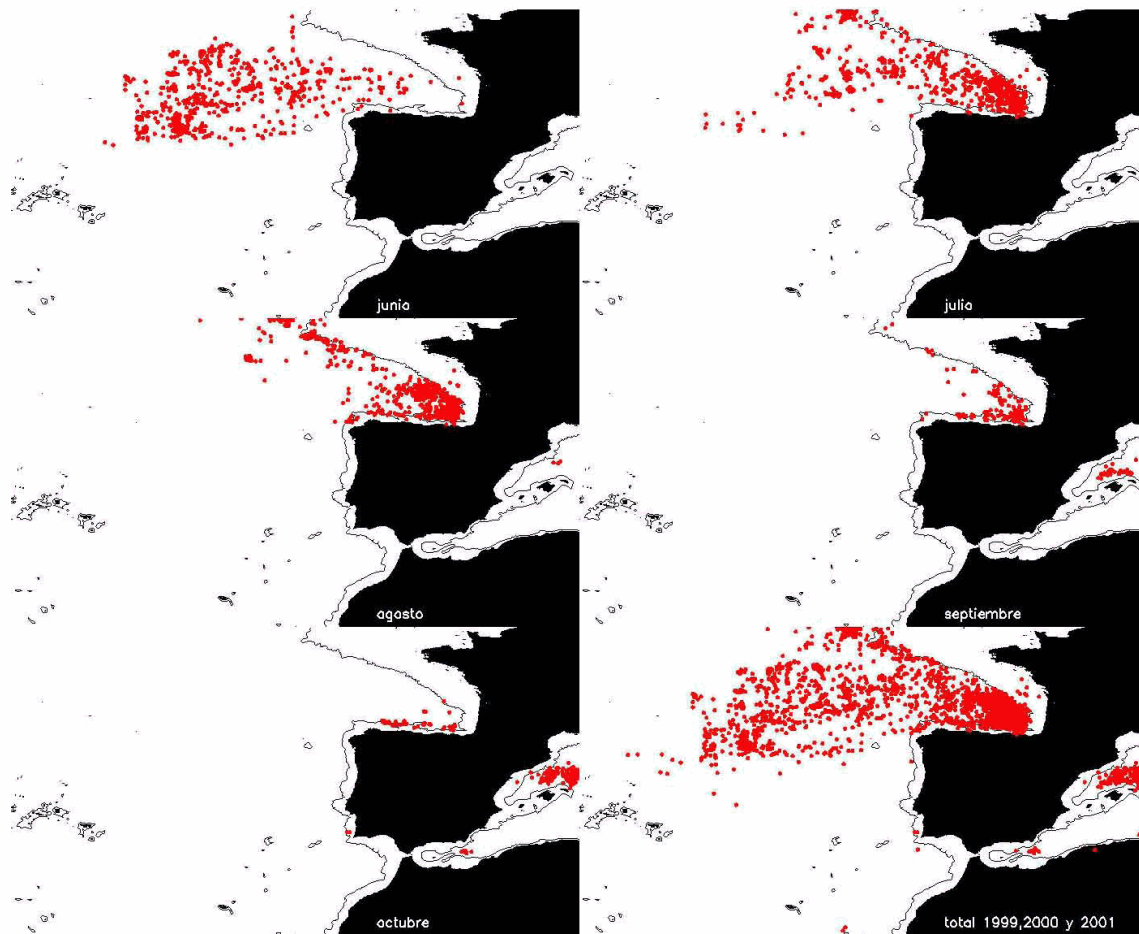
En junio de 1999, los puntos de captura están más concentrados en un área intermedia entre las Azores y la península Ibérica (siempre por encima del paralelo 40° N); en junio de 2000 y 2001, se distribuyen de forma más amplia en esa zona. En julio de 1999, las áreas de pesca se distribuyen fundamentalmente entre el golfo de Vizcaya y el talud continental francés; en julio de 2000 se produce una gran acumulación de puntos de captura en el interior del golfo de Vizcaya; en julio de 2001 no hay acumulación de puntos de captura en el golfo de Vizcaya. En agosto de 1999 se produce una gran acumulación de puntos de captura en el interior del golfo de Vizcaya; en agosto de 2000 se distribuyen entre el golfo de Vizcaya y el talud continental francés; en agosto de 2001, los pocos registros se reparten entre el golfo de Vizcaya y el talud continental francés. En septiembre de 1999 y 2000, los puntos se localizan en el golfo de Vizcaya; en septiembre de 2001 se acumulan al norte de las islas Baleares. En octubre de 1999 y 2000, las capturas se reparten entre la zona costera del norte de la península Ibérica y entre la península y el norte de las Baleares; en octubre de 2001, las capturas se localizan solo al norte de las Baleares.

Las áreas donde se desarrolló la pesquería artesanal vasca de atún blanco en el Atlántico nororiental y en el Mediterráneo durante los años 1999, 2000 y 2001 presentaron una variabilidad oceánica submesoescalar (O: 100 km, semana) observable a partir de imágenes radiométricas (temperatura superficial del mar y clorofila-a) y radar (anomalía del nivel del mar y bombeo de Ekman) obtenidas a partir de satélites polares. Las figuras que ilustran los comentarios de las campañas de pesca en relación a las variables de teledetección se encuentran en el Anexo I: Capturas sobre las variables de teledetección.

## **Campaña de pesca del año 1999**

### *Julio*

A principios de julio del año 1999, durante la primera semana, las capturas se realizaron en el Atlántico nororiental, en aguas exteriores del golfo de Vizcaya. Entre los días 5 y 6 de julio, las áreas de pesca estaban asociadas a un frente térmico con registros de temperatura superficial del mar que oscilaron entre 17,5 y 19 °C. Este frente térmico coincidió espacialmente con otro de concentración de clorofila-a, con valores entre 0,5 y 1 mg/m<sup>3</sup>. En algunos casos, las capturas se realizaron en áreas con valores de clorofila-a superiores a 1 mg/m<sup>3</sup>, consideradas excesivamente turbias para el atún blanco (Laurs *et al.*, 1984). Las áreas de pesca se localizaron en valores de anomalía del nivel del mar cercanos a 0, preferentemente en anomalías positivas no muy intensas y con valores comprendidos entre 0 y 100 mm.



**Figura 18:** Localización de los puntos de captura por meses iguales correspondientes a las campañas de pesca de los años 1999, 2000 y 2001.



**Figura 19:** Localización de los puntos de captura en cada mes de la campaña de pesca del año 1999.



**Figura 20:** Localización de los puntos de captura en cada mes de la campaña de pesca del año 2000.



**Figura 21:** Localización de los puntos de captura en cada mes de la campaña de pesca del año 2001.

Al comienzo del segundo cuarto del mes, entre los días 7 y 9 de julio, la flota atunera se ubicó en dos áreas. La utilización de imágenes radiométricas permitió ubicar las pescas en gradientes térmicos no muy intensos, entre 17 y 18 °C, y de concentración de clorofila-a entre 0,5 y 1 mg/m<sup>3</sup>. Los datos altimétricos, completamente transparentes a las nubes, permitieron ubicar las dos áreas de pesca en estructuras con una anomalía del nivel del mar positiva que superaba los 100 mm. El otro núcleo de pesca se desarrolló en áreas similares a las del primer cuarto del mes, con valores positivos no muy intensos y cercanos a 0. Entre los días 11 y 14 de julio, las condiciones oceanográficas que determinaban las áreas de pesca mostraron valores distintos a los del comienzo del mes, apareciendo a lo largo de frentes térmicos marcados, con diferencias de más de 1 °C, en valores comprendidos entre 16 y 19 °C. Estos frentes coincidieron con variaciones bruscas en cortas distancias de los niveles de concentración de clorofila-a, con valores entre 0,2 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>. Durante el mismo periodo no ocurrió lo mismo respecto a la anomalía del nivel del mar, produciéndose las capturas sobre valores positivos cercanos a 0 con un comportamiento similar al del periodo anterior. Durante los días 14 y 15 de julio hubo un periodo de transición, desplazándose las zonas de pesca hacia Galicia y Asturias. Durante estos días, los valores de anomalía del nivel del mar oscilaron entre -100 y 100 mm.

Entre los días 16 y 21 de julio, se registraron capturas importantes en el interior del golfo de Vizcaya y en aguas septentrionales al noroeste de la península Ibérica (50° N). Los primeros días no se apreció relación significativa entre las capturas y la presencia de frentes térmicos o de clorofila-a y los valores de anomalía del nivel del mar eran cercanos a 0. Entre los días 19 y 21 de julio se observó un cambio en la tendencia, las capturas se efectuaron en áreas con los valores de temperatura superficial más cálidos de la serie hasta ese momento, entre 19,5 y 21,5 °C, y gradientes significativos, entre 0,5 y 1 °C. Este gradiente térmico también coincidió espacialmente con otro de concentración de clorofila-a con valores comprendidos entre 0,3 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Cabe señalar que, en estas condiciones, las capturas más significativas se ubicaron sistemáticamente en el sector del frente menos turbio, con valores de clorofila-a que no superaron los 0,3 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes de anomalía del nivel del mar no mostraron cambios significativos en relación al resto del mes, registrándose valores positivos cercanos a 0 en las áreas de pesca.

Durante el último cuarto del mes, del 22 al 30 de julio, las capturas se produjeron en bolsas de agua cálida del golfo de Vizcaya, de 20 a 22,5 °C, asociadas a gradientes térmicos y de clorofila-a muy marcados que superaban en ocasiones 1 °C y 0,7 mg/m<sup>3</sup> de diferencia, como el desarrollado el día 25 de julio a lo largo del talud de la plataforma continental francesa. En algunos casos, se observa asociación con el cambio de signo en la anomalía del nivel del mar, siempre con valores próximos a 0. El día 25, las capturas se asociaron al frente de clorofila (valores de 0,1 a 0,7 mg/m<sup>3</sup>), aproximadamente paralelo a la costa francesa. Las escenas de anomalía del nivel del mar mostraron la tónica habitual del resto del mes, con cambios poco significativos y áreas de pesca localizadas en valores positivos cercanos a 0.

## **Agosto**

La puesta en órbita del dispersómetro de viento del QuikSCAT en julio del año 1999 permitió incorporar las escenas de bombeo de Ekman al análisis descriptivo de los eventos oceánicos observados por satélite.

Durante la primera semana de agosto de 1999, las capturas más significativas y los rendimientos más altos de la serie se registraron en el golfo de Vizcaya. Las imágenes de temperatura superficial del mar mostraron una bolsa de agua cálida en el interior del Cantábrico, con valores comprendidos entre 20 y 23 °C, y con valores de clorofila-a comprendidos entre 0,05 y 0,4 mg/m<sup>3</sup>. Sí se observaron, sin embargo, capturas significativas asociadas a zonas donde la anomalía del nivel del mar cambiaba el signo en valores cercanos a 0. Los últimos días del primer cuarto cambió la tendencia, con valores positivos de anomalía del nivel del mar entre 6 y 100 mm. En la mayoría de los casos no se observó asociación alguna de las capturas con cambios significativos del bombeo de Ekman con valores cercanos a 0, entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

El segundo cuarto del mes de agosto, las áreas de pesca se situaron en un frente térmico débil localizado en el golfo de Vizcaya, con valores comprendidos entre 20 y 23 °C, similares al periodo anterior, y con una concentración de clorofila-a de entre 0,2 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. Las capturas se situaron sobre valores positivos de anomalía del nivel del mar no superiores a los 100 mm. Los valores de bombeo de Ekman en las áreas de pesca mostraron valores intensos, comprendidos entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Durante el tercer cuarto del mes, las capturas se concentraron en las mismas áreas que en los dos periodos anteriores (en el interior del golfo de Vizcaya) con rendimientos significativamente elevados de CPUE. En estas zonas, las temperaturas oscilaron entre 20 y 22,5 °C y los valores de concentración de clorofila-a entre 0,1 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Las capturas se situaron geográficamente sobre estructuras positivas de anomalía del nivel del mar presentes durante todo ese periodo, aunque en ningún caso sobre valores superiores a 100 mm. Las imágenes de bombeo Ekman, que presentaron a principio del mes estructuras negativas y positivas en el área, con valores comprendidos entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s, evolucionaron hasta valores exclusivamente negativos, inferiores a  $-3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

En el último cuarto del mes se produjo un descenso de los rendimientos pesqueros de la flota atunera. Los rangos de temperatura superficial del mar no cambiaron mucho respecto al periodo anterior y las pescas se ubicaron en valores comprendidos entre 21,5 y 23 °C, medio grado más. Los valores de clorofila-a también fueron similares a los de los días precedentes y no se apreció una asociación clara con los núcleos de pesca. En estos días, las capturas se situaron en áreas de anomalía del nivel del mar positiva, con valores que alcanzaron los 200 mm en algún caso. Las áreas de pesca se localizaron en las zonas cero, entre estructuras de bombeo de Ekman positivas y negativas, con valores comprendidos entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

## **Septiembre**

En la primera quincena del mes de septiembre de 1999, en el golfo de Vizcaya, continuó la misma pauta de los últimos días del mes anterior, con gradientes de 1 °C y valores de temperatura superficial del mar comprendidos entre 21 y 23 °C. Los valores



de clorofila-a mostraron también una pauta similar al mes anterior, con valores bajos, comprendidos entre 0,2 y 0,4 mg/m<sup>3</sup>. En estos días, las capturas se situaron en áreas de anomalía del nivel del mar positiva, y con valores que alcanzaron en algún caso los 200 mm. El área de pesca se localizó en zonas cero, entre estructuras de bombeo de Ekman positivas y negativas, con valores de  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Durante los últimos quince días del mes, las capturas se registraron en los mismos caladeros del interior del golfo de Vizcaya, donde la temperatura superficial del mar descendió hasta el mínimo del mes, en torno a los 20 °C. Los valores de concentración de clorofila-a fueron, sin embargo, bajos, nunca superiores a 0,3 mg/m<sup>3</sup>. Las capturas se situaron geográficamente sobre las estructuras positivas de anomalía del nivel del mar, con valores inferiores a 100 mm. Entre los días 23 y 24 de septiembre, las imágenes de bombeo de Ekman mostraron núcleos significativos de pesca en estructuras muy marcadas e intensas, con valores marginales entre  $-5 \cdot 10^{-6}$  y  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

A finales de septiembre, una parte de la flota artesanal atunera vasca se desplazó hacia el Mediterráneo occidental, al norte del archipiélago balear. Los días 28 y 29 de septiembre se registraron capturas de atún blanco al norte de Mallorca, en áreas cálidas con un rango de temperatura superficial del mar que osciló entre 24 y 25 °C. Los valores de la concentración de clorofila-a correspondieron a aguas superficiales oligotróficas, con valores muy bajos, inferiores a 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes de anomalía del nivel del mar y de bombeo de Ekman mostraron zonas productivas en las áreas de cambio de signo, con valores de anomalía del nivel del mar positivos, próximos a 0, y de bombeo de Ekman negativos no muy altos.

### Octubre

Las dos primeras semanas del mes de octubre de 1999 se asemejaron mucho a las dos primeras semanas del mes anterior, aunque con rendimientos menores en las dos áreas de pesca, al norte de las Baleares y en el golfo de Vizcaya. En el Mediterráneo, los puntos de captura se situaron en zonas con temperaturas comprendidas entre 22 y 24 °C. En el Cantábrico, sin embargo, la temperatura superficial del mar descendió hasta los 19 °C. Los valores de clorofila-a no superaron los 0,2 mg/m<sup>3</sup> en el Mediterráneo y se situaron en torno a 0,3 mg/m<sup>3</sup> en el golfo de Vizcaya. En esta zona, la anomalía del nivel del mar mostró asociaciones claras de los núcleos de pesca con las áreas cercanas a los cambios de signo a medida que aumentaba progresivamente la extensión e intensidad de las estructuras positivas.

Durante los últimos quince días del mes de octubre se obtuvieron capturas al norte del archipiélago balear, en el Cantábrico oriental y en el mar de Alborán. La temperatura superficial del mar presentó valores en esas áreas muy dispares según la zona, con rangos que oscilaron entre 17 y 17,5 °C en el Cantábrico oriental, entre 19,5 y 20,5 °C en el mar de Alborán, y entre 20 y 22 °C en el archipiélago balear. Los valores de clorofila-a fueron bajos y uniformes, con niveles cercanos a los 0,2 mg/m<sup>3</sup> de media y siempre inferiores a 0,4 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de la anomalía del nivel del mar que generaron capturas significativas fueron intensos en las tres áreas, localizándose en los cambios de signo en el Cantábrico y en el estrecho de Gibraltar y en zonas muy positivas (con valores de 200 mm) en el Mediterráneo noroccidental. Se observó,

además, que estos caladeros presentaban valores de bombeo de Ekman cercanos a los cambios de signo, con valores entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

## **Campaña de pesca del año 2000**

### *Junio*

A finales de mayo y principios de junio de 2000, las capturas de atún blanco se ubicaron en el Atlántico nororiental, en aguas intermedias entre el archipiélago de las Azores y el suroeste de la península Ibérica. Los radiómetros mostraron áreas de pesca asociadas a un frente térmico, con valores que oscilaron entre 15 y 17 °C. Este frente térmico coincidió espacialmente con otro de concentración de clorofila-a que presentaba valores entre 0,2 y 0,9 mg/m<sup>3</sup>. Más al norte, la concentración de clorofila-a fue mucho más elevada. Los valores de la anomalía del nivel del mar indicaron, además, que las áreas de pesca se ubicaban en valores heterogéneos situados entre -100 y 100 mm. El análisis del bombeo de Ekman reveló una tendencia de la flota a agregarse en zonas con valores muy negativos, que en ocasiones llegaron a alcanzar los  $-4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre los días 3 y 9 de junio, la flota se ubicó en áreas donde la temperatura se mantenía en el mismo rango de los días precedentes, entre 15 y 17 °C. Algo similar ocurrió con la concentración de clorofila-a, que tampoco varió significativamente, indicando un tipo de aguas similares a las del periodo anterior, con valores entre 0,2 y 0,9 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes de anomalía del nivel del mar permitieron ubicar el área de pesca en estructuras con valores en torno a 0 y que oscilaban entre -100 y 200 mm. El bombeo de Ekman, sin embargo, continuó siendo de signo negativo, aunque en valores menos intensos que en los días precedentes.

Entre el 10 y el 21 de junio, las capturas se efectuaron en las mismas áreas ubicadas al norte del archipiélago de Azores. Entre el 16 y el 19 de junio, los rendimientos pesqueros fueron los más elevados hasta ese momento. La escasa cobertura nubosa permitió apreciar que los mejores rendimientos estaban limitados geográficamente por las isoterma de 17 y 15 °C, esta última ubicada en aguas más septentrionales. Esta banda térmica presentó valores de clorofila-a que variaban en un rango entre 0,4 y 0,9 mg/m<sup>3</sup>. Las escenas de anomalía del nivel del mar no mostraron cambios significativos en relación al resto del mes, localizándose las áreas de pesca en valores positivos no muy intensos y cercanos a 0, entre -200 y 200 mm. En el mismo periodo, la relación con las áreas frontales marcadas por los cambios de signo del bombeo de Ekman no fue constante. Entre los días 10 y 12, los puntos se relacionaron con áreas donde cambió el signo, oscilando entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s. Al final del tercer cuarto, el bombeo fue predominantemente negativo y alcanzó valores de  $-4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre los días 22 y 30 de junio, las capturas se realizaron en bolsas de agua ligeramente más cálidas ubicadas en áreas más septentrionales y cercanas al golfo de Vizcaya (entre 16 y 17,5 °C). Los valores de clorofila-a fueron similares a los del periodo anterior, formando frentes no muy definidos entre 0,1 y 0,9 mg/m<sup>3</sup> que se fueron intensificando hacia finales de mes, especialmente el día 25. Ese día, los valores de clorofila-a cambiaron rápidamente en las áreas de pesca entre 0,4 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar en las áreas de pesca indicaron áreas frontales

cercanas a 0, con valores que oscilaron entre -100 y 100 mm. Algo parecido ocurrió con el bombeo de Ekman, que en las mismas áreas mostró valores cercanos a 0, entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s, aunque al comienzo del cuarto las áreas de pesca presentaron valores significativamente negativos y cercanos a  $-3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Julio

Durante el primer cuarto del mes de julio del año 2000, al igual que en el año anterior, las capturas se desarrollaron en el Atlántico nororiental, en aguas exteriores al golfo de Vizcaya. El día 7 de julio, las áreas de pesca estaban muy agrupadas y asociadas a un frente térmico con valores cercanos a 17,5 °C, aunque la cobertura nubosa no permitió confirmar su evolución a lo largo del cuarto. Los valores de clorofila-a oscilaron entre 0,2 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar indicaron que las zonas de pesca se localizaban en áreas cercanas a 0, con valores que oscilaron entre -100 y 100 mm. El bombeo de Ekman mostró la misma tendencia que la anomalía del nivel del mar, observándose valores sobre los núcleos de pesca cercanos a 0, ni inferiores a  $-4 \cdot 10^{-6}$  m/s ni superiores a  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre los días 11 y 17 de julio, la mayoría de las capturas se realizaron en el interior del golfo de Vizcaya, aunque una parte de la flota artesanal operó al noroeste del cabo Finisterre. La cobertura nubosa en esta ventana exterior al golfo limitó el uso de los radiómetros, que registraron en las escasas imágenes válidas valores de temperatura superficial del mar de 17 °C y valores de clorofila-a de 0,5 mg/m<sup>3</sup>. El radar altimétrico mostró que los caladeros productivos se encontraban en áreas donde la anomalía del nivel del mar cambiaba el signo en valores cercanos a 0, entre -50 mm y 50 mm. El bombeo de Ekman también indicó que las áreas de pesca estaban en zonas significativamente negativas, entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y 0 m/s. Los caladeros del interior del golfo de Vizcaya se ubicaron en zonas donde los valores de temperatura superficial del mar eran ligeramente más cálidos, entre 18 y 19 °C, dispuestos a lo largo del talud de la plataforma continental francesa, en zonas frontales con valores de clorofila-a entre 0,1 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. La anomalía del nivel del mar cambiaba el signo en las áreas de pesca, que se localizaron en valores cercanos a 0, al igual que en la ventana exterior. El bombeo de Ekman también indicó que las áreas de pesca estaban en zonas significativamente negativas, entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y 0 m/s.

Durante los últimos quince días del mes de julio, el frente del talud de la plataforma continental francesa se intensificó. Las áreas de pesca de la flota artesanal atunera se localizaron a lo largo del frente más cálido y marcado de la serie anual, con registros de temperatura superficial que oscilaron entre 18,5 °C sobre la plataforma y 21 °C sobre el talud. Este frente térmico del talud coincidió geográficamente con otro de concentración de pigmentos, de valores próximos a 0,05 mg/m<sup>3</sup> sobre el talud y a 0,7 mg/m<sup>3</sup> sobre la plataforma continental francesa. Las imágenes altimétricas también mostraron un frente de talud, revelando que los núcleos de pesca eran especialmente productivos en áreas de anomalía del nivel del mar que llegaban a 200 mm y de bombeo de Ekman de  $-4 \cdot 10^{-6}$  m/s. En ambos casos, las áreas de pesca estaban localizadas a lo largo de la línea cero donde cambiaba el signo de ambas anomalías.

## Agosto

A comienzos del mes de agosto de 2000, como en el mes anterior, la flota se localizó en dos caladeros, en la ventana del interior del golfo de Vizcaya y en las áreas septentrionales al noroeste del cabo Finisterre. Los radiómetros infrarrojos indicaron que las zonas de pesca se localizaban en dos áreas con registros de temperatura superficial del mar significativamente distintos. En la ventana exterior al noroeste del cabo Finisterre, la temperatura superficial del mar sobre las zonas de pesca varió entre 16,5 y 17,5 °C, mientras que en los caladeros del interior del golfo de Vizcaya osciló entre 20,5 y 21,5 °C. La radiometría visible también mostró pautas de asociación claras entre las áreas de pesca y los valores de clorofila-a a lo largo de la plataforma continental francesa, con valores que oscilaron entre 0,05 y 1 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes altimétricas mostraron que en la ventana exterior las áreas de pesca presentaban valores de anomalía del nivel del mar positivos, cercanos a 200 mm, y en la ventana interior valores comprendidos entre -50 mm y 50 mm. El bombeo de Ekman también indicó que estas áreas de pesca se localizaban en valores significativamente distintos. En las aguas situadas al noroeste del cabo Finisterre, los valores oscilaron entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s; en el interior del golfo de Vizcaya, sin embargo, los valores fueron negativos en torno a  $-1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre los días 9 y 18 de agosto se localizaron dos núcleos de capturas en el golfo de Vizcaya. El primero, más meridional, se ubicó en las aguas fronterizas franco-españolas, en un rango de temperatura superficial del mar que osciló entre 20,5 y 22,5 °C, con valores de concentración de clorofila-a entre 0,7 y 0,05 mg/m<sup>3</sup>, respectivamente. El otro núcleo, más septentrional, se localizó en el talud de la península de Normandía, donde la temperatura superficial del mar no superó los 18 °C, con valores de clorofila-a similares a los de la ventana meridional, de 0,05 mg/m<sup>3</sup> sobre el talud y 0,7 mg/m<sup>3</sup> sobre la plataforma continental. En ambas áreas, la anomalía del nivel del mar presentó sobre las áreas de pesca valores de anomalías positivas que no superaban los 100 mm, los cuales se correspondían con valores de bombeo de Ekman negativos y cercanos a  $-3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

El tercer cuarto del mes, entre los días 19 y 23 de agosto, las áreas de pesca se localizaron geográficamente en las mismas ventanas que en la semana anterior. El caladero más meridional, ubicado a lo largo de un frente térmico en las aguas interiores del golfo de Vizcaya, se situó en un rango de temperatura superficial del mar que osciló entre 20 y 22,5 °C. Sin embargo, el caladero septentrional, localizado en la península de Normandía, presentó valores de temperatura superficial del mar entre 17 y 19 °C, con valores de concentración de clorofila-a que se mantuvieron como en el periodo anterior, entre 0,7 y 0,05 mg/m<sup>3</sup> respectivamente. En ambas áreas, la anomalía del nivel del mar presentó valores de anomalías positivas más intensos que en el periodo anterior, superando en ocasiones los 200 mm. Estas áreas presentaron valores de bombeo de Ekman que oscilaron entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

La última semana, entre el 24 y el 31 de agosto, los caladeros se desplazaron al sur del golfo de Vizcaya, ocupando el talud de la plataforma continental de la península Ibérica, desde el País Vasco hasta Galicia. La temperatura superficial del mar presentó registros que oscilaron entre los 22 °C en la vertiente oriental y los 17 °C en la cuenca occidental. Los valores de clorofila-a mostraron que los núcleos de capturas se ubicaban en frentes que presentaban valores entre 0,05 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. Las aguas más frías de la

cuenca occidental presentaron valores de anomalía del nivel del mar positivos, cercanos a 100 mm. En la cuenca oriental, sin embargo, con aguas más estables y más cálidas, los núcleos de pesca se ubicaron sobre valores de anomalía del nivel del mar y de bombeo de Ekman cercanos a 0.

### Septiembre

La primera quincena del mes de septiembre del año 2000, las capturas se localizaron en dos áreas de pesca, en el talud de la plataforma continental francesa y en el interior del golfo de Vizcaya. Ambas áreas presentaron una temperatura superficial del mar que varió entre 18 °C en las aguas septentrionales y 21,5 °C en las meridionales. Los valores de concentración de clorofila-a oscilaron entre 0,1 y 0,2 mg/m<sup>3</sup> en la zona de pesca del talud y en torno a 1 mg/m<sup>3</sup> en las aguas más turbias y ricas en materia orgánica de la plataforma continental francesa. Ambas áreas presentaron valores de anomalía del nivel del mar predominantemente positivos, próximos a 100 mm, correspondientes a zonas de bombeo de Ekman más frontales y con valores cercanos a 0 (entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s).

La tercera semana de septiembre, la totalidad de los núcleos de pesca se localizaron en la ventana meridional, en aguas del interior del golfo de Vizcaya. La distribución de los núcleos de pesca no mostró asociación alguna a frentes térmicos o de turbidez próximos. La temperatura superficial del mar en las áreas de pesca rondó los 21 °C y los valores de concentración de clorofila-a oscilaron entre 0,2 y 0,4 mg/m<sup>3</sup>. Los valores altimétricos de anomalía del nivel del mar siguieron mostrando áreas de pesca sobre anomalías positivas con valores cercanos a 100 mm. Esta anomalía positiva se correspondió, a su vez, con valores de bombeo de Ekman negativos de  $-3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Durante la última semana de septiembre, las áreas de pesca se concentraron en dos caladeros, uno en el interior del golfo de Vizcaya y otro en el límite occidental del golfo de Vizcaya. En el primero, la temperatura superficial del mar fue de 21,5 °C y la concentración de clorofila-a tomó valores comprendidos entre 0,2 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. En el segundo, la temperatura varió entre 16 y 17 °C y la concentración de clorofila-a entre 0,3 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. Esta zona de pesca occidental se localizó en un frente cercano a un área muy eutrófica, con valores de clorofila-a superiores a 2 mg/m<sup>3</sup>. En la ventana oriental, los valores de anomalía del nivel del mar mostraron la misma tendencia que en el periodo anterior. Las dos zonas de pesca presentaron anomalías positivas con valores cercanos a 100 mm, que correspondían en la zona exterior a valores frontales de bombeo de Ekman que alcanzaron los extremos del intervalo  $-4 \cdot 10^{-6}$  a  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Octubre

A finales de septiembre y comienzos de octubre de 2000, los escasos rendimientos pesqueros se ubicaron en áreas cercanas a la plataforma continental española. En estas zonas, la temperatura superficial del mar se homogenizó en valores próximos a 18 °C y la concentración de clorofila-a osciló entre 0,2 y 0,6 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de la anomalía del nivel del mar sobre las áreas de pesca fueron positivos e

intensos, superando en ocasiones los 200 mm, que correspondían a valores negativos de bombeo de Ekman próximos a  $-3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

La tercera semana de octubre, la totalidad de los núcleos de pesca se localizaron en áreas cercanas a la plataforma continental española con valores de temperatura superficial de 17 °C, niveles de concentración de clorofila-a entre 0,2 y 0,6 mg/m<sup>3</sup> y anomalías positivas con valores de 100 mm. Estas anomalías positivas se correspondieron, a su vez, con valores de bombeo de Ekman intensos en áreas frontales, oscilando entre  $-5 \cdot 10^{-6}$  y  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

La cuarta semana de octubre, última de la temporada de pesca del año 2000, el único caladero significativo, aunque de muy escaso rendimiento, se localizó en el mar de Alborán, donde los gradientes de temperatura no fueron muy marcados y se registraron valores de 19,5 °C. Este agua presentó, además, valores de clorofila similares a los del golfo de Vizcaya, con concentraciones entre 0,2 y 0,5 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes de anomalía del nivel del mar presentaron valores de 150 mm y el bombeo de Ekman osciló entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s, en zonas cercanas a 0.

## **Campaña de pesca del año 2001**

### *Junio*

Durante la primera quincena de junio de 2001, las capturas se ubicaron en el Atlántico nororiental, en aguas intermedias entre el archipiélago de las Azores y el suroeste de la península Ibérica. Las imágenes mostraron áreas de pesca asociadas a un frente térmico, con valores que oscilaron entre 16 y 17 °C, que coincidió espacialmente con otro de concentración de clorofila-a, cuyos valores oscilaron entre 0,2 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar indicaron, además, que las áreas de pesca se ubicaban en una estructura oceanográfica positiva intensa, que superó los 200 mm. El análisis del bombeo de Ekman reveló una tendencia de la flota a agregarse en zonas con valores frontales que oscilaron entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre el 13 y el 19 de junio, las capturas se registraron en las mismas áreas ubicadas al norte del archipiélago de Azores. La escasa cobertura nubosa permitió apreciar que los mejores rendimientos estaban limitados geográficamente por las isotermas de 15 °C y 17 °C, esta última ubicada en aguas más meridionales. Esta banda térmica presentó valores de clorofila-a que variaban en un rango entre 0,4 y 1 mg/m<sup>3</sup>. Las escenas de anomalía del nivel del mar mostraron un cambio significativo en relación al resto del mes, puesto que las áreas de pesca se localizaron en valores negativos intensos que alcanzaron los -200 mm, aunque cercanos a zonas donde la anomalía del nivel del mar estaba en torno a 0. En el mismo periodo, la relación con las áreas frontales marcadas por los cambios de signo del bombeo de Ekman no fue constante. Los núcleos de pesca se relacionaron con áreas donde cambiaba el signo, oscilando entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Entre los días 20 y el 24 de junio, la flota se fue desplazando progresivamente hacia bolsas de agua ligeramente más cálidas ubicadas en áreas más septentrionales y cercanas al golfo de Vizcaya, entre 16 y 17 °C. Los valores de clorofila-a fueron similares a los del periodo anterior, formando frentes no muy definidos entre 0,2 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar en las áreas de pesca mostraron zonas

frontales cercanas a 0 con valores que oscilaban entre -100 y 100 mm. El bombeo de Ekman presentó en las mismas áreas valores significativamente negativos y que variaban entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y 0 m/s.

En la última semana de junio, las capturas se realizaron en bolsas de agua ligeramente más cálidas ubicadas en áreas más septentrionales cercanas a Galicia, entre 16 y 18 °C. Los valores de clorofila-a fueron similares a los del periodo anterior, formando frentes no muy definidos entre 0,1 y 0,5 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar presentaron valores positivos cercanos a 100 mm. El bombeo de Ekman presentó valores cercanos a 0, variando entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Julio

Durante la primera semana de julio de 2001, las capturas se localizaron en dos áreas del Atlántico nororiental, en aguas interiores del golfo de Vizcaya y al noroeste de Galicia. Entre los días 1 y 9, las áreas de pesca se encontraron muy agrupadas y asociadas a una banda térmica sin estructuras frontales definidas, con valores entre 18 y 20 °C. Esta banda térmica coincidió con valores de concentración de clorofila-a entre 0,1 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Los valores de anomalía del nivel del mar indicaron que las zonas de pesca se localizaban en áreas con anomalías positivas, entre 0 y 150 mm, y valores de bombeo de Ekman negativos, entre 0 y  $-2 \cdot 10^{-6}$  m/s. A medida que avanzó la semana, el bombeo de Ekman cambió su signo y aparecieron estructuras positivas intensas que circundaban algunos núcleos negativos, con valores en el intervalo entre  $-4 \cdot 10^{-6}$  y  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

El segundo cuarto del mes de julio, entre los días 10 y 17, las áreas de pesca se ubicaron al noroeste de Galicia, a lo largo de un área con registros de temperatura que oscilaron entre 18 y 20 °C. Esta zona presentó, a su vez, valores de concentración de clorofila-a entre 0,1 y 0,6 mg/m<sup>3</sup> sin estructuras frontales definidas. Las imágenes altimétricas mostraron que las áreas de pesca estaban localizadas a lo largo de la línea cero, donde cambiaba el signo de la anomalía del nivel del mar y del bombeo de Ekman. La anomalía del nivel del mar osciló entre -150 y 150 mm, revelando que los núcleos de pesca eran especialmente productivos en las zonas positivas del frente con valores de hasta 100 mm. Esta estructura frontal coincidió, a su vez, con áreas donde el signo del bombeo de Ekman cambiaba. Los núcleos de pesca se localizaron sobre valores negativos de  $-2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

En el segundo y tercer cuartos del mes, especialmente entre los días 11 y 17 de julio, la mayoría de las capturas se realizaron en el interior del golfo de Vizcaya, aunque una parte de la flota artesanal operó al noroeste del cabo Finisterre. La cobertura nubosa en esta ventana exterior al golfo limitó el uso de los radiómetros, que registraron en las escasas imágenes válidas valores de temperatura superficial del mar entre 18 y 20 °C y valores de clorofila-a de 0,5 mg/m<sup>3</sup>. Los radares altimétricos mostraron que los caladeros productivos se encontraban en áreas con un rango de anomalía del nivel del mar entre -100 y 100 mm, aunque predominantemente en anomalías positivas (100 mm) cercanas a la línea cero. El bombeo de Ekman también indicó que las áreas de pesca estaban en zonas frontales, con valores entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s. Los caladeros del interior del golfo de Vizcaya, sin embargo, se ubicaron en zonas donde predominaban

anomalías del nivel del mar positivas y bombeo de Ekman negativo, entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y 0 m/s.

Entre los días 20 y 31 de julio, la cobertura nubosa impidió la obtención de escenas radiométricas para determinar los rangos de temperatura superficial del mar y clorofila-a donde se ubicaban las áreas de pesca. Las escasas imágenes disponibles permitieron determinar áreas de pesca con valores de temperatura de 16 °C, cercanas a frentes con valores de clorofila-a que oscilaban entre 0,2 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. El radar altimétrico y el dispersómetro de viento mostraron que estas áreas del golfo de Vizcaya oriental presentaban valores de anomalía del nivel del mar en las zonas frontales que oscilaban entre -150 y 200 m y valores de bombeo de Ekman entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### **Agosto**

El mes de agosto de 2001 fue el menos productivo en rendimientos pesqueros de la serie 1999-2001. La flota se localizó en dos caladeros: la ventana septentrional situada al noroeste del cabo Finisterre y el golfo de Vizcaya oriental.

A comienzos del mes, hasta el día 7 de agosto, las escasas escenas disponibles, debido a la cobertura nubosa, indicaron que las zonas de pesca se localizaban sobre registros de temperatura superficial del mar comprendidos entre 16 y 17 °C. La radiometría visible tampoco mostró pautas de asociación claras entre las áreas de pesca y alguna estructura oceanográfica definida a partir de los mapas de concentración de pigmentos tipo clorofila-a, cuyos valores oscilaron entre 0,2 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes altimétricas mostraron que, en la ventana exterior, las áreas de pesca presentaban valores de anomalía del nivel del mar cercanos a zonas frontales que oscilaban en un rango entre -50 y 50 mm. El bombeo de Ekman también indicó que estas áreas de pesca se localizaban en valores típicos de zonas frontales que oscilaban entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

El resto del mes, excepto entre los días 8 y 15, la flota artesanal atunera amarró debido a las malas condiciones meteorológicas y oceánicas que impidieron la actividad pesquera. Los escasos núcleos de pesca situados al noroeste del cabo Finisterre se ubicaron en áreas con valores muy bajos de temperatura (16 °C). A medida que avanzaba el mes fueron trasladándose progresivamente hacia aguas más cálidas del sureste del golfo de Vizcaya, con registros de temperatura entre 19 y 21,5 °C y valores de clorofila-a entre 0,2 y 0,7 mg/m<sup>3</sup>. La anomalía del nivel del mar indicó que las zonas de pesca se localizaban en áreas con valores positivos cercanas a 100 mm. Los valores de bombeo de Ekman fueron negativos, entre 0 y  $-2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### **Septiembre**

Las tres primeras semanas de septiembre de 2001, entre los días 1 y 19, las malas condiciones meteorológicas y oceánicas continuaron limitando la actividad pesquera. Los escasos núcleos de pesca se desarrollaron al sureste del golfo de Vizcaya, en áreas donde los registros radiométricos de temperatura superficial del mar y de clorofila-a fueron similares a los del mes anterior. La anomalía del nivel del mar mostró una pauta distinta, presentando valores positivos que alcanzaron los 200 mm.



Entre los días 20 y 30 de septiembre, la flota se trasladó hacia el Mediterráneo occidental, localizándose en un área ubicada al norte y noreste del archipiélago balear. Las áreas de pesca se situaron a lo largo de un frente térmico con el afloramiento del golfo de León y registros de temperatura que oscilaban entre 21 y 24 °C y valores de concentración de clorofila-a no superiores a 0,1 mg/m<sup>3</sup>. La anomalía del nivel del mar indicó que las zonas de pesca se localizaban en áreas con anomalías positivas muy intensas cercanas a 200 mm y valores de bombeo de Ekman cercanos a zonas frontales de cambio de signo, entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Octubre

Las malas condiciones que imperaron el año 2001 en la ventana geográfica septentrional tradicional motivaron que, durante la primera quincena de octubre, parte de las unidades atuneras vascas se trasladaran a pescar al archipiélago canario, en aguas cálidas septentrionales ubicadas al noreste de Lanzarote. Otra parte de la flota, sin embargo, permaneció operando en el Mediterráneo noroccidental. Las aguas situadas al noreste de Lanzarote presentaron registros de temperatura superficial cálidos, con valores que oscilaron entre 22,5 y 23 °C. Los valores de concentración de clorofila-a en las mismas áreas fueron relativamente bajos, inferiores a 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Las imágenes radar mostraron que estos caladeros presentaban valores de anomalía del nivel del mar cercanos a 200 mm, ubicados a lo largo de un frente con valores que no superaban los -100 mm. Esta zona frontal se correspondió con valores de bombeo de Ekman entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Al final de la temporada de pesca 2001, los escasos caladeros del Mediterráneo noroccidental se ubicaron en la misma ventana geográfica que durante el mes anterior. Los caladeros se localizaron a lo largo de la estructura frontal generada entre las aguas afloradas del golfo de León, con un registro de temperatura de 20,5 °C y valores de concentración de clorofila-a de 0,3 mg/m<sup>3</sup>, y las aguas septentrionales del archipiélago balear, con un registro de temperatura superficial del mar de 24 °C y valores de concentración de clorofila-a de 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Las escenas altimétricas indicaron valores de anomalía del nivel del mar positivos que oscilaron entre 200 y 300 mm. Los valores de bombeo de Ekman entre  $-3 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

## 3.2 Histogramas de frecuencia y gráficos de dispersión

Los rangos de CPUE altos (rango 1), medios (rango 2) o bajos (rango 3) se fijaron en base a los porcentajes de observaciones acumulados de la variable CPUE5. El rango 1 se fijó por encima del 70 % (valores de CPUE5 superiores a 702); el rango 2 entre el 35 y el 70 % (valores de CPUE5 entre 320 y 702); y el rango 3 entre el 0 y el 35 % (valores de CPUE5 inferiores a 320). Para la división en dos rangos (rango 1 y rango 2) que se utilizó en tratamientos posteriores se consideró como valor de separación el 55 % (CPUE5 igual a 521) para el rango 1 y por debajo para el rango 2. La elección de la variable CPUE5 frente a las otras CPUE presentes en la base de datos (CPUE y CPUE3) se basó en los resultados estadísticos que se obtuvieron en apartados posteriores.

El histograma de temperatura superficial del mar mostró que el total de las observaciones se efectuaron en un rango entre 13 y 25 °C, sin máximos pronunciados, con una distribución relativamente uniforme. Los rendimientos altos (rango 1) se obtuvieron en un intervalo de temperatura superficial del mar comprendido entre 19 y 23 °C; los medios (rango 2) entre 15 y 18 °C (las más frías) y entre 23 y 24 °C (las más cálidas); y los bajos (rango 3) por encima de 24 °C y por debajo de 15 °C (Figura 22).

El histograma de concentración de clorofila-a mostró que el rango en el que se ubicaron la totalidad de las observaciones osciló entre 0,1 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>. El registro más frecuente se ubicó en los 0,15 mg/m<sup>3</sup>. Los rendimientos altos (rango 1) se obtuvieron en valores de concentración de clorofila-a entre 0,1 y 0,5 mg/m<sup>3</sup>; los medios (rango 2) entre 0,5 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>; y los bajos en valores inferiores a 0,1 mg/m<sup>3</sup> y superiores a 0,8 mg/m<sup>3</sup> (Figura 22).

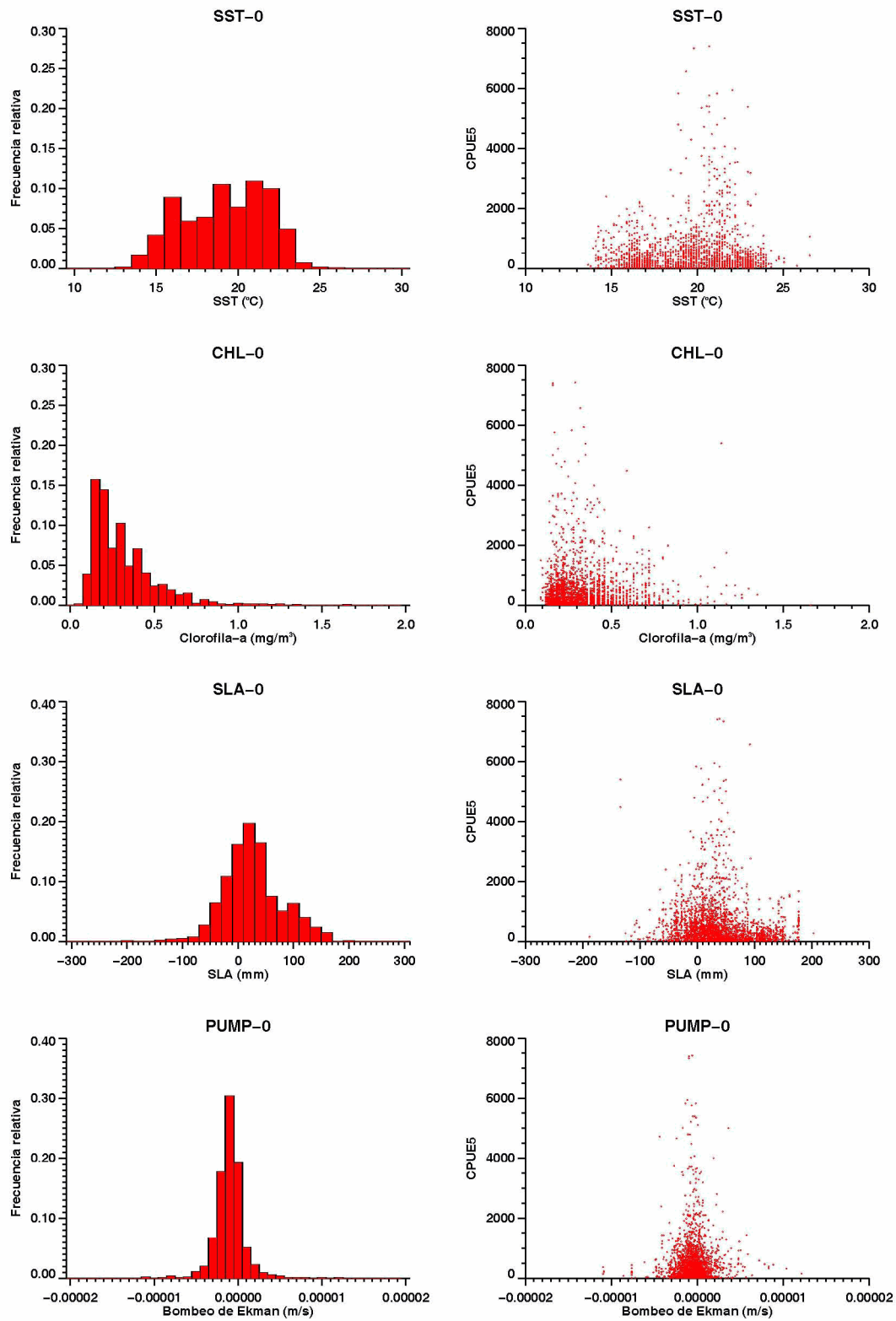
El histograma de anomalía del nivel del mar mostró que el rango en el que se situaron todas las observaciones osciló entre -70 y 190 mm. Los rendimientos altos (rango 1) correspondieron a valores comprendidos entre -20 y 60 mm; los medios (rango 2) entre -60 y -20 mm y entre 60 y 180 mm; y los bajos (rango 3) en valores inferiores a -60 mm y superiores a 180 mm (Figura 22).

El histograma de bombeo de Ekman mostró que el rango en el que se ubicaron todas las observaciones osciló entre  $-5 \cdot 10^{-6}$  y  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s. Los rendimientos altos (rango 1) se obtuvieron en un intervalo de bombeo de Ekman entre  $-2 \cdot 10^{-6}$  y  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s; los medios (rango 2) entre  $-1 \cdot 10^{-6}$  y  $-2 \cdot 10^{-6}$  m/s en el caso de los valores negativos y entre  $1 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s en el caso de los positivos; y los bajos (rango 3) en valores inferiores a  $-4 \cdot 10^{-6}$  y superiores  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s (Figura 22).

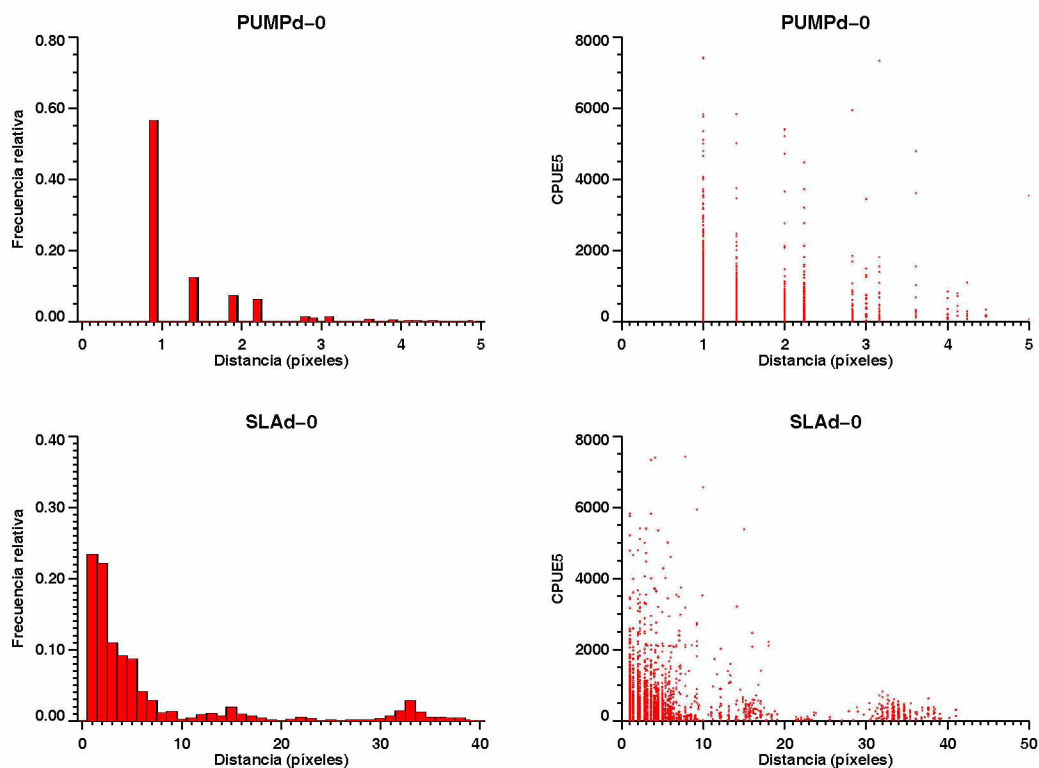
El histograma de frecuencias de distancias al cambio de signo de la anomalía del nivel del mar mostró una acumulación de puntos en un área de pocos píxeles geográficos. La frecuencia disminuyó con el aumento de la distancia. En el gráfico de dispersión se apreció, además, que los rendimientos más altos se produjeron en distancias pequeñas. En base a los gráficos se fijaron los tres rangos siguientes: rango 1, de 0 a 5 píxeles; rango 2, de 5 a 10 píxeles; y rango 3, más de 10 píxeles (Figura 23).

El histograma de frecuencias de distancias al cambio de signo del bombeo de Ekman mostró una acumulación de puntos en un área de pocos píxeles geográficos. Al igual que en el caso de la anomalía del nivel del mar, la frecuencia disminuyó con el aumento de la distancia al frente. En el gráfico de dispersión se apreció, además, que los rendimientos más altos se produjeron en distancias pequeñas (1 píxel). En base a los gráficos, se fijaron los tres rangos: rango 1, de 0 a 1,3 píxeles; rango 2, de 1,3 a 2,4 píxeles; y rango 3, más de 2,4 píxeles (Figura 23).

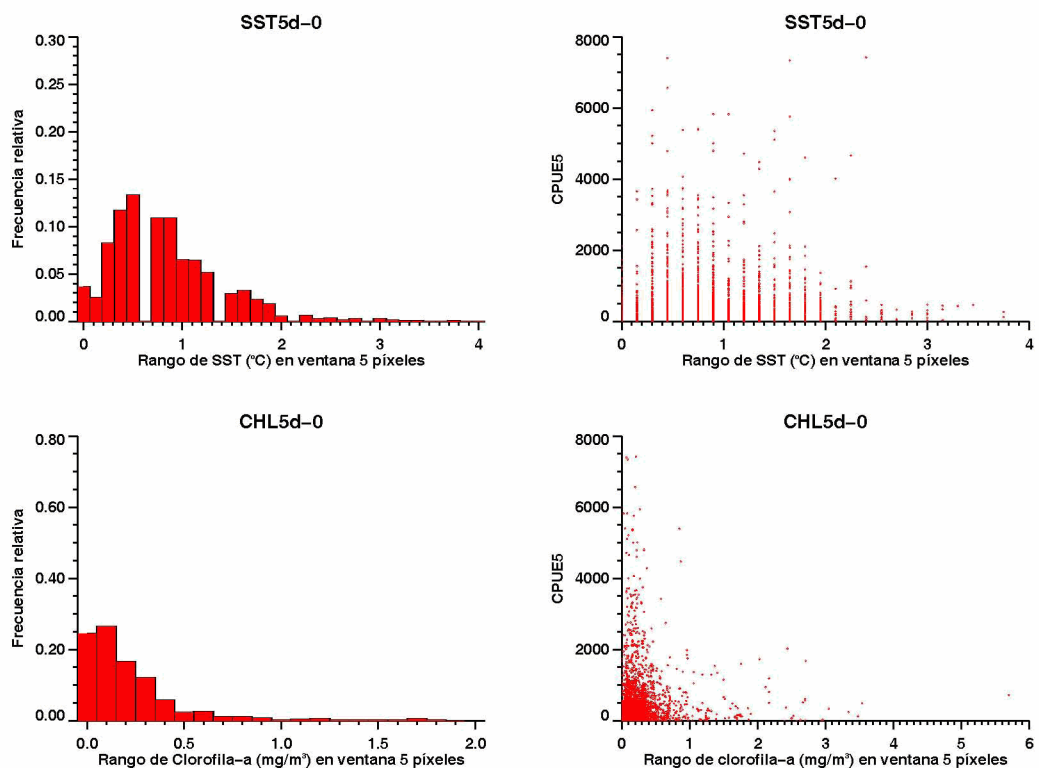
El histograma de frecuencias de las diferencias de temperatura superficial del mar en una ventana de 5 píxeles cuadrados permitió apreciar ocurrencias mayores en un rango de valores entre 0,5 y 1,3 °C, decreciendo a ambos lados de ese intervalo. En base a los gráficos, se fijaron los tres rangos de valores: rango 1, de 0,5 a 1,3 °C; rango 2, entre 0 y 0,5 °C y entre 1,3 y 1,9 °C; y rango 3, valores superiores a 1,9 °C (Figura 24).



**Figura 22:** Histogramas de frecuencia y gráficos de dispersión de las variables de teledetección para el día de captura.



**Figura 23:** Histogramas de frecuencias y gráficos de dispersión para las distancias a cambio de signo de la anomalía del nivel del mar y del bombeo de Ekman para el día de captura.



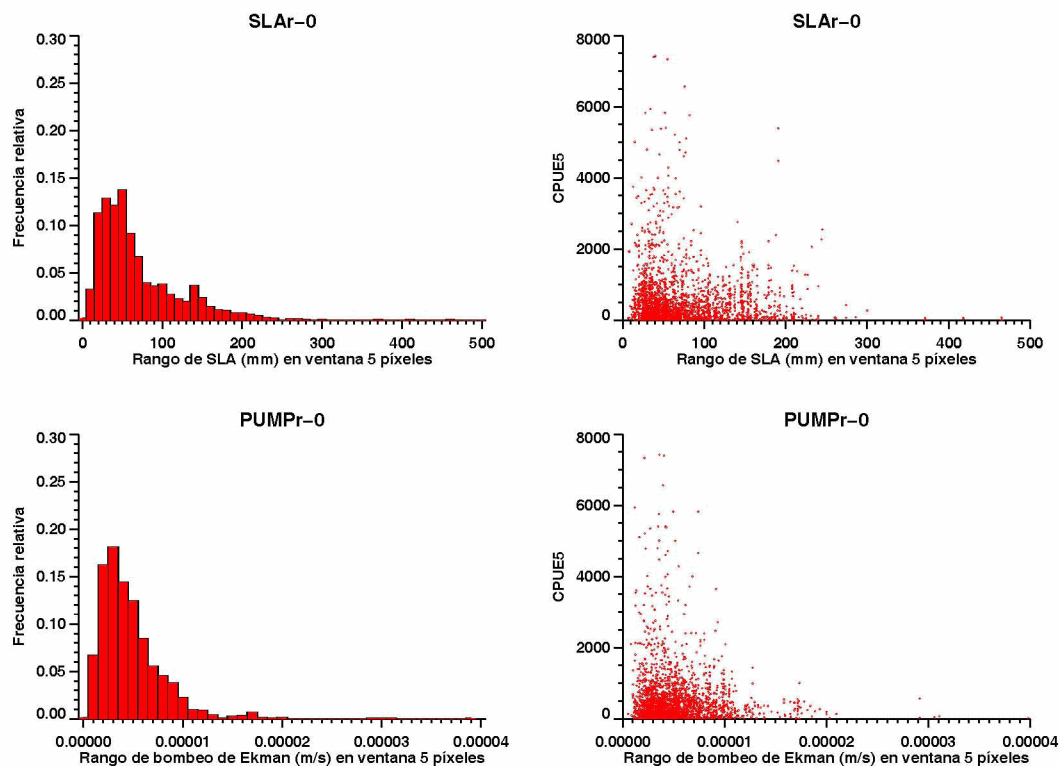
**Figura 24:** Histogramas de frecuencias y gráficos de dispersión para el rango de temperatura y clorofila en una ventana de 5 píxeles para el día de captura.

El histograma de frecuencias de las diferencias de concentración de clorofila-a en una ventana de 5 píxeles cuadrados permitió observar los mayores porcentajes en valores inferiores a  $0,5 \text{ mg/m}^3$  de diferencia entre el punto de captura y los píxeles más alejados del frente. En base a los gráficos se fijaron los tres rangos de valores: rango 1, entre  $0,1$  y  $0,2 \text{ mg/m}^3$ ; rango 2, entre  $0,2$  y  $0,4 \text{ mg/m}^3$ ; y rango 3, más de  $0,4 \text{ mg/m}^3$  (Figura 24).

En el histograma de frecuencias de las diferencias de bombeo de Ekman en una ventana de 5 píxeles cuadrados se apreció un máximo en valores entre  $2 \cdot 10^{-6}$  y  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ . Los valores decrecieron a ambos lados de este rango, mucho más bruscamente en los valores inferiores. El análisis de los gráficos permitió dividir el histograma en tres rangos: rango 1, entre  $2 \cdot 10^{-6}$  y  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ; rango 2, entre  $1 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  y entre  $6 \cdot 10^{-6}$  y  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ; y rango 3, más de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (Figura 25).

El histograma de frecuencias de las diferencias de anomalía del nivel del mar en una ventana de 5 píxeles cuadrados mostró que los mayores rendimientos correspondieron a ventanas con diferencias de anomalías ubicadas entre  $20$  y  $80 \text{ mm}$ . Los valores decrecieron a ambos lados de este rango, con un patrón similar al que se producía en el bombeo de Ekman. El análisis de los gráficos permitió obtener tres rangos de valores: rango 1, entre  $20$  y  $80 \text{ mm}$ ; rango 2, entre  $10$  y  $20 \text{ mm}$  y entre  $80$  y  $160 \text{ mm}$ ; y rango 3, más de  $160 \text{ mm}$  y menos de  $10 \text{ mm}$  (Figura 25).

En el histograma del operador de Sobel correspondiente a la temperatura superficial del mar se apreció que las mayores frecuencias de núcleos de captura se produjeron en áreas con valores ubicados entre  $0,2$  y  $2 \text{ }^\circ\text{C/píxel}$ . El gráfico de dispersión no permitió apreciar una tendencia clara. Los mayores rendimientos se produjeron sobre valores de  $0,3 \text{ }^\circ\text{C/píxel}$ , disminuyendo gradualmente a medida que aumentaba el valor del operador. En los gráficos se identificaron tres rangos de valores: rango 1, entre  $0,2$  y  $2 \text{ }^\circ\text{C/píxel}$ ; rango 2, entre  $2$  y  $4,5 \text{ }^\circ\text{C/píxel}$ ; y rango 3, más de  $4,5 \text{ }^\circ\text{C/píxel}$  (Figura 26).

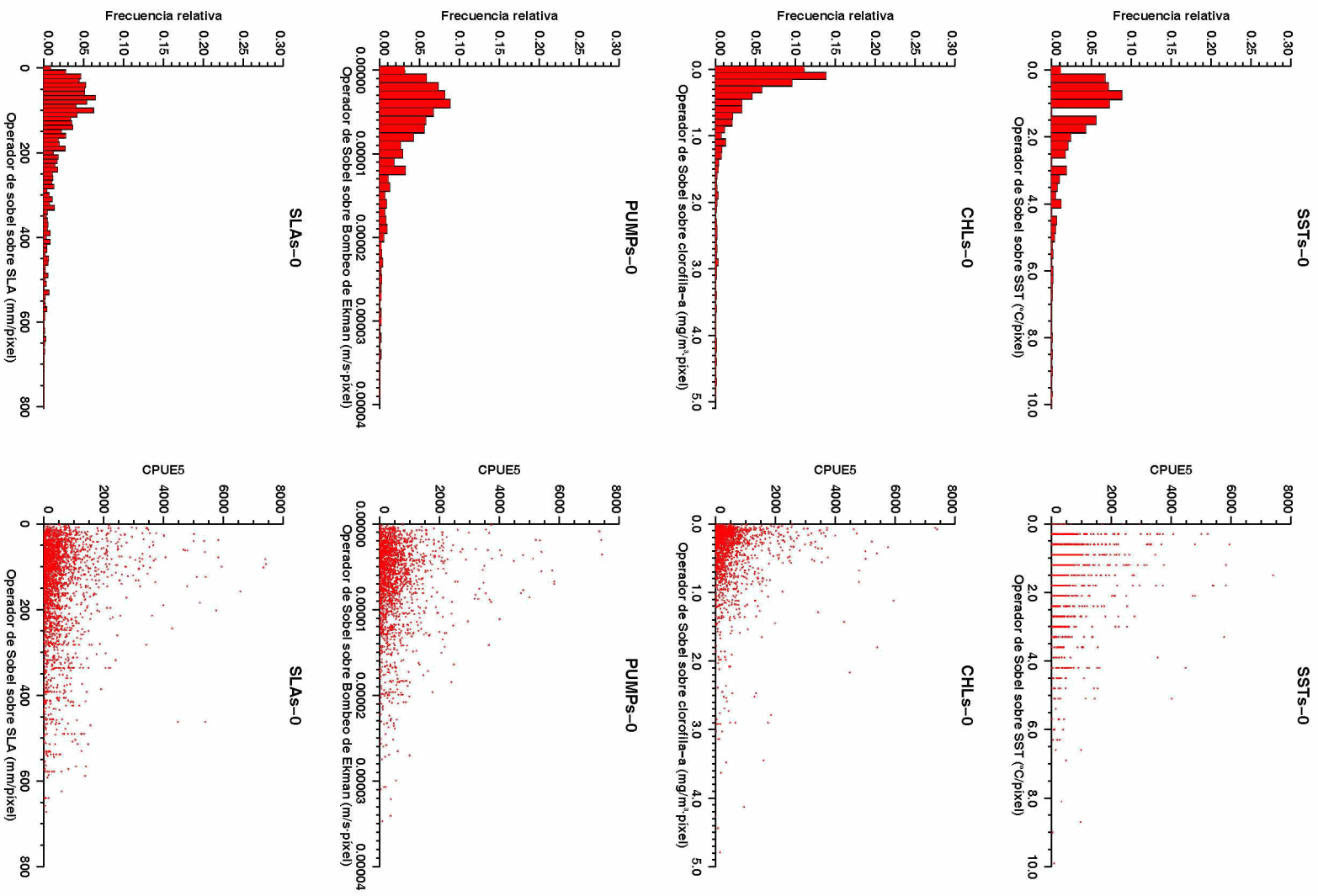


**Figura 25:** Histogramas de frecuencias y gráficos de dispersión para el rango de anomalía del nivel del mar y el bombeo de Ekman en una ventana de 5 píxeles para el día de captura.

El histograma del operador de Sobel sobre la concentración de clorofila-a mostró que las áreas de pesca más productivas se producían en rangos de valores muy pequeños, inferiores a  $0,5 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{píxel})$ . La frecuencia disminuía a medida que aumentaba la diferencia. El histograma permitió identificar tres niveles o rangos del operador de Sobel sobre concentración de clorofila-a: rango 1, de 0 a  $0,5 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{píxel})$ ; rango 2, de  $0,5$  a  $1,5 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{píxel})$ ; y rango 3, más de  $1,5 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{píxel})$  (Figura 26).

En el histograma de frecuencias del operador de Sobel sobre la anomalía del nivel del mar no se apreciaron valores modales pronunciados. Las mayores frecuencias se observaron en el rango entre 0 y  $190 \text{ mm}/\text{píxel}$ . En el diagrama de dispersión, el mayor número de rendimientos pesqueros elevados se concentraron alrededor de los valores bajos del operador. Ello permitió identificar tres rangos de valores: rango 1, entre 0 y  $190 \text{ mm}/\text{píxel}$ ; rango 2, entre  $190$  y  $410 \text{ mm}/\text{píxel}$ ; y rango 3, más de  $410 \text{ mm}/\text{píxel}$  (Figura 26).

En el histograma del operador de Sobel sobre el bombeo de Ekman se observó que el mayor número de registros de capturas significativas se realizaron en el intervalo entre  $1 \cdot 10^{-6}$  y  $8 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{píxel})$  y disminuían gradualmente hacia ambos lados de éste. El histograma permitió determinar tres rangos de valores: rango 1, entre  $1 \cdot 10^{-6}$  y  $8 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{píxel})$ ; rango 2, entre 0 y  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{píxel})$  y entre  $8 \cdot 10^{-6}$  y  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{píxel})$ ; y rango 3, más de  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{píxel})$  (Figura 26).



**Figura 26:** Histogramas de frecuencias y gráficos de dispersión del operador de Sobel sobre las variables de teledetección para el día de captura.

### 3.3 Correlaciones

Antes de obtener las correlaciones de Spearman entre todas las variables extraídas y la CPUE, la CPUE3 y la CPUE5, se realizó un análisis para identificar las posibles diferencias en la utilización de la CPUE en una coordenada concreta, la CPUE3 en una ventana de tres grados y la CPUE5 en una ventana de 5 grados. Los resultados mostraron que el coeficiente de correlación de Spearman entre la CPUE y la CPUE3 fue de 0,636, entre la CPUE y la CPUE5 de 0,607, y entre la CPUE3 y la CPUE5 de 0,942. Estos resultados demostraron que, a efectos del cálculo de las correlaciones de Spearman entre todas las variables y la CPUE, no se observaron diferencias significativas entre la utilización de la CPUE3 y la CPUE5, por lo que se obtuvo el mismo resultado al utilizar una u otra extracción de datos circundantes. Finalmente, se optó por la utilización de la variable CPUE5, puesto que presentó correlaciones mayores con el resto de las variables físicas extraídas alrededor del núcleo de captura. Además, la utilización de la CPUE5 mostró mejores resultados en los posteriores análisis multivariantes.

En general, las correlaciones entre la CPUE5 y las variables extraídas fueron significativas pero extremadamente bajas (Tabla 6). Las correlaciones correspondientes a la SLA y la SLAd fueron significativas, del orden de -0,2 y -0,3 respectivamente. Las correlaciones correspondientes al PUMPr, SLAr y SLAs fueron también significativas y presentaron valores de correlación comprendidos entre -0,1 y -0,2. La CHL, CHLs, CHL5d, CHL7d, SST5d, SST7d, PUMPd y PUMP mostraron coeficientes de correlación muy bajos, algunos estadísticamente no significativos. La variable SST mostró valores significativos que superaron un coeficiente de correlación de 0,1 en valor absoluto (positivas para los días 0 y +5 y negativa para el día -15). Las SSTs y PUMPs fueron significativas y algunos valores superaron un valor del coeficiente de correlación de Spearman de -0,1.

**Tabla 6:** Coeficientes de correlación de las variables extraídas frente a la CPUE5 (\* correlaciones no significativas).

CPUE5	Día -15	Día -10	Día -5	Día 0	Día +5
CHL	0,081	0,054	0,071	0,008*	0,045
SST	0,082	-0,027*	0,038*	0,102	0,137
PUMP	0,083	-0,005*	0,068	0,050	0,026*
SLA	0,084	-0,290	-0,277	-0,292	-0,263
CHL5d	0,085	0,004*	0,005*	-0,009*	0,049
CHL7d	0,086	-0,002*	0,011*	-0,010*	0,057
SST5d	0,087	-0,066	-0,040*	-0,074	-0,030*
SST7d	0,088	-0,087	-0,063	-0,084	-0,059
PUMPd	0,089	0,049	-0,049	-0,016*	0,015*
SLAd	0,090	-0,284	-0,248	-0,254	-0,234
PUMPr	0,091	-0,162	-0,135	-0,177	-0,126
SLAr	0,092	-0,123	-0,155	-0,205	-0,184
SSTs	0,093	-0,101	-0,104	-0,069	-0,078
CHLs	0,094	0,041*	0,028*	-0,010*	0,055
PUMPs	0,095	-0,137	-0,175	-0,128	-0,158
SLAs	0,096	-0,109	-0,141	-0,188	-0,159



Las correlaciones de Spearman entre las variables de cada grupo a diferentes lapsos de tiempo fueron elevadas. Sin embargo, el grupo de valores correspondientes al bombeo de Ekman (PUMP) mostró coeficientes de correlación muy bajos entre ellos, con registros inferiores a 0,1. El resto de grupos de variables mostró coeficientes de correlación de Spearman (en valor absoluto) elevados entre los diferentes lapsos de tiempo (Tabla 7).

El grupo de variables CHL presentó valores de correlación de Spearman comprendidos entre 0,7 y 0,8, las variables CHL5d y CHL7d entre 0,5 y 0,7, y las variables del grupo CHLs entre 0,5 y 0,6.

El grupo de variables SST presentó valores de correlación de Spearman comprendidos entre 0,8 y 0,9, las variables SST5d y SST7d entre 0,2 y 0,3, y las variables SSTs entre 0,1 y 0,25.

La SLA presentó valores de correlación de Spearman que variaron entre 0,7 y 0,9, las variables SLAd entre 0,5 y 0,8, las variables de la SLAr entre 0,6 y 0,8, y en unos pocos casos superiores, y las variables SLAs entre 0,5 y 0,8.

**Tabla 7:** Correlaciones para cada grupo de variables entre los diferentes lapsos de tiempo.

Grupo	Correlaciones
CHL	0,7-0,8
SST	0,8-0,9
PUMP	muy bajas
SLA	0,7-0,9
CHL5d	0,5-0,7
CHL7d	0,5-0,7
SST5d	0,2-0,3
SST7d	0,2-0,3
PUMPd	muy bajas
SLAd	0,5-0,8
PUMPPr	muy bajas
SLAr	0,6-0,8
SSTs	0,1-0,25
CHLs	0,5-0,6
PUMPs	muy bajas
SLAs	0,5-0,8

Describir todas las combinaciones posibles entre las diferentes variables de todos los grupos supondría extenderse mucho, habida cuenta del número de correlaciones a efectuar. Por ello, se decidió presentar solamente aquellas que presentaron niveles de correlación elevada.

Los rangos de correlación con los grupos SST5d y SSTd7 presentaron valores que oscilaron entre 0,8 y 0,9 y en algunos casos superiores (0,96).

En el caso de los grupos CHL5d y CHL7d se obtuvieron correlaciones elevadas del orden de 0,7 a 0,8, para los lapsos de tiempo coincidentes. Las correlaciones entre todas las variables que tenían relaciones significativas con la clorofila (CHL, CHLs, CHL5d y CHL7d) presentaron correlaciones entre 0,4 y 0,8 (siempre positivas).

Las correlaciones de las variables relativas a la SLA (SLA, SLAd, SLAr y SLAs) presentaron valores bastante dispares. Las correlaciones con la SLAr y SLAs fueron relativamente altas y superaron el valor de 0,8 para aquellos lapsos de tiempo coincidentes; sin embargo, las correlaciones con la SLA y la SLAd fueron del orden de 0,5.

Para las variables relacionadas con el bombeo de Ekman (PUMP, PUMPd, PUMPPr y PUMPs), las correlaciones fueron relativamente bajas, con valores entre -0,34 y 0,1, y en muchos de los casos igual a 0. Las variables PUMPs y PUMPPr fueron la excepción, debido a que en los lapsos de tiempo coincidentes las correlaciones entre ellas oscilaron entre 0,58 y 0,65.

Las correlaciones entre los grupos de variables derivadas de datos de satélites diferentes fueron bajas por lo general, aunque se observaron algunas excepciones. Los grupos de variables SST y SLAd a diferentes lapsos de tiempo presentaron correlaciones que oscilaron entre 0,4 y 0,7. Las variables SST y SLA a diferentes lapsos de tiempo presentaron correlaciones que oscilaron entre 0,28 y 0,56. Los grupos de variables SST y CHL a diferentes lapsos de tiempo presentaron correlaciones entre -0,33 y -0,5. Los grupos de variables CHL5d y CHL7d presentaron correlaciones negativas con el grupo de variables SST a diferentes lapsos de tiempo que variaban entre -0,25 y -0,42. Las correlaciones de Spearman entre los grupos SST y SLAr presentaron valores que variaron entre -0,28 y -0,42.

El análisis de las correlaciones fue utilizado posteriormente para el desarrollo de los métodos multivariantes que requerían evitar efectos de colinealidad. Para la generación de los modelos no se introdujeron simultáneamente en los tratamientos estadísticos variables explicativas con correlaciones entre sí superiores a 0,5.

### **3.4 Análisis factorial de correspondencias múltiples**

En el análisis de correspondencias múltiples se utilizaron las variables agrupadas en los tres rangos, siguiendo el análisis de los histogramas descritos en el apartado anterior. El análisis se efectuó relacionando las distintas variables obtenidas de datos de satélite con los rendimientos pesqueros realizados el día de captura (0), con el objeto de no sobrecargar el gráfico y hacerlo interpretable.

La Tabla 8 muestra las variables que presentaron un coeficiente de correlación superior a 0,5. Aquellas variables con coeficientes de correlación superiores a ese valor fueron eliminadas del análisis, por considerarse que aportaban información similar. La tercera columna de la tabla, denominada patrón, indica si las variables mostraron un comportamiento similar o diferente en los resultados del análisis a pesar de estar correlacionadas entre sí.

La Figura 27 presenta los resultados del análisis para las variables obtenidas de datos de satélites frente a las capturas correspondientes al mismo día de captura. En términos generales, el rango 3 de las distintas variables mostró cierta lejanía con respecto a las CPUE5 altas (rango 1), medias (rango 2) y bajas (rango 3), indicando con ello poca influencia sobre estas últimas. El rango 2 de las diferentes variables se situó cerca de las CPUE5 medias (rango 2). El rango 1 de las diferentes variables se situó, por lo general más cerca de las CPUE5 medias (rango 2).

**Tabla 8:** Correlaciones superiores a 0,5 para el día de captura y patrón que muestran sobre el gráfico (en color rojo las que se suprimen del análisis).

Variables	Correlaciones	Patrón
SLAd-0 – SST-0	0,570	diferente
CHLs-0 – CHL-0	0,647	similar
CHL5d-0 – CHL-0	0,705	diferente
SLAd-0 – SLA-0	0,688	diferente
SSTs-0 – SST5d-0	0,587	diferente
SLAs-0 – SLAr-0	0,824	similar
PUMPs-0 – PUMPPr-0	0,609	similar
CHLs-0 – CHL5d-0	0,758	similar

El rango 1 de SST presentó una relación con los rangos 2 y 3 de CPUE5; el rango 2 de SST también presentó relaciones con los rangos 2 y 3 de CPUE5, aunque menores que para el rango 1; el rango 3 de SST no mostró ninguna relación con la CPUE5. El rango 1 de SSTs presentó una mayor relación con el rango 2 de CPUE5; el rango 2 de SSTs se relacionó con los rangos 2 y 3 de CPUE5; el rango 3 de SSTs se relacionó con el rango 3 de CPUE5.

El rango 2 de CHL mostró relaciones significativas con el rango 2 de CPUE5; los rangos 1 y 3 de CHL no presentaron cercanías remarcables en el análisis de correspondencias.

El rango 1 de SLA fue la variable que mayor relación presentó con el rango 1 de CPUE5; el rango 2 de SLA se relacionó con el rango 3 de CPUE5; el rango 3 de SLA no mostró relación con ninguno de los rangos de CPUE5. El rango 1 de SLAs fue la única variable que presentó cierta relación con el rango 2 de CPUE5.

El rango 1 de PUMP mostró una relación muy significativa con el rango 2 de CPUE5; el rango 2 de PUMP se relacionó con el rango 2 de CPUE5; el rango 3 PUMP se relacionó con el rango 3 de CPUE5. Los tres rangos de PUMPd mostraron una relación significativa con el rango 2 de CPUE5. El rango 1 de PUMPs se relacionó significativamente con el rango 2 de CPUE5; el rango 2 se relacionó con los rangos 2 y 3 de CPUE5; el rango 3 no mostró ninguna relación con CPUE5.

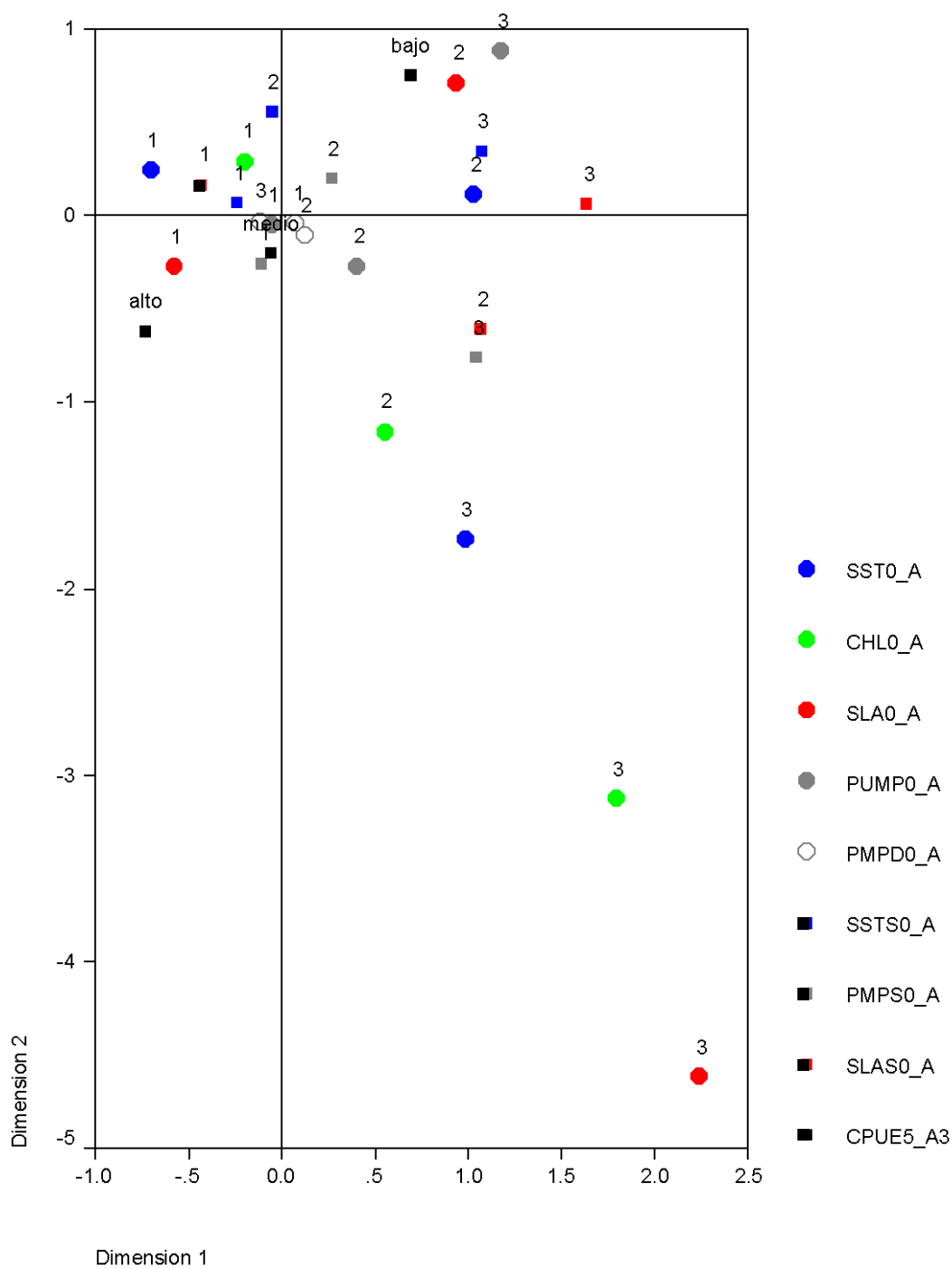


Figura 27: Resultado del análisis factorial de correspondencias HOMALS.

### 3.5 Regresión lineal

Los modelos de regresión lineal permitieron explicar un porcentaje importante de la CPUE5. En la generación de los modelos se partió de un gran número de variables; sin embargo, a la hora de introducirlas en los análisis, se consideró previamente la colinealidad que muchas de ellas presentaban, además de que se cumplieran los demás supuestos de la regresión lineal múltiple.

Para conseguir porcentajes de explicación altos se combinaron variables derivadas de variables de teledetección diferentes. Los niveles de explicación que se obtuvieron a partir de una única variable de teledetección fueron muy bajos. Así, por ejemplo, al utilizar variables derivadas de la temperatura superficial del mar se consiguieron coeficientes de regresión de 0,296; sin embargo, el resto de variables apenas llegó a 0,1.

Usando combinaciones de variables derivadas de dos tipos de datos originales de teledetección, y que no presentaran colinealidad y que cumplieran el resto de los supuestos de la regresión lineal, al utilizar los métodos de regresión lineal por pasos sucesivos se consiguieron porcentajes de explicación más altos. Así, al combinar variables derivadas de la temperatura superficial del mar y el bombeo de Ekman se alcanzaron coeficientes de regresión de 0,496 y al utilizar combinaciones múltiples de siete variables en lapsos temporales distintos derivadas de la temperatura superficial y de la anomalía del nivel del mar se alcanzaron niveles de regresión de 0,410. Asimismo, el modelo lineal que incluía variables derivadas de la temperatura superficial y de la concentración de clorofila-a en distintos lapsos temporales mostró niveles de explicación cercanos a 0,470 usando tres variables.

Para obtener varios modelos de regresión lineal similares y que alcanzaran niveles de regresión cercanos al 50 % que no incluyeran variables extraídas para 5 días después de la captura, esto es que permitieran su utilización en tiempo real, se utilizaron las variables derivadas de, al menos, tres tipos de variables originales obtenidas mediante técnicas de teledetección espacial. Entre los modelos lineales ensayados se optó por dos de ellos, el modelo 1 y el modelo 2.

El modelo 1 se formuló a partir de una constante y tres variables, cada una de las cuales correspondía a una variable original de teledetección (temperatura superficial del mar, concentración de clorofila-a y anomalía del nivel del mar). Con estas tres variables, el coeficiente de regresión corregido resultante fue de 0,444 (el modelo explicó el 44 % de la varianza de la CPUE5). El error estándar resultante de la estimación fue igual a 293,46 (Tabla 9):

$$CPUE5 = -1410,531 - 6,462 \cdot SLA0 + 96,710 \cdot SST0 + 806,252 \cdot CHL0$$

La sencillez del modelo 1 radicó en la utilización de una constante y de tres variables, todas ellas consideradas significativas a un nivel de significación inferior a 0,05, extraídas para el mismo día de captura y que correspondían al valor numérico de tres variables de teledetección obtenidos directamente de las escenas sin ninguna derivación. De las tres variables, la que más peso mostró sobre la CPUE5 fue la anomalía del nivel del mar el día de captura (SLA-0), con un coeficiente estandarizado

de -0,739, la segunda variable fue la temperatura superficial el día de captura (SST-0), con un coeficiente estandarizado de -0,458, y la tercera variable fue la concentración de clorofila-a el día de captura (CHL-0), con un coeficiente estandarizado de -0,254.

**Tabla 9:** Variables, coeficientes, errores y significación para el modelo 1 derivado de tres variables obtenidas mediante teledetección espacial (SLA-0, SST-0 y CHL-0).

Variables	Coeficientes sin estandarizar		Coeficientes estandarizados	t	Significación
	B	Error estándar	Beta		
Constante	-1410,531	453,535		-3,110	0,002
SLA-0	-6,462	0,898	-0,739	-7,199	0,000
SST-0	96,710	21,123	0,458	4,578	0,000
CHL-0	806,252	272,602	0,254	2,958	0,004

El modelo 2 utilizó una constante y cuatro variables derivadas de cada tipo de dato original obtenido mediante teledetección espacial. Este modelo explicó un 62 % de la varianza de la CPUE5 ( $R^2=0,623$  corregido). El error estándar resultante de la estimación fue de 305,70 (Tabla 10):

$$CPUE5 = -1363,914 - 6,637 \cdot SLA15 + 648,815 \cdot CHLs5 + 103,132 \cdot SST0 - 2,9 \cdot 10^7 \cdot PUMPr10$$

El modelo 2 destacó por el elevado porcentaje de explicación de la variabilidad de la CPUE5 (62 %) y se formuló a partir de una constante y cuatro variables, todas ellas significativas a un nivel de significación inferior a 0,05. Cada una de las cuatro variables se derivó de uno de los cuatro datos originales de teledetección de los que se disponía. La variable que más peso presentó fue la anomalía del nivel del mar 15 días antes del día de captura (SLA-15), con un coeficiente estandarizado de -0,686; la segunda variable en importancia sobre la CPUE5 fue la temperatura superficial del mar el día de captura (SST-0), con un coeficiente estandarizado de 0,387; la tercera variable fue el operador de Sobel sobre la clorofila-a 5 días antes del día de captura (CHLs-5), con una importancia relativa sobre la CPUE similar a la de SST-0, con un coeficiente estandarizado de 0,307; y la última variable del modelo fue el rango de bombeo de Ekman 10 días antes de la captura en una ventana de cinco píxeles (PUMPr-10), con un coeficiente estandarizado de -0,198.

**Tabla 10:** Variables, coeficientes, errores y significación para el modelo 2 obtenido a partir de cuatro variables obtenidas mediante teledetección espacial (SLA 15, CHL-5, SST-0 y PUMPr-10).

Variables	Coeficientes sin estandarizar		Coeficientes estandarizados	t	Significación
	B	Error estándar	Beta		
Constante	-1363,914	571,019		-2,389	0,021
SLA-15	-6,637	1,007	-0,686	-6,592	0,000
CHLs-5	648,815	207,837	0,307	3,122	0,003
SST-0	103,132	26,501	0,387	3,892	0,000
PUMPr-10	-2,9·10 <sup>7</sup>	1,3·10 <sup>7</sup>	-0,198	-2,235	0,030

Con respecto al modelo 1, el modelo 2 aumentó el grado de explicación de la CPUE en un 18 % al incluir una variable nueva, el bombeo de Ekman. Además, al comparar los modelos 1 y 2 se observó que la variable SST-0 estaba presente en ambas formulaciones, mientras que de la anomalía del nivel del mar se utilizaron solamente dos variables, SLA-0 y SLA-15. Algo similar ocurrió con la clorofila-a, pues mientras en el modelo 1 se utilizó la variable CHL-0, en el modelo 2 se utilizó CHLs-5.

En ambos modelos, la anomalía del nivel del mar presentó coeficientes estandarizados similares (aunque era mayor para el modelo 1). En el modelo 1, las variables ligadas a la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila tenían pesos diferentes, mayor para la temperatura; en el modelo 2, la diferencia entre las dos variables se reducía al disminuir el peso de la temperatura superficial y aumentar el de la clorofila-a. La variable ligada al bombeo de Ekman introducida en el modelo 2 tenía un peso claramente inferior a las demás.

### 3.6 Análisis discriminante

De los resultados obtenidos mediante el análisis discriminante se seleccionaron dos por su diferente capacidad de discriminación de los rangos de CPUE5.

El modelo 1 discriminante utilizó seis variables y una constante. Las variables fueron la temperatura el mismo día de captura (SST-0), la distancia al cambio de signo en la anomalía del nivel del mar diez días antes (SLAd-10), el operador de Sobel sobre la temperatura superficial del mar para el mismo día (SSTs-0), el operador de Sobel sobre el bombeo de Ekman para el mismo día (PUMPs-0), el operador de Sobel sobre la anomalía del nivel del mar cinco días antes (SLAs-5) y la distancia al cambio de signo en el bombeo de Ekman para el mismo día (PUMPd-0). Todas las variables fueron significativas a niveles inferiores a 0,001. Se trató de variables independientes cuyas correlaciones oscilaron entre 0,1 y 0,3, con un registro récord de 0,43. Los coeficientes de las funciones discriminantes para este modelo se detallan en la Tabla 11.

**Tabla 11:** Coeficientes de las funciones discriminantes de Fisher para el modelo 1.

CPUE5_A3	Alto	Medio	Bajo
PUMPd-0	3,606	3,586	3,959
PUMPs-0	768480,7	842854,5	815237,5
SLAd-10	-1,020	-0,950	-0,788
SST-0	6,990	6,670	6,318
SLAs-5	0,052	0,052	0,056
SSTs-0	2,486	2,312	2,258
Constante	-79,807	-73,920	-69,166

El valor de la lambda de Wilks para este modelo fue de 0,625, con un nivel de significación menor de 0,001, lo cual no indicó una alta capacidad de discriminación. La capacidad de clasificación global no fue muy elevada. En términos generales, el modelo 1 clasificó bien el 56,9 % de los casos, 56,4 % en el caso de la validación cruzada.

La primera función canónica discriminante explicó el 93,6 % de la varianza del modelo. Los coeficientes tipificados de esta función mostraron que la variable con más peso fue la distancia al cambio de signo de la anomalía del nivel del mar diez días antes, seguido de la temperatura superficial el día de captura, el operador de Sobel sobre la anomalía del nivel del mar cinco días antes, el operador de Sobel sobre la temperatura superficial del mar el día de captura y la distancia al cambio de signo en el bombeo de Ekman para el día de captura (Tabla 12).

La segunda función canónica discriminante explicó únicamente el 6,4 % de la varianza del modelo. Para esta función, el coeficiente tipificado tuvo el mayor peso para el operador de Sobel sobre el bombeo de Ekman el día de captura, seguido de la temperatura superficial el día de captura. El resto de variables presentaron pesos parecidos. Las correlaciones canónicas para el primer y segundo autovalor fueron 0,593 y 0,189, respectivamente, indicando la mayor capacidad de discriminación entre los grupos de la primera función frente a la segunda.

**Tabla 12:** Coeficientes tipificados de las funciones canónicas discriminantes para el primer análisis.

Función	1	2
PUMPd-0	0,157	0,245
PUMPs-0	0,084	-0,649
SLAd-10	1,170	0,217
SST-0	-0,889	0,501
SLAs-5	0,298	0,314
SSTs-0	-0,141	0,277

El contraste de las funciones canónicas discriminantes permitió obtener un valor de lambda de Wilks de 0,625 para la primera función y de 0,964 para la segunda (significación menor de 0,01 para ambas). Aunque fue elevado para ambas, sobre todo para la segunda, el nivel de significación permitió rechazar los grupos comparados que tenían promedios iguales en las dos variables discriminantes.

En la Tabla 13 se muestran los resultados de la clasificación por grupos. Este modelo destacó por su sensibilidad para discriminar las CPUE5 bajas aplicando las funciones discriminantes. Para la validación cruzada, el 66,9 % de las CPUE5 que eran bajas las clasificó como bajas, el 25,4 % como medias y solo el 7,7 % como altas. Por tanto, fue posible obtener funciones discriminantes que, a partir de las variables extraídas, permitieron clasificar bastante bien las áreas donde los rendimientos obtenidos eran potencialmente altos o bajos. El número de variables que utilizó fue ligeramente elevado y el problema residió en la mala clasificación de los valores medios.

El modelo 2 discriminante utilizó cuatro variables y una constante. Las variables utilizadas fueron el bombeo de Ekman diez días antes (PUMP-10), la distancia al cambio de signo en la anomalía del nivel del mar diez días antes (SLAd-10), el operador de Sobel sobre la temperatura superficial del mar quince días antes (SSTs-15) y el operador de Sobel sobre el bombeo de Ekman diez días antes del día de captura (PUMPd-10). Todas las variables fueron significativas a niveles inferiores a 0,01. Se trató de variables independientes, puesto que las correlaciones entre ellas, salvo un caso



en el que la correlación alcanzó un valor de 0,192, fueron prácticamente cero. En la Tabla 14 se describen los coeficientes de las funciones discriminantes de Fisher.

**Tabla 13:** Resultados de la clasificación para el modelo 1.

Original		Clasificación				
Original	Casos	CPUE5_A3	Alto	Medio	Bajo	Total
		Alto	222	59	26	37
	Medio	139	120	82	341	
	Bajo	36	95	235	366	
%	Alto	72,3	19,2	8,5	100	
	Medio	40,8	35,2	24,0	100	
	Bajo	9,8	26,0	64,2	100	
Validación cruzada	Casos	Alto	222	59	26	307
		Medio	141	116	84	341
	Bajo	36	96	234	366	
%	Alto	72,3	19,2	8,5	100	
	Medio	41,3	34,0	24,6	100	
	Bajo	9,8	26,2	63,9	100	

**Tabla 14:** Coeficientes de las funciones discriminantes de Fisher para el modelo 2 discriminante.

CPUE5_A3	Alto	Medio	Bajo
PUMP-10	-539441,5237	1206775,2280	-109755,3637
SLAd-10	-0,0073	0,0886	0,2588
SSTs-15	0,8138	0,2358	1,638
PUMPs-10	153430,1018	516938,9646	309285,4084
Constante	-2,0449	-3,9735	-8,4520

Globalmente, el modelo 2 clasificó peor que el primero (44,7 % de los casos para la validación cruzada), y el valor de la lambda de Wilks fue más bajo, igual a 0,245 (nivel de significación menor de 0,01).

La primera función canónica discriminante explicó el 72,4 % de la varianza y sus coeficientes tipificados para SSTs-15 (0,386) y para SLAd-10 (0,773) fueron mucho mayores que los de PUMP-10 (-0,027) y los de PUMPs-10 (0,083).

La segunda función canónica discriminante explicó únicamente el 27,6 % de la varianza y los coeficientes tipificados para PUMP-10 (0,984) y PUMPs-10 (0,900) fueron mayores que los obtenidos para SLAd-10 (0,232) y SSTs-15 (-0,478). Las correlaciones canónicas para el primer y segundo autovalor fueron de 0,781 y 0,611 respectivamente, lo cual indicó que las funciones tenían capacidad de discriminación entre grupos.

El contraste de las funciones canónicas discriminantes permitió obtener un valor de lambda de Wilks de 0,245 para la primera función y de 0,627 para la segunda (significación menor de 0,01 para ambas). Aunque la lambda de Wilks fue algo elevada

para la segunda función, el nivel de significación permitió rechazar la hipótesis de que los grupos comparados tenían promedios iguales en las dos variables discriminantes.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de la clasificación por grupos. El aspecto más interesante de los resultados fue la capacidad que mostraron las funciones discriminantes de Fisher para clasificar las CPUE5 altas. Para la validación cruzada clasificaron el 81,1 % de las CPUE5 altas como altas, el 16,9 % de las CPUE5 altas como medias y el 2 % de las CPUE5 altas como bajas.

**Tabla 15:** Resultados de la clasificación para el modelo 2.

Original		Clasificación					
Original	Casos	CPUE5_A3	Alto	Medio	Bajo	Total	
		Alto	212	42	0	254	
	Medio	194	100	24	318		
	Bajo	122	59	93	274		
%		Alto	83,46	16,54	0,0	100	
		Medio	61,01	31,47	7,55	100	
		Bajo	44,53	21,53	33,94	100	
Validación cruzada	Casos	Alto	206	43	5	254	
		Medio	196	91	31	318	
		Bajo	127	66	81	274	
	%		Alto	81,10	16,93	1,97	100
			Medio	61,64	28,61	9,75	100
			Bajo	46,35	24,09	29,56	100

Desde un punto de vista práctico, el resultado fue sumamente interesante, porque si bien la capacidad de clasificación global fue baja, el modelo permitió discriminar bien áreas de CPUE5 elevadas. Las funciones clasificaron como altas únicamente un 2 % de los casos correspondientes a CPUE5 que eran realmente bajas. Cabe resaltar que este grado de clasificación se obtuvo mediante el uso de un número relativamente reducido de variables (cuatro). Llamó la atención que todas las variables correspondían a periodos de 10 y 15 días antes del día de captura. Dos de las variables se derivaron del bombeo de Ekman (el valor directo y el operador de Sobel), otra de la temperatura superficial del mar (el operador de Sobel) y otra de la anomalía del nivel del mar (la distancia al cambio de signo). No se incluyó ninguna de las funciones discriminantes derivadas de las variables relacionadas con la concentración de clorofila-a.

### 3.7 Regresión logística binaria

El método de selección de variables utilizado para la regresión logística binaria fué la razón de verosimilitudes. La variable CPUE5 fue considerada como dependiente, para lo cual se agrupó en dos rangos, altos y bajos. El valor de corte de la probabilidad se mantuvo en 0,5, correspondiente a la agrupación real de las CPUE5.

Después de 12 iteraciones, se consiguió un modelo 1 que clasificó correctamente el 83,5 % de las CPUE5 altas (grupo 1) y bien el 64,4 de las CPUE5 bajas (grupo 2)

(Tabla 16). El principal resultado fue que el sistema clasificó bastante bien las zonas que se correspondían con las CPUE5 altas, justo las áreas que interesaba identificar. Los resultados fueron peores en la clasificación de las CPUE5 bajas.

**Tabla 16:** Clasificación de la variable CPUE5 agrupada en dos del modelo 1 de regresión logística (iteración 12).

		Pronosticado		% Correcto
		1	2	
Observado	1	136	29	83,5
	2	65	125	64,4
% Global				73,5

En la Tabla 17 se muestran los resultados del modelo en la iteración 12. Éste constó de tres variables y una constante, todas significativas a un nivel de significación menor del 0,05. Las variables utilizadas fueron la temperatura superficial el mismo día de captura (SST-0), la distancia al cambio de signo en anomalía del nivel del mar quince días antes (SLAd-15) y el rango de la anomalía del nivel del mar en una ventana de cinco píxeles el día de captura (SLAr-0). Fue un modelo sencillo que utilizó únicamente tres variables derivadas de dos variables de teledetección, la anomalía del nivel del mar y la temperatura superficial. No se incluyó en la clasificación ninguna variable relacionada con el bombeo de Ekman o con la clorofila-a. Según los coeficientes (B) resultantes y su razón de las ventajas (Exp(B)), un aumento de SST-0 producía una disminución de la probabilidad de CPUE5 altas; sin embargo, un aumento de SLAd-15 y de SLAr-0 generaba el efecto contrario, aumentando la probabilidad de CPUE5 altas.

**Tabla 17:** Variables, coeficientes y estadísticos del modelo de regresión logística (iteración 12).

Variables	B	S.E.	Wald	Df	Sig.	Exp(B)
SST-0	-0,265	0,073	13,211	1	0,000	0,767
SLAd-15	0,196	0,042	22,893	1	0,000	1,216
SLAr-0	0,015	0,004	14,063	1	0,000	1,015
Constante	3,425	1,512	5,133	1	0,023	30,723

Para obtener la probabilidad de clasificación se construyó la ecuación logística utilizando los coeficientes y la constante resultantes del modelo:

$$\text{Pr} = \frac{1}{1 + e^{-(3,425 - 0,265 \cdot \text{SST}0 + 0,196 \cdot \text{SLAd}15 + 0,015 \cdot \text{SLAr}0)}} .$$

Cuando el resultado de la ecuación fue menor de 0,5 las CPUE5 se consideraron altas (grupo 1) y cuando fue mayor de 0,5 se consideraron bajas (grupo 2).

Además del modelo 1, se obtuvo un modelo 2 que después de 8 iteraciones clasificó correctamente el 86,2 % de las CPUE5 altas (grupo 1) y bien el 80,5 de las

CPUE5 bajas (grupo 2) (Tabla 18). El inconveniente de este modelo radicó en el uso del doble de variables (6 en total) que el modelo anterior.

**Tabla 18:** Clasificación de la variable CPUE5 agrupada en dos del modelo 2 de regresión logística (iteración 8).

		Pronosticado		% Correcto
		1	2	
Observado	1	50	8	86,4
	2	8	33	80,5
% Global				83,8

La Tabla 19 muestra los resultados del modelo en el paso iterativo 8. El modelo presentó seis variables y una constante, todas significativas a un nivel de significación inferior a 0,05. Las variables que utilizó el modelo fueron la temperatura (SST-0), la concentración de clorofila-a (CHL-0), la anomalía del nivel del mar (SLA-0), el operador de Sobel sobre la clorofila-a (CHLs-0) y el operador de Sobel sobre la anomalía del nivel del mar (SLAs-0), todas el mismo día de captura. Además, el modelo incluyó la distancia al cambio de signo de bombeo de Ekman quince días antes (PUMPd-15). Según los coeficientes (B) resultantes y su razón de las ventajas (Exp(B)) un aumento de SST-0, CHL-0 y PUMPd-15 generaba un aumento de la probabilidad de CPUE5 alta; sin embargo, un aumento de SLAs-0, SLA-0 y CHLs-0 producía una disminución de dicha probabilidad de CPUE5 alta.

**Tabla 19:** Variables, coeficientes y estadísticos del modelo 2 de regresión logística (iteración 8).

Variables	B	S.E.	Wald	Df	Sig.	Exp(B)
SST-0	0,593	0,267	4,942	1	0,026	1,809
CHL-0	9,062	3,860	5,512	1	0,019	8623,5
SLA-0	-0,048	0,011	18,753	1	0,000	0,953
PUMPd-15	0,973	0,462	4,432	1	0,035	2,645
CHLs-0	-1,073	0,891	1,452	1	0,023	0,342
SLAs-0	-0,008	0,005	3,205	1	0,037	0,992
Constante	-13.252	5,962	4,941	1	0,026	0,000

Para obtener la probabilidad de clasificación se construyó una ecuación logística usando los coeficientes y la constante resultantes del modelo:

$$Pr = \frac{1}{1 + e^{-(-13,252 + 0,593 \cdot SST0 + 9,062 \cdot CHL0 - 0,048 \cdot SLA0 + 0,973 \cdot PUMPd15) - 1,073 \cdot CHLs0 - 0,008 \cdot SLAs0}}$$

Cuando el resultado de la ecuación fue menor de 0,5 las CPUE5 se consideraron altas (grupo 1) y cuando fue mayor de 0,5 se consideraron bajas (grupo 2).

### 3.8 Mapas de probabilidad

Los modelos empleados para generar los mapas de probabilidad fueron los dos de regresión lineal, los dos de análisis discriminante y los dos de regresión logística.

En los modelos de regresión logística, los mapas de probabilidad se generaron utilizando dos puntos de corte en la probabilidad de alta o baja. El primer punto de corte se localizó en el valor 0,5 que marcaba el análisis directamente y el segundo en 0,75, más exigente para las CPUE altas. Al subir el valor de corte se limitó el error que se producía al obtener zonas de probabilidad alta cuando realmente eran de probabilidad baja y, lo contrario, clasificar como de probabilidad baja aquellas zonas que eran de probabilidad alta.

En el caso de la regresión lineal, la agrupación de los tres niveles se realizó siguiendo dos procedimientos. En el primero se asignaron los intervalos de CPUE alta, media o baja según los valores obtenidos en la agrupación realizada para el análisis discriminante. Valores mayores de 720 fueron asignados a una CPUE alta, valores en el intervalo 320–720 fueron asignados a una CPUE media y valores menores de 320 fueron asignados a una CPUE baja. Debido al error estándar de las estimaciones de los modelos lineales, 293,46 para el primero y 305,70 para el segundo, se incrementaron los rangos de las agrupaciones. Los valores mayores de 1000 se consideraron de CPUE alta, los valores entre 500 y 1000 se consideraron de CPUE media y los valores menores de 500 se consideraron de CPUE baja. Las figuras a las que se hace referencia en este apartado se encuentran en el Anexo II: Mapas de probabilidad.

En la comparación entre las varianzas de las variables extraídas al azar y las extraídas en los puntos de captura mediante la prueba de Levene se obtuvo como resultado que, únicamente, 15 de las 82 variables extraídas tenían varianzas iguales en ambos casos. La comparación de medias mediante la prueba de Mann-Whitney mostró que 21 de las 82 variables presentaban medias iguales. Sólo ocho variables presentaron medias y varianzas iguales, concretamente SST-10, SST-5, PUMP-15, SST5d-0, SST5d\_5, SST7d\_5, PUMP-15 y SSTs-10. Ninguna de estas variables fue incluida en los modelos multivariantes utilizados. La generación de los mapas de probabilidad mejoró al excluirse las áreas en las que los valores quedaban fuera de los rangos de los histogramas de frecuencia para los puntos de captura.

Si se toma como ejemplo el modelo 1 de regresión lineal descrito en la sección 3.5 pueden verse los problemas derivados de incluir todos los píxeles en la generación de los mapas de probabilidad. Este modelo utilizó tres variables correspondientes al día de captura. La primera variable fue la temperatura superficial del mar, que presentó un coeficiente positivo, la segunda fue la anomalía del nivel del mar, que presentó un coeficiente negativo, y la tercera fue la concentración de clorofila-a, que presentó un coeficiente positivo. Un aumento de la temperatura superficial del mar produjo un aumento de la captura pronosticada, resultado bastante razonable para los valores y la localización geográfica de la pesquería. Con valores negativos de la anomalía del nivel del mar aumentó la captura pronosticada, no produciéndose capturas sobre valores de anomalía del nivel del mar muy negativos aunque sí se presentaban en el conjunto del área perturbando el resultado del modelo. Las capturas se produjeron sobre valores de clorofila-a que oscilaban entre 0,1 y 0,8 mg/m<sup>3</sup>. El coeficiente de la clorofila-a fue positivo, por lo que en áreas con concentraciones elevadas (por ejemplo, en

afloramientos) producían pronósticos elevados, aunque a esos niveles de clorofila-a ( $> 0,8 \text{ mg/m}^3$ ) no se encuentre el atún blanco (Laurs *et al.*, 1984). La solución consistía en evitar los valores más allá de los márgenes de los histogramas de capturas reales de atún blanco sobre cada dato original de teledetección, eliminando de los mapas de probabilidad aquellos píxeles con valores sobre los que no se producían capturas de atún blanco.

### **3.8.1 Primer modelo de regresión lineal**

Los resultados derivados del primer modelo de regresión lineal descrito en la sección 3.5, con límites de CPUE descritos en la sección 3.2 entre bajo ( $<320$ ), medio ( $320-720$ ) y alto ( $>720$ ), generó áreas de probabilidad de captura alta y media cuya coincidencia con los puntos de captura fue relativamente buena. Sin embargo, el nivel de explicación de este modelo no llegó al 50 %. La exclusión de los valores fuera de rango de los mapas evitó tener valores elevados de captura en periodos en los que no se producían, como por ejemplo en marzo de 2000 (figuras Anexo II desde la AII-1 a AII-4). En los meses de enero y febrero, los mapas resultantes fueron coherentes, ya que los pronósticos disminuían de sur a norte y de oeste a este. Esta disminución progresiva permitió encontrar valores fuera de rango para ese periodo. En mayo aparecieron probabilidades altas y medias en el Mediterráneo desarrollándose núcleos de probabilidad media en el golfo de Vizcaya a finales del mes.

En julio de 1999 se pronosticaron rendimientos altos y medios en la zona del golfo de Vizcaya. Las áreas exteriores, sin embargo, presentaron rendimientos bajos; mientras que las capturas se dispusieron sobre los pronósticos altos y medios. La franja fuera de rango era muy ancha y separaba las Azores y las Canarias. En el Mediterráneo se encontraron pequeños núcleos de probabilidad alta en el golfo de León y en el mar de Alborán, al igual que al norte de las islas Canarias. A principios del mes de agosto de 1999 aumentaron las áreas de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya. Estas áreas se fueron extendiendo y desplazando hacia el oeste a medida que avanzaba el mes. A finales de mes, todas las áreas de alta probabilidad se localizaron en la ventana occidental al golfo de Vizcaya, al noroeste del afloramiento gallego, desapareciendo del área interior del golfo. El mes de septiembre de 1999 se mantuvo la franja de valores fuera de rango. Los pronósticos descendieron a medida que avanzó el otoño en el Atlántico nororiental, pasándose de probabilidades altas y medias a probabilidades bajas y fuera de rango. Las pocas capturas disponibles se generaron sobre las reducidas áreas de probabilidad alta y media. Esta reducción de probabilidad en el Atlántico nororiental coincidió con un ligero aumento de la probabilidad en el Mediterráneo occidental. Los rendimientos fueron bajos y se produjeron entre el archipiélago de las Baleares y la península Ibérica, en áreas de probabilidad media. También aparecieron núcleos de probabilidad alta al noreste del archipiélago Chinijo, en Lanzarote, coincidiendo con el aumento de los rendimientos en el Mediterráneo occidental.

En el mes de junio de 2000, la probabilidad aumentó progresivamente y se fue adentrando en el golfo de Vizcaya. Algunas capturas se produjeron sobre valores fuera de rango en frentes muy marcados, sobre áreas de pronóstico de probabilidad alta y media. En julio de 2000, la probabilidad alta y la probabilidad media aumentaron en el golfo de Vizcaya, concentrando rendimientos pesqueros elevados. En el mes de agosto de 2000, las capturas se produjeron fundamentalmente en dos núcleos de pesca con

elevados rendimientos; el primero se localizó al noroeste, en la latitud de Brest, y el segundo más al sur, al noroeste del cabo Finisterre. En general, todos ellos se dispusieron sobre pronósticos de probabilidad alta y media, con la salvedad de los primeros días del mes que presentaron capturas significativas en áreas de probabilidad baja del golfo de Vizcaya exterior. En el mes de septiembre de 2000, los pronósticos de probabilidad disminuyeron. Los pronósticos de probabilidad baja y fuera de rango fueron extendiéndose, pero las escasas capturas se dispusieron en áreas de pronóstico alto y medio. En octubre de 2000, las probabilidades siguieron disminuyendo y extendiéndose geográficamente. Los rendimientos se desplazaron hacia el sur y el Mediterráneo (norte de las Baleares), donde los pronósticos eran de probabilidad media y baja.

El mes de junio de 2001 comenzó con una gran variabilidad geográfica de pronósticos de probabilidad alta, media, baja y valores fuera de rango. En general, los mejores rendimientos se produjeron sobre áreas de probabilidad alta y media. A medida que avanzó el mes, las capturas más significativas y los mejores pronósticos se acercaron progresivamente al interior del golfo de Vizcaya. El mes de julio de 2001, la franja de valores fuera de rango al sur del afloramiento gallego apareció muy marcada, acumulando los rendimientos más significativos y los mejores pronósticos en el interior del golfo de Vizcaya, en áreas de probabilidad alta. Al comparar el mes de agosto de 2001 con el mes de agosto de los años 1999 y 2000 se observó que fue el peor en rendimientos pesqueros de la serie, predominando los pronósticos de probabilidad baja. Las capturas se localizaron en el golfo de Vizcaya, sobre pronósticos de probabilidad alta y media. En el mes de septiembre de 2001 el pronóstico fue pésimo, con capturas poco significativas en el Mediterráneo occidental sobre áreas de probabilidad baja (no se dio ningún área de probabilidad alta). En octubre de 2001 continuó disminuyendo el pronóstico y aumentando los valores fuera de rango. En el Mediterráneo occidental, al noreste de las Baleares, se produjeron algunas capturas poco significativas sobre áreas de probabilidad baja derivadas del modelo. En Canarias se produjeron algunas capturas aisladas sobre un bolsillo de probabilidad alta al noreste de Lanzarote.

En general, los pronósticos coincidieron con los puntos de captura reales (junio y julio de 2000 o junio de 2001, Figuras de AII-5 a AII-12). En periodos en que no se produjeron capturas significativas también apareció en los mapas un gran número de valores fuera de rango (Figuras de AII-13 a AII-16). El primer modelo de regresión lineal con los límites establecidos de bajo (<500), medio (500–1000) y alto (>1000) redujo las áreas de probabilidad de captura alta y media, manteniendo bastante coherencia con los puntos de captura reales.

### 3.8.2 Segundo modelo de regresión lineal

El segundo modelo de regresión lineal descrito en la sección 3.5 tiene un nivel de explicación de la captura sensiblemente mayor que el primero (62 %). El modelo utilizó cuatro variables, la temperatura superficial del mar el día de captura, la anomalía del nivel del mar quince días antes, el operador de Sobel sobre la concentración de clorofila-a cinco días antes y el rango de bombeo en una ventana de cinco píxeles diez días antes. El modelo generó soluciones que coincidieron mejor que el primer modelo con las áreas de captura reales. Los valores altos y medios fueron demasiado frecuentes,

si bien fueron menores que los del modelo anterior. En las soluciones de pronóstico bajo fueron, sin embargo, muy parecidos a los del modelo anterior.

El mes de julio de 1999, no se obtuvieron pronósticos debido a que el modelo utilizó el rango de bombeo de Ekman diez días antes y el dispersómetro de viento fue lanzado ese mes, de tal manera que el primer fichero disponible de bombeo correspondió al 23 de julio de 1999. El mes de agosto de 1999 comenzó con muy buenos rendimientos en el golfo de Vizcaya sobre pronósticos medios y altos. En septiembre de 1999, las capturas más significativas se generaron en el golfo de Vizcaya, en áreas donde el modelo obtuvo pronósticos de probabilidad alta que fueron disminuyendo progresivamente a medida que avanzaba el mes. En el Mediterráneo se presentaron algunos rendimientos pesqueros poco significativos cercanos a zonas con salidas del modelo de probabilidad media. En octubre de 1999, los pronósticos de probabilidad se redujeron drásticamente (predominio de la probabilidad baja), reduciéndose aún más a medida que avanzó el mes. En el Mediterráneo occidental se apreciaron capturas bajas sobre áreas de pronóstico bajo.

En la primera quincena del mes de julio de 2000, las capturas de atún blanco en el golfo de Vizcaya coincidieron en las áreas con pronósticos de probabilidad alta y media. En el Mediterráneo occidental, los pronósticos fueron de probabilidad alta a principios del mes, descendiendo a medida que transcurrían los días. El mes de agosto de 2000 mantuvo la misma tónica del mes anterior en el Cantábrico. En el Mediterráneo occidental aparecieron núcleos de probabilidad alta en el mar de Alborán y en el golfo de León. Los escasos rendimientos pesqueros obtenidos en el golfo de Vizcaya en septiembre de 2000 se localizaron en áreas de probabilidad alta. En el Mediterráneo occidental se obtuvieron rendimientos pesqueros significativos sobre áreas de probabilidad alta. En octubre de 2000, los mapas derivados de este modelo dieron lugar a pronósticos de probabilidad baja. En el Mediterráneo occidental se obtuvieron algunas capturas de atún blanco en áreas de probabilidad baja al nordeste de las islas Baleares.

En junio de 2001 aumentaron las áreas con pronóstico de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya. A principios de mes se apreció una buena relación entre las capturas de atún blanco y las áreas de pronóstico de probabilidad alta. Durante todo el mes también se obtuvieron soluciones del segundo modelo de regresión lineal de pronóstico de probabilidad alta en el Mediterráneo occidental. En julio de 2001, los mapas de pronóstico presentaron extensas áreas de valores fuera de rango. A principios de mes, los días 1, 2 y 3 de julio, se apreciaron capturas elevadas en aguas exteriores, sobre áreas con pronóstico bajo pero cercanas a zonas con pronóstico alto y medio. En el golfo de Vizcaya, sin embargo, se apreció que las capturas se ubicaban en áreas de pronóstico alto. En agosto de 2001, las capturas en el golfo de Vizcaya coincidieron con áreas de probabilidad alta. El Mediterráneo occidental, sin embargo, presentó valores de pronóstico fuera de rango, salvo algunos núcleos aislados que hicieron que los rendimientos fueran escasos. En el mes de septiembre de 2001, los pronósticos de probabilidad descendieron en el golfo de Vizcaya; sin embargo, los rendimientos altos se distribuyeron sobre áreas de pronóstico de probabilidad alta. Durante el mes de octubre de 2001 descendieron las áreas de probabilidad alta en el Mediterráneo y en el Atlántico nororiental. En el Mediterráneo occidental se generaron algunos rendimientos pesqueros significativos sobre áreas de probabilidad baja al noreste de las islas Baleares. Los únicos rendimientos significativos se localizaron al noreste de Lanzarote, sobre un área de probabilidad alta (Figuras AII-17 a AII-32).



El aumento en el valor de corte entre probabilidades en el segundo modelo de regresión lineal generó efectos similares a los del primer modelo. Se mantuvo la coherencia entre las áreas de pronóstico alto y la abundancia de puntos de captura, con la salvedad de que era más restrictivo a la hora de establecer áreas de pronóstico elevado.

### 3.8.3 Primer modelo de análisis discriminante

Para la generación de mapas de probabilidad a partir de las soluciones del análisis discriminante se implementaron los dos modelos descritos en la sección 3.6. El número de variables utilizadas y las características de éstas hicieron más difícil su interpretación.

El primer modelo descrito en la sección 3.6 utilizó seis variables. Ello derivó en la obtención de soluciones de pronóstico de probabilidad con un número elevado de valores perdidos. El problema que presentó este modelo es que clasificaba mal los valores de pronóstico medio, debido a que muchos de ellos fueron asignados al rango de capturas elevadas.

El mes de julio de 1999 se observaron muchas ventanas geográficas con pronóstico de probabilidad alta, coincidentes con las áreas de pesca más significativas, tanto en el Atlántico nororiental como en el Mediterráneo oriental (golfo de León). En agosto de 1999, la situación en el Cantábrico fue similar al mes anterior, con áreas de pronóstico de probabilidad alta coincidentes con buenos rendimientos pesqueros. Mientras, en el Mediterráneo occidental, las áreas de probabilidad alta fueron reduciéndose en extensión y los pronósticos obtenidos del modelo indicaron núcleos de probabilidad exclusivamente baja. Los mapas correspondientes al mes de septiembre de 1999 presentaron muchas áreas de pronóstico fuera de rango, sobre todo a finales del mes. Los rendimientos pesqueros, poco numerosos, se dispusieron sobre áreas de probabilidad alta; sin embargo, a medida que avanzaba el mes, los pronósticos de probabilidad fueron descendiendo significativamente. Las capturas que se realizaron en el Mediterráneo occidental fueron poco significativas y se distribuyeron sobre valores fuera de rango cercanos a áreas de probabilidad baja. En el mes de octubre de 1999, las probabilidades de pesca de atún blanco en el Cantábrico siguieron descendiendo, con muchas áreas de valores fuera de rango. En el Mediterráneo occidental, sin embargo, los núcleos de probabilidad media fueron aumentando en extensión y en intensidad. Los rendimientos fueron muy variables en biomasa y se produjeron en zonas con probabilidades altas y medias.

Durante los primeros meses del año 2000, en los cuales no se produjeron capturas, se observó un comportamiento coherente de los mapas de probabilidad en cuanto a la gradación latitudinal de los pronósticos de probabilidad y los valores fuera de rango. A finales de mayo de 2000, el modelo discriminante presentó valores de probabilidad baja en el Cantábrico, mientras que en el Mediterráneo occidental se produjeron valores de pronóstico que fueron progresivamente aumentando a lo largo del mes. En junio del año 2000, los pronósticos de probabilidad en la zona de pesca fueron bajos, con áreas extensas que presentaron valores fuera de rango. Las capturas se situaron sobre áreas de probabilidad media y baja. En julio de 2000, las probabilidades fueron aumentando en el interior del golfo de Vizcaya, coincidiendo con las áreas donde

se realizaron capturas significativas de atún blanco. En el Mediterráneo occidental, los núcleos de probabilidad se localizaron en el golfo de León. En agosto del año 2000, en el interior del golfo de Vizcaya, las capturas se realizaron en áreas de probabilidad alta, mientras que al oeste de Brest los mejores rendimientos se ubicaron en zonas con pronósticos de probabilidad media. En septiembre del año 2000, los pronósticos descendieron progresivamente y las capturas más significativas del mes se realizaron sobre áreas de probabilidad alta y media. A final del mes, los pronósticos indicaron un área muy extensa con valores fuera de rango. Durante el mes de octubre de 2000, los pronósticos descendieron tanto en el Cantábrico como en el Mediterráneo occidental, pasando de probabilidades altas (localizadas) a probabilidades bajas (más extensas). Las capturas en el Mediterráneo fueron poco significativas y se situaron sobre valores fuera de rango y áreas de probabilidad baja.

A finales de mayo de 2001, el modelo de análisis discriminante generó áreas geográficas muy limitadas con pronósticos de probabilidad baja en el Cantábrico rodeadas de zonas con valores fuera de rango. A medida que transcurría el mes de junio de 2001, los pronósticos de probabilidad fueron incrementándose y, paralelamente, las áreas de pesca significativas se fueron acercando al golfo de Vizcaya. Las capturas se localizaron sobre áreas con pronóstico de probabilidad baja y media. En julio de 2001, los rendimientos pesqueros disponibles fueron sensiblemente inferiores a los de los meses de julio de años anteriores. En el golfo de Vizcaya, las capturas se distribuyeron sobre áreas de pronóstico alto y medio. En el Mediterráneo occidental (golfo de León), sin embargo, se generaron áreas de pronóstico de probabilidad alta al noroeste de las islas Baleares. En agosto de 2001 se produjeron pocas capturas de atún blanco, fundamentalmente en áreas de pronóstico alto del golfo de Vizcaya. La misma tónica continuó en el mes de septiembre de 2001, cuando las capturas registradas en el golfo de Vizcaya se localizaron en áreas que presentaron pronósticos de probabilidad alta, que fueron progresivamente disminuyendo mientras iban aumentando y extendiéndose en el Mediterráneo occidental. En esta zona, las áreas de pronóstico de probabilidad baja fueron mejorando y convirtiéndose progresivamente en áreas de probabilidad media y alta. En el mes de octubre de 2001, en el Atlántico nororiental, los pronósticos en el golfo de Vizcaya disminuyeron, trasladándose progresivamente hacia el sur, al noreste de Lanzarote, donde las escasas capturas registradas se situaron sobre núcleos de probabilidad alta. En el Mediterráneo occidental, las escasas capturas disponibles en la base de datos se localizaron en áreas de pronóstico bajo.

Por regla general, las soluciones de pronóstico derivadas del primer modelo de análisis discriminante dieron lugar a un número excesivo de áreas de pronóstico alto o medio y pocas zonas de pronóstico bajo, como se puede apreciar en los mapas correspondientes a agosto de 1999 (Figura AII-33). Los valores pronosticados en la zona del Cantábrico sí que correspondían a clasificaciones bajas para periodos en los que no se produjeron capturas (Figuras AII-34 y AII-35). Los meses de junio de 2000 y 2001 se observaron coincidencias significativas entre los valores pronosticados y los puntos de captura, sobre todo en junio de 2000 (Figuras AII-36 y AII-37).

### 3.8.4 Segundo modelo de análisis discriminante

Los resultados del segundo modelo de análisis discriminante fueron malos para todos los periodos, puesto que asignaron valores de pronóstico alto y medio a todas las áreas de pesca (Figuras AII-38 y AII-39). La capacidad de clasificación de este modelo sólo fue buena para los rendimientos pesqueros altos, ya que clasificó como zonas de pronóstico alto muchas áreas que en realidad eran de pronóstico medio y bajo; sin embargo, al utilizar sólo cuatro variables, el número de valores perdidos fue menor que en el modelo anterior.

### 3.8.5 Primer modelo de regresión logística

El primer modelo de regresión logística utilizó tres variables, una derivada de la temperatura y dos derivadas de la anomalía del nivel del mar, por lo que el número de valores perdidos fue muy bajo.

En los meses de junio, julio y agosto de 1999, los resultados del primer modelo de regresión logística produjeron zonas con pronóstico de probabilidad alta en las áreas septentrionales del Atlántico nororiental y zonas con pronóstico de probabilidad baja en aguas situadas más al sur (islas de Azores y noreste de Canarias). En septiembre de 1999, los pronósticos de probabilidad alta aumentaron en el golfo de Vizcaya; sin embargo, la flota se había desplazado hacia el Mediterráneo occidental, donde las escasas capturas de atún blanco se efectuaron sobre zonas cercanas a áreas de pronóstico de probabilidad alta. En octubre de 1999 la situación cambió radicalmente; las áreas de pronóstico de probabilidad alta se extendieron en el golfo de Vizcaya y en el Mediterráneo occidental, coincidiendo geográficamente con los mejores rendimientos pesqueros del mes.

En junio de 2000, los mapas de previsión carecieron de coherencia latitudinal entre los de pronósticos de probabilidad alta, baja y fuera de rango. El mes de julio de 2000, las capturas se localizaron geográficamente en el golfo de Vizcaya, en áreas de probabilidad alta que iban progresivamente descendiendo a medida que avanzaba el mes. En agosto de 2000, el paisaje de las áreas de pesca de atún blanco y los pronósticos de probabilidad fueron muy parecidos a los del año anterior en el mismo periodo. Los resultados dieron lugar a zonas con pronóstico de probabilidad alta en las áreas septentrionales del Atlántico nororiental y zonas con pronóstico de probabilidad baja en aguas situadas más al sur. Durante los meses de septiembre y octubre de 2000 aumentaron los pronósticos de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya. Las zonas donde se ubicaron esos pronósticos coincidieron geográficamente con los caladeros donde la flota atunera vasca obtuvo rendimientos significativos de atún blanco. En el Mediterráneo occidental, la flota generó rendimientos elevados en áreas de pronóstico de probabilidad de captura alta.

El comportamiento de la flota artesanal atunera vasca en junio de 2001 fue el mismo que el observado para el mismo mes en el año 2000. Los mapas de previsión carecieron de coherencia latitudinal entre las previsiones de pronóstico de probabilidad alta y baja. En julio de 2001, las áreas de pronóstico de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya coincidieron con los caladeros de la flota artesanal atunera vasca. En el mes de agosto de 2001, las escasas capturas realizadas en el golfo de Vizcaya se efectuaron

sobre áreas de pronóstico de probabilidad baja. En septiembre de 2001, en el Mediterráneo occidental, las capturas se localizaron geográficamente en áreas de probabilidad alta. En el mes de octubre de 2001, las escasas capturas obtenidas en el Atlántico nororiental se localizaron al noreste de Lanzarote, coincidiendo con áreas de probabilidad baja. En el Mediterráneo occidental, las capturas de atún blanco obtenidas por la flota de bajura vasca se localizaron al noreste de las islas Baleares, coincidiendo con áreas de probabilidad alta.

El primer modelo de regresión logística obtuvo resultados de pronóstico de probabilidad poco realistas. La relación entre las áreas de pronóstico alto y bajo no coincidieron con los caladeros de pesca significativa de atún blanco. Este modelo asignó probabilidades bajas a zonas donde se produjeron buenos rendimientos pesqueros (Figura AII-40); únicamente en periodos concretos, junio de 2000 y 2001, se produjeron coincidencias con las áreas de pesca (Figuras AII-41 y AII-42). Además, asignó pronósticos de probabilidad alta en periodos en los que no se produjeron capturas significativas (Figura AII-43).

### **3.8.6 Segundo modelo de regresión logística**

El segundo modelo de regresión logística utilizó seis variables, tres derivadas de la temperatura superficial del mar a diferentes lapsos de tiempo con respecto al día de captura, por lo que se generó un gran número de valores perdidos. Este modelo de regresión logística generó soluciones más coherentes que el primero. El mes de agosto de 1999, las áreas de pronóstico de probabilidad alta coincidieron geográficamente con las zonas de captura en el golfo de Vizcaya. En septiembre de 1999 disminuyeron los pronósticos de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya y las escasas áreas resultantes coincidieron con capturas significativas de atún blanco. En el mes de octubre de 1999, las escasas capturas en el Mediterráneo occidental se situaron principalmente sobre áreas de probabilidad baja o fuera de rango, aunque algunas de ellas se desarrollaron en áreas clasificadas como de probabilidad alta.

En los meses previos a la temporada de pesca de 2000, los mapas de pronóstico de probabilidad presentaron una gran coherencia latitudinal entre probabilidades altas, bajas y valores fuera de rango. En junio de 2000, las escasas capturas de atún blanco en el Atlántico nororiental se localizaron en áreas de probabilidad alta. A principios de julio de 2000, los mapas presentaron extensas áreas del golfo de Vizcaya con valores de probabilidad alta, coincidentes con los caladeros donde se obtuvieron las mayores capturas. A principios de agosto de 2000 se apreciaron algunas capturas al noreste del afloramiento gallego, sobre áreas de probabilidad baja. En el Mediterráneo occidental, el modelo generó soluciones de pronóstico bajo, salvo en el golfo de León, donde los pronósticos generados correspondieron a probabilidades altas. En el mes de octubre de 2000, el modelo generó soluciones con extensas áreas de valores fuera de rango y de probabilidad baja, en el golfo de Vizcaya, en el Mediterráneo occidental y al noreste de Canarias.

A principios de junio de 2001, el segundo modelo de regresión logística generó muchos valores perdidos. En general, la coincidencia geográfica con los caladeros fue buena, salvo los últimos días del mes en los que las mejores capturas se realizaron sobre áreas de probabilidad baja. En julio de 2001, las capturas más significativas de atún

blanco se produjeron en áreas de probabilidad alta localizados en el interior del golfo de Vizcaya. En el Mediterráneo occidental, el segundo modelo de regresión logística pronosticó áreas de probabilidad alta en el golfo de León, disminuyendo progresivamente a finales del mes. En agosto de 2001, los pronósticos de probabilidad continuaron descendiendo; los escasos rendimientos de pesca de atún blanco coincidieron geográficamente con áreas de probabilidad alta en el golfo de Vizcaya. El Mediterráneo occidental presentó muchos valores fuera de rango y áreas de pronóstico de probabilidad baja en el Golfo de León, donde se obtuvieron los escasos rendimientos pesqueros de ese periodo. En septiembre de 2001, en el Mediterráneo occidental los pronósticos de probabilidad descendieron considerablemente y las capturas se produjeron sobre áreas de probabilidad baja o fuera de rango. Los puntos de captura aislados, que se observaron en el mes de octubre al noreste de Lanzarote coincidieron con un núcleo de probabilidad alta. En el Mediterráneo, las escasas capturas obtenidas se dispusieron sobre probabilidades bajas y valores perdidos.

Los pronósticos del segundo modelo de regresión logística fueron mejores que los del primero. El segundo modelo, más restrictivo que el primero, asignó extensas áreas de pronóstico de probabilidad alta que coincidieron geográficamente mejor con los caladeros de la flota artesanal atunera vasca. Para los meses de junio, julio y agosto, la cercanía geográfica entre las soluciones del modelo de pronóstico y las áreas de pesca de atún blanco fueron bastante buenas (Figuras de la AII-44 a la AII-47). En periodos en los que no se produjeron capturas, como en los primeros meses de 2000, los resultados fueron también muy coherentes (Figura AII-48). En los meses de septiembre y octubre disminuyeron los pronósticos elevados y la relación con los puntos de captura (Figuras AII-49 y AII-50).

### 3.8.7 Coherencia de los mapas de probabilidad

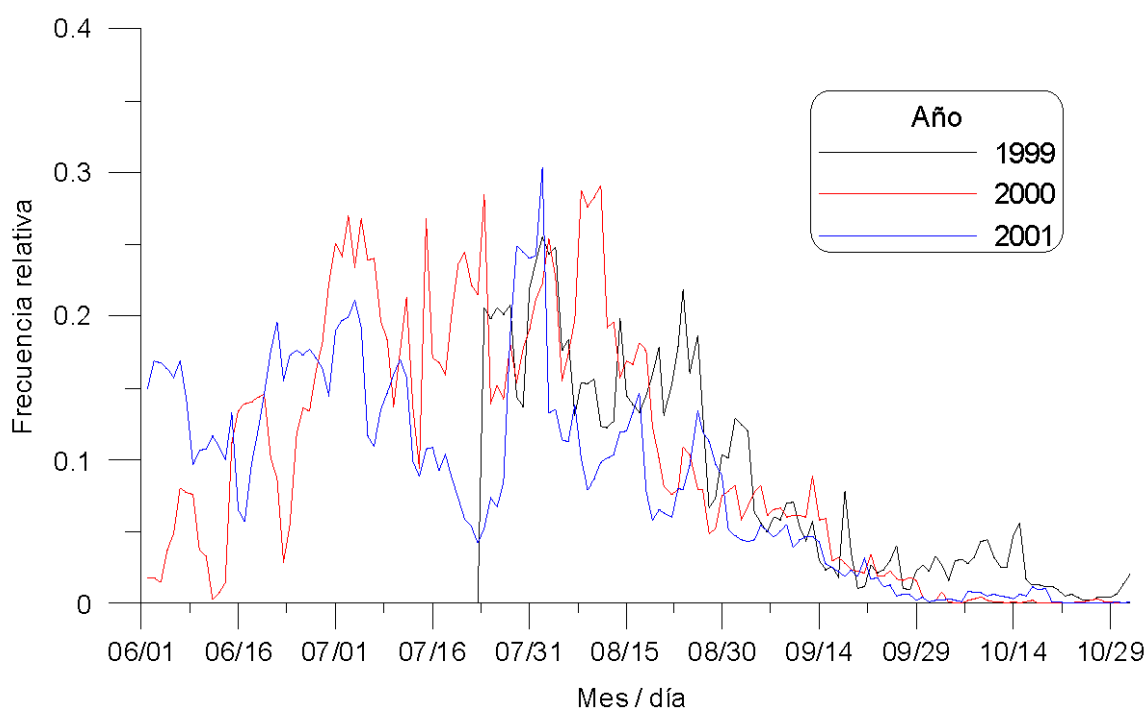
Las figuras 28 a 33 muestran que, durante el periodo de realización de las distintas campañas de pesca (de junio a octubre de 1999, 2000 y 2001), la proporción de píxeles con pronóstico de probabilidad alta de los modelos descritos en los apartados 3.5, 3.6 y 3.7 en el área del golfo de Vizcaya fue significativamente superior en los meses de julio y agosto, disminuyendo progresivamente en septiembre y octubre. El mes de junio, sin embargo, mostró frecuencias relativas de los pronósticos de probabilidad alta menores que en los meses de julio y agosto, pero mayores que en los meses de septiembre y octubre.

Otro aspecto importante es que, durante los meses de julio y agosto de 2001, la frecuencia relativa de probabilidades altas fue menor que durante los mismos meses de los dos años precedentes (1999 y 2000). Esto se observó en las soluciones del primer modelo de regresión lineal (Figura 28), del segundo modelo de regresión lineal (Figura 29), del segundo modelo de regresión logística (Figura 31) y del primer análisis discriminante (Figura 32). Estas tendencias fueron coherentes con la ubicación geográfica y los rendimientos de la flota artesanal atunera vasca.

Respecto a la estrategia geográfica de la flota artesanal atunera vasca, los resultados mostraron que en el mes de junio la distribución fue bastante aleatoria y dependió de las condiciones del océano mostradas por los mapas de pronóstico, lo que hizo que la pauta de comportamiento de la flota fuera distinta dependiendo del año

(1999, 2000 y 2001). En los meses de julio y agosto, sin embargo, la estrategia de la flota coincidió en mayor medida, ubicándose principalmente en el golfo de Vizcaya. Ya en los meses de septiembre y octubre se fueron desplazando progresivamente hacia el sur (noreste de Canarias) y hacia el este (Mediterráneo occidental). Los resultados también mostraron que los mapas de pronóstico indicaron áreas menos extensas de probabilidad alta en el año 2001 que en los años 1999 y 2000.

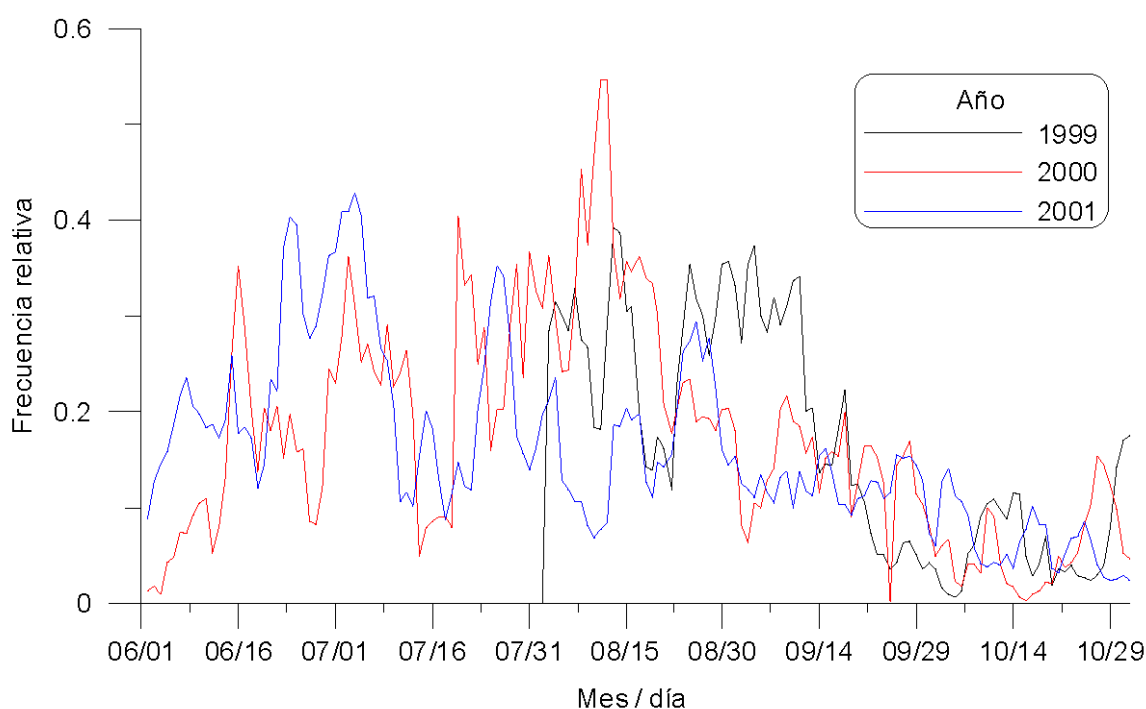
Los mapas de pronóstico de probabilidad generados por el primer modelo de regresión logística llaman la atención (Figura 30). Este modelo presentó tendencias opuestas al resto de modelos, indicando áreas de pronóstico de probabilidad baja para los meses de julio y agosto de 1999 y 2000 y valores más altos para los mismos meses del año 2001. Como se explicó anteriormente, los resultados de los mapas de probabilidad generados por este modelo no fueron coherentes con las situaciones favorables a las capturas, que sí describen el resto de modelos. El segundo análisis discriminante tampoco describió tendencias coherentes, debido a que los resultados obtenidos estaban condicionados por la limitada capacidad de clasificación del modelo (Figura 33).



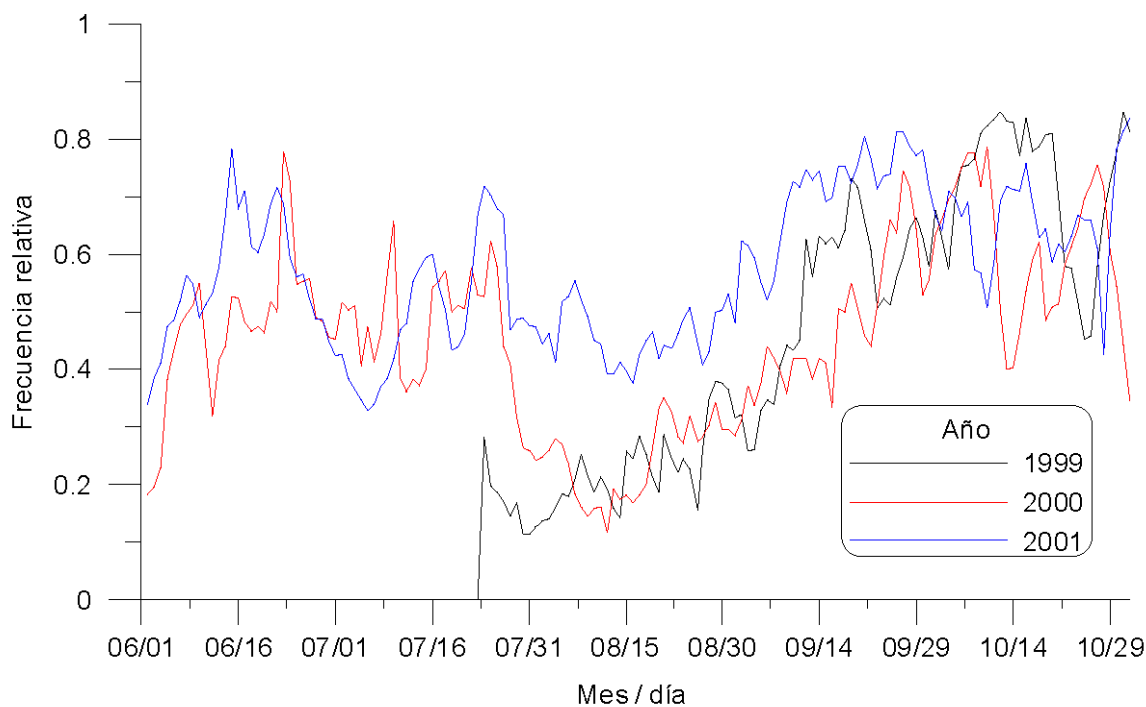
**Figura 28:** Proporción de probabilidades altas pronosticadas por el primer modelo de regresión lineal.

La Figura 34 presenta la proporción de valores fuera de rango en el golfo de Vizcaya para el primer modelo de regresión lineal. La proporción de valores de pronóstico de probabilidad fuera de rango disminuyó en los meses de julio y agosto, debido a las mejores condiciones para la pesca de atún blanco, y aumentó en los meses de junio, septiembre y octubre, cuando no se obtenían buenos rendimientos pesqueros

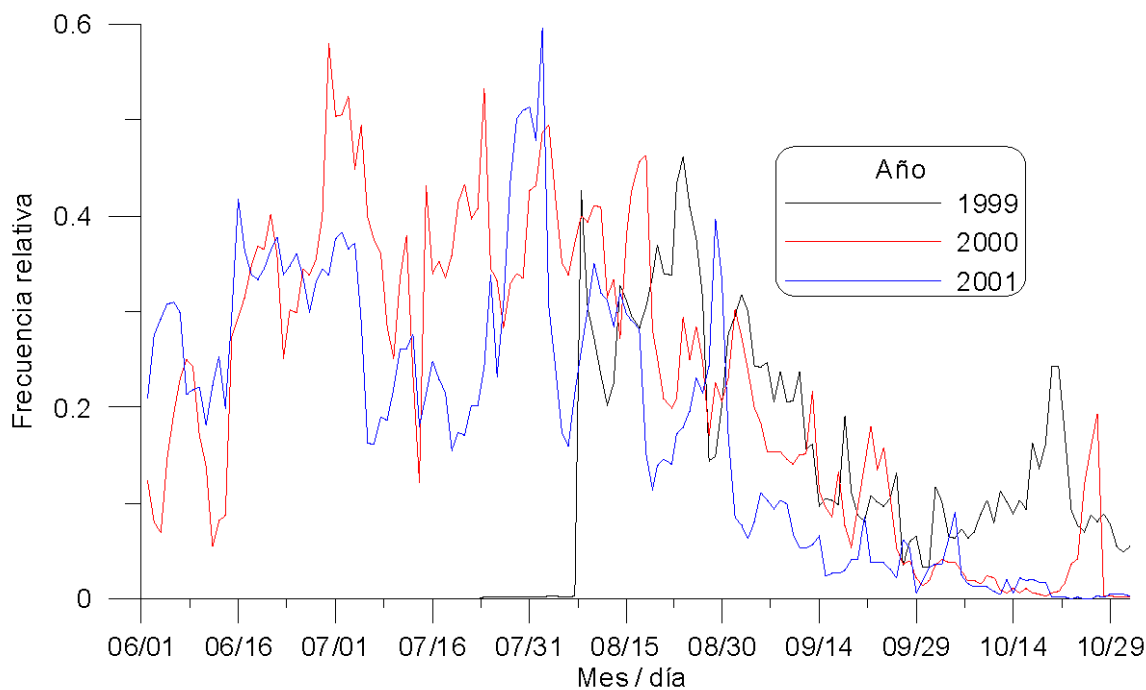
debido a que las condiciones para la pesca de atún blanco empeoraban. Las gráficas de valores fuera de rango para el resto de modelos mostraron un patrón de comportamiento similar y, por ello, no se incluyeron en este trabajo. A pesar de que el número de valores fuera de rango fue igual para todos los modelos, no lo fue su frecuencia relativa respecto a todos los valores disponibles. El número y disposición de los valores obtenidos en los mapas de pronóstico de probabilidad dependieron de la disponibilidad de las variables utilizadas para los lapsos de tiempo considerados. El empleo de un número más alto de variables derivadas de la temperatura superficial y de la concentración de clorofila-a a diferentes lapsos de tiempo disminuyó el número de valores disponibles en los mapas de probabilidad. La gran variabilidad y aleatoriedad para los diferentes modelos de la cobertura nubosa, que en muchas ocasiones fue predominante en el área, introdujeron distorsiones en las frecuencias mostradas en las gráficas.



**Figura 29:** Proporción de probabilidades altas pronosticadas por el segundo modelo de regresión lineal.

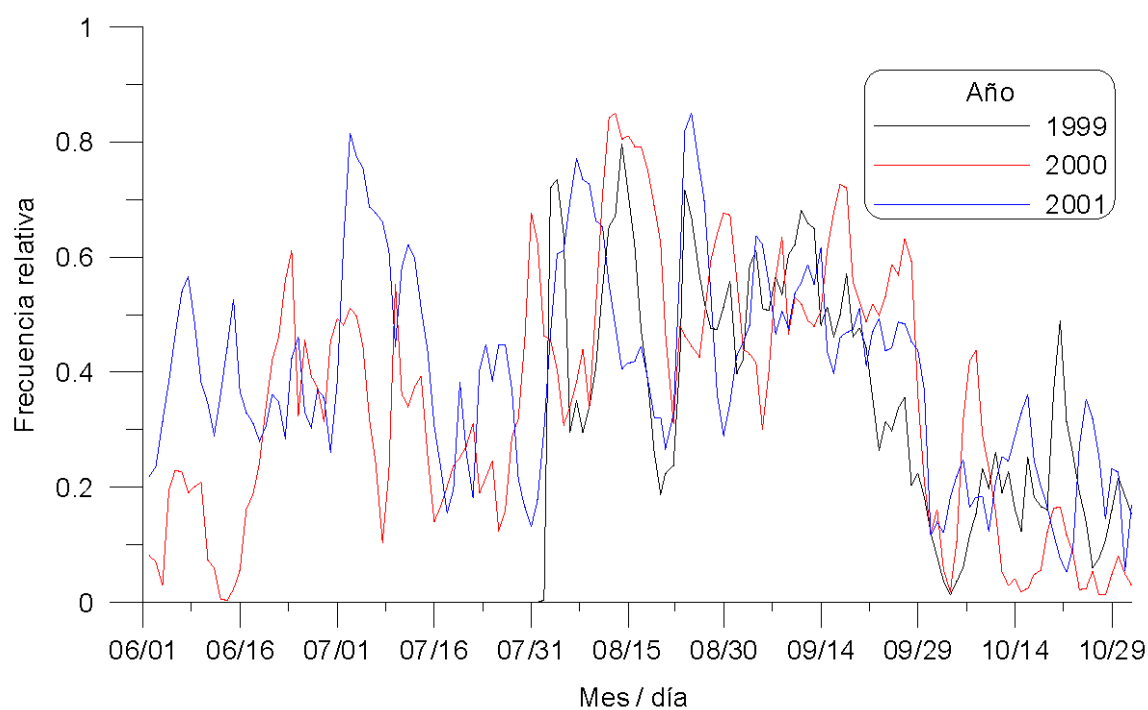
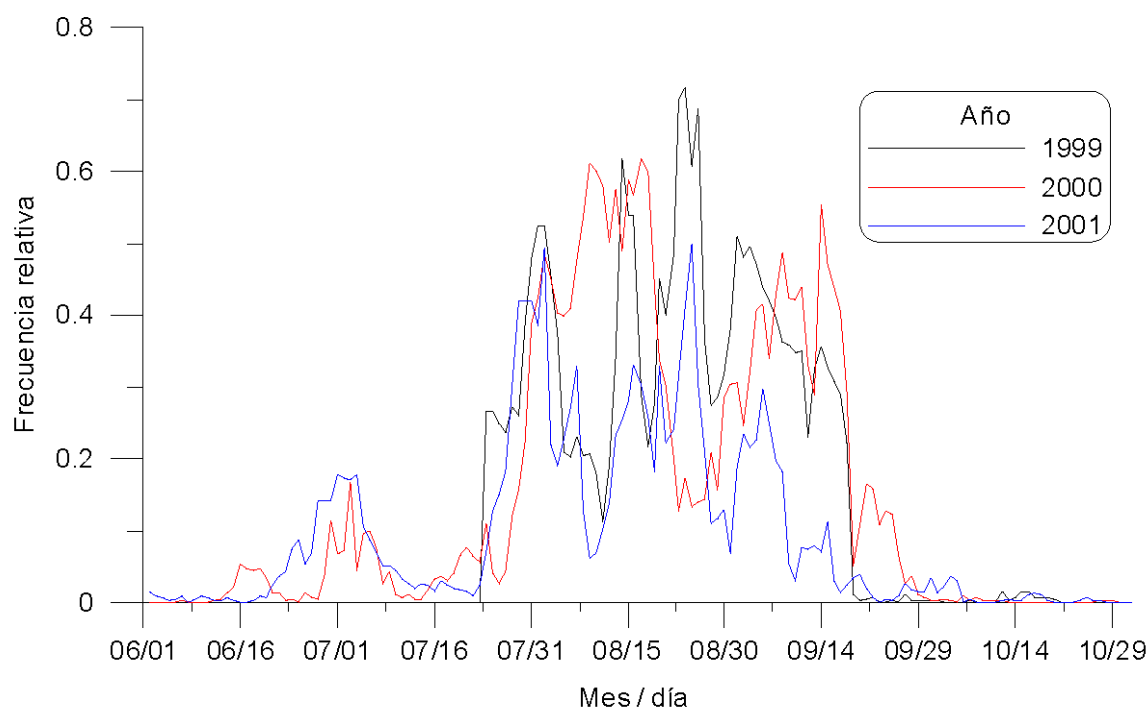


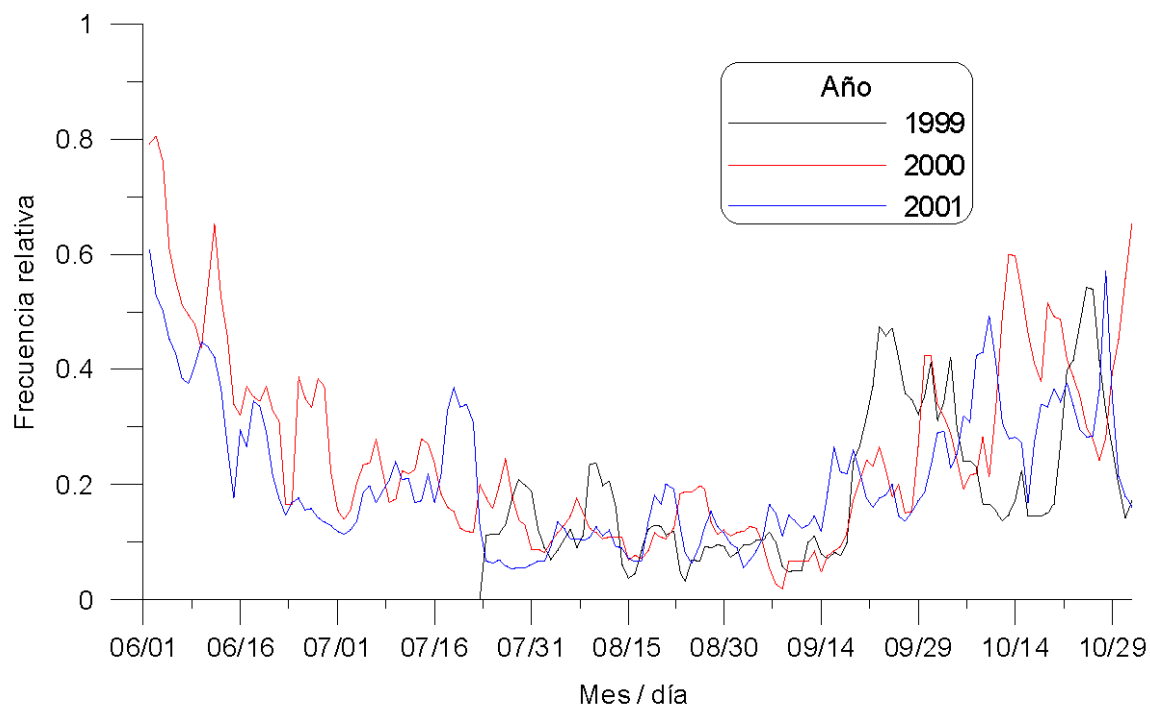
**Figura 30:** Proporción de probabilidades altas pronosticadas por el primer modelo de regresión logística (punto de corte en 0,5).



**Figura 31:** Proporción de probabilidades altas pronosticadas por el segundo modelo de regresión logística (punto de corte en 0,5).







**Figura 34:** Proporción de valores fuera de rango para el primer modelo de regresión lineal.

## 4 Discusión

La influencia de la heterogeneidad de las condiciones oceánicas debida a fenómenos geofísicos submesoescalares sobre la concentración de cardúmenes de peces pelágicos ha sido ampliamente estudiada en trabajos anteriores. Valiela (1995) describió esa heterogeneidad y destacó la imbricación de las escalas espacio-temporales en la sucesión de “manchas geofísicas” (frentes, giros, ...) que generan “cascadas turbulentas” de energía no lineales y materia cada vez más pequeñas o grandes. Este autor concluyó que estos fenómenos físicos a pequeña escala transfieren gran cantidad de energía al océano, por lo que es importante comprenderlos, si bien también apuntó que resulta muy difícil abordarlos, sobre todo cuando se analizan eslabones tróficos superiores (peces pelágicos oceánicos). Cushing (1995) también subrayó la importancia de los fenómenos submesoescalares en el océano, ya que inducen el desarrollo de presas de grandes pelágicos en lapsos de tiempo fugaces. A veces, esta generación de biomasa no aparece en los registros de los valores de clorofila-a cuando se trabaja a escala global. Esto cuestiona la definición de la escala sinóptica (oceánica) de grandes regiones geográficas, que aparecen muy homogéneas y estables (afloramientos costeros), como los responsables de toda la producción oceánica. Bakun (1996), siguiendo las pautas establecidas por los autores precedentes, estableció una síntesis de las estructuras oceánicas submesoescalares determinantes en la dinámica del necton pelágico, redefiniendo las regiones tipificadas con anterioridad.

En la década de los años ochenta y primera mitad de los noventa del siglo pasado, varios autores apuntaron la necesidad de establecer aquellas condiciones medioambientales submesoescalares que determinan el comportamiento de los túnidos, grupo de gran importancia socio-económica y ecológica. Y es que los animales de este grupo presentan una divergencia fisiológica evolutiva (la *rete mirabile* entre capilares arteriales y venosos) que les hace únicos respecto al resto de escómbridos y peces poiquilotermos (salvo xífidos e istiofóridos). Esta particularidad les confiere la posibilidad de conservar cierta cantidad de calor (termorregulación), pero genera elevados requerimientos alimenticios (presas). Por ello, el túnido debe desarrollar una especial sensibilidad para localizar este tipo de eventos distintos en un espacio tan homogéneo como el océano. Sund *et al.* (1981) sintetizaron las estructuras oceánicas involucradas en la presencia/ausencia de túnidos, aportando con ello los primeros datos numéricos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, transparencia del agua y campos de corrientes marinas). Posteriormente, otros autores profundizaron en el estudio espacio-temporal de estos eventos (frentes oceánicos, afloramientos, efectos de isla y objetos flotantes), que también generan respuestas en el comportamiento de este grupo taxonómico tan especial (Lauris *et al.*, 1984; Petit, 1991; Stretta, 1991; Ramos, 1992; Santiago *et al.*, 1993). Estas discontinuidades (frentes, montes submarinos, remolinos, ...) rompen la homogeneidad del medio marino y atraen indefectiblemente al pez, puesto que son áreas de alta probabilidad de contacto entre las condiciones de acumulación de presas y las condiciones ambientales adecuadas para su fisiología.

En las décadas de los ochenta y noventa del siglo pasado, el desarrollo y la puesta en órbita de numerosos satélites operacionales para la observación del océano permitió abordar el problema desde otra perspectiva. Algunas de esas variables submesoescalares y de esas discontinuidades ya pudieron ser observadas desde el espacio. Esto ofreció tres ventajas frente a las convencionales observaciones *in situ*:

visualizar de forma continua variables clave (clorofila-a, temperatura superficial del mar, ...), abarcar áreas muy amplias y trabajar en periodos de tiempo muy cortos. Los radiómetros (sensores pasivos), de los cuales se derivaron los datos de temperatura superficial del mar y de concentración de clorofila-a de este trabajo, presentan una resolución espacial relativamente alta (1 kilómetro) y cubren casi la totalidad (95 %) de la superficie del planeta en un solo día. El éxito fue tal que proliferaron masivamente plataformas orbitales, lo que supuso mayor disponibilidad, calidad y variedad de datos, posibilitando con ello el estudio del mismo evento oceánico capaz de acumular pescado a partir de productos procedentes de diferentes satélites y sensores.

Laurs *et al.* (1984), Santiago *et al.* (1993) y Ramos *et al.* (1996) mostraron la existencia de una relación significativa entre las capturas de atún blanco realizadas en diferentes áreas y los frentes visualizados mediante técnicas de teledetección espacial, tanto infrarroja como visible. En relación con esto, el presente trabajo permitió mejorar la cobertura espacio-temporal frente a las situaciones puntuales que se analizaron en los trabajos publicados anteriormente. La elevada cantidad de imágenes radiométricas analizadas en este trabajo de temperatura y clorofila-a permitió analizar tres temporadas de pesca consecutivas (1999, 2000 y 2001) y establecer las variables determinantes en el momento de la captura o en días anteriores, confirmando lo publicado en artículos anteriores. Además, permitió profundizar en las variaciones de los eventos submesoescalares del Atlántico nororiental y Mediterráneo occidental que determinaban cambios significativos en la pauta de la pesquería de atún blanco. Sin embargo, tanto en los trabajos de los autores citados antes como en el presente trabajo se identificó un problema en las áreas donde se desarrollan los caladeros tradicionales o inéditos de la flota atunera artesanal vasca: la elevada cobertura nubosa impidió, en varias ocasiones, la identificación de las condiciones que regían el comportamiento espacio-temporal de la pesquería.

Habida cuenta de la magnitud del problema de la cobertura nubosa, se decidió considerar otro tipo de productos inéditos que solventaran esta dificultad. La utilización de información radar, transparente a la cobertura nubosa, aumentó el número de productos geofísicos derivados de satélites operacionales que se añadieron a los ya obtenidos de los radiómetros. Los primeros trabajos en esta línea datan de 1991, cuando el lanzamiento del ERS-1 permitió disponer de bases de datos radar sobre el océano desde el espacio. El radar de apertura sintética, el altímetro y el dispersómetro de viento permitieron obtener nuevos productos y aplicaciones susceptibles de ser utilizados en la pesquería de túnidos. Así, Petit (1991) y, posteriormente, Ramos *et al.* (1997) utilizaron por primera vez tecnología radar para la localización de eventos susceptibles de determinar un comportamiento concreto en el atún blanco. Petit (1991) utilizó un radar de apertura sintética aerotransportado en el Mediterráneo occidental con el objetivo de localizar cardúmenes de atún blanco y analizar, al mismo tiempo, los eventos oceánicos que se desarrollaban. Ramos *et al.* (1997) desarrollaron una metodología de cálculo del bombeo de Ekman a partir de datos radar del dispersómetro de viento del ERS-1 y ERS-2 en el Índico suroccidental. En este trabajo, se llevaron a cabo varias mejoras en los algoritmos de cálculo del bombeo de Ekman. Además, este trabajo mejoró la continuidad geográfica del producto frente a los primeros tests de la década de los noventa. Paralelamente al cálculo del bombeo de Ekman con datos del dispersómetro del QuikSCAT, en este trabajo se realizaron las primeras experiencias de utilización de la anomalía del nivel del mar a partir de datos del TOPEX/POSEIDON, ERS y JASON

para el estudio de la pesquería de atún blanco en el Atlántico nororiental. Los sensores activos presentan la ventaja de su transparencia a las nubes.

## 4.1 La respuesta coherente

El análisis descriptivo de la pesquería de atún blanco frente a las variables oceánicas en el Atlántico nororiental permitió establecer una visión multisensor del paisaje oceánico superficial que acumula pescado. Para ello se utilizaron escenas radiométricas (temperatura superficial del mar y clorofila-a) y escenas radar (anomalía del nivel del mar y bombeo de Ekman). Petit y Huynh (2001) describieron la pesquería de pez espada y atún blanco con palangre en el Índico suroccidental utilizando variables de este tipo (temperatura superficial del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar). Sus resultados mostraron diferencias respecto a los obtenidos en este trabajo. En el Índico suroccidental, la temperatura superficial del mar que acumuló pescado fue significativamente superior, entre 24 y 30 °C, a la observada para el Atlántico nororiental en este trabajo, entre 17 y 25 °C. Es necesario destacar que en ese estudio, desarrollado en el Índico, la variable de extracción fue palangre puesto y en el presente trabajo punto de captura. Esas diferencias se derivaron del tipo de pesquería, océano y clases de tallas objetivo. Los niveles de concentración de clorofila-a obtenidos en el Índico suroccidental alcanzaron valores entre 0,05 y 0,2 mg/m<sup>3</sup>, inferiores a los observados para el Atlántico nororiental en el presente trabajo. En el Índico suroriental, los valores de anomalía del nivel del mar en los puntos de extracción de las variables mostraron cierta asimetría hacia los valores negativos, mientras que los observados en el Atlántico nororiental, más templado, presentaron asimetría hacia los valores positivos.

La visión multisensor del Atlántico nororiental desarrollada en este trabajo mejoró, de forma significativa, la descripción de la distribución geográfica de los caladeros de atún blanco en esta área, en comparación con la dada en trabajos anteriores desarrollados en estas mismas aguas (Santiago *et al.*, 1993; Ramos *et al.*, 1996). A ello contribuyó el uso de variables geofísicas derivadas de satélites operacionales, inéditas hasta entonces, que aproximaron una visión nueva del paisaje oceánico en la zona. Los resultados obtenidos permitieron observar pautas de comportamiento del atún blanco frente a las nuevas variables obtenidas mediante satélite, mostrando una especial sensibilidad y preferencia a determinados rangos y cambios espacio-temporales.

### 4.1.1 Temperatura superficial del mar

La relación entre la presencia de atún blanco y el valor absoluto de la temperatura superficial del mar en el punto geográfico de captura no presentó una tendencia clara hacia valores concretos. Abdon (1982), utilizando datos de temperatura superficial del mar y de capturas, concluyó que en aguas del Atlántico suroccidental la temperatura superficial del mar no es indicativa *per se* del aumento de la presencia de atún blanco. En el presente trabajo, el análisis de la temperatura superficial del mar únicamente produjo resultados interesantes, especialmente cuando se compararon con los obtenidos en otras áreas sobre la misma especie. Según datos obtenidos en este trabajo, durante las campañas de pesca 1999, 2000 y 2001, en el Atlántico nororiental y en el Mediterráneo occidental, la pesquería de atún blanco se desarrolló en un rango de

temperatura superficial del mar entre 15 y 23 °C (moda entre 19 y 21 °C), confirmando el carácter del atún blanco como especie de hábitos templados, tal como ya habían apuntado trabajos anteriores sobre la misma pesquería (Santiago *et al.*, 1993; Ramos *et al.*, 1996). Los resultados de Santiago *et al.* (1993) indicaron que más del 90 % de las capturas se producían en un rango de temperatura superficial del mar entre 17 y 22 °C. En el presente trabajo, ese mismo rango acumuló el 60 % de los rendimientos. Esta diferencia se explicó por los diferentes periodos de tiempo tratados en cada estudio, puesto que en el presente trabajo se consideraron los meses de mayo y junio (registros de temperatura superficial del mar más fríos). Además, en este trabajo, la ventana geográfica se amplió incluyendo el Mediterráneo occidental, donde se registraron los valores más altos de la temperatura superficial (islas Baleares).

En la bibliografía existen numerosos trabajos que relacionan la pesquería de atún blanco y la temperatura superficial del mar en otras áreas. Le Gall *et al.* (1982), quienes realizaron una campaña experimental de curricán en la convergencia subtropical del Pacífico suroccidental, tomando además medidas de las condiciones hidrobiológicas en los caladeros de atún blanco, encontraron que las capturas se realizaron en zonas frontales entre 16 y 19 °C. Laurs *et al.* (1980) demostraron que el atún blanco del Pacífico pasaba la mayor parte del tiempo a profundidades próximas a la termoclina, a temperaturas entre 10 y 19 °C, con escasas incursiones hacia las aguas superficiales, presumiblemente cuando se alimentaba. Barbieri *et al.* (1987), quienes relacionaron los frentes de temperatura superficial del mar del afloramiento chileno con la pesquería de atún blanco, encontraron que las mayores capturas se producían a 17 °C y sobre frentes térmicos estables con valores de clorofila elevados, coincidiendo con el comportamiento descrito por Le Gall para la misma pesquería en el Pacífico suroccidental. Seki *et al.* (2002), quienes relacionaron el frente localizado entre el Pacífico norte y el Ártico con las pesquerías de palangre de atún blanco, observaron que, al igual que en el Pacífico suroccidental, la isoterma de 17 °C marcaba el frente oceánico entre las áreas oligotróficas meridionales cálidas y las áreas eutróficas septentrionales frías más cercanas al polo. Este frente determinaba áreas preferenciales de acumulación de atún blanco en el Pacífico norte, coincidiendo con el comportamiento del stock del Pacífico sur, que respondía a los mismos rangos térmicos.

El rango de temperatura observado en este trabajo difiere significativamente de los publicados para otras especies de túnidos considerados como tropicales. El rabil y el listado, al distribuirse en la franja intertropical de los tres océanos, presentan hábitos más cálidos, con valores de temperatura superficial del mar entre 21 y 30 °C. Esta diferencia interespecífica con otros túnidos de hábitos tropicales también se manifiesta cuando se compara el comportamiento de los stocks de atún blanco en distintos océanos (diferencias intraespecíficas). El valor de temperatura superficial del mar en el que se ubica esta especie en el Atlántico nororiental determina un desarrollo divergente del comportamiento, debido a que en este océano explotan, a conveniencia, condiciones similares (frentes de afloramientos, giros, ...) a temperaturas más cálidas que en el Pacífico. Esta versatilidad estratégica resulta del efecto que las condiciones oceánicas diversas generan sobre la fisiología del atún blanco. Indefectiblemente, el sistema de intercambio lateral de calor determina un comportamiento adaptativo (termorregulación) que le permite explotar de forma eficiente distintos escenarios térmicos en esas áreas, adaptando su fisiología y/o adoptando un determinado comportamiento ante ellos.

### 4.1.2 Clorofila-a

El lanzamiento del sensor radiométrico SeaWiFS en 1997 permitió disponer de imágenes de pigmentos tipo-clorofila con la frecuencia y la cobertura espacial que ofrece una plataforma orbital polar con un campo de visión de 2800 km de anchura. En la década de los años ochenta del siglo pasado, varios autores realizaron trabajos similares en otras áreas que permitieron la comparación de los resultados. Laurs *et al.* (1980, 1984) observaron en aguas del Pacífico nororiental (afloramiento californiano) que el atún blanco se distribuía en frentes de clorofila-a en áreas con valores inferiores a  $1 \text{ mg/m}^3$ . Polovina *et al.* (2001) describieron la relación de las pesquerías de palangre de atún blanco en el Pacífico norte y las áreas de convergencia frías, mezcladas y ricas que se hundían debajo de las aguas cálidas estratificadas y pobres. El presente trabajo permitió relacionar, por primera vez, la pesquería de atún blanco y la distribución espacio-temporal de la producción primaria en el Atlántico nororiental y en el Mediterráneo occidental.

A principios de la temporada del año 1999, la convergencia subártica fue muy intensa, generando frentes de clorofila-a muy nítidos. A medida que avanzó el verano, estos frentes se fueron difuminando a valores puntuales inferiores ( $<0,5 \text{ mg/m}^3$ ). La intensidad y los gradientes de clorofila-a fueron mayores que los localizados en los años 2000 y 2001. En el año 2000, estos frentes de producción primaria se localizaron nítidamente entre los meses de julio y agosto a lo largo del talud francés. En el año 2001, los valores de clorofila-a fueron elevados en el talud y en áreas situadas al noroeste del afloramiento gallego. Los cambios interanuales de las áreas frontales determinaron indefectiblemente cambios en la acumulación y en el rendimiento de los caladeros, haciendo que éstos se trasladaran en función de la intensidad de esos eventos. Al igual que en los trabajos realizados en otras áreas citados anteriormente, el atún blanco mostró preferencias por zonas con valores de concentración de clorofila-a entre  $0,1$  y  $1 \text{ mg/m}^3$ . Únicamente en el 1 % de los datos disponibles se apreciaron capturas en áreas con valores de clorofila-a superiores a  $1 \text{ mg/m}^3$  y en el 3 % sobre valores superiores a  $0,8 \text{ mg/m}^3$ , coincidiendo estos casos con zonas de gradientes con concentraciones menores.

La utilización en este trabajo de métodos de análisis multivariante permitió cuantificar, por primera vez, el efecto de la intensidad del frente sobre la localización de los caladeros de atún blanco. En la mayoría de las escenas y periodos, los mejores caladeros coincidieron con frentes de concentración de clorofila-a poco intensos. Así, los frentes entre valores bajos y medios de clorofila-a, entorno a  $1 \text{ mg/m}^3$ , y bajos, entorno a  $0,3 \text{ mg/m}^3$ , acumularon el 70 % de los rendimientos pesqueros de la especie.

La relación entre el atún blanco y los frentes generados por cambios bruscos en la concentración de clorofila-a se debe principalmente a la tendencia de esta especie a localizar áreas con elevadas agregaciones de alimento, donde satisfacer el elevado requerimiento alimenticio (energético) que le genera la termorregulación. Sin embargo, dada su condición de predador óptico, desplazarse en el interior de estas áreas muy turbias constituye un problema, debido a la escasa visibilidad para localizar densidades significativas de presas, optando por localizarse en la línea del frente de clorofila-a, cerca de las áreas más productivas en concentración de alimento.

### **4.1.3 Anomalía del nivel del mar**

El lanzamiento en la década de los noventa de radares altimétricos a bordo de las plataformas europeas ERS-1 y ERS-2 y los proyectos franco-americanos TOPEX/POSEIDON y JASON permitieron relacionar las anomalías del nivel del mar con la evolución espacio-temporal de los caladeros de atún blanco en el Atlántico nororiental y Mediterráneo occidental. Los resultados de este trabajo, mostraron que en el Atlántico norte la anomalía del nivel del mar evolucionó anualmente, siguiendo la misma pauta anual en todo el periodo considerado (1999, 2000 y 2001). A principios de las temporadas de pesca, entre los meses de mayo y julio, la anomalía del nivel del mar negativa predominó en todo el Atlántico norte. Esta situación determinó que el esfuerzo pesquero se trasladara hacia aguas más meridionales al norte de Azores. A medida que avanzó la temporada de pesca (entre agosto y octubre), la anomalía del nivel del mar se tornó positiva, ampliando su área geográfica de influencia desde pequeños núcleos meridionales hacia el interior del golfo de Vizcaya y hacia el noroeste del afloramiento gallego. Esta situación desarrolló núcleos pesqueros de atún blanco en el interior del golfo a lo largo del talud francés y del norte de la plataforma continental cántabra.

El presente trabajo permitió, además, demostrar que las acumulaciones de atún blanco generan buenos rendimientos pesqueros en áreas donde la variación del signo de la anomalía del nivel del mar y la corriente geostrofica asociada no es muy intensa. Además, este túnido tiene tendencia a ubicarse en la parte positiva del frente donde cambia el signo de la anomalía del nivel del mar.

Nel *et al.* (2001) observaron la acumulación de aves marinas (albatros) en los bordes de las anomalías positivas de la anomalía del nivel del mar (remolinos anticiclónicos) de reciente generación. Esto indica una tendencia de sus presas (pelágicos costeros) a ubicarse en estas áreas que indefectiblemente también deben atraer al atún blanco; de hecho, muchas veces, las concentraciones de aves marinas le indican al pescador donde se localiza el atún.

Como resultado de la célula de circulación, en la parte central del golfo de Vizcaya, se generan giros anticiclónicos en el área central. Estos giros cálidos que se generan en el interior del golfo de Vizcaya, descritos por Pingree y Le Cann (1992a, b) y Pingree (1993) determinan la formación de áreas de anomalía del nivel del mar positiva que acumulan atún blanco. Santiago *et al.* (1993) y Ramos *et al.* (1997) ya habían observado, con técnicas radiométricas, la tendencia de esta especie a localizarse en esos giros anticiclónicos, no solo en el Cantábrico sino también en el mar de Alborán. La oportunidad de disponer en este trabajo de datos del Mediterráneo noroccidental permitió demostrar una tendencia similar del atún blanco a ubicarse en el giro anticiclónico observado al sureste del golfo de León (norte de islas Baleares).

### **4.1.4 Bombeo de Ekman**

Numerosos autores han descrito la implicación subsidiaria del bombeo de Ekman en el inicio y en la dinámica de la cadena trófica epipelágica. Martin y Richards (2001) estudiaron los mecanismos de transporte vertical de nutrientes en los giros submesoescalares del Atlántico norte, giros que fueron ampliamente observados y descritos con técnicas radiométricas y radar en los resultados del trabajo que aquí se



presenta. Andersen y Prieur (2000) observaron dos eventos, uno que consistía en un estrés de viento intenso sobre la superficie del océano que generaba un bombeo de Ekman positivo, y como consecuencia una mezcla vertical ascendente y una disminución del fitoplancton, y otro que consistía en una pérdida de intensidad del viento que generaba un bombeo de Ekman negativo, y como consecuencia áreas de convergencia y mezcla descendente y una mayor biomasa de fitoplancton. Fiedler (2002) demostró que la evolución estacional del domo tropical de Costa Rica se intensificaba por los patrones del viento a mesoescala, produciendo extensas áreas de bombeo de Ekman positivo. Este efecto tenía una consecuencia directa sobre la productividad biológica y afectaba a la distribución de ballenas y delfines (disponibilidad de alimento).

Sin embargo, antes de este trabajo, el campo de bombeo de Ekman no había sido analizado con la regularidad (diaria) y extensión (global) que la nueva generación de dispersómetros de viento espaciales permite desde julio de 1999. El dispersómetro de viento del QuikSCAT permitió calcular y presentar en este trabajo, por primera vez, la evolución espacio-temporal de las áreas de bombeo de Ekman en el Atlántico nororiental y cómo éstas afectan al comportamiento de una especie neotónica pelágica como el atún blanco. Como ya se indicó antes, Laurs (1984) y Ramos *et al.* (1996) describieron la presencia de atún blanco en aguas frontales convergentes cálidas, estables y claras, que colindan con aguas frías, inestables y turbias. Los resultados presentados en este trabajo demostraron que las acumulaciones de atún blanco en el Atlántico norte coinciden también con áreas de convergencia (bombeo de Ekman negativo) y divergencia (bombeo de Ekman positivo). Estas áreas de acumulación de pescado lindan geográficamente y se manifiestan en especial en primavera y otoño, mostrando la tendencia del atún blanco a ubicarse en “áreas 0”, con preferencia por los valores negativos, como ocurre con el resto de variables radiométricas (temperatura superficial del mar y clorofila-a) y radar (anomalía del nivel del mar). Esta preferencia por zonas de convergencia cercanas a valores 0 de bombeo de Ekman coincide con lo observado por Coca *et al.* (2001), en la misma área y para la misma especie, a pesar de que los datos procedentes del dispersómetro de viento del ERS-1 no permitieron obtener una buena cobertura espacial. El comportamiento de este pez frente a esta nueva variable derivada de sensores radar muestra el verdadero alcance de su flexibilidad adaptativa frente al resto de tónidos y especies termorreguladoras (*Xiphidae* e *Istiophoridae*), únicas en la fisiología de los osteictios.

El test del primer dispersómetro operacional (Ramos *et al.*, 1997) y las mejoras posteriores introducidas en este trabajo con el más sofisticado *SeaWindS* a bordo del QuikSCAT han permitido observar, de forma inédita, áreas frontales entre convergencia y divergencia, debidas al estrés de viento, y relacionarlas con las acumulaciones de atún blanco. Los resultados muestran que esta especie explota los flujos de materia y energía generados en estas áreas, las cuales acumulan alimento y constituyen un escenario idóneo además para sus requerimientos termo-fisiológicos. Ello le permite explotar al máximo, y con el mínimo consumo de energía, la cosecha de alimento en forma de zooplancton, fauna mesopelágica o bancos de peces pelágicos costeros que se generan o acumulan en dichas zonas. Este comportamiento coincide con el descrito por Petit (1991), quién postuló la *respuesta coherente* de esta especie termorreguladora a localizar y explotar cualquier anomalía que rompa la homogeneidad del ecosistema pelágico.

## 4.2 La respuesta retardada

Además de estudiar la *respuesta coherente* del atún blanco ante las anomalías oceánicas, este trabajo realiza un análisis de la relación entre las variables y los rendimientos pesqueros en días posteriores. Este análisis permite contrastar si el comportamiento del atún blanco responde a las tesis enunciadas por Stretta (1991) y Ramos (1992), denominadas como *respuesta retardada*. Estos autores encontraron relaciones retardadas entre las pesquerías de túnidos tropicales y los eventos submesoescalares, como los generados en el área de Canarias. La materia y energía generada por las perturbaciones oceánicas causadas por las islas determinan buenos rendimientos dos semanas después, cuando las áreas maduran y se vuelven estables y productivas.

Las correlaciones de las CPUE sobre “ventanas dinámicas” con las variables extraídas fueron mayores que las obtenidas con la CPUE original, ya que el efecto de las variables tenía una influencia más allá del valor puntual. La CPUE tenía en cuenta únicamente la captura en el punto, mientras las CPUE3 y CPUE5 tenían en cuenta las capturas obtenidas en una ventana entorno al punto de captura para el que se extrajeron las diversas variables. Las capturas estaban, por tanto, más relacionadas con la estructura espacial que con las situaciones definidas en un único punto. También los niveles de explicación alcanzados en los análisis multivariantes corroboraron estos resultados al alcanzarse niveles de explicación mayores con las CPUE sobre “ventanas dinámicas”.

### 4.2.1 Temperatura superficial del mar

La inclusión de la variable temperatura superficial el día de captura en todos los modelos salvo en uno da idea de su importancia puntual para el de atún blanco. Los coeficientes positivos de esta variable confirmaron la preferencia de esta especie por un evento cálido más acorde a sus necesidades eto-fisiológicas. Los resultados de los diferentes análisis no mostraron efectos de retardo de variables relacionadas con la temperatura superficial del mar sobre las CPUE.

### 4.2.2 Clorofila-a

Petit y Huynh (2001) encontraron una correlación negativa entre los valores de clorofila-a y los rendimientos obtenidos dos semanas después por los palangreros dedicados a la pesca de atún blanco en el océano Índico suroccidental. Los bajos valores de clorofila-a encontrados en eventos oceánicos fríos inmaduros (giros ciclónicos, por ejemplo) evolucionaban hacia valores mayores mediante la producción primaria, transfiriendo con ello materia y energía hacia los eslabones tróficos superiores. Ello explicaba la posterior acumulación de buenos rendimientos pesqueros en esas áreas. Al contrario, un valor elevado de biomasa fitoplanctónica indicaba un tipo de aguas generalmente madura que podría acumular pescado en ese momento y no dos semanas después, cuando la transferencia de materia y energía entre niveles tróficos estaba ya agotada. El carácter oligotrófico de las aguas donde se desarrollaba la pesquería (entre 0,05 y 0,2 mg/m<sup>3</sup> de clorofila-a) determinaba áreas que siempre presentaban valores

inferiores al establecido por otros autores ( $0,8 \text{ mg/m}^3$ ) como nivel limitante superior para el atún blanco, considerado predador óptico. De esta manera, cualquier cambio en la tendencia del evento productivo generaría un tipo de agua con valores de concentración de clorofila-a no limitantes para la acumulación de atún blanco. Además, el carácter oligotrófico del Índico suroccidental determinaba una reducción de la biomasa disponible como alimento para el túnido, que reaccionaba significativamente al proceso de maduración.

Si bien el proceso de maduración del evento ciclónico debe ser similar en cualquier área, las cantidades de biomasa fitoplanctónica transferidas en las áreas de los caladeros de atún blanco en el Atlántico nororiental superaron en un orden de magnitud los encontrados en el Índico suroccidental. En el proceso de maduración, niveles de acumulación de biomasa superiores a  $0,8 \text{ mg/m}^3$  reducen la probabilidad de acumulación de atún blanco, haciendo que esa correlación negativa no se manifieste en los datos.

#### 4.2.3 Anomalía del nivel del mar

En el presente trabajo, el análisis de variables oceánicas obtenidas a partir de datos radar ofreció la oportunidad, inédita, de contrastar la respuesta retardada del atún blanco hacia las anomalías del nivel del mar. Los resultados mostraron una tendencia del atún blanco a acumularse en las áreas donde cambia el signo de la anomalía del nivel del mar “áreas cero” desde valores negativos (fríos) a positivos (cálidos). Esa relación estadísticamente significativa obtenida en el análisis discriminante confirma que el túnido responde no solo al proceso de maduración térmica del agua sino también al proceso de maduración dinámica. La evolución de una anomalía negativa a una anomalía positiva determina una tendencia de ese cuerpo de mar hacia la estabilidad (térmica, planctónica y advectiva), generando áreas potencialmente óptimas para el atún blanco. De hecho, la anomalía del nivel del mar ofrece un aumento de la correlación entre las áreas cero que evolucionan hacia la estabilidad y las acumulaciones de atún blanco.

#### 4.2.4 Bombeo de Ekman

El efecto del bombeo de Ekman sobre las cadenas tróficas en el océano, discutido anteriormente, refleja su efecto retardado sobre las capturas en varios de los análisis realizados. Las estructuras que el movimiento vertical de la columna de agua debido al estrés de viento pueda crear precisan de un tiempo de maduración para que las implicaciones biológicas puedan manifestarse.

### 4.3 La respuesta predictiva

Las correlaciones simples, el análisis factorial de correspondencias múltiples y la regresión lineal permitieron cualificar y cuantificar la pauta de comportamiento espacio-temporal de las agregaciones de atún blanco y las condiciones meteorológicas y oceánicas submesoescalares. Estos métodos de análisis aportaron correlaciones

positivas y negativas que explicaron parte de la estrategia del túnido frente a esas variables. En el mejor de los casos, a pesar de ser significativas, las correlaciones alcanzaron valores de 0,3. Parametrizar los rendimientos pesqueros como altos, medios o bajos permitió restringir aún más aquellas áreas que ofertaron unas condiciones excepcionales para aumentar la densidad de atún blanco y el nivel de explicación y, por ende, de predicción. El análisis multivariante superó las limitaciones de la interpretación empírica visual de cuatro variables que evolucionan de forma simultánea.

El análisis de correspondencias múltiples ofrece una visión multivariante cualitativa de las relaciones entre la CPUE5 y las variables ambientales. En él se observó la mayor asociación de los rangos 1 con las CPUE5 medias, aunque las CPUE5 altas y medias estaban relativamente cerca y las bajas algo más alejadas. Los rangos 2 de las variables se dispusieron de forma coherente respecto a las CPUE5 (entre las medias y las bajas) y los rangos 3, por lo general, alejados de ellas. Las variables ligadas al bombeo de Ekman, aunque con comportamiento poco diferenciado entre ellas, destacaron por su alta relación con las CPUE5 medias. La anomalía del nivel del mar mostró el patrón más descriptivo con respecto a las CPUE5, con el rango 1 muy cerca de las altas y medias, el rango 2 cerca de las bajas y el rango 3 extremadamente alejado. En estos resultados tuvo que tenerse en consideración que los rangos 3 de las variables ambientales se correspondían con zonas fuera de rango y en la CPUE el rango 3 corresponde a CPUE5 bajas (no a CPUE5 nulas).

Los modelos obtenidos en este trabajo mediante regresión lineal múltiple ofrecieron un elevado nivel de explicación. Destaca, sobre todo, la importancia y el peso relativo de la anomalía del nivel del mar frente a la temperatura superficial del mar y la clorofila-a. Sin embargo, el primer modelo de regresión lineal múltiple no consideró las relaciones entre variables decaladas en el tiempo que, como se indicó anteriormente, son determinantes. Por ello, el segundo modelo incluyó variables correspondientes a anticipaciones de 5, 10 y 15 días respecto al día de la captura. Las cuatro variables de las que consta el modelo ordenadas de menor a mayor peso específico están ligadas al bombeo de Ekman, a la concentración de clorofila-a, la temperatura superficial del mar y a la anomalía del nivel del mar. Desruisseaux (2004), quien elaboró mapas de potencial de pesca para las pesquerías industriales de túnidos tropicales de cerco mediante datos de temperatura superficial del mar, concentración de clorofila-a y anomalía del nivel del mar, concluyó que la anomalía del nivel del mar era la variable geofísica más relevante de las tres utilizadas.

El análisis discriminante incluyó variables con anticipaciones de diez y cinco días en los dos modelos. El gran problema de estos modelos radicó en la poca capacidad de clasificación de los valores medios que se reparten entre altos, medios y bajos, lo que afectó a los mapas de probabilidad generados a partir de estos modelos. Los mapas de probabilidad resultantes del primer modelo no fueron coherentes con las capturas, por el contrario, los resultantes del segundo sí. Desde un punto de vista práctico, se consideraron útiles porque las áreas clasificadas como altas son fiables, al clasificarse como tales pocas que áreas corresponden realmente a CPUEs bajas.

El primer modelo de regresión logística ensayado utilizó solo tres variables, el registro de la temperatura superficial del mar el día de captura, la anomalía del nivel del mar el día de captura y la anomalía del nivel del mar quince días antes del día de captura. Este primer ensayo mostró una gran capacidad para clasificar las capturas altas,

pero presentó mucha incertidumbre a la hora de predecir los rendimientos bajos. El primer modelo dio lugar a mapas de probabilidad sin coherencia con las capturas, algo que no ocurrió con el segundo. La inclusión en el segundo modelo de variables derivadas de los cuatro tipos disponibles, temperatura superficial del mar, concentración de clorofila-a, anomalía del nivel del mar y bombeo de Ekman, mejoró la capacidad de clasificación de las CPUE altas y bajas, especialmente cuando se elevó el nivel de probabilidad logística de 0,5 al 0,75. Este aumento del grado de restricción al 75 % de explicación dió como resultado la generación de mapas de previsión más certeros.

Petit y Huynh (2001) desarrollaron un modelo que explicó el 72 % de la variación de los rendimientos de palangre sobre pez espada. Sin embargo, dos variables como el “número de anzuelos” y la “distancia a costa” representaron un porcentaje 10 veces superior al del resto de variables ambientales. En el presente trabajo, las CPUEs estandarizadas permitieron alcanzar niveles de explicación del 62 % usando únicamente variables ambientales.

Los modelos multivariantes obtenidos utilizaron variables ambientales extraídas en los puntos de captura, la única información para abordar este tipo de estudios. En el presente trabajo, la probabilidad obtenida hace referencia a la posibilidad de capturar o no, basándose en el nivel de rendimiento pesquero potencial.

De las distribuciones correspondientes a las ochenta y dos variables analizadas en los puntos de captura y al azar sobre el área de pesca, solo ocho no presentaron diferencias significativas en media y varianza simultáneamente, haciendo que los escenarios donde se desarrolla la pesquería puedan ser ubicados espacio-temporalmente. Los mapas de probabilidad mostraron resultados coherentes cuando se aplicaron sobre toda el área de estudio, excluyendo de la generación de los modelos las zonas donde los rangos quedaron fuera de las distribuciones de las variables ambientales en los puntos de captura. La aparición de áreas probables y la acumulación en estas zonas a principios de la temporada de pesca dependen, en gran medida, de la existencia de pasillos o escenarios oceánicos que conecten las áreas del Atlántico central, donde se acumula el atún blanco para la freza en invierno, con las áreas de acumulación del Atlántico norte, donde se desarrolla la pesquería.

A partir de la metodología desarrollada a lo largo de este trabajo es posible elaborar mapas de probabilidad de pesca más allá de los análisis descriptivos desarrollados en la década de los años noventa. La combinación de cuatro variables oceánicas obtenidas a partir de imágenes de satélite y de variables derivadas de éstas, algunas de ellas retardadas, ha sentado las bases metodológicas para el desarrollo de estudios similares sobre pesquerías distintas. Análisis similares sobre pesquerías de otras especies de túnidos (tropicales) o sobre especies poiquilothermas ubicadas en niveles tróficos distintos (pelágicos costeros) permitirán contrastar las diferentes estrategias de explotación de estas especies neotónicas pelágicas sobre un medio muy dinámico y cambiante.



## 5 Conclusiones

1) Una o dos variables geofísicas obtenidas de datos de satélite son insuficientes para cuantificar, mediante la metodología utilizada, las relaciones entre ellas y las capturas por unidad de esfuerzo.

2) Es posible cuantificar las relaciones entre los datos de teledetección y las capturas por unidad de esfuerzo de atún blanco cuando se dispone de información de diferentes variables geofísicas. Los niveles de explicación que se alcanzan son elevados (62 % en el caso de la regresión múltiple). En el caso de la regresión logística binaria, la capacidad de clasificación entre las capturas por unidad de esfuerzo altas y las capturas por unidad de esfuerzo bajas es del 83 %. En el caso del análisis discriminante, la clasificación es buena para las capturas por unidad de esfuerzo altas (72 %) y las capturas por unidad de esfuerzo bajas (63 %).

3) Las capturas por unidad de esfuerzo sobre una ventana dinámica de cinco grados tiene mayor relación con las variables que la captura por unidad de esfuerzo individual y alcanza mayores niveles de explicación en los tratamientos multivariantes. Esto se debe a la importancia de la estructura espacial frente al valor puntual.

4) La anomalía del nivel del mar es la variable más importante tanto por la relación directa con las capturas por unidad de esfuerzo, como por su importancia relativa en los modelos. Ello se aprecia en todos los análisis realizados: correlaciones, análisis de correspondencias múltiples, regresión lineal múltiple, análisis discriminante y regresión logística binaria.

5) La temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a tienen pesos intermedios en los modelos. Sin embargo, las variables ligadas a la temperatura superficial del mar se presentan en todos los modelos descritos. Esto no ocurre con la concentración de clorofila-a, que solo aparece como variable significativa en alguno de los modelos.

6) El bombeo de Ekman es el que menos importancia individual tiene, pero es fundamental para subir los niveles de explicación. Variables derivadas de éste se incorporan a los modelos obtenidos en cada tratamiento multivariante que se corresponden con los niveles de explicación y clasificación más elevados.

7) La extracción de variables derivadas de las variables originales de teledetección es importante a la hora de generar modelos multivariantes. Estas variables ayudan a incorporar a los modelos la importancia de la estructura espacial en la presencia de atún blanco. Este comportamiento respecto a dichas variables se encuentra en concordancia con la respuesta coherente (Petit, 1991).

8) La extracción de variables derivadas de los datos originales de teledetección a diferentes lapsos de tiempo es importante a la hora de generar modelos multivariantes. Los lapsos de tiempo ayudan a incorporar a los modelos la importancia del retardo entre la generación de una estructura y la capacidad de acumular individuos de atún blanco. Este comportamiento respecto a los lapsos de tiempo se encuentra en concordancia con la respuesta retardada (Stretta, 1991).

9) Los mapas de probabilidad derivados a partir de los modelos generados en los análisis multivariantes son coherentes con los periodos y zonas de pesca de atún blanco.



## 6 Bibliografía

- ABBES, R. y F.X. BARD (editores). 1999. ECOTAP, étude du comportement des thonidés par l'acoustique et la pêche en Polynésie Française. Rapport Final, SRM-IRD-IFREMER: 523 pp.
- ABBOT, M.R. y P.M. ZION. 1987. Spatial and temporal variability of phytoplankton pigments of northern California during coastal ocean dynamics experiments. *J. Geophys. Res.*, 92(C2): 1745-1755.
- ABDON, M.M. 1982. A study on the relationship between surface temperature and tuna fish catch data in south and south-east Brazil using oceanographic and satellite data. *Atlantica*, 5(2): 1-10.
- ALONCLE, H. 1973. Rythmes alimentaires et circadiens chez le germon *Thunnus alalunga* dans le Nord-Est Atlantique. Les populations de germes dans le Nord-Est Atlantique. Tesis Doctoral, Universidad de París: 194 pp.
- ALTRINGHAM, J.D. y B.A. BLOCK. 1997. Why do tuna maintain elevated slow muscle temperatures? Power output muscle isolate from endothermic and ectothermic fish. *J. Exp. Biol.*, 200: 2617-2627.
- ALTRINGHAM, J.D. y R.E. SHADWICK. 2001. Swimming and muscle function. En: *Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution*, B.A. Block y E.D. Stevens (editores). Academic Press, New York: 314-341.
- ANDERSEN, V. y L. PRIEUR. 2000. One month study in the open NW Mediterranean Sea (DYNAPROC experiment, May 1995): overview of the hydrobiogeochemical structures and effects of wind events. *Deep-Sea Res. Oceanogr.*, 47(A3): 397-422.
- ANDRADE, H.A. y C.A.E. GARCIA. 1999. Skipjack tuna fishery in relation to sea surface temperature off the southern Brazilian coast. *Fish. Oceanogr.*, 8(4): 245-254.
- BARBIERI, M.A., F. NARANJO, E. YANEZ, M. FARIAS, G. DANNERI y P. ROJAS. 1987. La pesquería artesanal del atún aleta larga en la zona de Valparaíso y el satélite NOAA. *Invest. Mar.*, 15: 41-61.
- BAKUN, A. 1996. *Patterns in the Ocean*. Sea Grant/CIB, California: 323 pp.
- BAKUN, A. y C.S. NELSON. 1991. The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions. *J. Geophys. Res.*, 96(C12): 1815-1834.
- BANNIKOV, A.F. 1985. Iskopaemye skumbrievye SSSR (Fossil scombrids of the USSR). *Trudy Pal. Int.*, 210: 111 pp.
- BARD, F.X. 1981. Le thon germon (*Thunnus alalunga*) de l'Océan Atlantique. De la dynamique de population à la stratégie démographique. Tesis Doctoral, Universidad de París: 336 pp.

- BARD, F.X. y E. JOSSE. 1996. Peculiarity of swimming bladder of large albacore (*Thunnus alalunga*) caught by longline. *Doc. SPAR 6<sup>th</sup> meeting*: 3 pp.
- BAYLIFF, W.H. (editor). 1980. Synopses of biological data on eight species of scombrids. Inter-American Tropical Tuna Commission. Special Report, 2, La Jolla: 530 pp.
- BERTRAND, A., E. JOSSE y J. MASSÉ. 1999a. Preliminary results of acoustic target strength measurements of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). En: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Indo-Pacifique Fish Conference, Nouméa, 1997*, B. Séret y J.Y. Sire (editores). Societe Francaise d'Ichtyologie, Paris: 443-450.
- BERTRAND, A., E. JOSSE y J. MASSE. 1999b. *In situ* acoustic target strength measurement of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) by coupling split-beam echo-sounder and sonic tracking. *ICES J. Mar. Sci.*, 56(1): 51-60.
- BLANC, T.V., W.J. PLANT y W.C. KELLER. 1989. The Naval Research Laboratory's air-sea interaction blimp experiment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 70(4): 198-227.
- BLOCK, B.A., J.R. FINNERTY, A.F.R. STEWART y J. KIDD. 1993. Evolution of endothermy in fish: Mapping physiological traits on a molecular phylogeny. *Science*, 260(5105): 210-214.
- BLOCK, B.A. y J.R. FINNERTY. 1994. Endothermy in fishes: A phylogenetic analysis of constraints, predispositions, and selection pressures. *Environ. Biol. Fish.*, 40(3): 283-302.
- BLOCK, B.A., J.E. KENN, B. CASTILLO, H. DEWAR, E.V. FREUND, D.J. MARCINEK, R.W. BRILL y C. FARWELL. 1997. Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extend of its range. *Mar. Biol.*, 130(1): 119-132.
- BOTAS, J.A., E. FERNÁNDEZ, A. BODE y R. ANADON. 1990. A persistent upwelling off the central Cantabrian coast (Bay of Biscay). *Est. Coast. Shelf Sci.*, 30(2): 185-199.
- BRILL, R.W. 1994. A review of temperature and oxygen tolerance studies of tunas pertinent to fisheries oceanography, movement models and stock assessments. *Fish. Oceanogr.*, 3(3): 204-216.
- BRILL, R.W., D.B. HOLTS, R.K.C. CHANG, S. SULLIVAN, H. DEWAR y F.G. CAREY. 1993. Vertical and horizontal movements of striped marlin (*Tetrapturus audax*) near the Hawaiian Islands, determined by ultrasonic telemetry, with simultaneous measurements of oceanic currents. *Mar. Biol.*, 117(4): 567-574.
- BRILL, R.W., H. DEWAR y J.B. GRAHAM. 1994. Basic concepts relevant to heat transfer in fishes, and their measuring the physiological thermoregulatory abilities of tunas. *Environ. Biol. Fish.*, 40(2): 109-124.

- BRILL, R.W., B.A. BLOCK, C.H. BOGGS, K.A. BIGELOW, E.V. FREUND y D.J. MARCINEK. 1999. Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: Implication for the physiological ecology of pelagic fishes. *Mar. Biol.*, 133(3): 395-408.
- BROCK, J.C., C.R. McCLAIN, M.E. LUTHER y W.W. HAY. 1991. The phytoplankton bloom in the northwestern Arabian Sea during the southwest monsoon of 1979. *J. Geophys. Res.*, 96(C11): 623-642.
- BUSHNELL, P.G., D.R. JONES y A.P. FARREL. 1992. The arterial system. En: *The Cardiovascular System*, W.S. Hoar, D.J. Randall y A.P. Farrel (editores). Academic Press, San Diego: 89-139.
- CALVO, F. 1993. *Técnicas Estadísticas Multivariantes*. Universidad de Deusto, Bilbao: 444 pp.
- CAREY, F.G. y K.D. LAWSON. 1973. Temperature regulation in free-swimming bluefin tuna. *Comp. Biochem. Physiol.*, 44(A2): 375-392.
- CAYRE, P. 1989. Physiologie de la thermorégulation des thons. *FAO Doc. Tech. Pêches*, 302: 43-47.
- CHI, C.Y. y F.K. LI. 1988. A comparative study of several wind estimation algorithms for spaceborne scatterometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 26(2): 115-121.
- COCA, J., A.G. RAMOS, J.M. PAJUELO, J.M. LORENZO, I. ARTETXE y J. SANTIAGO. 2001. Análisis de la distribución de atún blanco *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788) en el Atlántico nororiental a partir de datos de bombeo de Ekman obtenidos del dispersómetro de viento del ERS-1. *Revista de Teledetección*, 16: 101-105.
- COLLETTE, B.B. y C.E. NAUEN. 1983. FAO Species Catalogue. Vol. 2. Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, makerels, bonitos and related species known to date. *FAO Fish. Synop.*, 125(2): 137 pp.
- CUSHING, D. 1995. *Population and Regulation in the Sea, a Fisheries Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge: 354 pp.
- DAVISON, J. y D.E. HARRISON. 1990. Comparison of Seasat scatterometer winds with tropical Pacific observations. *J. Geophys. Res.*, 95(C3): 3403-3410.
- DESRUISSEAU, M. 2004. Pertinence des données altimétriques en halieutique appliquées à la pêche tonnière. Tesis Doctoral, Universidad de Quebec y Universidad Pierre et Marie-Curie: 150 pp.
- DEWAR, H., J.B. GRAHAM y R.W. BRILL. 1994. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel. II. Thermoregulation. *J. Exp. Biol.*, 192: 33-44.
- DICKSON, K.A. 1994. Tunas as small as 207 mm fork length can elevate muscle temperatures significantly above ambient temperature. *J. Exp. Biol.*, 190: 79-93.

- DICKSON, K.A., N. JOHNSON, J.M. DONLEY, J.A. HOSKINSON, M.W. HANSEN y J.D. TESSIER. 2000. Ontogenic changes in characteristics required for endothermy in juvenile black skipjack tuna (*Euthymus lineatus*). *J. Exp. Biol.*, 203: 3077-3087.
- DONELAN, M.A. y W.J. PIERSON. 1987. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry. *J. Geophys. Res.*, 92(C5): 4971-5029.
- DUNBAR, R.S., S.V. HSAIO y B.H. LAMBRIGTSEN. 1988. Science algorithm specifications for the NASA Scatterometer Project. D-5610 (2 vol.). Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.
- ELLERBY, D.J., J.D. ALTRINGHAM, T. WILLIAMS y B.A. BLOCK. 2000. Slow muscle function of Pacific bonito (*Sarda chiliensis*) during steady swimming. *J. Exp. Biol.*, 203: 2001-2013.
- EMERY, W., Y. YU y G. WICK. 1994. Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water vapor attenuation. *J. Geophys. Res.*, 99(C9): 329-342.
- EVANS, R.H., D.R. MCLAIN y R.A. BAUER. 1981. Atlantic skipjack tuna: Influence of the mean environmental conditions on their vulnerability to surface fishing gear. *Mar. Fish. Rev.*, 43(6): 1-11.
- FIEDLER, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Res. Oceanogr.*, 49(A2): 321-338.
- FIEDLER, P.C. y H.J. BERNARD. 1987. Tuna aggregation and feeding near front observed in satellite imagery. *Cont. Shelf Res.*, 7(8): 871-881.
- FONTENEAU, A. 1997. *Atlas of Tropical Tuna Fisheries: World Catches and the Environment*. ORSTOM, París: 192 pp.
- FREILICH, M.H. 1998. SeaWindS algorithm theoretical basis document. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena: 56 pp.
- FREILICH, M.H. y S.S. PAWKA. 1987. Statistics of  $S_{xy}$  estimates. *J. Phys. Oceanogr.*, 17(10): 1786-1797.
- FREILICH, M.H. y R.S. DUNBAR. 1993. A preliminary C-band scatterometer model function for the ERS-1 AMI instrument. En: *Proceedings of First ERS-1 Symposium-Space at the Service of Our Environment*. ESA SP-359, Cannes: 79-84.
- GEERNAERT, G.L. 1988. Measurements of the angle between the wind vector and the wind stress vector in the surface layer over the North Sea. *J. Geophys. Res.*, 93(C7): 8215-8220.
- GEERNAERT, G.L., S.E. LARSEN y F. HANSEN. 1987. Measurements of the wind stress heat flux and turbulence intensity during storm conditions in the North Sea. *J. Geophys. Res.*, 92(C12): 13127-13139.

- GEERNAERT, G.L. y S.E. LARSEN. 1993. On the role of humidity in estimating marine surface layer stratification and scatterometer cross section. *J. Geophys. Res.*, 98(C1): 927-932.
- GILHOUSEN, D.B. 1987. A field evaluation of NDBC moored buoy winds. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 4: 94-104.
- GRAHAM, J.B. 1975. Heat exchange in the yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, and skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, and the adaptative significance of elevated body temperatures in scombrid fishes. *Fish. Bull.*, 73(2): 219-229.
- GRAHAM, J.B. 1983. Heat transfer. En: *Fish Biomechanic*, P.W. Webb y D. Weihs (editores). Praeger, New York: 248-278.
- GRAHAM, J.B. y D.R. DIENER. 1978. Comparative morphology of the central heat exchangers in skipjacks *Katsuwonus* y *Euthynnus*. En: *The Physiological Ecology of Tuna*, G.D. Sharp y A.E. Dizon (editores). Academic Press, San Diego: 113-133.
- GRAHAM, J.B., F.J. KOEHRN y K.A. DICKSON. 1983. Distribution and relative proportions of red muscle in scombrid fishes: Consequences of body size relationships to locomotion and endothermy. *Can. J. Zool.*, 61(9): 2087-2096.
- GRAHAM, J. B. y K.A. DICKSON. 2000. The evolution of thunniform locomotion and heat conservation in scombrid fishes: New insights based on the morphology of *Allothunnus fallai*. *Zool. J. Linn. Soc.*, 129(4): 419-466.
- GRAHAM, J.B. y K.A. DICKSON. 2001. Anatomical and physiological specializations for endothermy. En: *Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution*, B.A. Block y E.D. Stevens (editores). Academic Press, New York: 121-160.
- GUNN, J. y B.A. BLOCK. 2001. Advances in acoustic, archival and satellite tagging of tunas. En: *Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution*, B.A. Block y E.D. Stevens (editores). Academic Press, New York: 167-219.
- GUYMER, T.H. y S. ZECCHETTO. 1993. Applications of scatterometer winds in coastal areas. *Int. J. Remote Sens.*, 14(9): 1787-1812.
- HUDDLESTON, J.N. y B.W. STILES. 2000. Multidimensional histogram (MUDH) rain flag. Version 2.1. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena: 8 pp.
- ICCAT. 2002. *Report of the Standing Committee on Research and Statistics (SCRS)*. ICCAT, Madrid: 202 pp.
- IWAI, T., I. NAKAMURA y K. MATSUBARA. 1965. Taxonomic study of the tunas. *Misaki Marine Bio. Inst., Kyoto Univ., Spec. Rept.*, 2: 1-51.
- JENKINS, G.M. y D.G. WATTS. 1968. *Spectral Analysis and Its Applications*. Holden-Day, San Francisco: 525 pp.

- JOHNSTON, I. y R.W. BRILL. 1984. Thermal dependence of contractile properties of single skinned muscle fibres from Antarctic and various warm water marine fishes including skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) and kawakawa (*Euthynnus affinis*). *J. Comp. Physiol.*, 155(B1): 63-70.
- KAWAMIYA, M. 2001. Mechanism of offshore nutrient supply in the western Arabian Sea. *J. Mar. Res.*, 59(5): 675-696.
- KIRIMOTO, T. y R.K. MOORE. 1985. Scanning wind-vector scatterometers with two pencil beams. En: *Proceedings Conference on Remote Sensing of Oceans and Atmospheres*. NASA, Conf. Pub. 2303: 89-97.
- KISHINOUE, E. 1923. Contributions to the comparative study of the so-called scombroid fishes. *J. Coll. Agric. Imp. Univ. Tokyo*, 8: 293-475.
- KORSMEYER, K.E., H. DEWAR, N.C. LAI y J.B. GRAHAM. 1996. The aerobic capacity of tunas: Adaptation for multiple metabolic demands. *Comp. Biochem. Physiol.*, 113(A1): 17-24.
- KUMARI, B., M. RAMAN, A. NARAIN y T.E. SIVAPRAKASAM. 1993. Location of tuna resources in Indian waters using NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 14(17): 3305-3309.
- LARGE, W.G. y S. POND. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11(3): 324-336.
- LAURS, R.M. 1997. Overview of satellite remote sensing applications in fisheries research. En: *Changing Oceans and Changing Fisheries: Environmental Data for Fisheries Research and Management*, G.W. Boehlert y J.D. Schumacher (editores). NOAA, La Jolla: 9-16.
- LAURS, R.M., R.C. DOTSON, A. DIZON y A. JEMISON. 1980. Observations on swimming depth and ocean temperature telemetered from free-swimming albacore. En: *Proceedings of 31<sup>st</sup> Tuna Conference, 11-14 May 1980, Lake Arrowhead*, A. Wild (editor). IATTC, La Jolla: 33-34.
- LAURS, R.M. y R.J. LYNN. 1977. Seasonal migration of North Pacific albacore, *Thunnus alalunga*, into North American coastal waters: distribution, relative abundance, and association with Transition Zone waters. *Fish. Bull.*, 75(4): 795-822.
- LAURS, R.M., H.S.H. YUEN y J.H. JOHNSON. 1977. Small-scale movements of albacore, *Thunnus alalunga*, in relation to ocean features indicated by ultrasonic tracking and oceanic sampling. *Fish. Bull.*, 75(2): 347-355.
- LAURS, R.M., P.C. FIEDLER y D.R. MONTGOMERY. 1984. Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep-Sea Res.*, 31(A9): 1085-1099.
- LE GALL, J.Y. 1974. Exposé synoptique de données biologiques sur le germon *Thunnus alalunga* de l'Océan Atlantique. *FAO Synop. Pêches*, 109: 70 pp.

- LE GALL, J.Y., J.P. HALLIER, F. GALLET y H. WALICO. 1982. Resultats de la campagne Prosgermon à bord du N.O. Coriolis. *ORSTOM Rapp. Sci. Tech. Cent. Noumea*, 26: 62 pp.
- LEHODEY, P., M. BERTIGNAC, J. HAMPTON, A. LEWIS y J. PICAUT. 1997. El Nino Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, 389(6652): 715-718.
- LEHODEY, P., J.M. ANDRÉ, M. BERTIGNAC, J. HAMPTON, A. STOENS, C. MENKÈS, L. MEMERY y N. GRIMA. 1998. Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model. *Fish. Oceanogr.*, 7(3-4): 317-325.
- LEROY, C. 1984. Pêchê et thermographie de surface. Expérience d'aide à la prospection germonière. *Met-Mar*, 124: 248-253.
- LEROY, C. 1988. Télédétection satellitaire et pêche du germon *Thunnus alalunga* dans le NE Atlantique. *VIII Semana das Pescas dos Açores*, 8: 241-267.
- LEROY, C. 1990. Satellite remote sensing and the albacore (*Thunnus alalunga*) in the Northeast Atlantic. *ICCAT Col. Vol. Sci. Pap.*, 32(1): 147-157.
- LIOURZU, B., C. LEROY y J. MASSE. 1985. Prospection germonière. Premières marées, grand ouest, zone traditionnelle. Remarques sur l'aide à la pêche germonière. IFREMER/DRV/RH (Rapport interne), Nantes.
- LIOURZU, B., C. LEROY, J. MASSE y O. BARBAROU. 1987. Campagne germonière 1986. Prospections, suivi de la pêche, télédétection. IFREMER/DRV/RH (Rapport interne), Nantes: 91 pp.
- LONGHURST, A. 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Prog. Oceanogr.*, 36(2): 77-167.
- LONGHURST, A. 1998. *Ecological Geography of the Sea*. Academic Press, San Diego: 398 pp.
- LOWE, T.E., R.W. BRILL y K.L. COUSINS. 2000. Blook oxygen-binding characteristics of bigeye tuna (*Thunnus obesus*), a high-energy demand teleost that is tolerant of low ambient oxygen. *Mar. Biol.*, 136(6): 1087-1098.
- MAGNUSON, J.J. 1963. Tuna behavior and physiology, a review. *FAO Fish. Rep.*, 6: 1057-1066.
- MAGNUSON, J.J. 1973. Comparative study of adaptations for continuous swimming and hydrostatic equilibrium of scombroid and xiphiod fishes. *Fish. Bull.*, 71(1): 337-356.
- MAGNUSON, J.J. 1978. Locomotion by scombrid fishes: Hidromechanics, morphology, and behavior. En: *Locomotion*, W.S. Hoar y D.J. Randall (editores). Academic Press, New York: 239-313.

- MARCINEK, D.J., S.B. BLACKWELL, H. DEWAR, E.V. FREUND, C. FARWELL, D.J. DAU, A.C. SEITZ y B.A. BLOCK. 2001. Depth and muscle temperatures of Pacific bluefin tuna examined with acoustic and pop-up satellite archival tags. *Mar. Biol.*, 138(4): 869-885.
- MARTIN, A.P. y K.J. RICHARDS. 2001. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy. *Deep-Sea Res. Oceanogr.*, 48(A4-5): 757-773.
- MCCCLAIN, E.P., W.G. PICHEL y C.C. WALTON. 1985. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 90(C6): 11587-11601.
- MCCREARY, J.P. JR., K.E. KOHLER, R.R. HOOD y D.B. OLSON. 1996. A four-component ecosystem model of biological activity in the Arabian Sea. *Prog. Oceanogr.*, 37(3-4): 193-240.
- MENARD, F., B. STEQUERT, A. RUBIN, M. HERRERA y E. MARCHAL. 2000. Food consumption of tuna in the Equatorial. Atlantic ocean: FAD associated versus unassociated schools. *Aquat. Living Resour.*, 13(4): 233-240.
- MENARD, F. y E. MARCHAL. 2003. Foraging behaviour of tuna feeding on small schooling *Vinciguerria nimbaria* in the surface layer of the equatorial. Atlantic Ocean. *Aquat. Living Resour.*, 16(3): 231-238.
- MOORE, J.A. 1998. Possible nervous innervation and characterization of the blood vessels of the counter-current heat exchangers in three species of tuna. Tesis de Master, Universidad del Estado de California: 107 pp.
- MURPHY, G.I. 1956. Effect of water clarity on albacore catches. *Limnol. Oceanogr.*, 4(1): 86-93.
- NADERI, F.M., M.H. FREILICH y D.G. LONG. 1991. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean, an overview of the NSCAT scatterometer system. *Proc. IEEE*, 79(6): 850-866.
- NAKAMURA, H. 1969. *Tuna Distribution and Migration*. Fishing News Books, Londres: 76 pp.
- NEILL, W.H. y E.D. STEVENS. 1974. Thermal inertia versus thermoregulation in "warm" turtles and tunas. *Science*, 184(4140): 1008-1010.
- NEL, D.C., J.R.E. LUTJEHARMS, E.A. PAKHOMOV, I.J. ANSORGE, P.G. RYAN y N.T.W. KLAGES. 2001. Exploitation of mesoscale oceanographic features by grey-headed albatross *Thalassarche chrystosoma* in the southern Indian Ocean. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 217: 15-26.
- NISHIKAWA, Y., M. HONMA, S. UEYANAGI y S. KIKAWA. 1985. Average distribution of larvae of oceanic species of scombroid fishes, 1956-1981. *S. Ser. Far Seas Fish. Res. Lab.*, (12): 99 pp.



- PARDO, A. y M.A. RUIZ. 2002. *SPSS 11. Guía para el Análisis de Datos*. McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid: 715 pp.
- PEARCY, W.G. y J.L. MUELLER. 1970. Upwelling Columbia River plume and albacore tuna. En: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Universidad de Michigan: 1101-1113.
- PELÁEZ, J. y J.A. MCGOWAN. 1986. Phytoplankton pigment patterns in the California current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 31(3): 927-950.
- PERRY, K.L. (editor). 2001. QuikSCAT science data product. User's manual. Version 2.1. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena: 86 pp.
- PETIT, M. 1991. Télédétection aérospatiales et gestion des pêches; application: recherche environnementale et halieutique thonière opérationnelle. Tesis Doctoral, Universidad de Pierre et Marie Curie: 130 pp.
- PETIT, M. y F. HUYNH (editores). 2001. Halieutique et environnement océanique, le cas de la pêche palangrière à l'espadon depuis l'Île de la Réunion (France-DOM). Convention IFREMER palangre, action 4 Rapport: 301 pp.
- PHILLIPS, O.M. 1988. Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and Breaking waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 18(8): 1065-1074.
- PIERSON, W.J. 1984. A Monte-Carlo comparison of the recovery of winds near upwind and downwind from the SASS-I model function by means of the sum of squares algorithm and a maximum likelihood estimator. *NASA Cont. Rep.* 3839.
- PIERSON, W.J. 1990. Examples of, reasons for, and consequences of the poor quality of wind data from ships for the marine boundary layer: implications for remote sensing. *J. Geophys. Res.*, 95(C8): 13313-13340.
- PICKARD, G.L. y W.J. EMERY. 1982. *Descriptive Physical Oceanography. An Introduction*. Pergamon Press, Oxford: 249 pp.
- PINGREE, R.D. 1993. Flow of surface waters to the west of the British Islands and in the Bay of Biscay. *Deep-Sea Res.*, 40(A1-2): 369-388.
- PINGREE, R.D. y B. LE CANN. 1992a. Three anticyclonic slope water oceanic eddies (SWOEDDIES) in the Southern Bay of Biscay in 1990. *Deep-Sea Res.*, 39(A7-8): 1147-1175.
- PINGREE, R.D. y B. LE CANN. 1992b. Anticyclonic eddy X91 in southern Bay of Biscay, May 1991 to February 1992. *J. Geophys. Res.*, 97(C9): 14353-14367.
- PODESTA, G.P., S. SHENOI, J.W. BROWN y R.H. EVANS. 1995. AVHRR Pathfinder oceans matchup data base 1985-1993 (Version 18). Draft Technical Report of the University of Miami Roseniel School of Marine and Atmospheric Science: 33 pp.

- POLOVINA, J.J., E. HOWEL, D.R. KOBAYASHI y M.P. SEKI. 2001. The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources. *Prog. Oceanogr.*, 49(1-4): 469-483.
- POWER, J.H. y L.N. MAY JR. 1991. Satellite observed sea-surface temperatures and yellowfin tuna catch and effort in the Gulf of Mexico. *Fish. Bull.*, 89(3): 429-439.
- PRASANNAKUMAR, S., M. MADHUPRATAP, M. DILEEPKUMAR, P.M. MURALEEDHARAN, S.N. DESOUZA, M. GAUNS y V.V.S.S. SARMA. 2001. High biological productivity in the central Arabian Sea during the summer monsoon driven by Ekman pumping and lateral advection. *Curr. Sci.*, 81(12): 1633-1638.
- RAMOS, A.G. 1992. Bioecología del listado (*Katsuwonus pelamis* Linnaeus, 1758) en el área de Canarias. Modelo de gestión y de explotación mediante el uso de la teledetección. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: 196 pp.
- RAMOS, A.G., J. SANTIAGO, P. SANGRÁ y M. CANTÓN. 1996. An application of satellite-derived sea surface temperature to the skipjack (*Katsuwonus pelamis* Linnaeus, 1758) and albacore tuna (*Thunnus alalunga* Bonnaterre, 1788) fisheries in the north-east Atlantic. *Int. J. Remote Sens.*, 7(4): 749-759.
- RAMOS, A.G., J. COCA, A. WILLIAMS, M. PETIT y M. CANTÓN. 1997. Satellite-derived scatterometer/ERS-1 sea surface wind stress curl in the oceans. *ESA Bull.*, 414: 1391-1395.
- RÍOS, A.F., F.F. PÉREZ y F. FRAGA. 1987. Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of Azores. *Deep-Sea Res.*, 39(A3-4): 645-658.
- ROSS, N.H. y J.F. LOUIS. 1990. The influence of atmospheric stratification on scatterometer winds. *J. Geophys. Res.*, 95(C6): 9723-9730.
- SAFINA, C. 2001. Tuna conservation. En: *Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution*, B.A. Block y E.D. Stevens (editores). Academic Press, New York: 414-467.
- SAITO, S. 1973. Studies on fishing of albacore, *Thunnus alalunga* (Bonnaterre) by experimental deep-sea tuna long-line. *Mem. Fac. Fish., Hokkaido Univ.*, 21(2): 107-182.
- SANTIAGO, J. 1992. *La Pesca de Atún Blanco en Euskadi. Campañas 1990-1991*. Servicio Central de Publicaciones Gobierno Vasco, Vitoria. Colección Itkaso 9: 78 pp.
- SANTIAGO, J. 2004. Dinámica de la población de atún blanco (*Thunnus alalunga* Bonnaterre 1788) del Atlántico norte. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco: 354 pp.
- SANTIAGO, J., A.G. RAMOS y M. CANTÓN. 1993. Teledetección y pesca de atún blanco en el NE Atlántico. *Informes Técnicos del Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco*, 51: 142 pp.

- SAUNDERS, P.M. 1976. On the uncertainty of wind stress calculations. *J. Mar. Res.*, 34(2): 155-160.
- SAVINYKH, V.F. 1993. The epipelagic ichthyocene of subtropical and mixed waters in the northwestern Pacific ocean during winter. *J. Ichtyol.*, 33(5): 46-52.
- SCHROEDER, L.C., W.L. GRANTHAM, E.M. BRACALANTE, C.L. BRITT, K.S. SHANMUGAM, F.J. WENTZ, D.P. WYLIE y B.B. HINTON. 1985. Removal of ambiguous wind directions for a Ku-band wind scatterometer using three different azimuth angles. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23(2): 91-99.
- SCHULTZ, H. 1990. A circular median filter approach for resolving directional ambiguities in wind fields retrieved from spaceborne scatterometer data. *J. Geophys. Res.*, 95(C4): 5291-5303.
- SHADWICK, R.E., S.L. KATZ, K.E. KORSMEYER, T. KNOWER y J.W. COVELL. 1999. Muscle dynamics in skipjack tuna: Timing of red muscle shortening in relation to activation and body curvature during steady swimming. *J. Exp. Biol.*, 202(16): 2139-2150.
- SHAFFER, S.J., R.S. DUNBAR, S.V. HSAIO y D.G. LONG. 1991. A median-filter-based ambiguity removal algorithm for NSCAT. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 29(1): 167-173.
- SHARP, G.D. 1976. Vulnerability of tunas as a function of environmental profiles. En: *Maguro Gyokyo Kyogikay Gijiroku, Suisano-Enyo Suisan Kenkyusho (Proceedings of the Tuna Fishery Research Conference)*. Fisheries Agency-Far Seas Fisheries Research Laboratory, Shimizu.
- SHARP, G.D. 1978. Behavioural and physiological properties of tunas and their effects on vulnerability to fishing gear. En: *The Physiological Ecology of Tunas*, G.D. Sharp y A.E. Dizon (editores). Academic Press, San Diego: 397-449.
- SHARP, G.D. 1979. Areas of potentially successful exploitation of tunas in the Indian Ocean with emphasis on surface methods. *Dev. Rep. Indian Ocean Programme*, 47: 55 pp.
- SHARP, G.D. 2001. Tuna oceanography. En: *Tuna: Physiology, Ecology, and Evolution*, B.A. Block y E.D. Stevens (editores). Academic Press, New York: 345-385.
- SHARP, G.D. y J. VLYMEN. 1978. The relation between heat generation, conservation, and the swimming energetics of tunas. En: *The Physiological Ecology of Tunas*, G.D. Sharp y A.E. Dizon (editores). Academic Press, San Diego: 213-232.
- SMITH, S.D. 1980. Wind stress and heat flux over the ocean in gale-force winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 10(5): 709-726.

- STILES, B.W. 1999. Special wind vector data product: Direction Interval Retrieval with Thresholded Nudging (DIRTH) Version 1.1. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena: 10 pp.
- STRETTA, J.M. 1991. Forecasting tuna fishery with aerospatial remote sensing. *Int. J. Remote Sens.*, 12(4): 771-779.
- SUND, P.N., M. BLACKBURN y F. WILLIAMS. 1981. Tunas and their environment in the Pacific Ocean. A review. *Oceanogr. Mar. Biol., Annu. Rev.*, 19: 443-512.
- SY, A. 1988. Investigations of large-scale circulation patterns in the central North Atlantic: the North Atlantic current, the Azores current, and the mediterranean water plume area of Mid-Atlantic Ridge. *Deep-Sea Res.*, 35(A3): 383-413.
- TCHERNIA, P. 1980. *Descriptive Regional Oceanography, Vol. 3*. Pergamon Marine Series, Oxford: 253 pp.
- UDA, M. 1973. Pulsative fluctuation of oceanic fronts in association with the tuna fishing grounds and fisheries. *J. Fac. Mar. Sci. Technol., Tokai Univ.*, 7: 245-265.
- UEYANAGI, S. 1969. Observations on the the distribution of tuna larvae in the Indo-Pacific Ocean with emphasis on the delineation of the spawning areas of albacore, *Thunnus alalunga*. *Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab.*, 2: 177-256.
- ULABY, F.T., R.K. MOORE y A.K. FUNG. 1981. *Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Vol. 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Addison-Wesley, Massachusetts: 456 pp.
- ULABY, F.T., R.K. MOORE y A.K. FUNG. 1982. *Microwave Remote Sensing. Active and Pasive, Vol. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Addison-Wesley, Massachusetts: 607 pp.
- ULABY, F.T., R.K. MOORE y A.K. FUNG. 1986. *Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Vol. 3: Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications*. Artech House, Inc., Massachusetts: 1097 pp.
- VALIELA, I. 1995. *Marine Ecological Processes*. Springer, New York: 686 pp.
- WENTZ, F.J. 1991. A simplified wind vector algorithm for satellite scatterometers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 8: 697-704.
- WENTZ, F.J. 1996. Climatology of 14 GHz atmospheric attenuation. Remote Sensing Systems Technology Memories 020596, California.
- WENTZ, F.J., S. PETEHERYCH y L.A. THOMAS. 1984. A model function for ocean radar cross-sections at 14.6 GHz. *J. Geophys. Res.*, 89(C3): 3689-3704.

WOICESHYN, P.M., M.G. WURTELE, D.H. BOGGS, L.F. MCGOLDRICK y S. PETEHRYCH.  
1986. The necessity for a new parameterization of an empirical model for  
wind/ocean scatterometry. *J. Geophys. Res.*, 91(C2): 2273-2288.

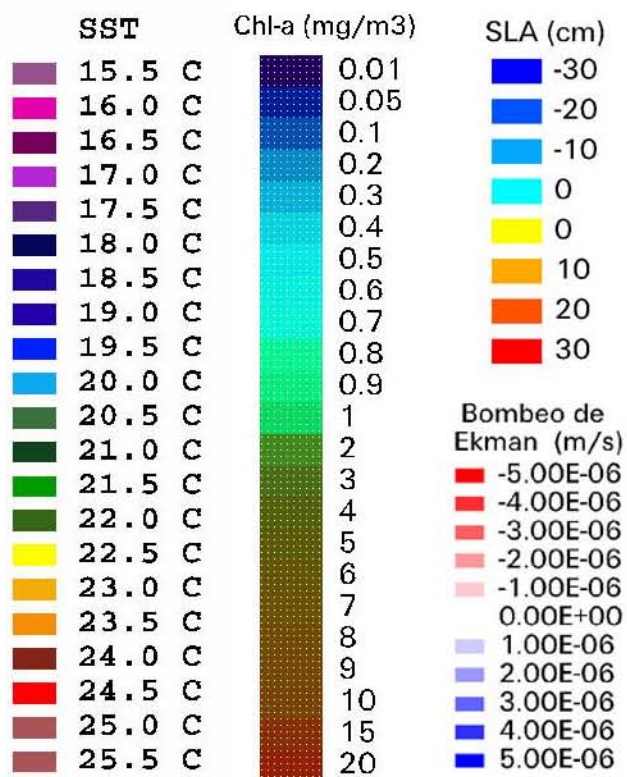
WURTELE, M.G., P.M. WOICESHYN, S. PETEHRYCH, M. BOROWSKY y W.S. APPLEBY.  
1982. Wind direction alias removal studies of Seasat scatterometer-derived wind  
fields. *J. Geophys. Res.*, 87(C5): 3365-3377.

#### URL

- [www.azti.es](http://www.azti.es). Informe técnico: tunidos.pdf. 10 pp.



**ANEXO I:**  
**Capturas sobre las variables de teledetección**



**Figura AI-0:** Paletas de colores usadas en la visualización de las variables.



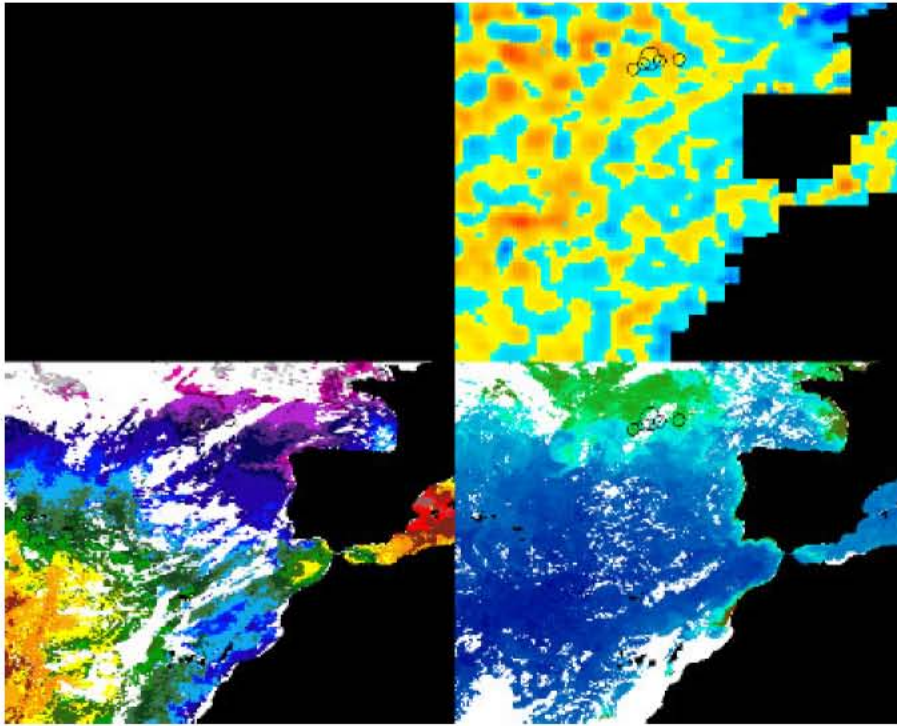


Figura AI-1: Capturas sobre variables de teledetección el día 5 de julio de 1999.

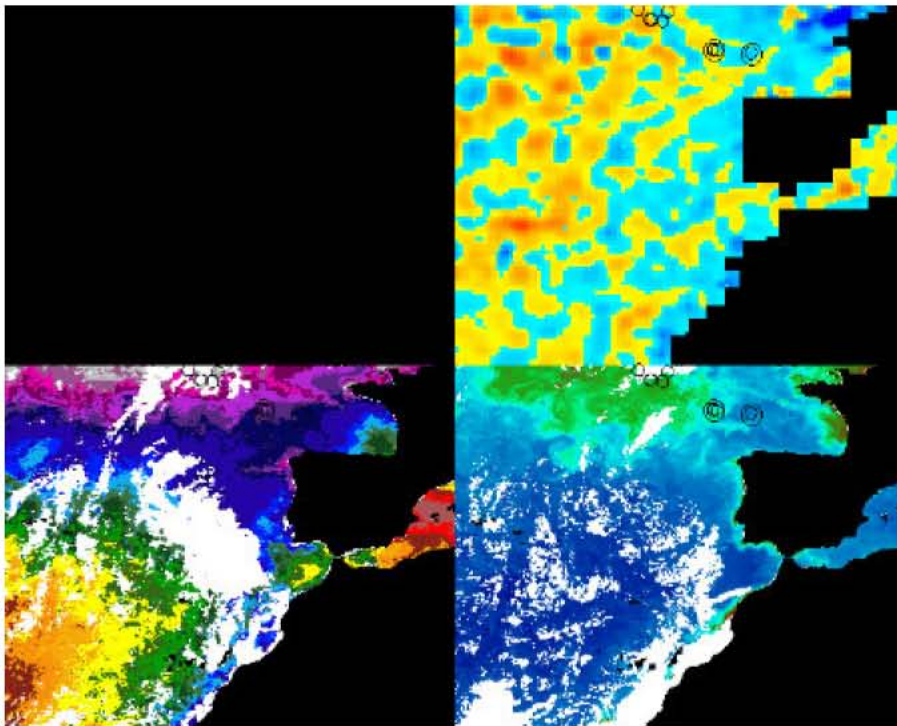
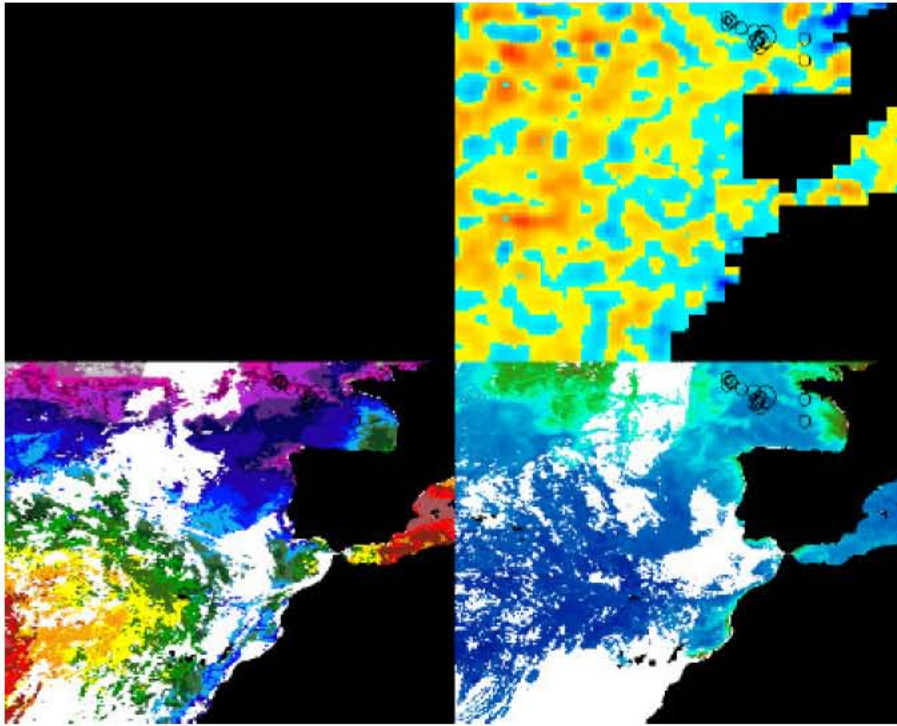
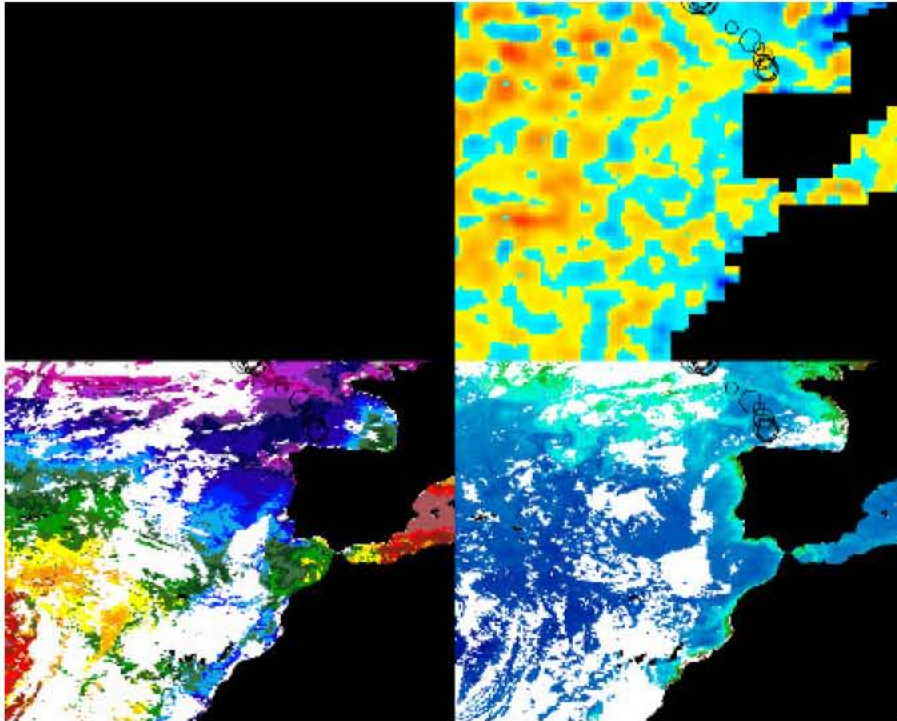


Figura AI-2: Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de julio de 1999.



**Figura AI-3:** Capturas sobre variables de teledetección el día 11 de julio de 1999.



**Figura AI-4:** Capturas sobre variables de teledetección el día 13 de julio de 1999.

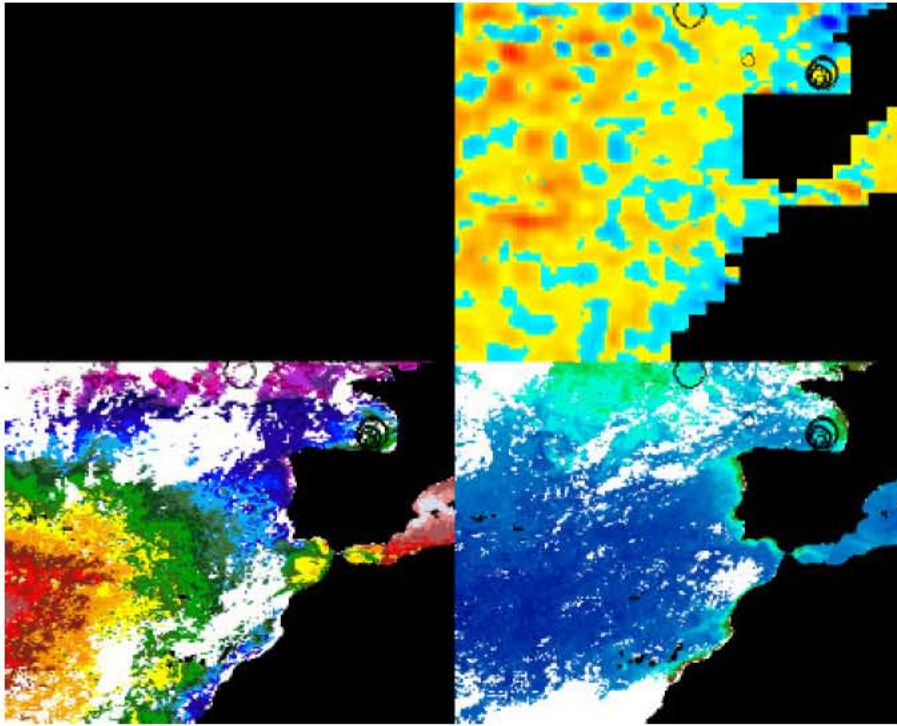


Figura AI-5: Capturas sobre variables de teledetección el día 20 de julio de 1999.

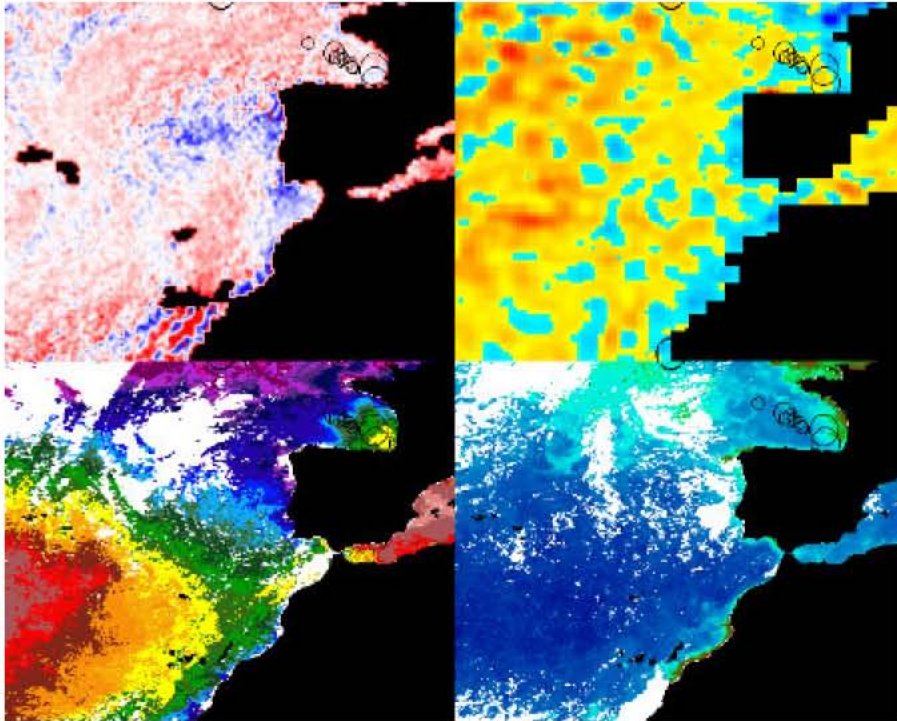
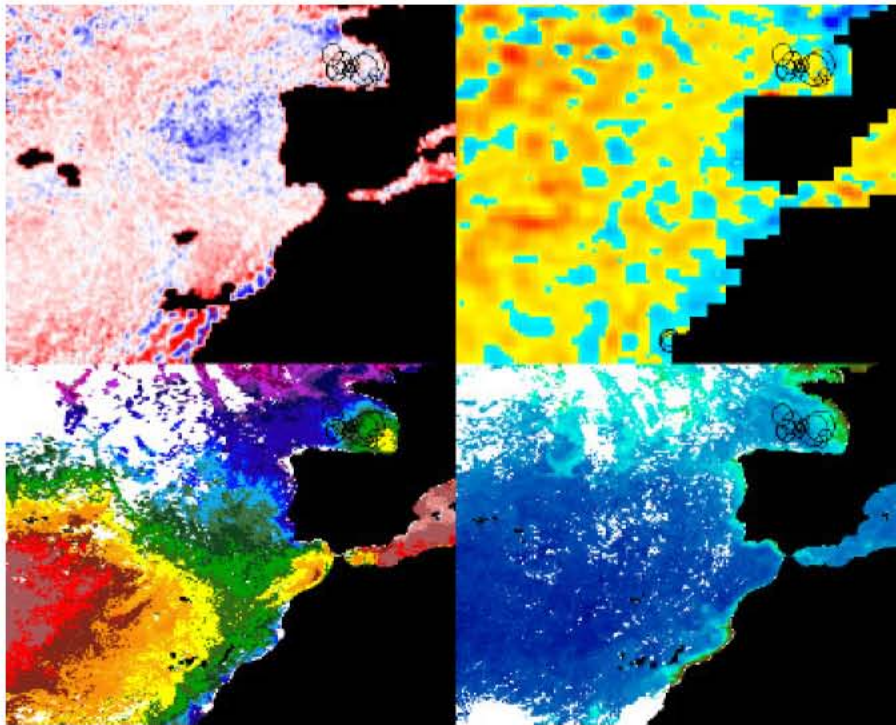
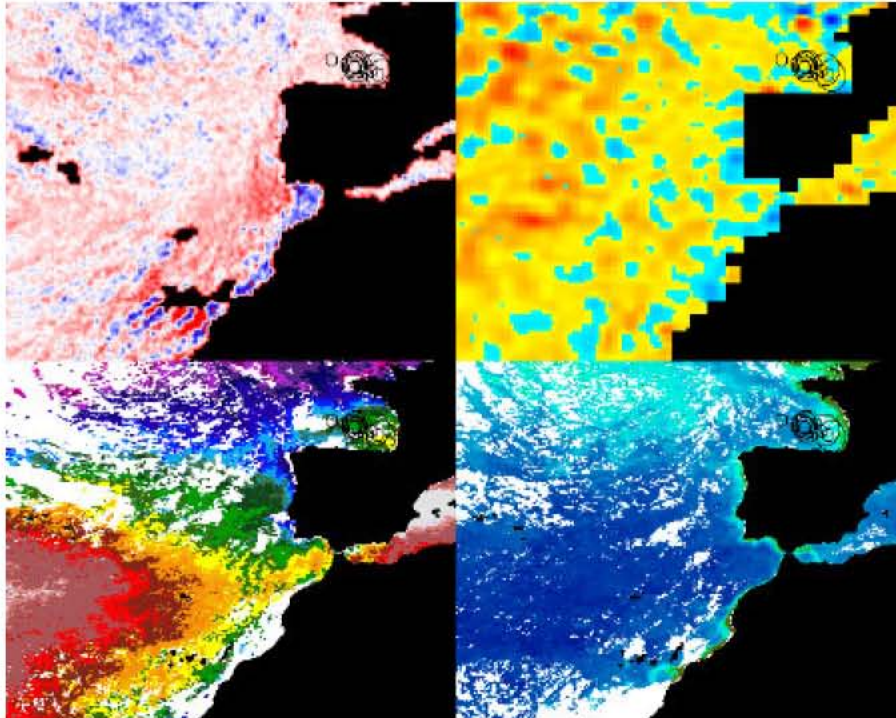


Figura AI-6: Capturas sobre variables de teledetección el día 25 de julio de 1999.



**Figura AI-7:** Capturas sobre variables de teledetección el día 27 de julio de 1999.



**Figura AI-8:** Capturas sobre variables de teledetección el día 3 de agosto de 1999.

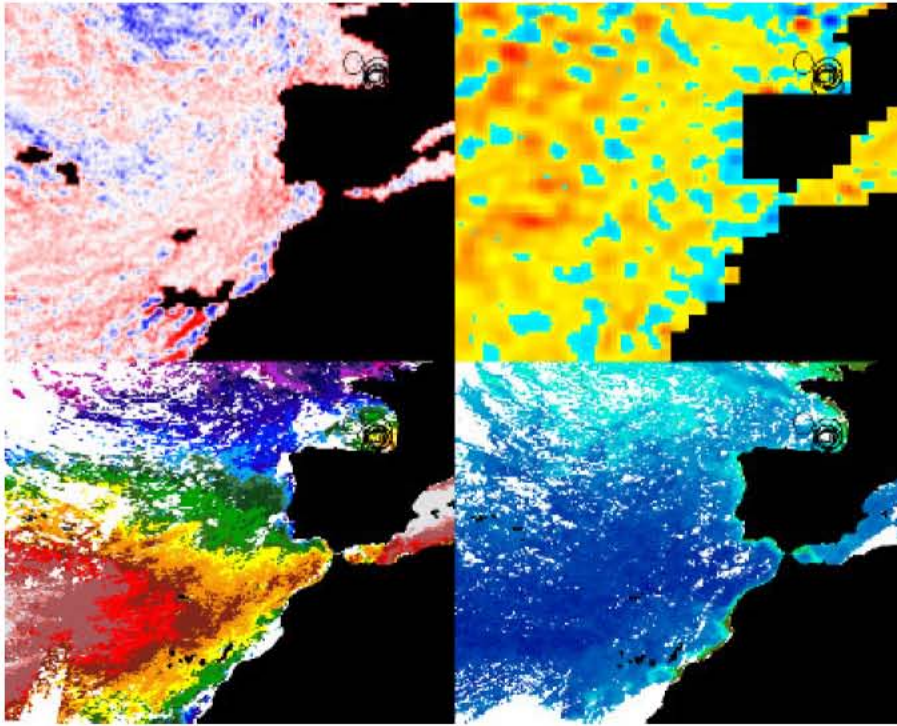


Figura AI-9: Capturas sobre variables de teledetección el día 5 de agosto de 1999.

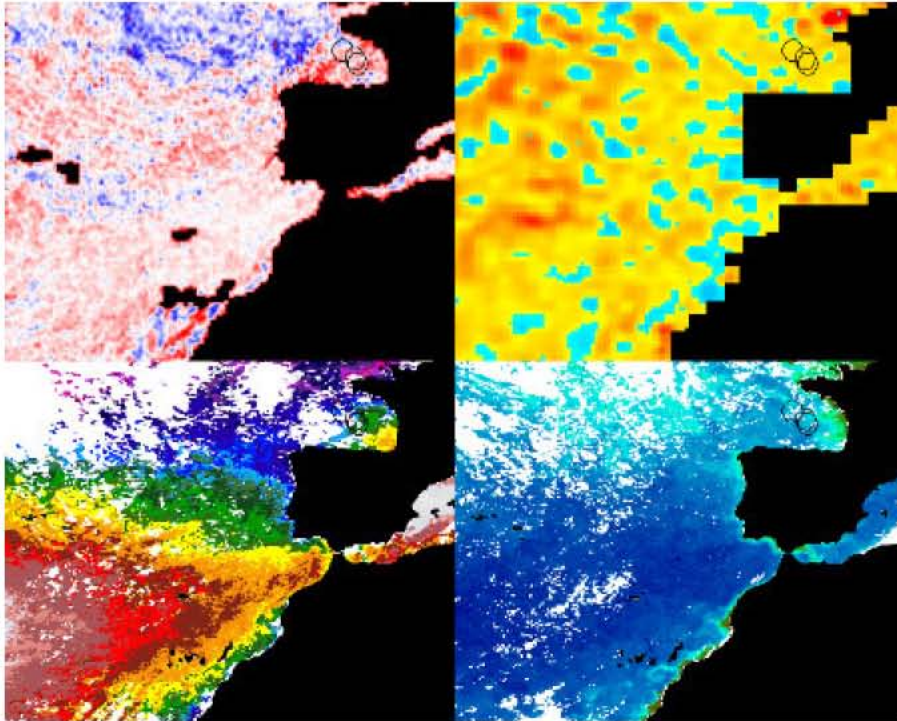
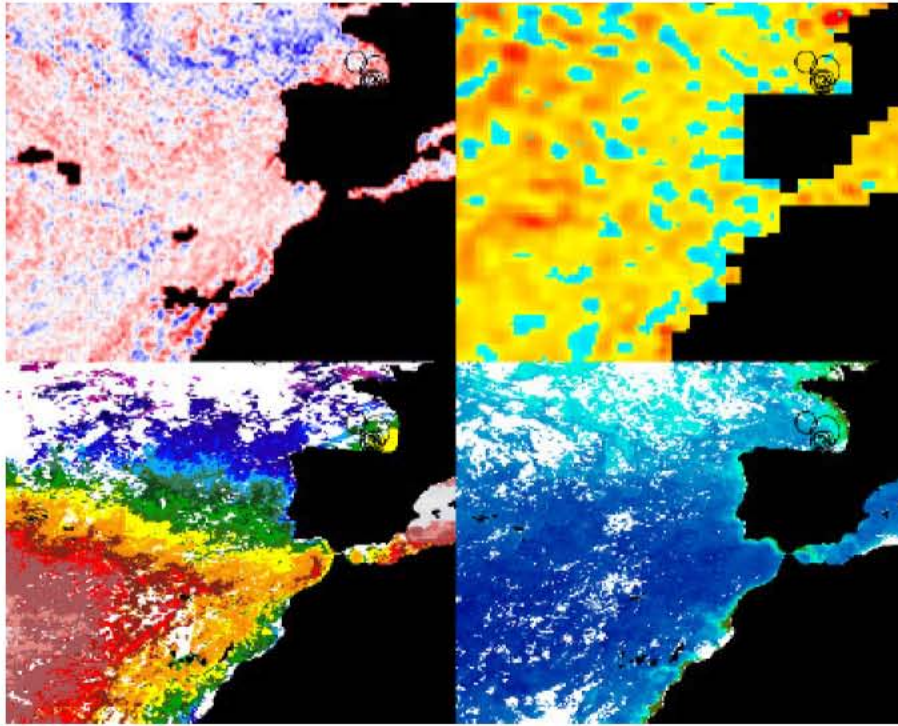
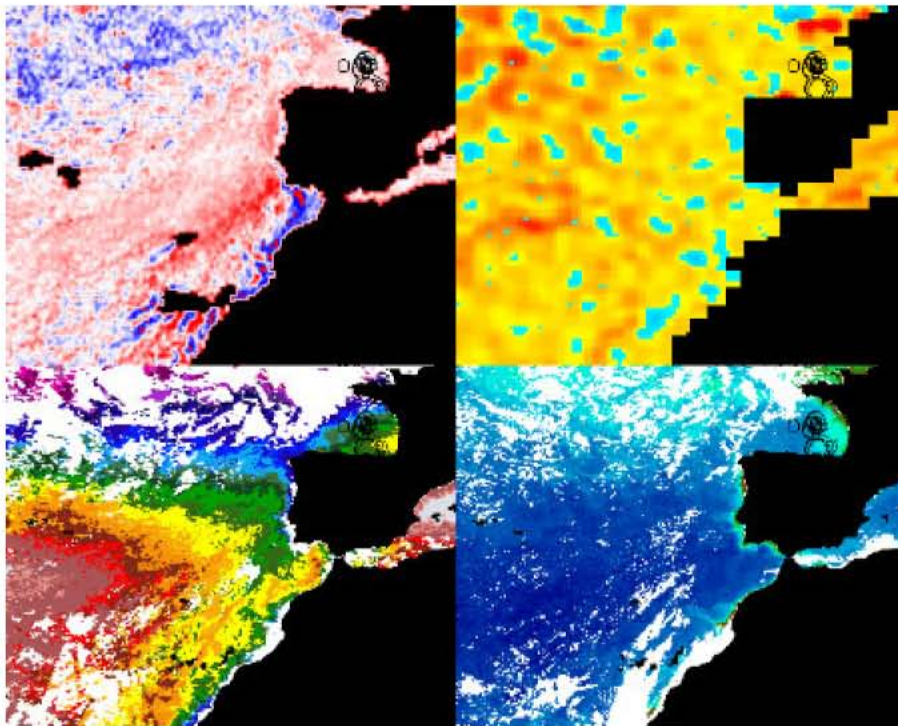


Figura AI-10: Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de agosto de 1999.



**Figura AI-11:** Capturas sobre variables de teledetección el día 10 de agosto de 1999.



**Figura AI-12:** Capturas sobre variables de teledetección el día 23 de agosto de 1999.

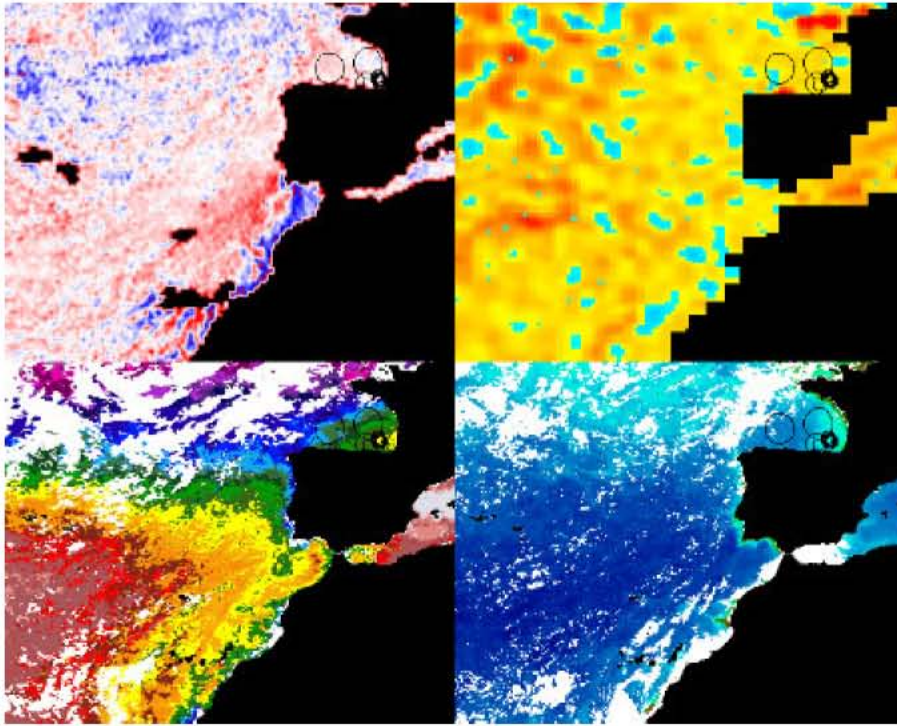


Figura AI-13: Capturas sobre variables de teledetección el día 25 de agosto de 1999.

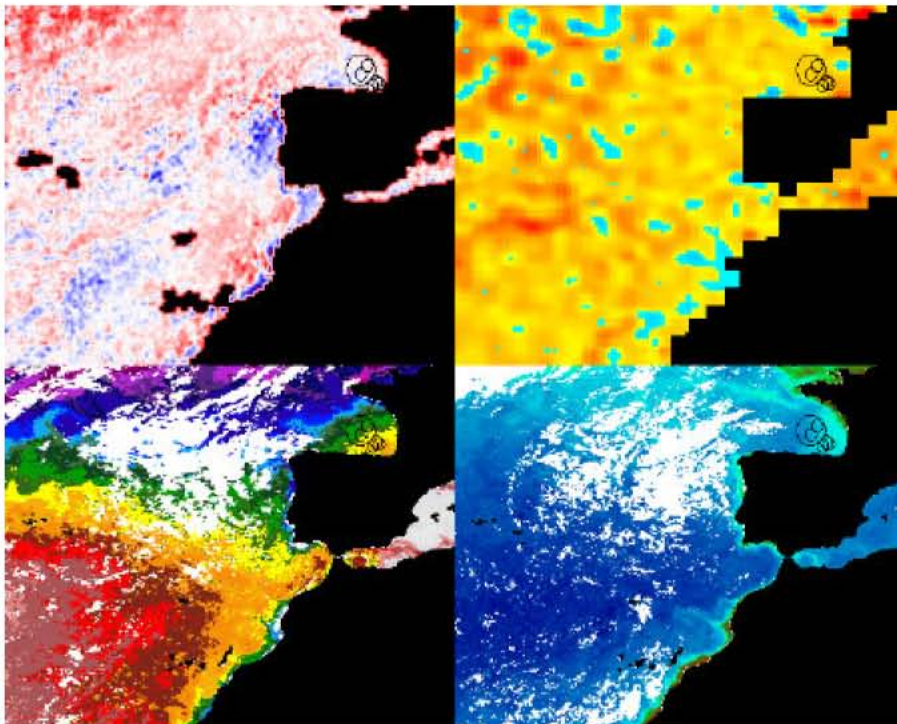
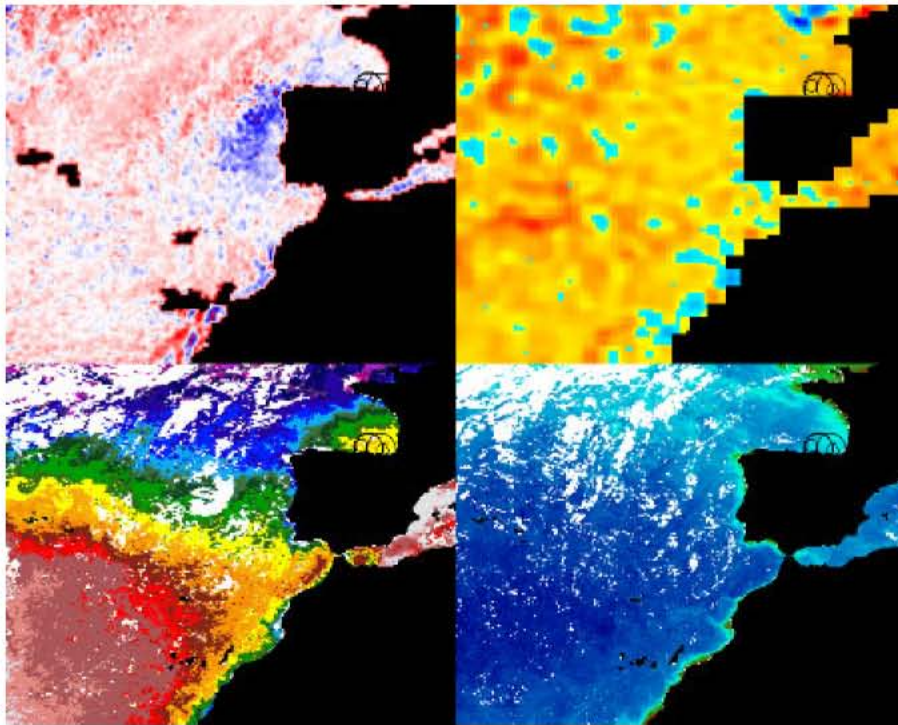
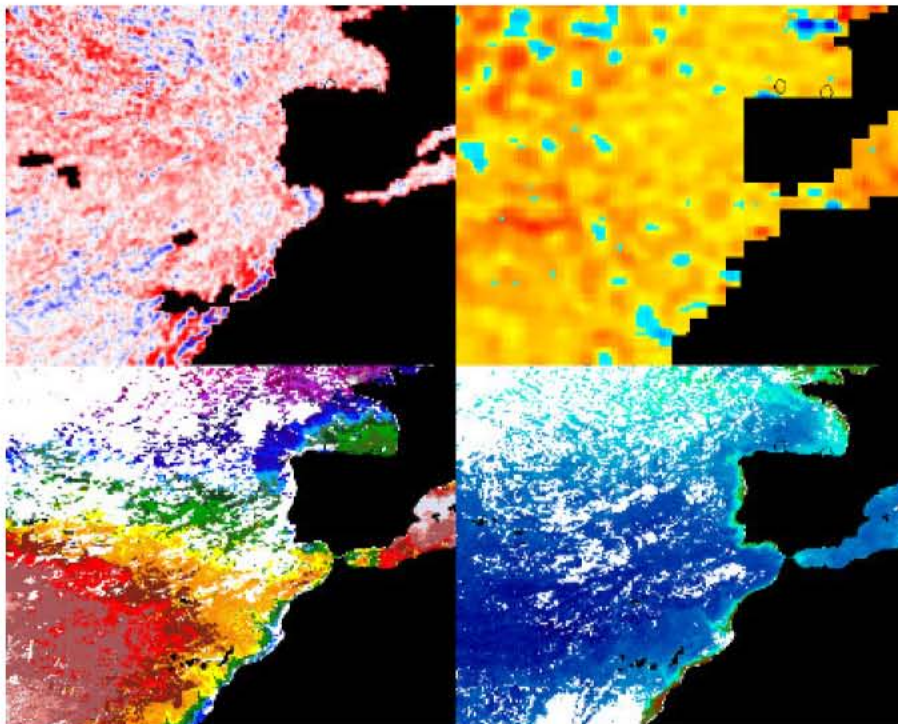


Figura AI-14: Capturas sobre variables de teledetección el día 1 de septiembre de 1999.



**Figura AI-15:** Capturas sobre variables de teledetección el día 5 de septiembre de 1999.



**Figura AI-16:** Capturas sobre variables de teledetección el día 17 de septiembre de 1999.



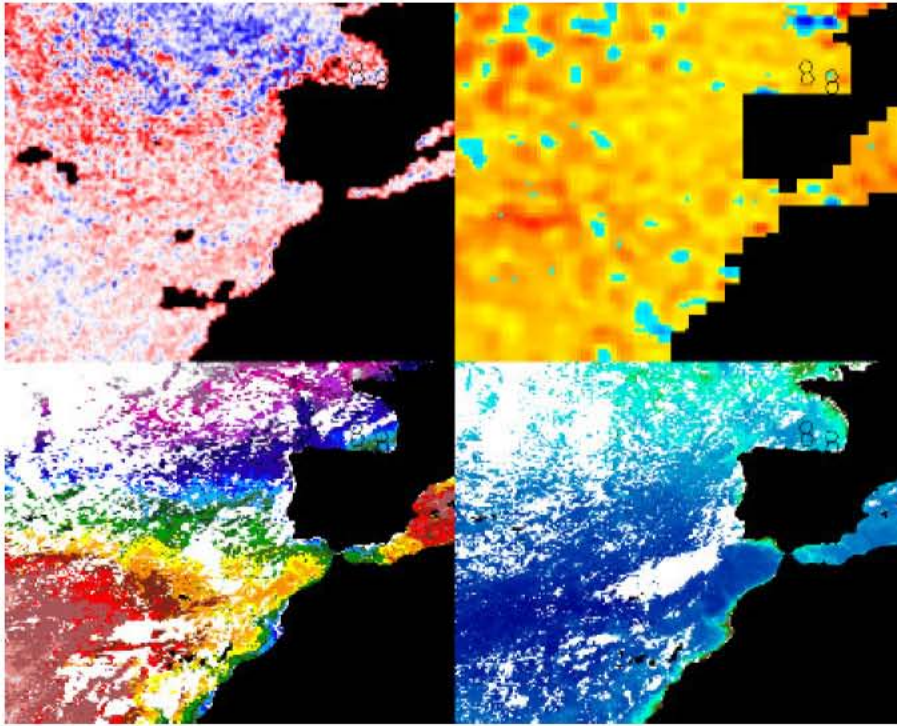


Figura AI-17: Capturas sobre variables de teledetección el día 23 de septiembre de 1999.

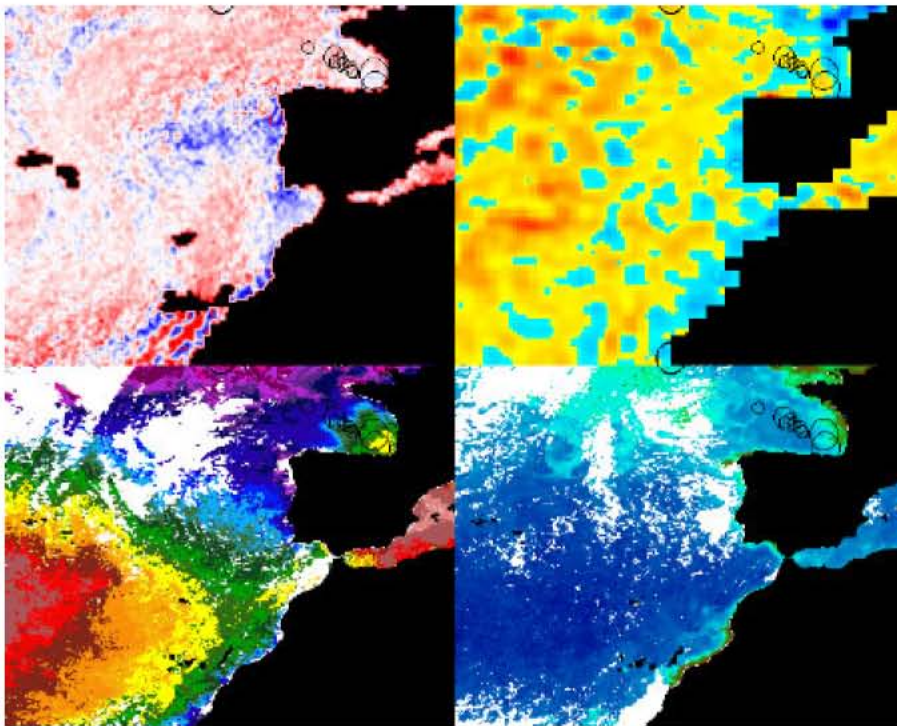
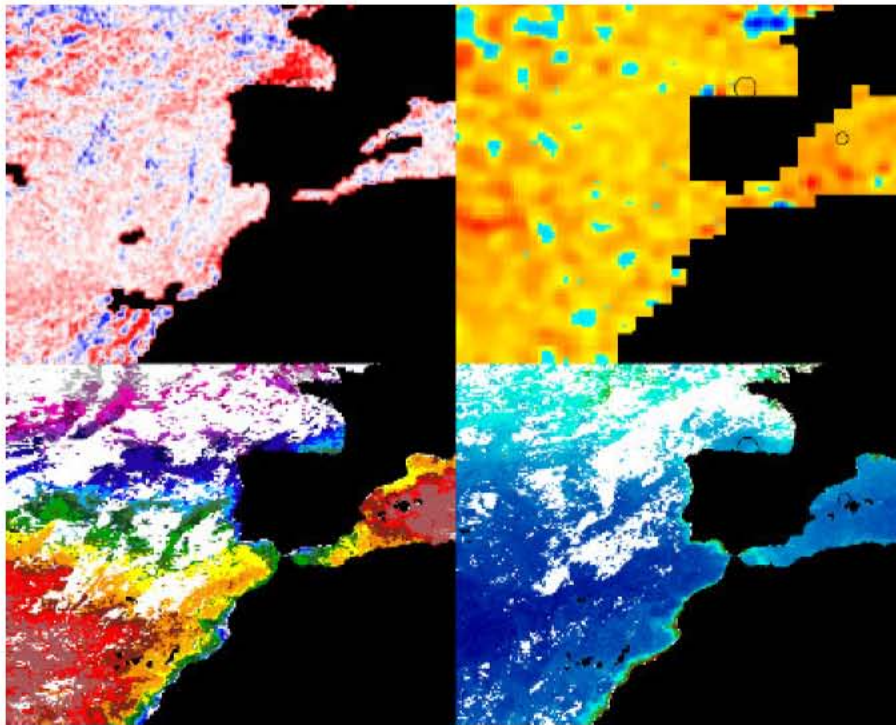
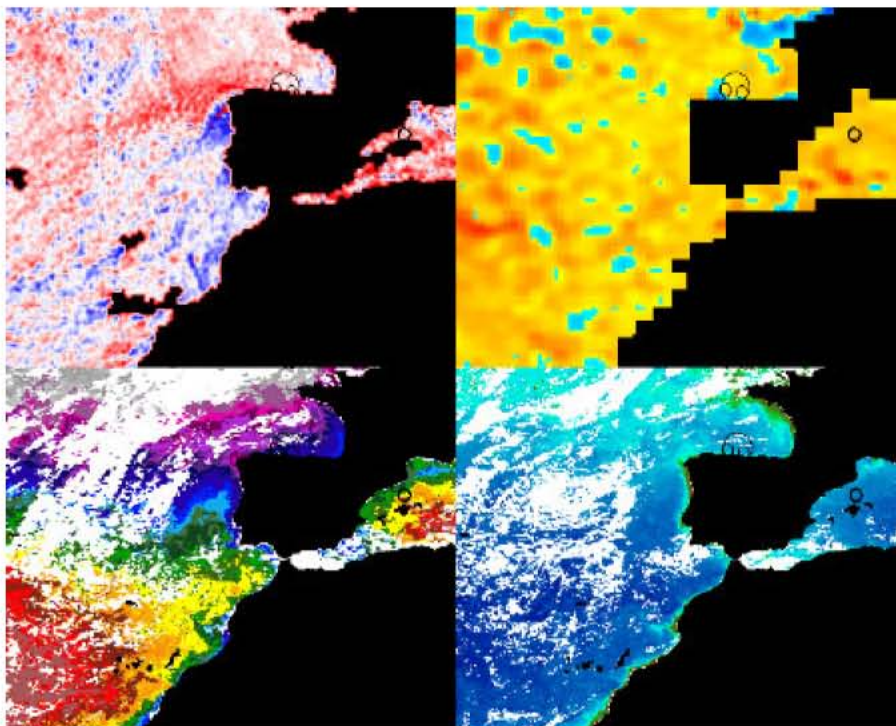


Figura AI-18: Capturas sobre variables de teledetección el día 25 de septiembre de 1999.



**Figura AI-19:** Capturas sobre variables de teledetección el día 28 de septiembre de 1999.



**Figura AI-20:** Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de octubre de 1999.

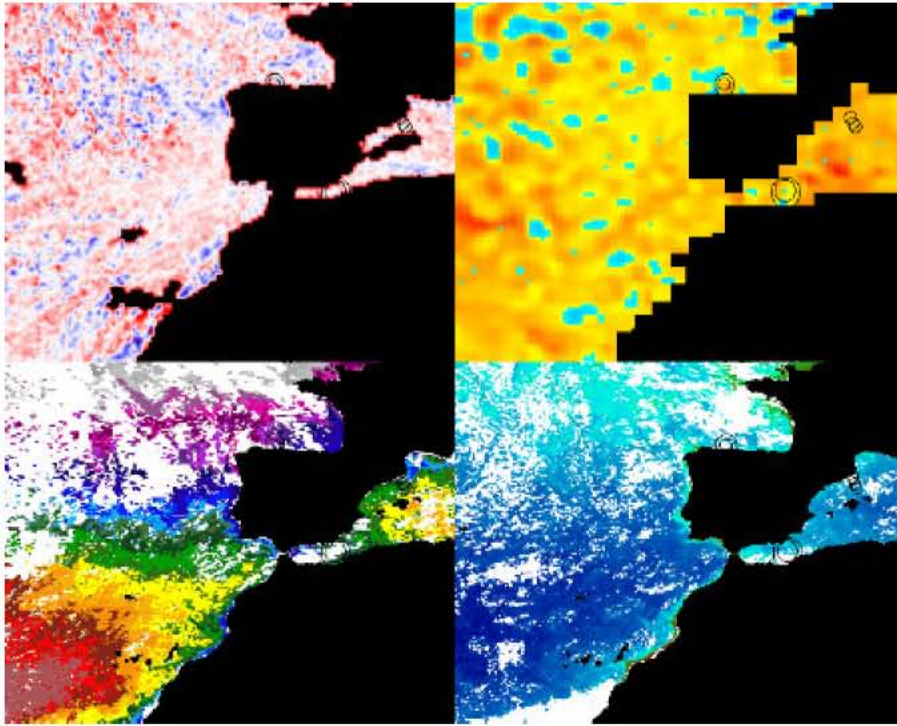


Figura AI-21: Capturas sobre variables de teledetección el día 16 de octubre de 1999.

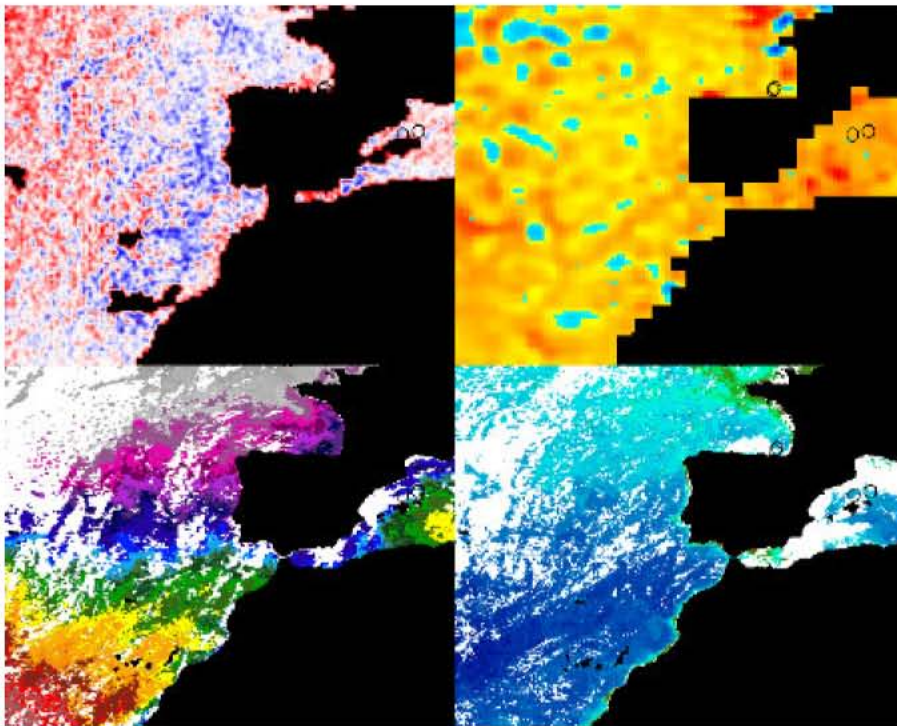
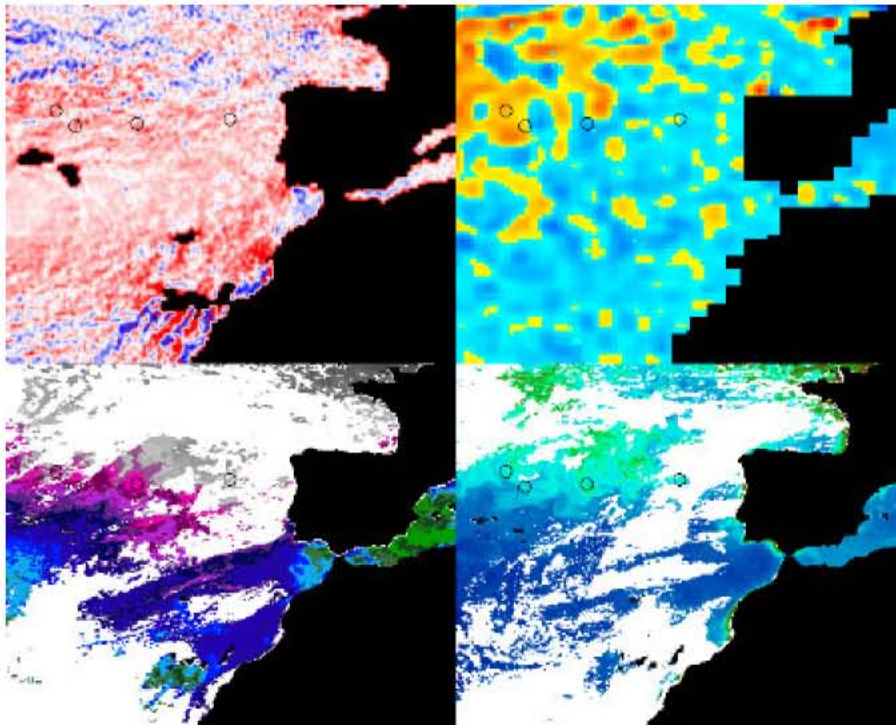
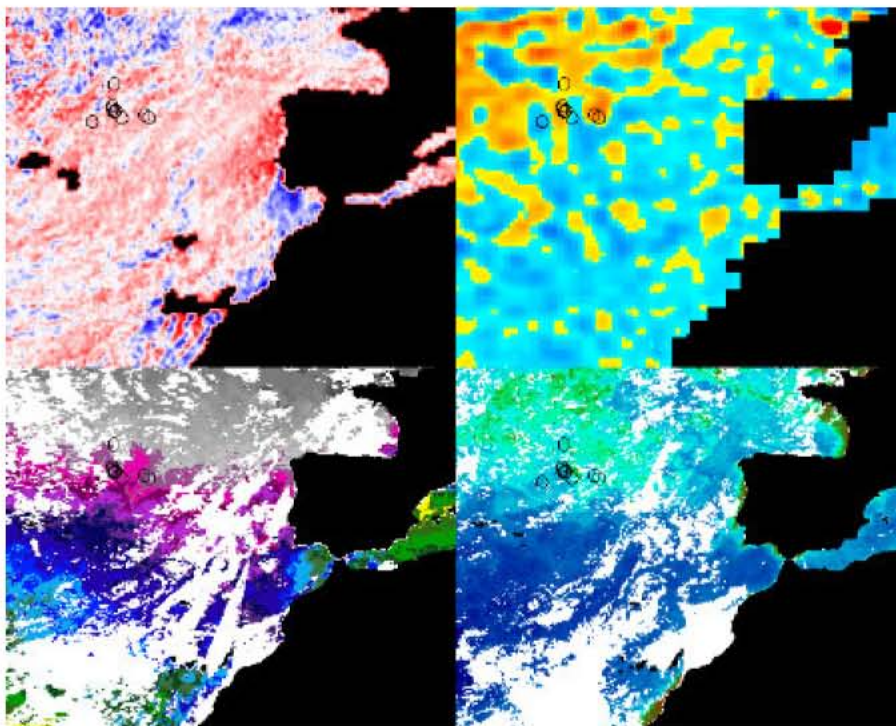


Figura AI-22: Capturas sobre variables de teledetección el día 28 de octubre de 1999.



**Figura AI-23:** Capturas sobre variables de teledetección el día 29 de mayo de 2000.



**Figura AI-24:** Capturas sobre variables de teledetección el día 3 de junio de 2000.

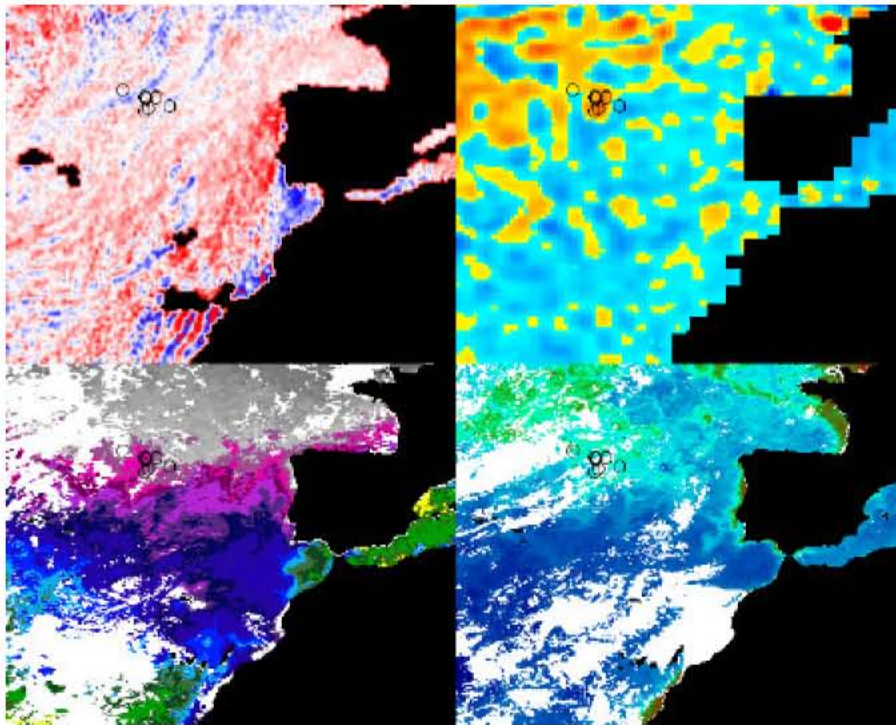


Figura AI-25: Capturas sobre variables de teledetección el día 5 junio de 2000.

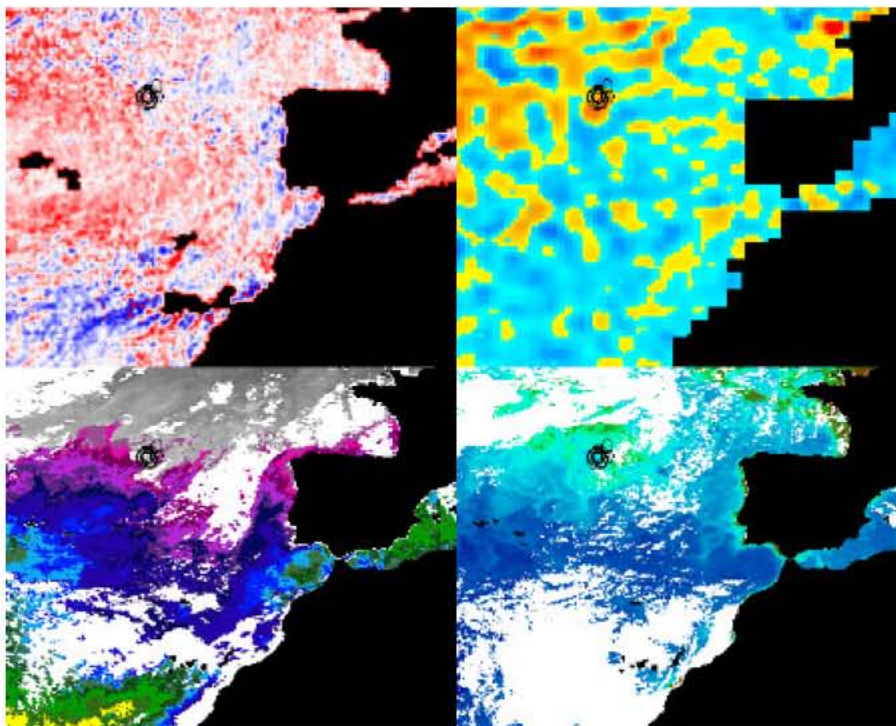
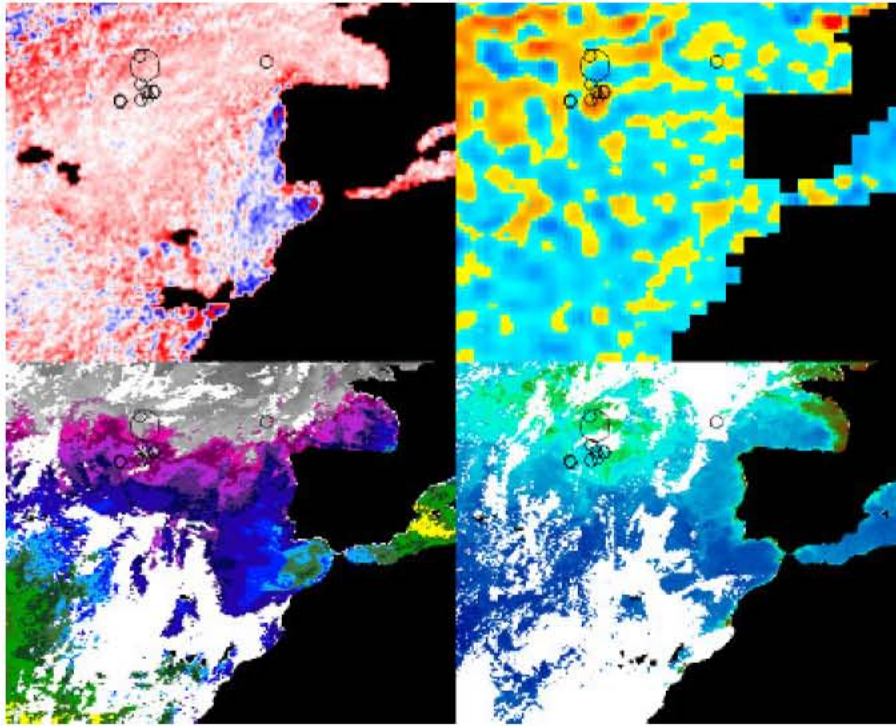
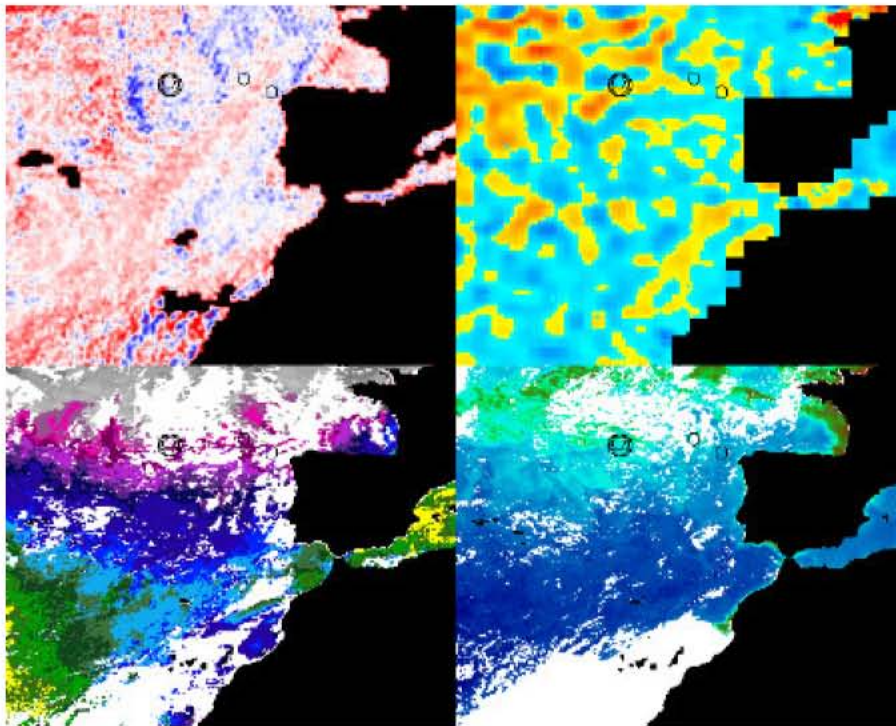


Figura AI-26: Capturas sobre variables de teledetección el día 11 de junio de 2000.



**Figura AI-27:** Capturas sobre variables de teledetección el día 15 de junio de 2000.



**Figura AI-28:** Capturas sobre variables de teledetección el día 20 de junio de 2000.

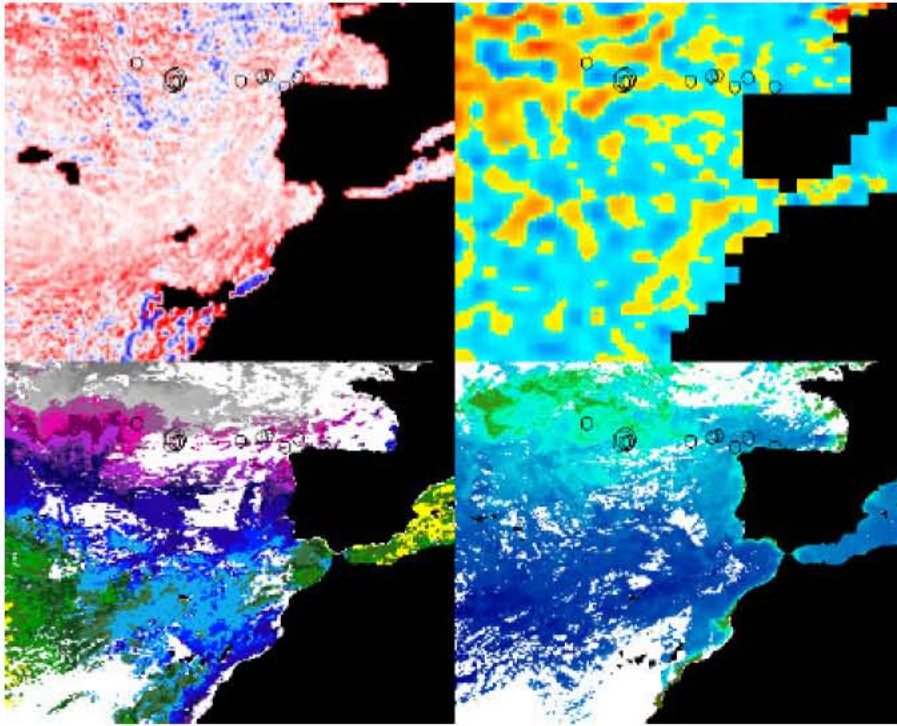


Figura AI-29: Capturas sobre variables de teledetección el día 22 de junio de 2000.

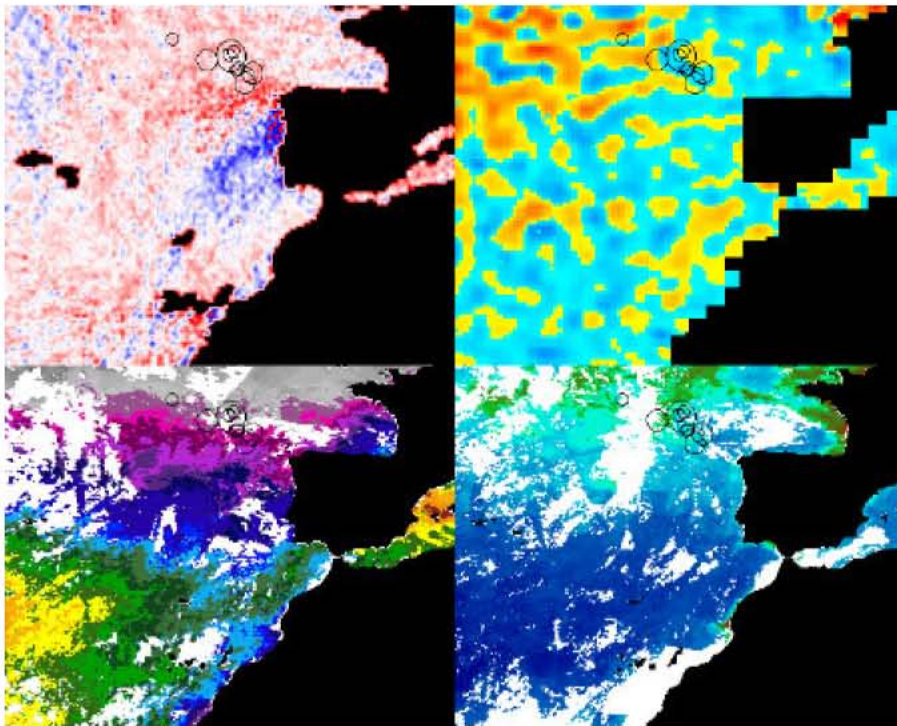
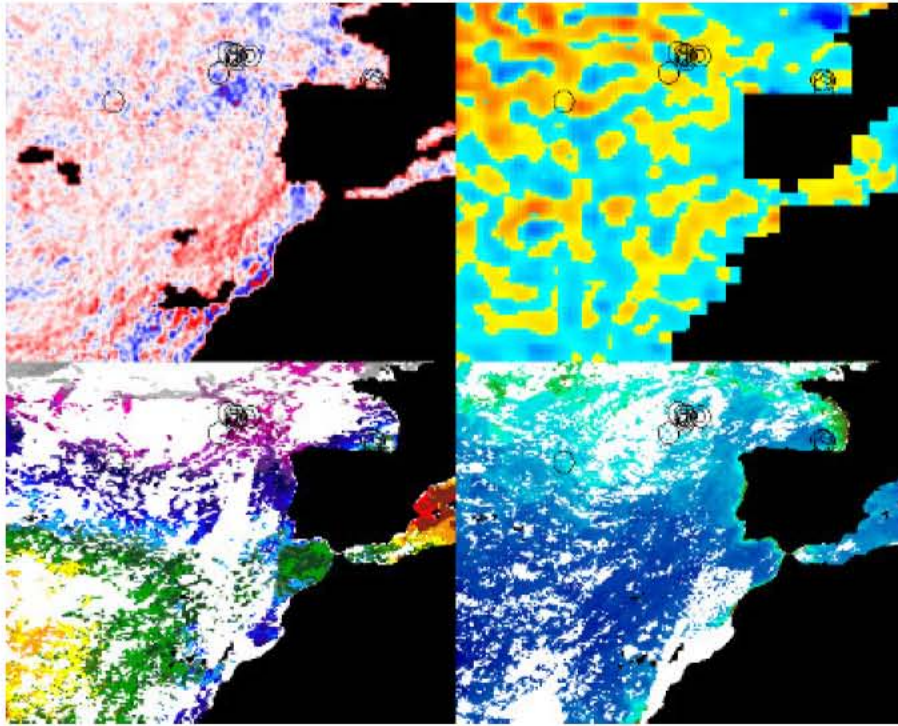
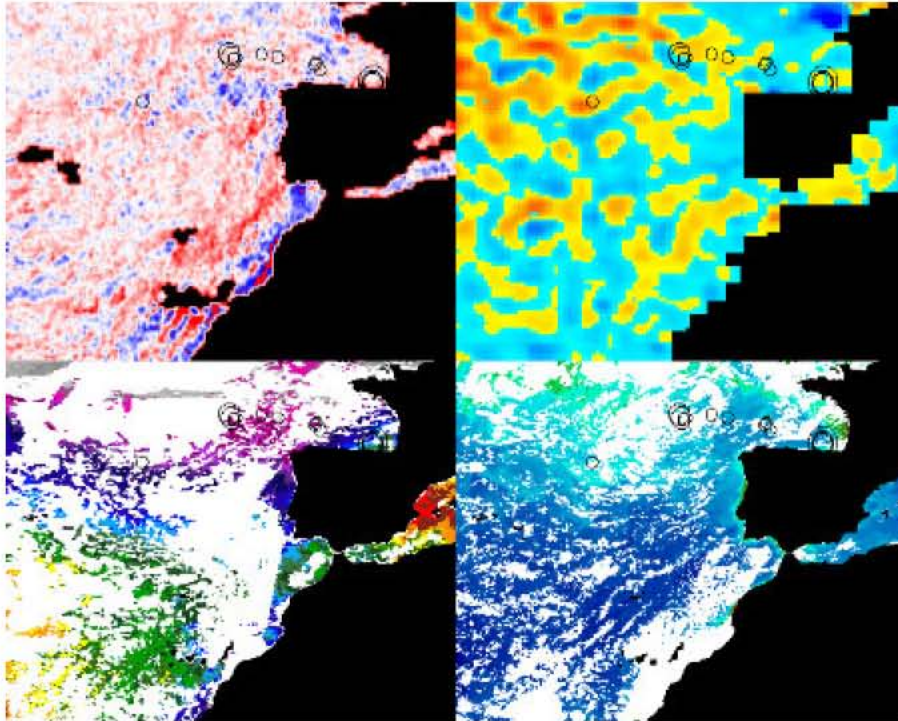


Figura AI-30: Capturas sobre variables de teledetección el día 27 de junio de 2000.



**Figura AI-31:** Capturas sobre variables de teledetección el día 7 de julio de 2000.



**Figura AI-32:** Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de julio de 2000.



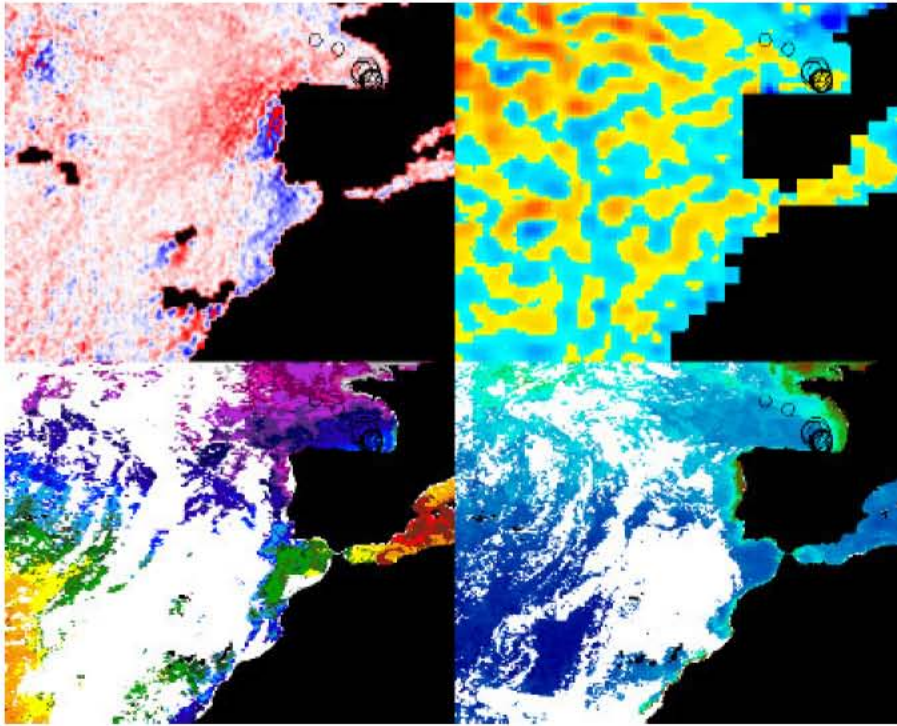


Figura AI-33: Capturas sobre variables de teledetección el día 18 de julio de 2000.

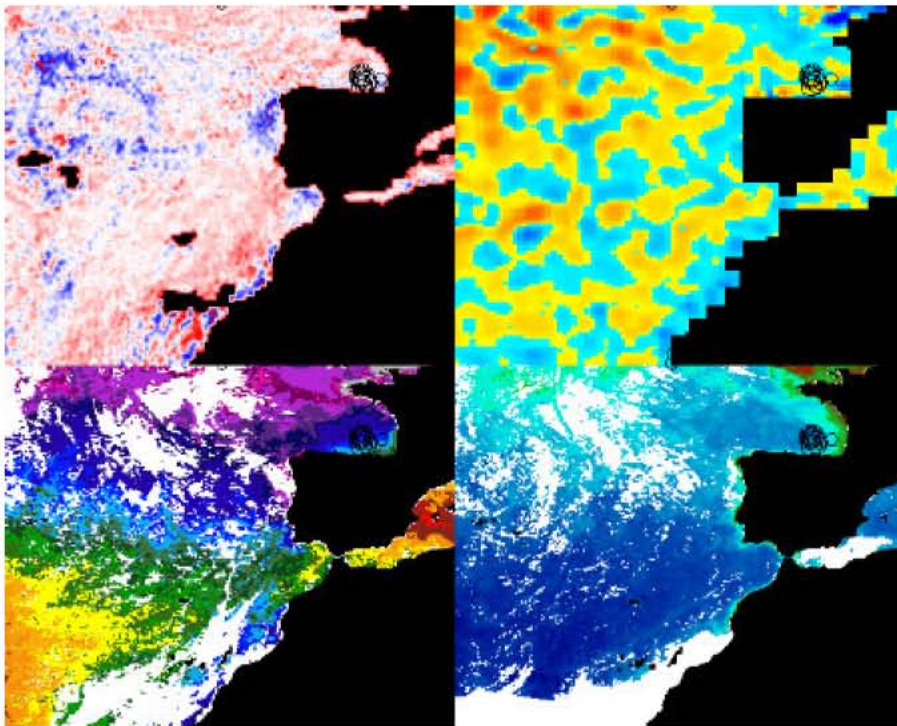
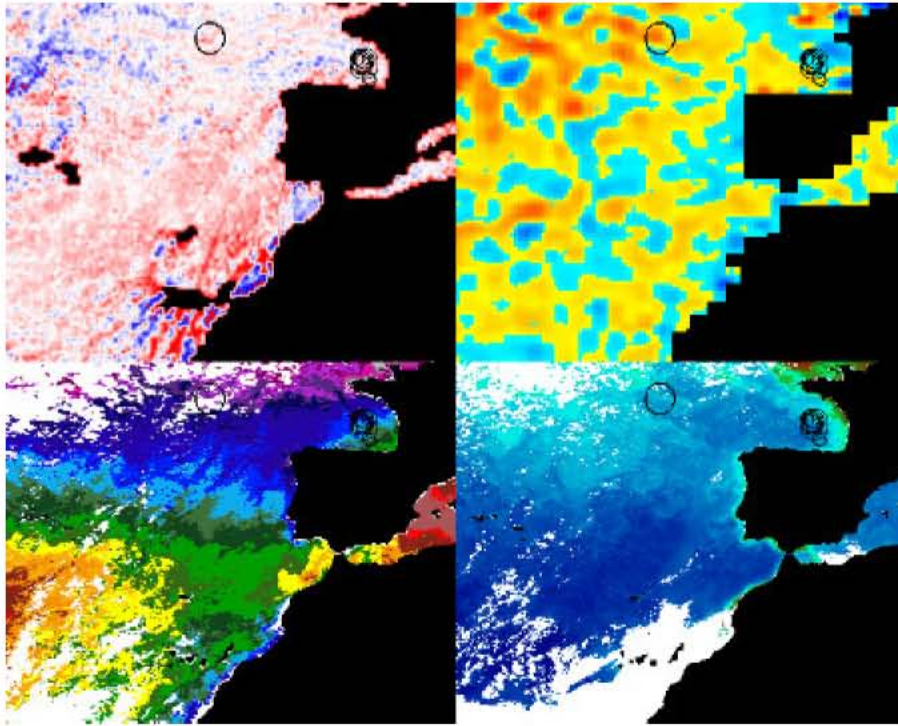
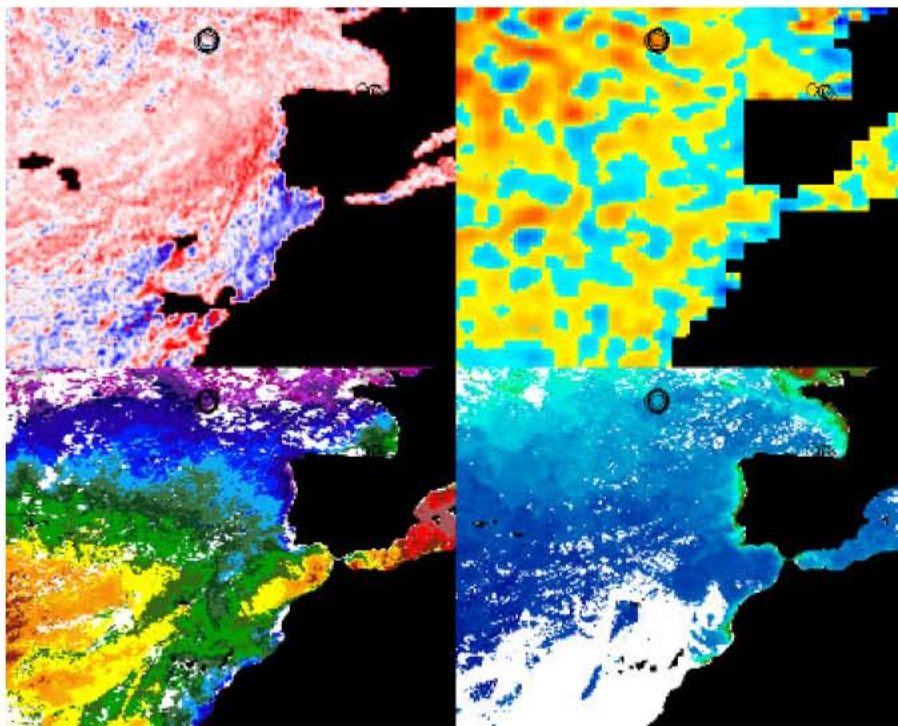


Figura AI-34: Capturas sobre variables de teledetección el día 21 de julio de 2000.



**Figura AI-35:** Capturas sobre variables de teledetección el día 29 de julio de 2000.



**Figura AI-36:** Capturas sobre variables de teledetección el día 3 de agosto de 2000.

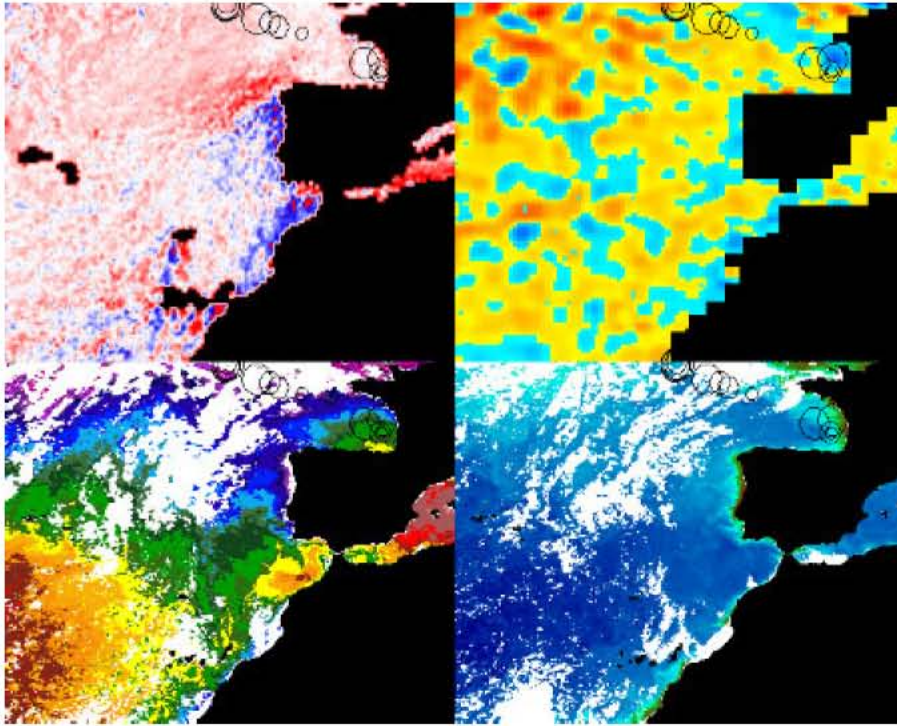


Figura AI-37: Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de agosto de 2000.

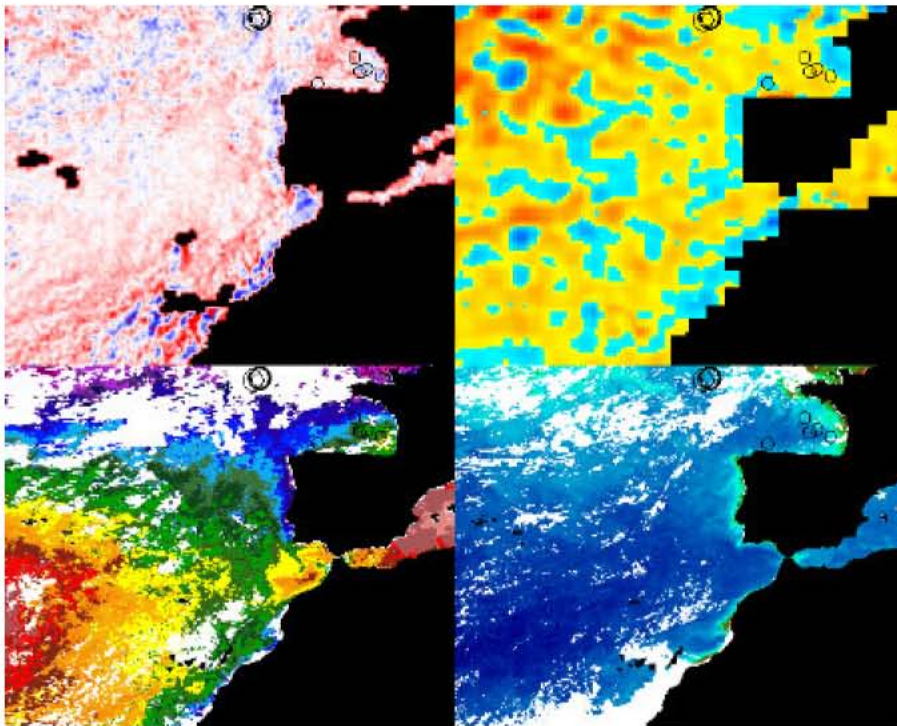
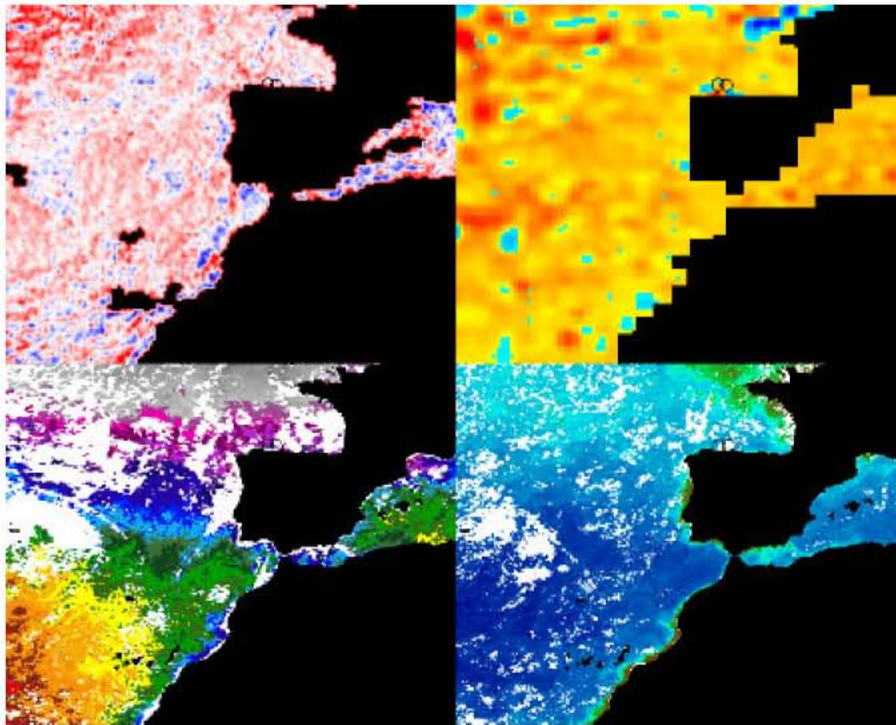
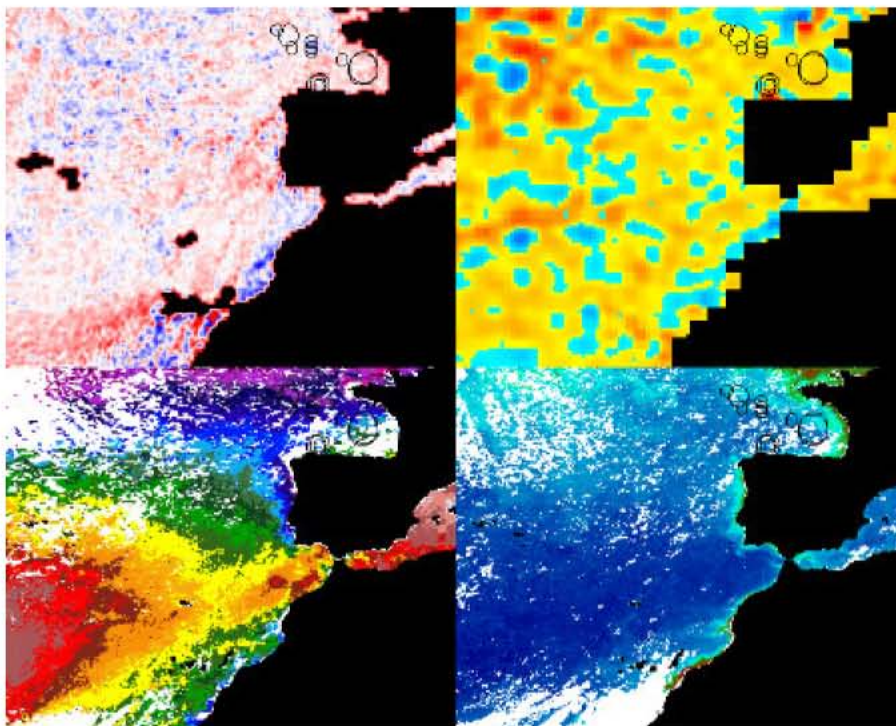


Figura AI-38: Capturas sobre variables de teledetección el día 13 de agosto de 2000.



**Figura AI-39:** Capturas sobre variables de teledetección el día 17 de agosto de 2000.



**Figura AI-40:** Capturas sobre variables de teledetección el día 20 de agosto de 2000.

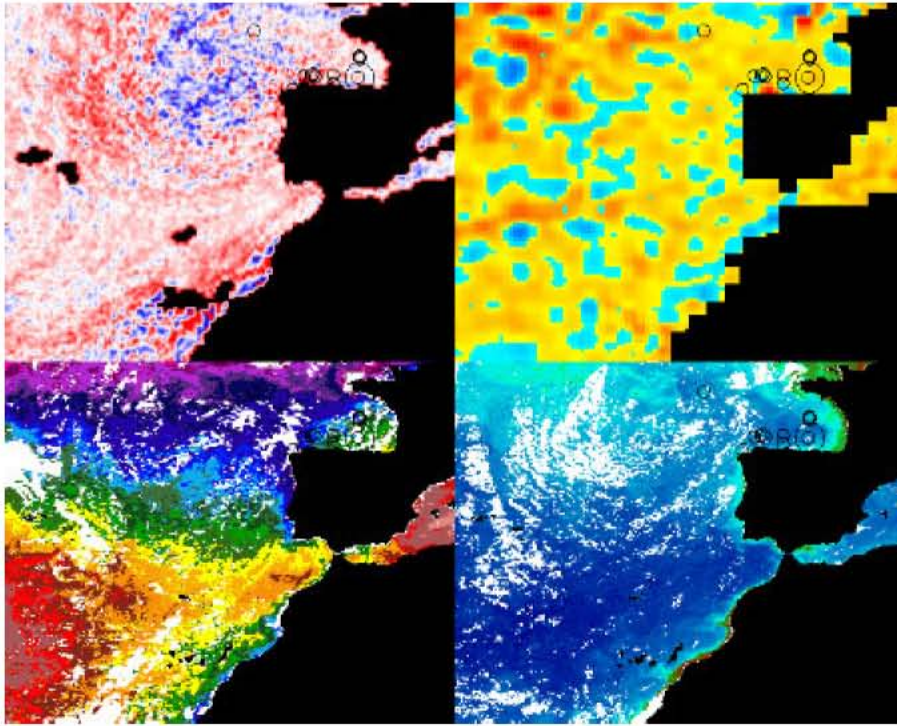


Figura AI-41: Capturas sobre variables de teledetección el día 24 de agosto de 2000.

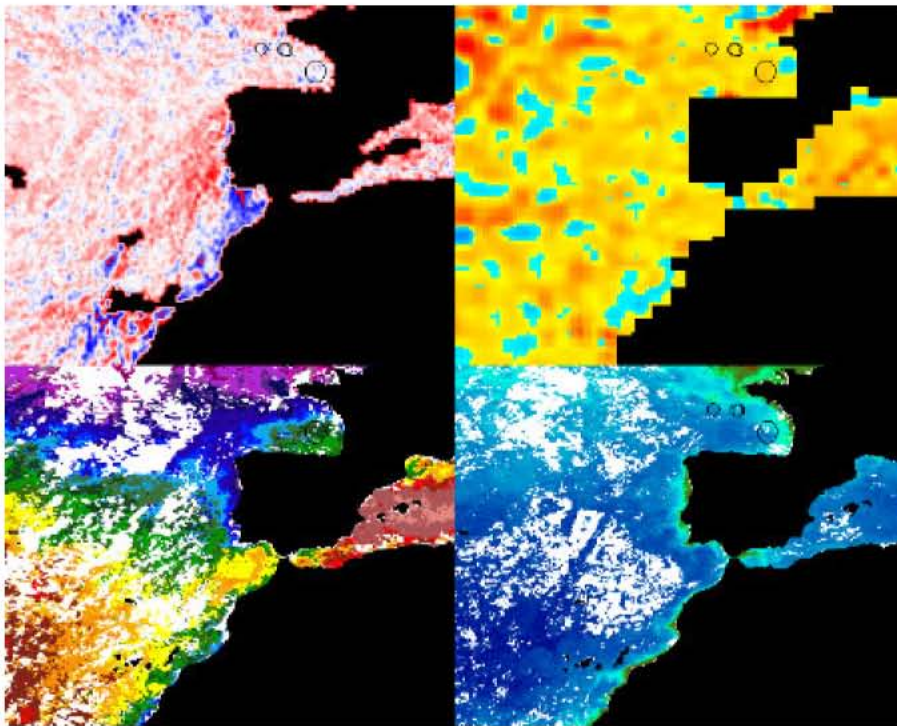
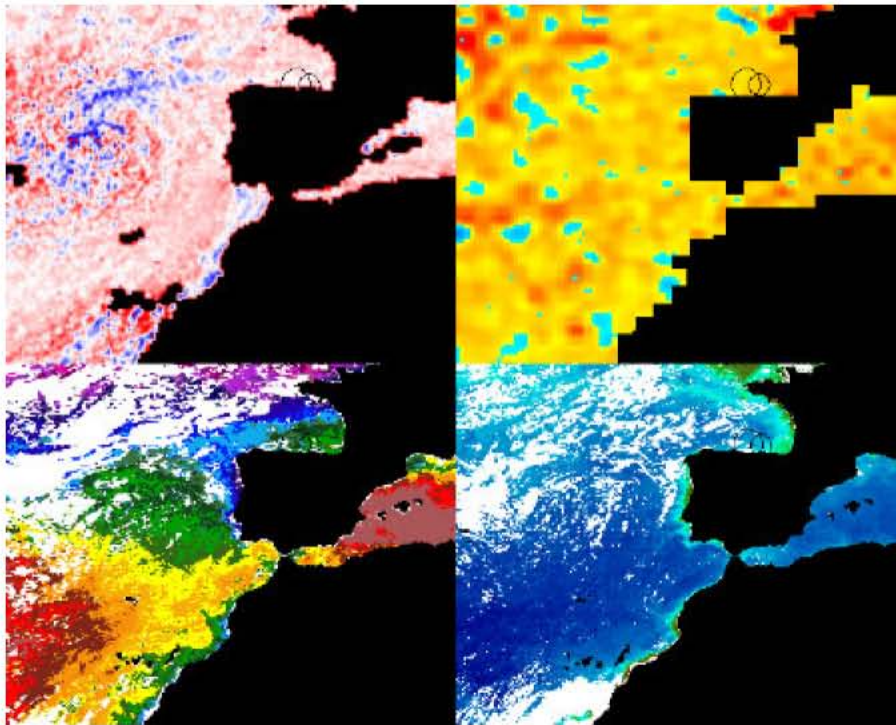
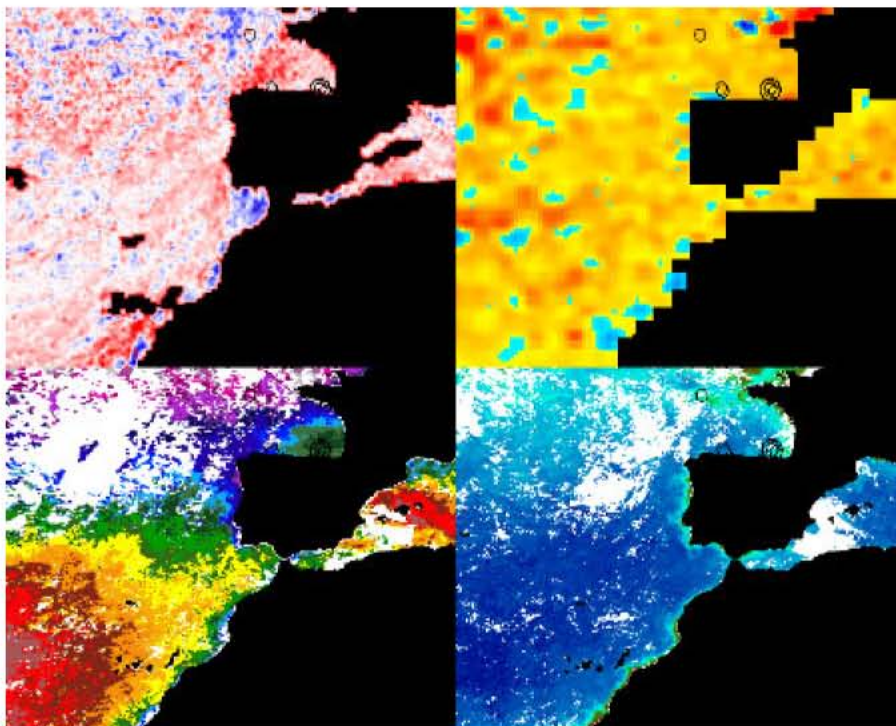


Figura AI-42: Capturas sobre variables de teledetección el día 1 de septiembre de 2000.



**Figura AI-43:** Capturas sobre variables de teledetección el día 16 de septiembre de 2000.



**Figura AI-44:** Capturas sobre variables de teledetección el día 25 de septiembre de 2000.

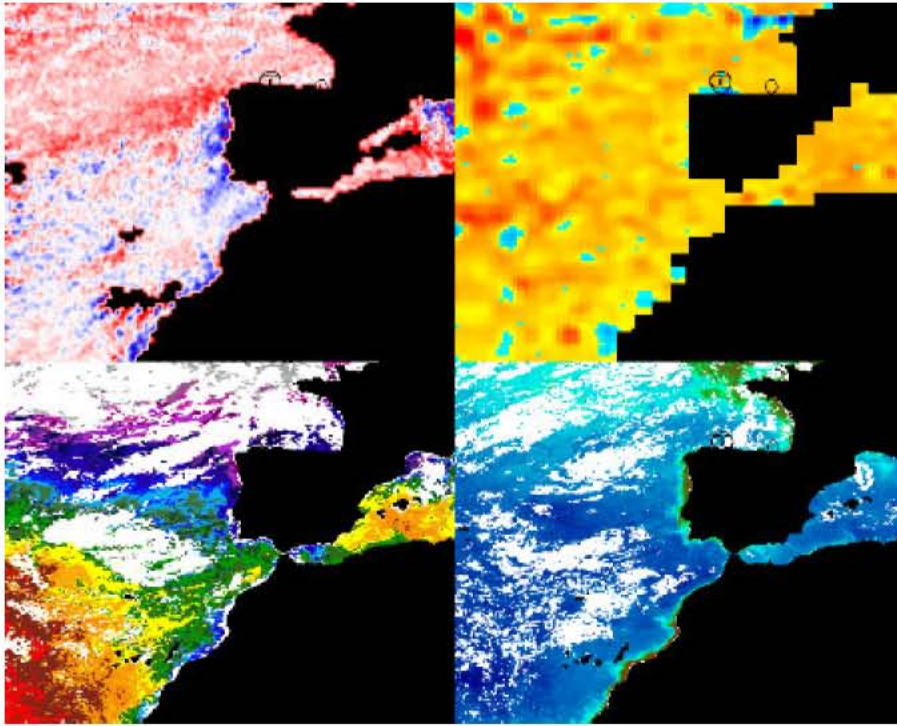


Figura AI-45: Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de octubre de 2000.

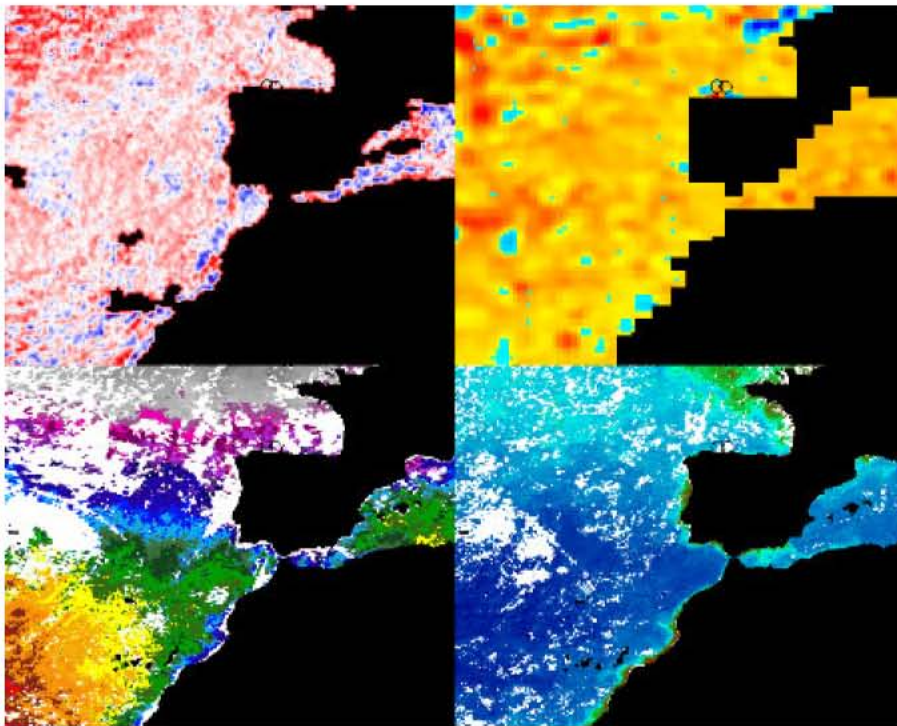
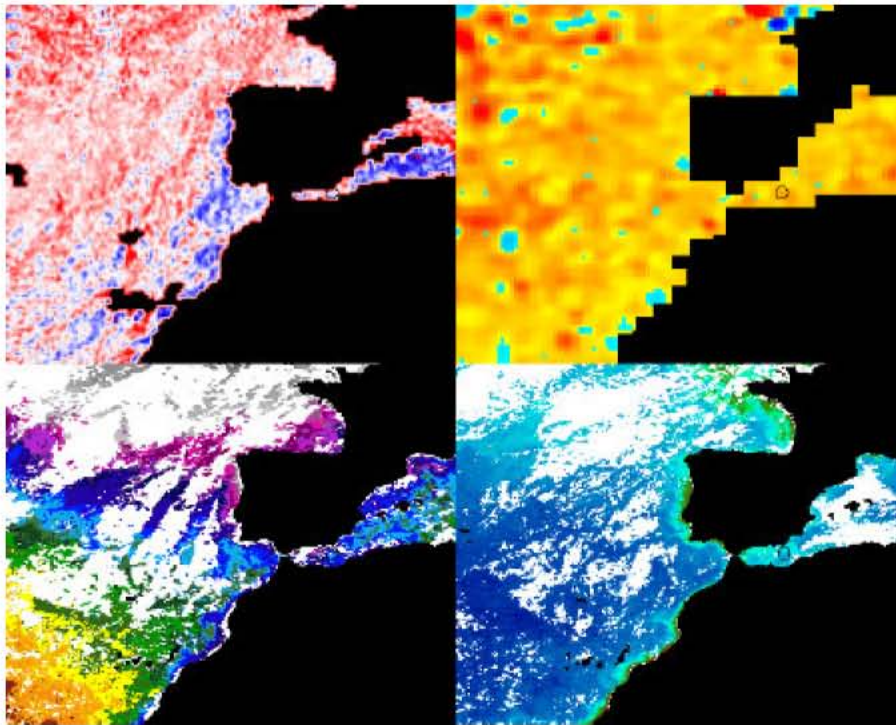
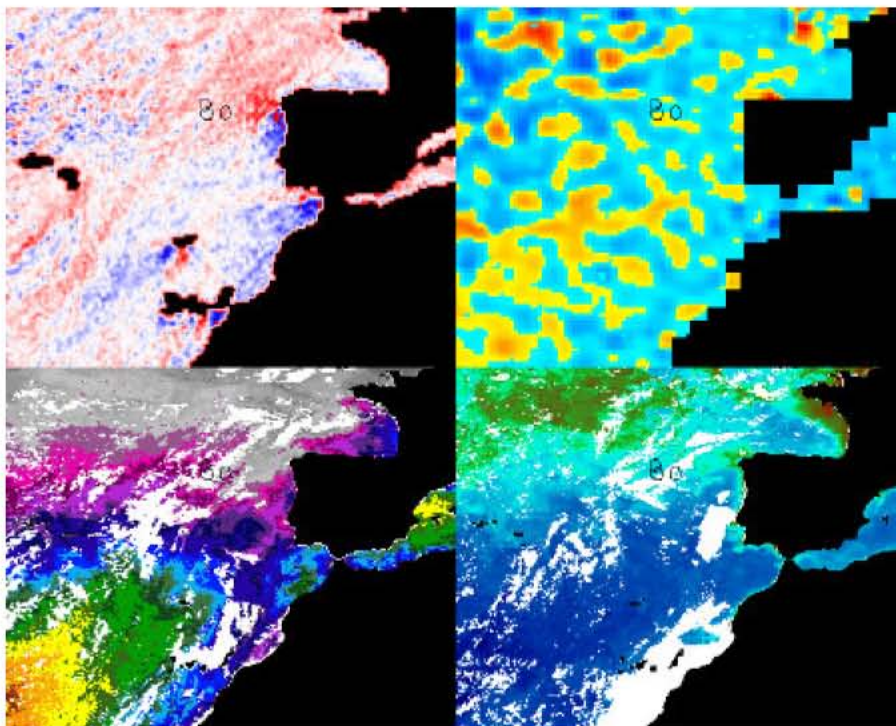


Figura AI-46: Capturas sobre variables de teledetección el día 17 de octubre de 2000.



**Figura AI-47:** Capturas sobre variables de teledetección el día 25 de octubre de 2000.



**Figura AI-48:** Capturas sobre variables de teledetección el día 31 de mayo de 2001.



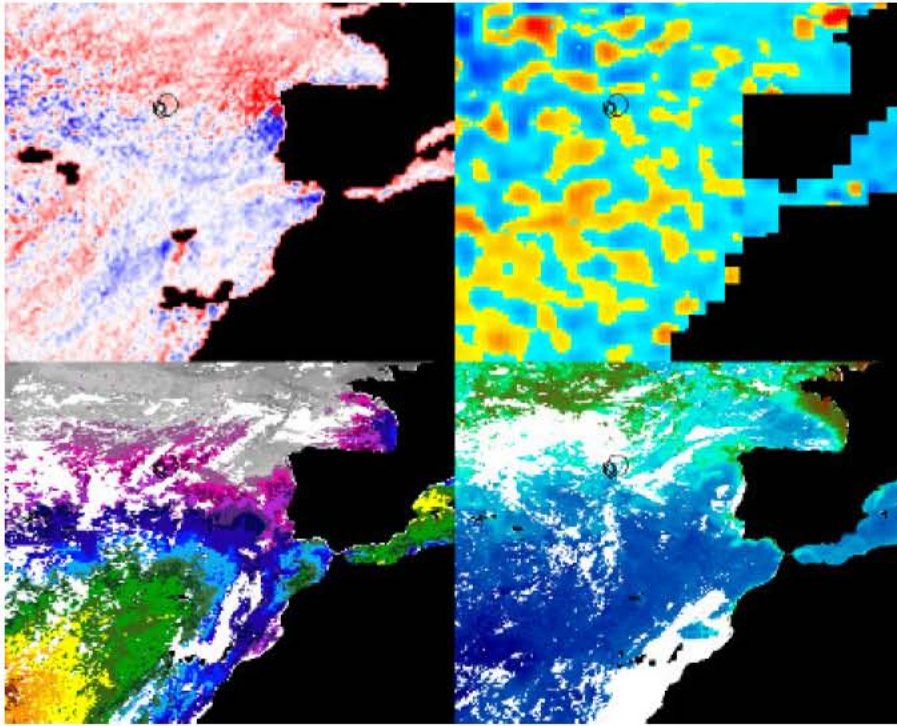


Figura AI-49: Capturas sobre variables de teledetección el día 1 de junio de 2001.

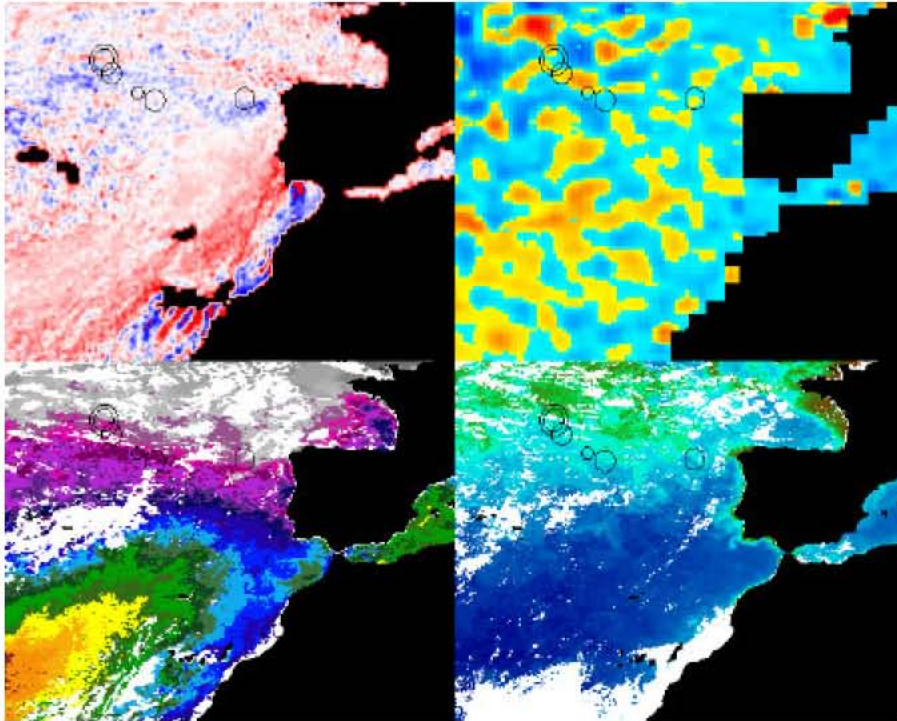
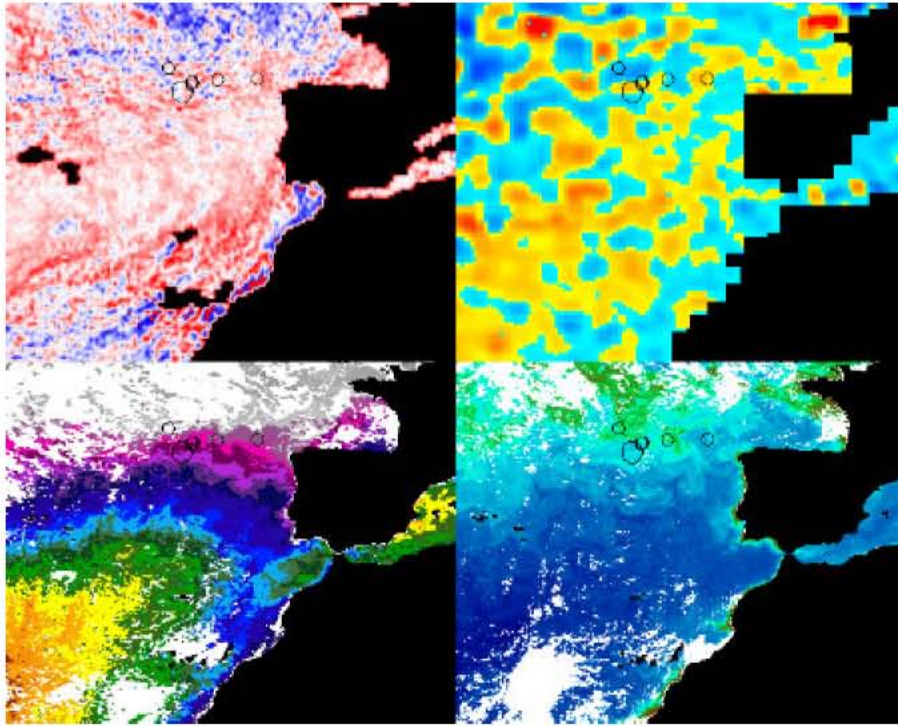
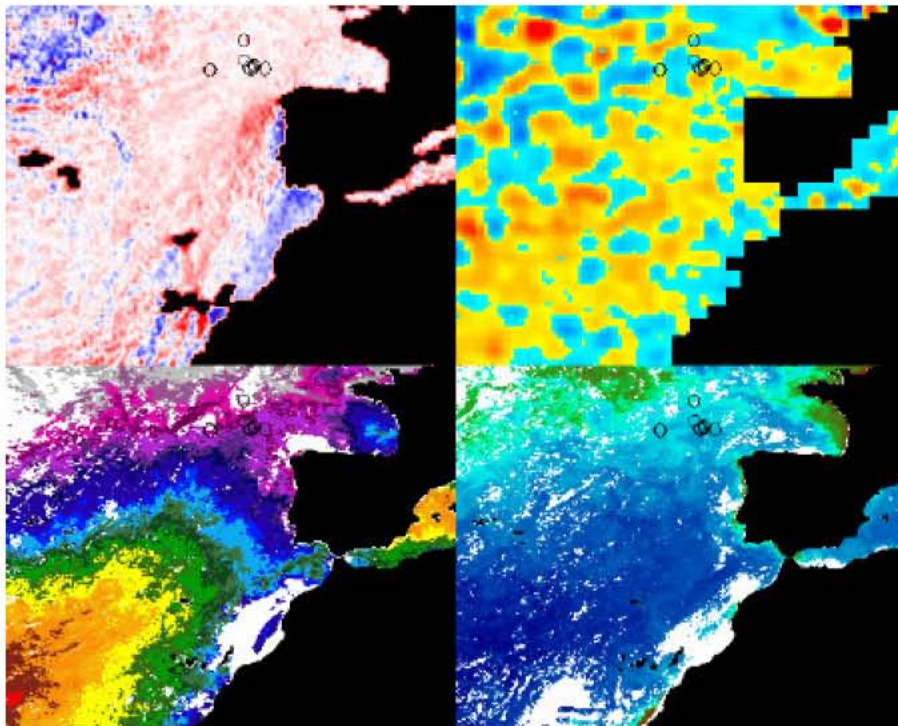


Figura AI-50: Capturas sobre variables de teledetección el día 6 de junio de 2001.



**Figura AI-51:** Capturas sobre variables de teledetección el día 16 de junio de 2001.



**Figura AI-52:** Capturas sobre variables de teledetección el día 24 de junio de 2001.

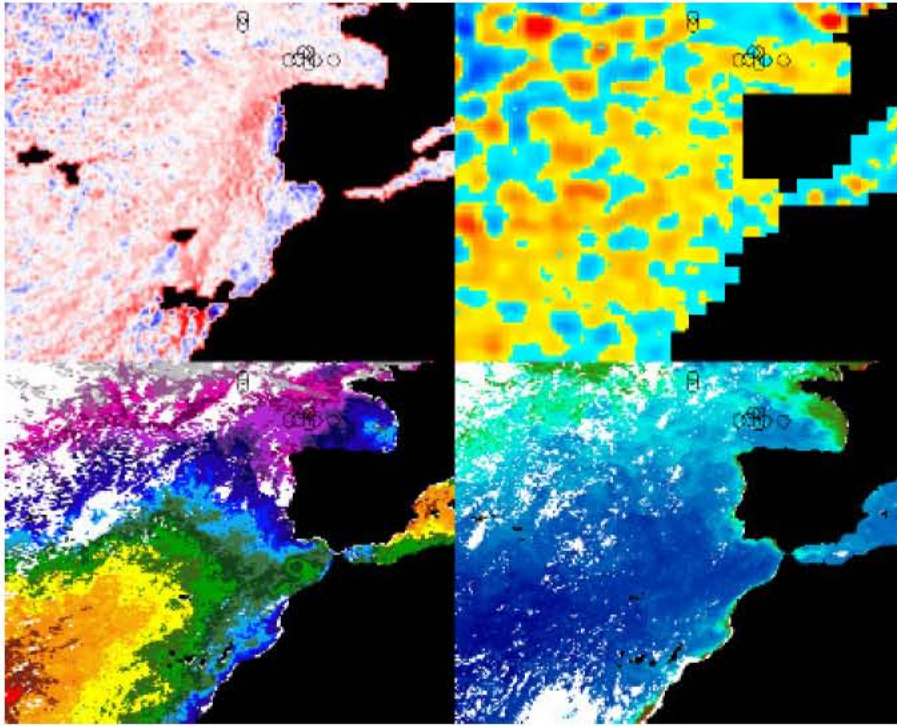


Figura AI-53: Capturas sobre variables de teledetección el día 26 de junio de 2001.

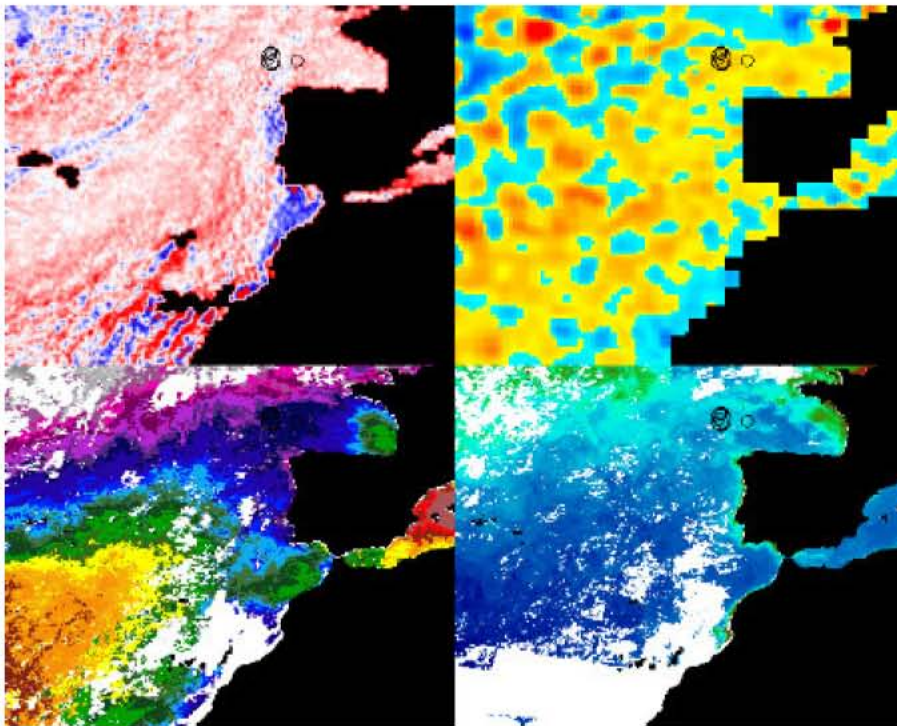
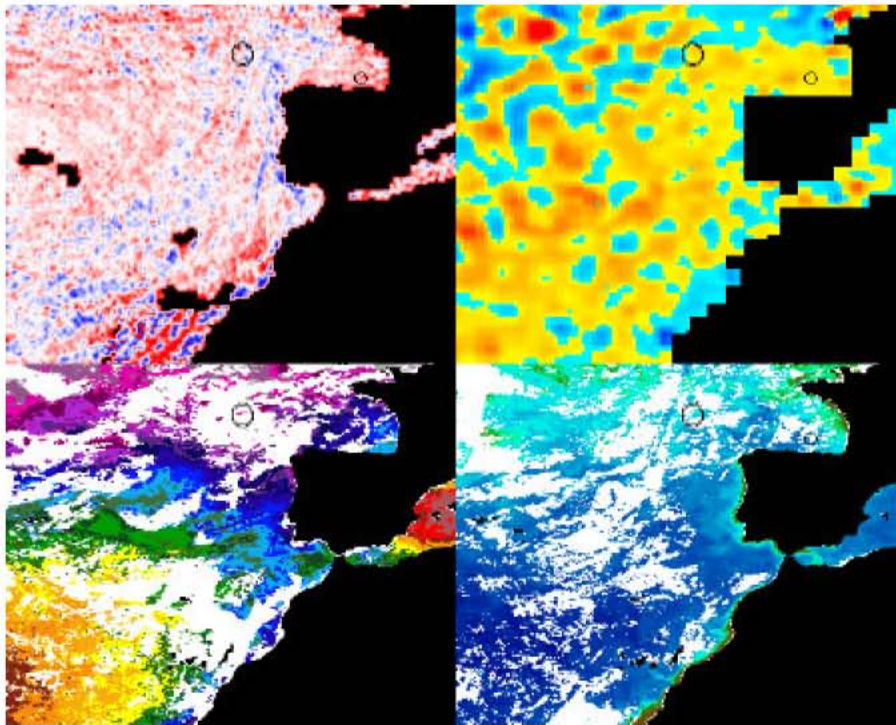
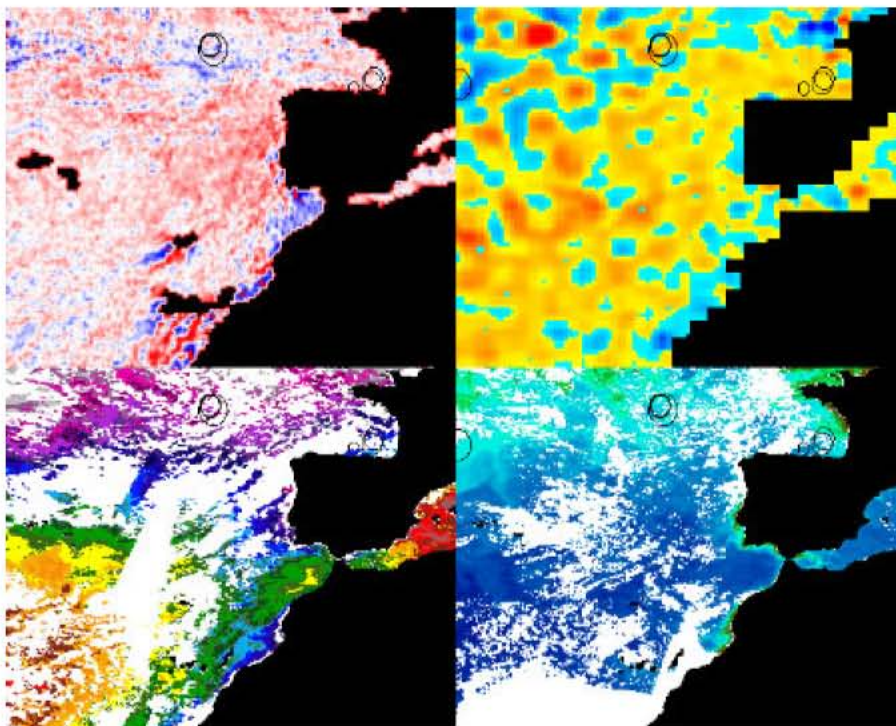


Figura AI-54: Capturas sobre variables de teledetección el día 2 de julio de 2001.



**Figura AI-55:** Capturas sobre variables de teledetección el día 10 de julio de 2001.



**Figura AI-56:** Capturas sobre variables de teledetección el día 15 de julio de 2001.

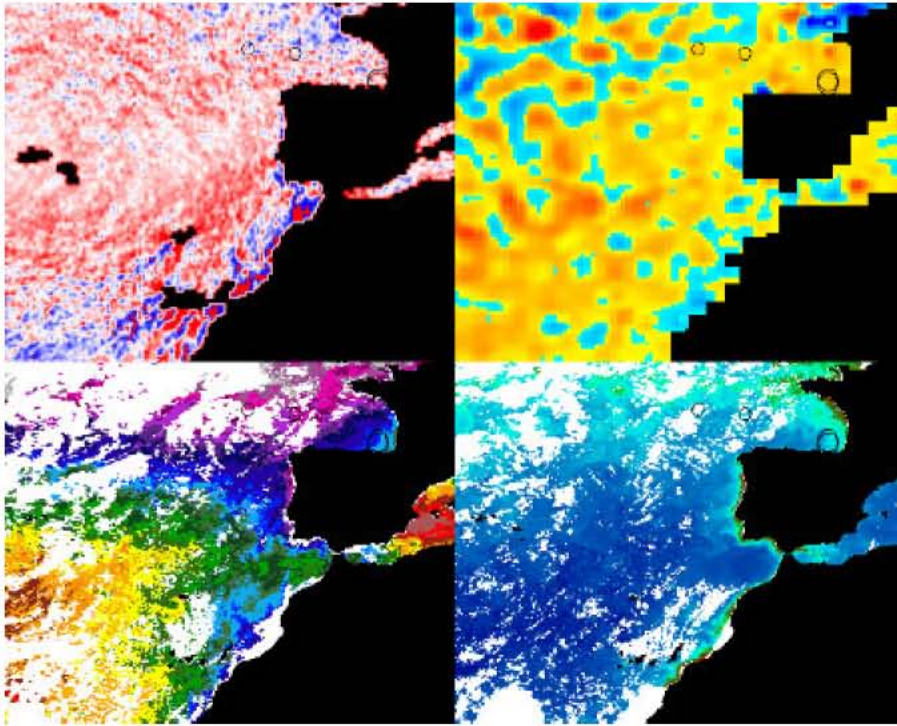


Figura AI-57: Capturas sobre variables de teledetección el día 21 de julio de 2001.

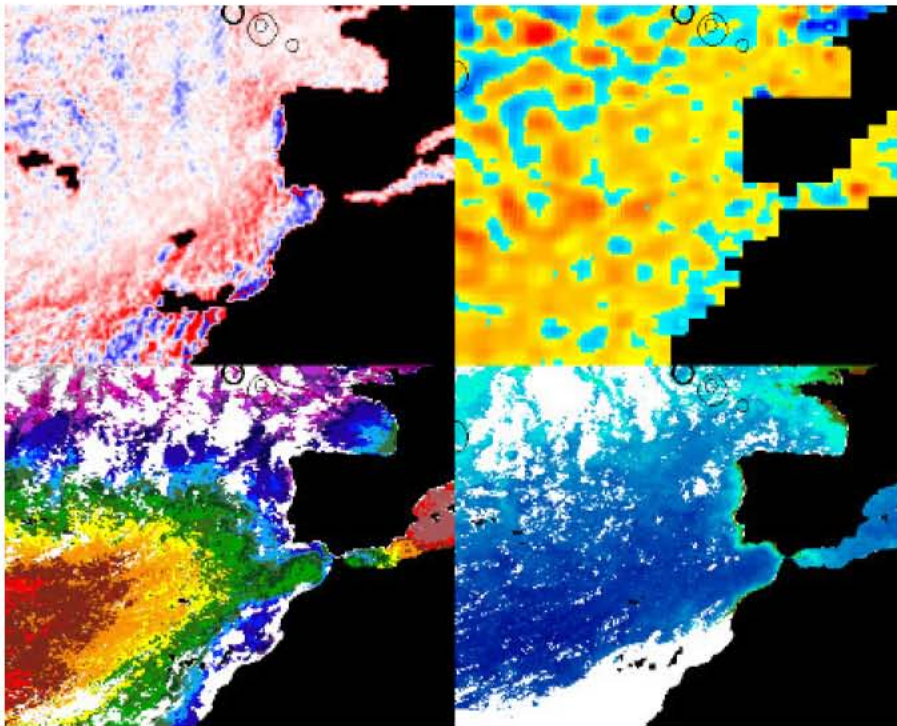
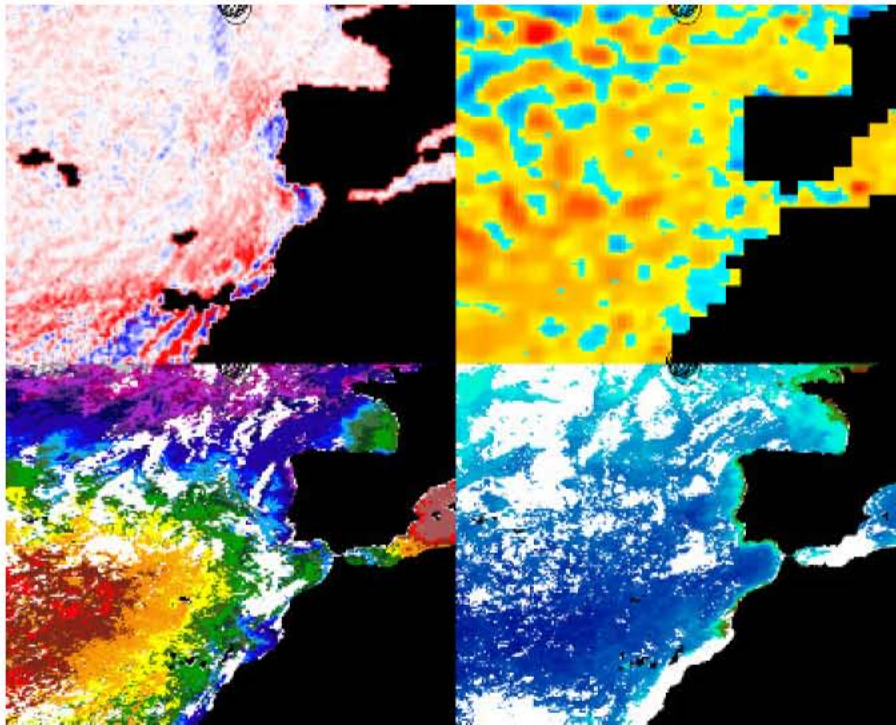
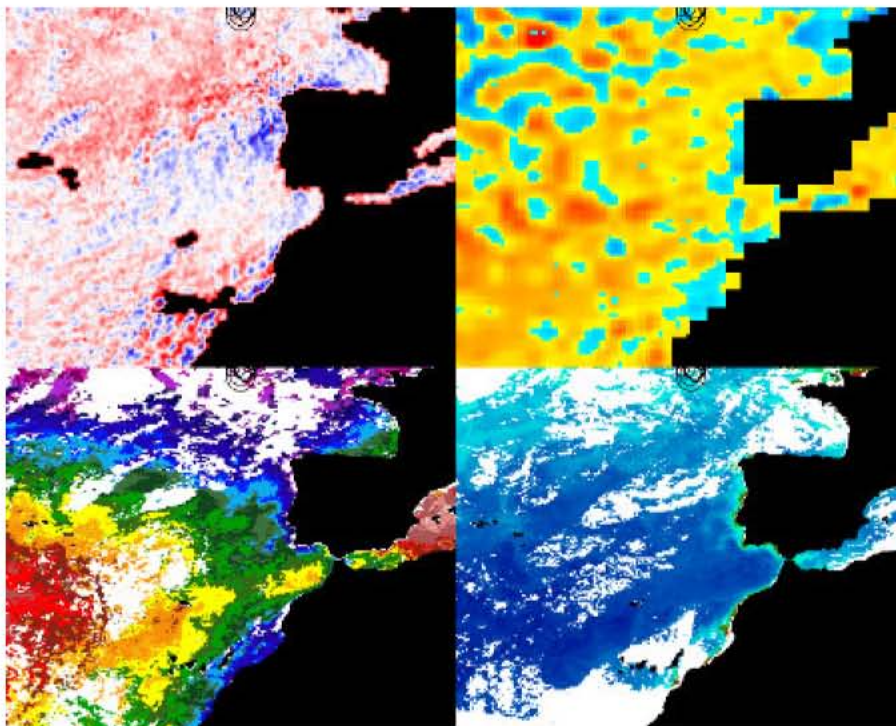


Figura AI-58: Capturas sobre variables de teledetección el día 26 de julio de 2001.



**Figura AI-59:** Capturas sobre variables de teledetección el día 29 de julio de 2001.



**Figura AI-60:** Capturas sobre variables de teledetección el día 3 de agosto de 2001.

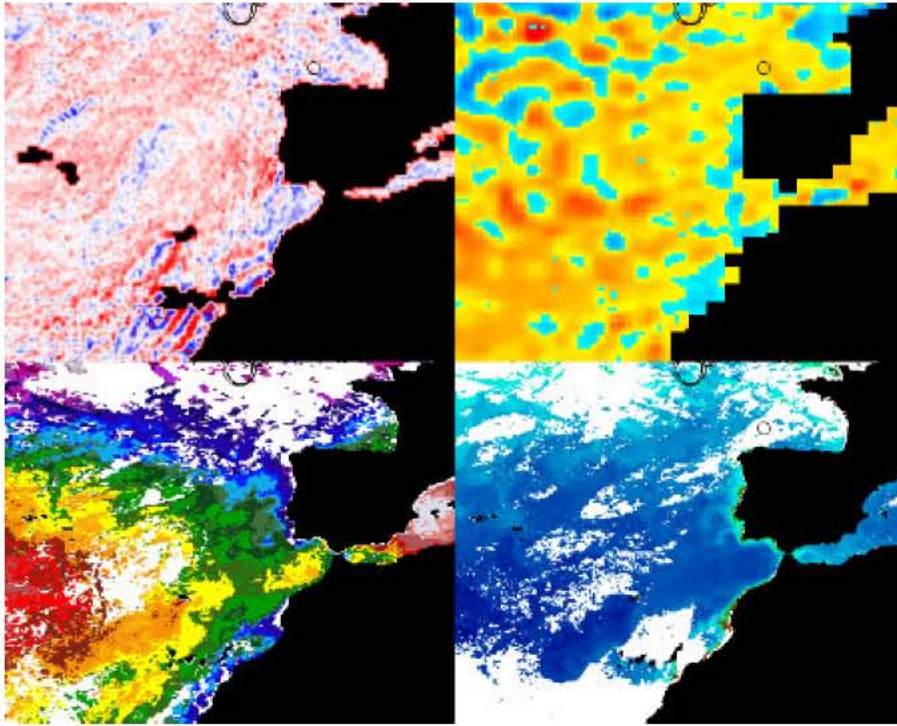


Figura AI-61: Capturas sobre variables de teledetección el día 5 de agosto de 2001.

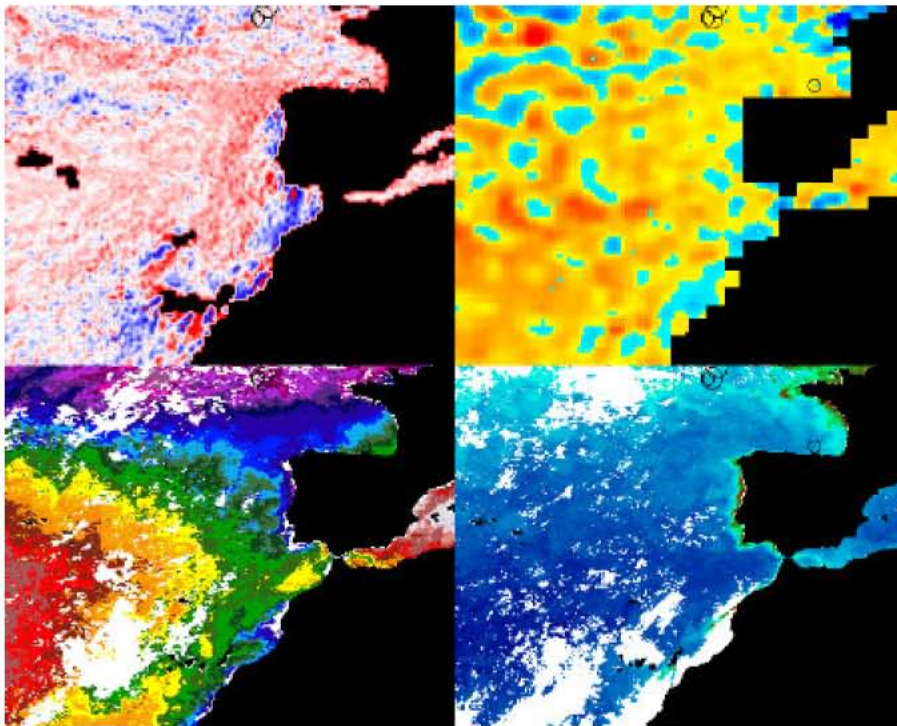
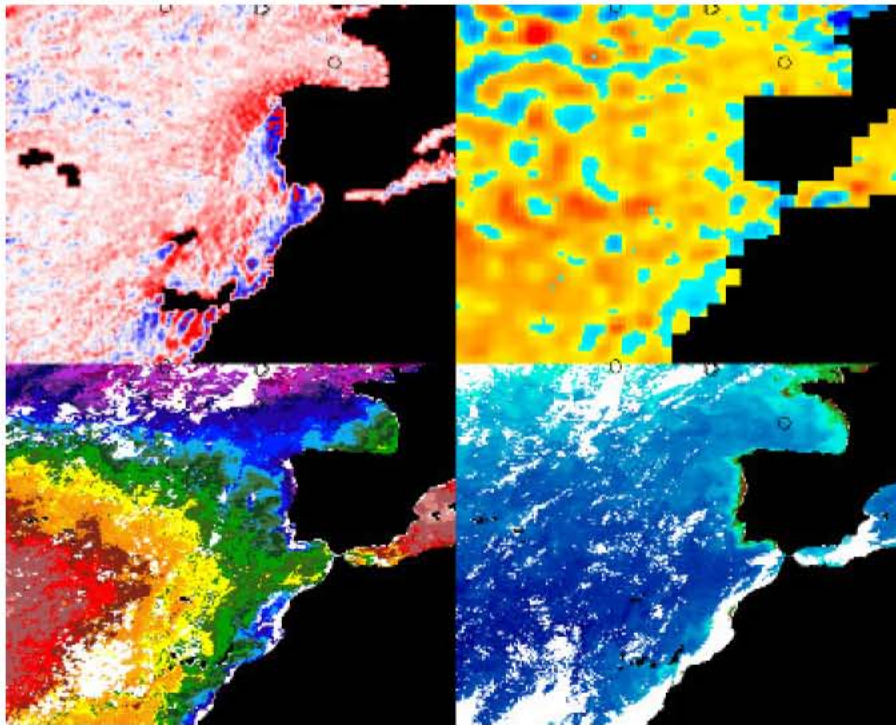
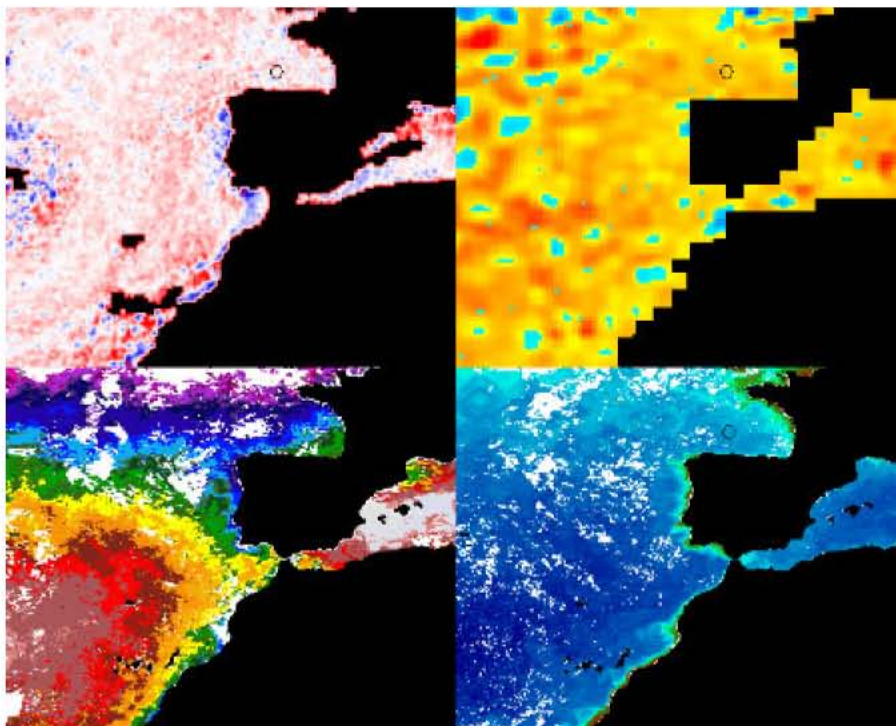


Figura AI-62: Capturas sobre variables de teledetección el día 10 de agosto de 2001.

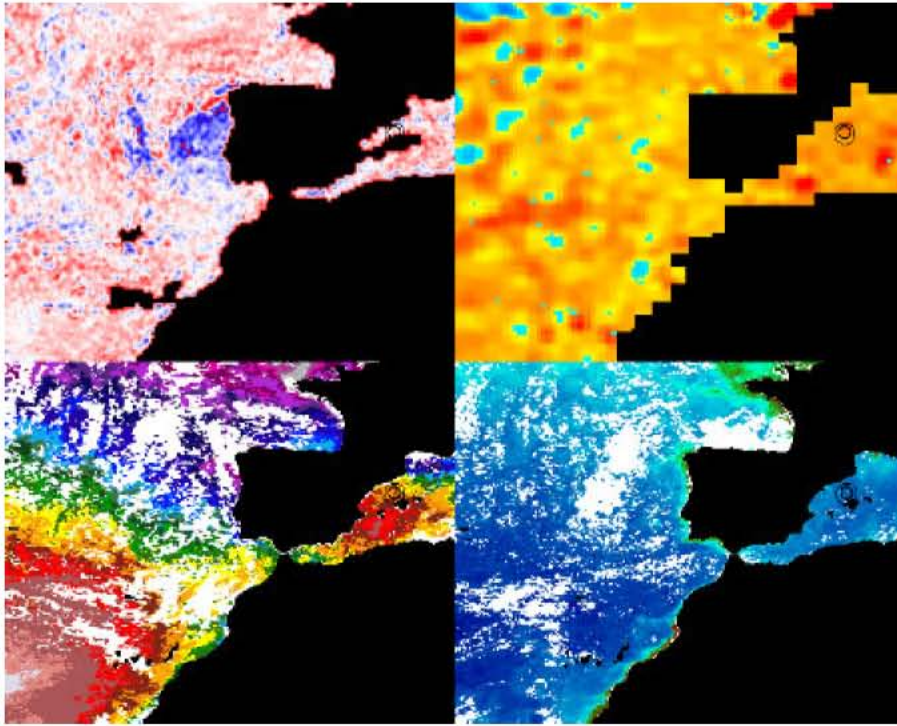


**Figura AI-63:** Capturas sobre variables de teledetección el día 12 de agosto de 2001.

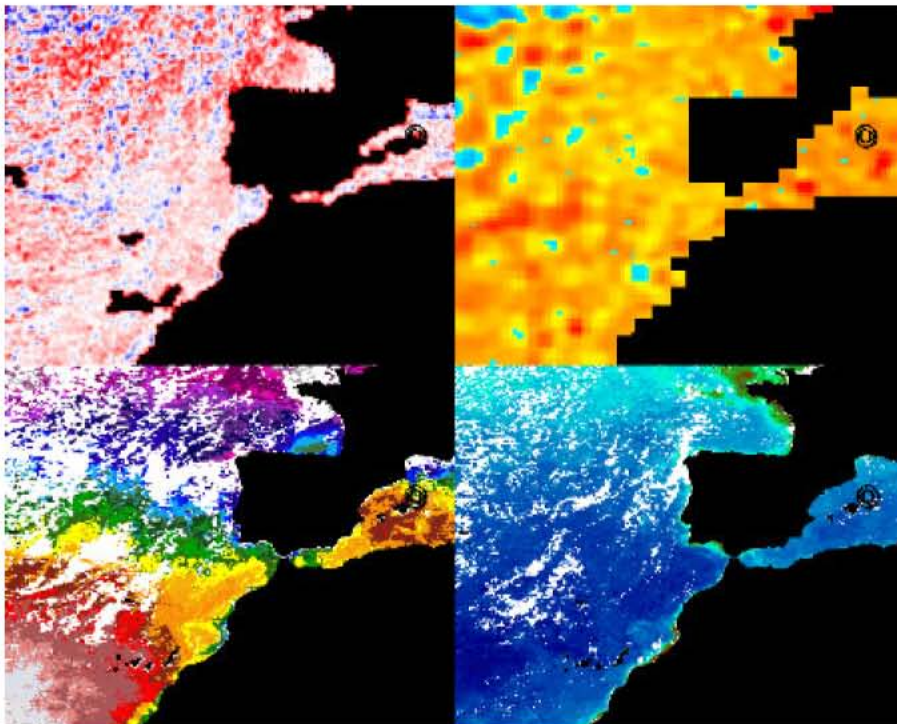


**Figura AI-64:** Capturas sobre variables de teledetección el día 1 de septiembre de 2001.

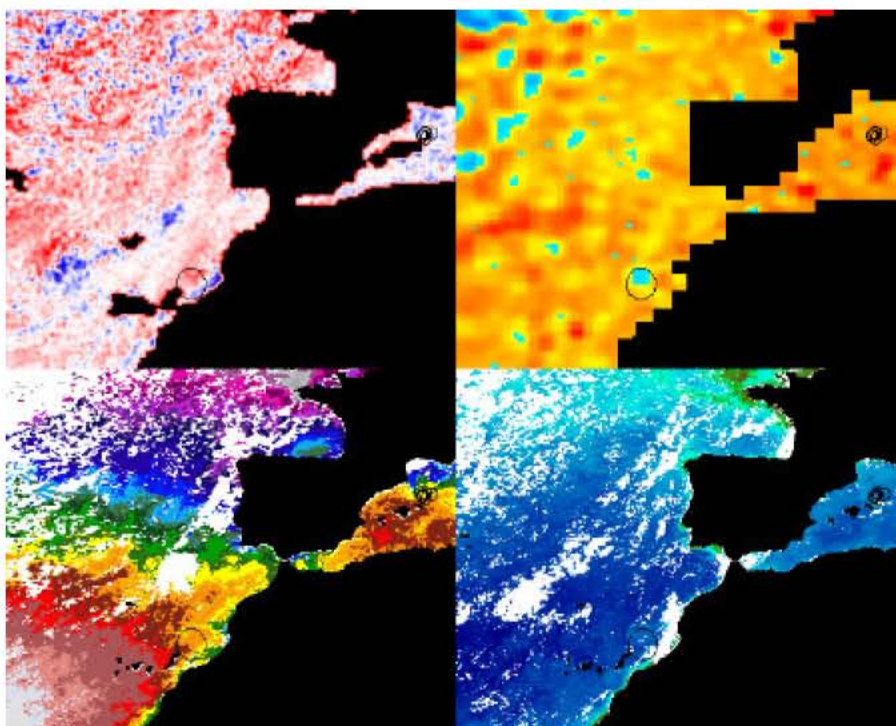




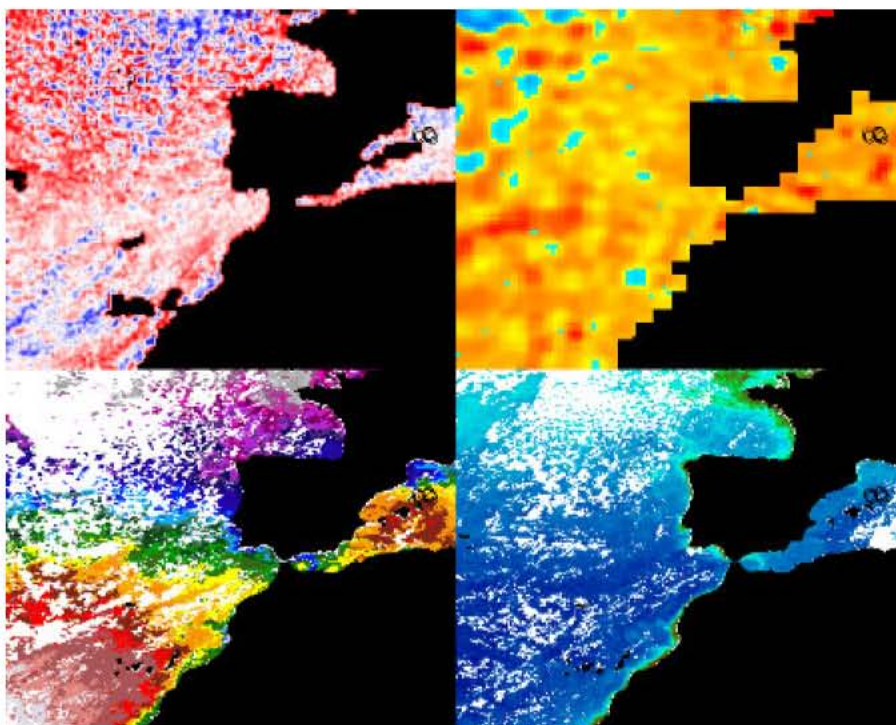
**Figura AI-65:** Capturas sobre variables de teledetección el día 22 de septiembre de 2001.



**Figura AI-66:** Capturas sobre variables de teledetección el día 30 de septiembre de 2001.



**Figura AI-67:** Capturas sobre variables de teledetección el día 4 de octubre de 2001.



**Figura AI-68:** Capturas sobre variables de teledetección el día 8 de octubre de 2001.

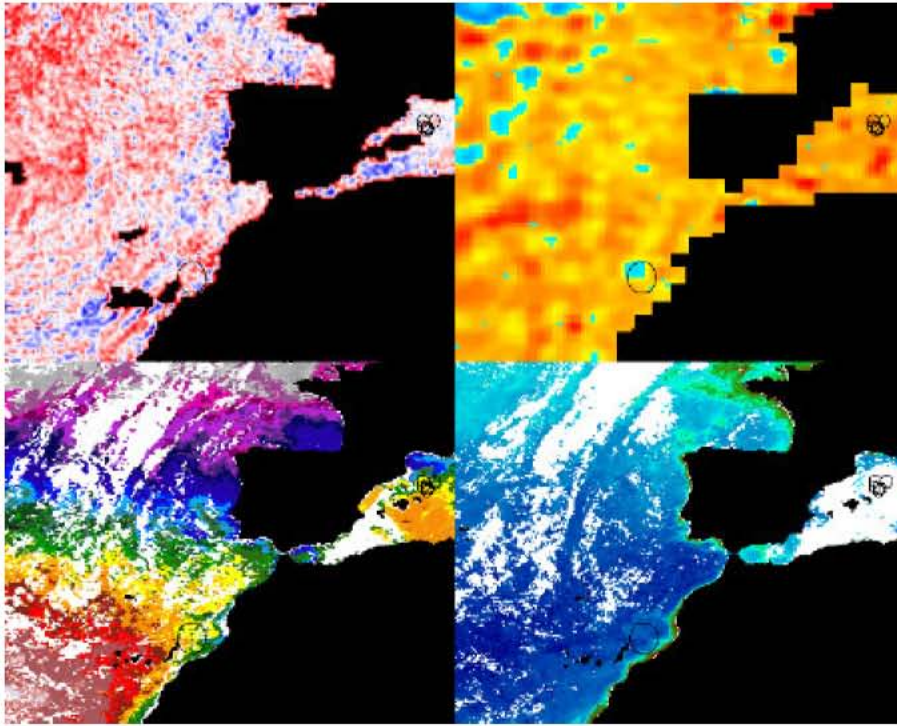


Figura AI-69: Capturas sobre variables de teledetección el día 11 de octubre de 2001.

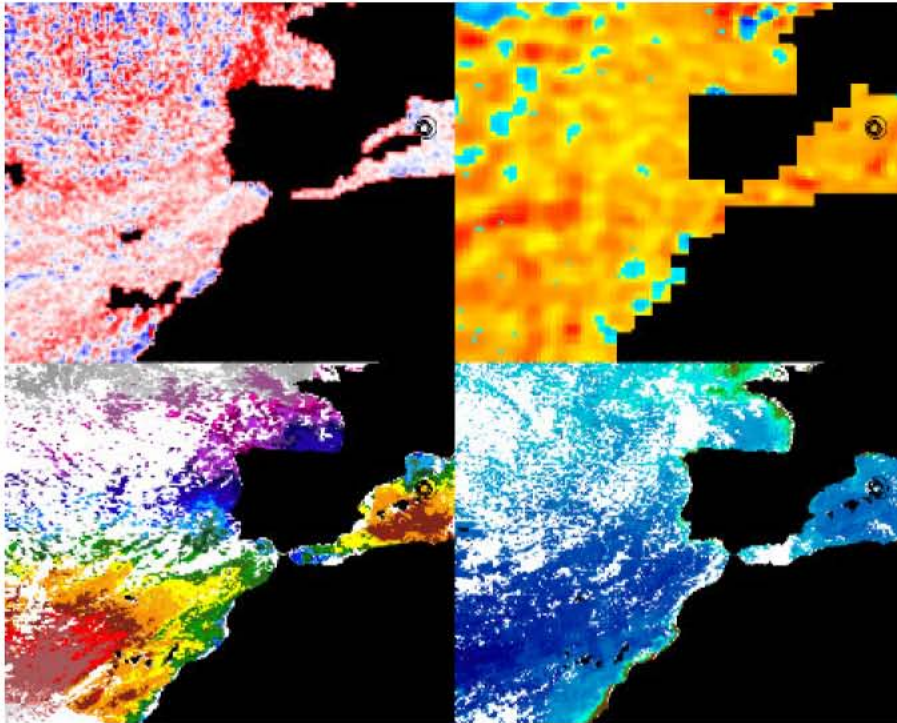
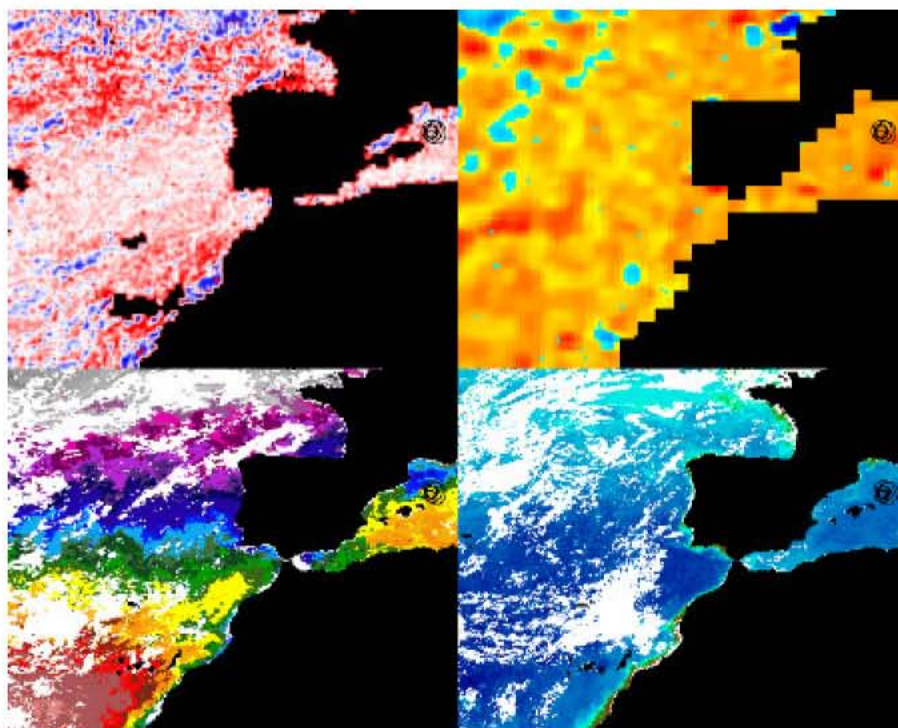
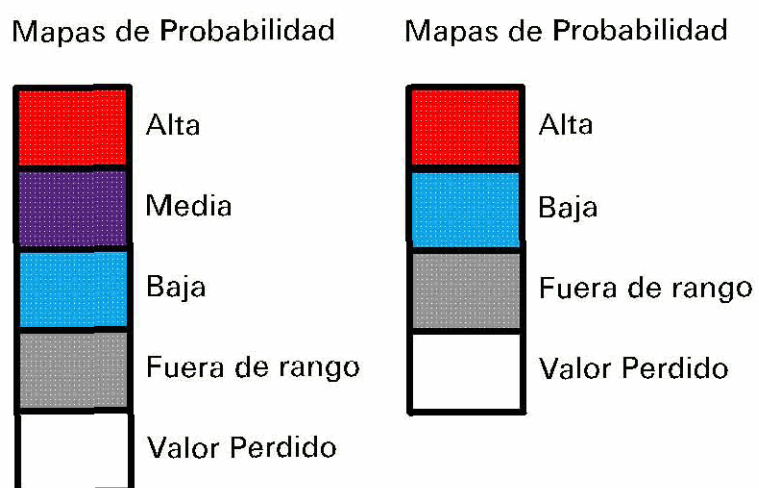


Figura AI-70: Capturas sobre variables de teledetección el día 18 de octubre de 2001.

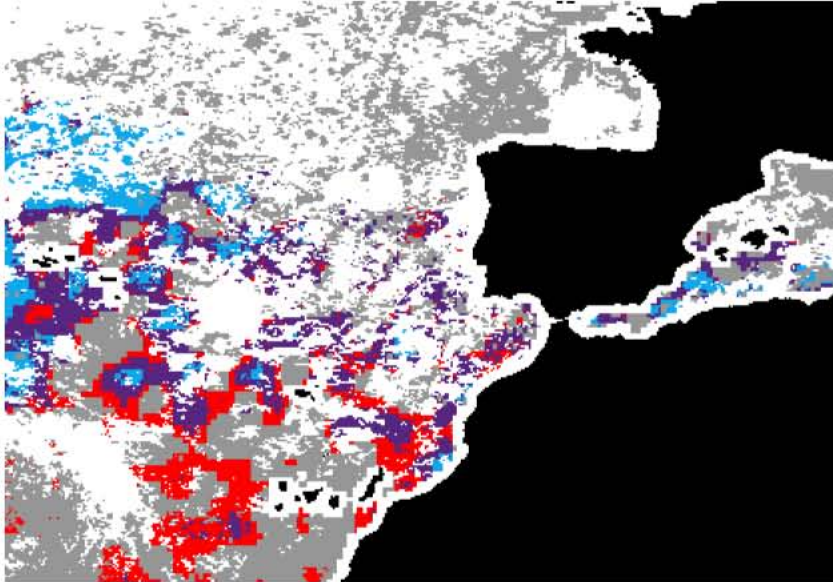


**Figura AI-71:** Capturas sobre variables de teledetección el día 26 de octubre de 2001.

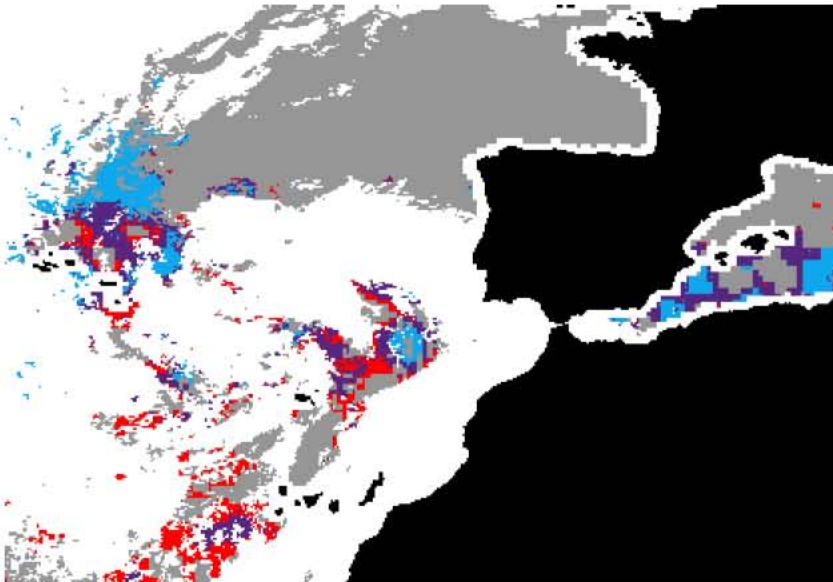
**ANEXO II:**  
**Mapas de probabilidad**



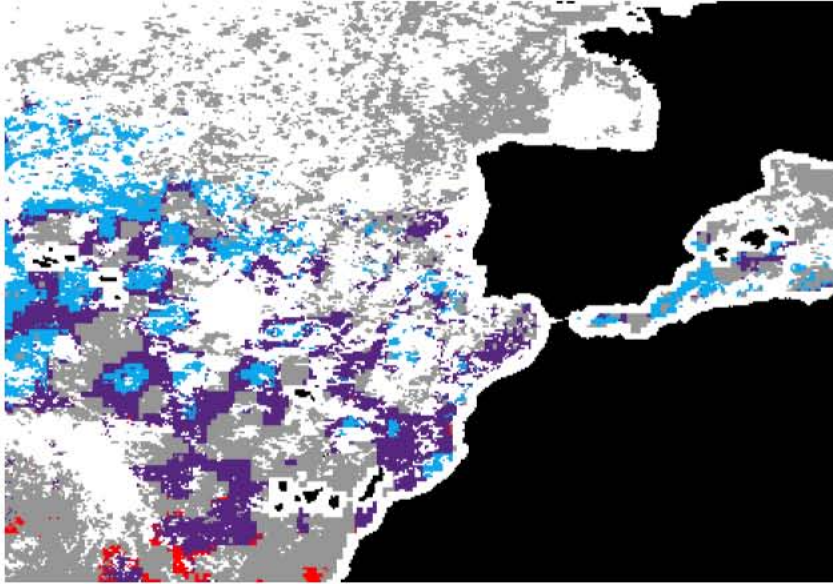
**Figura AII-0:** Paletas de los mapas de probabilidad, derecha para regresión logística e izquierda para regresión lineal y análisis discriminante.



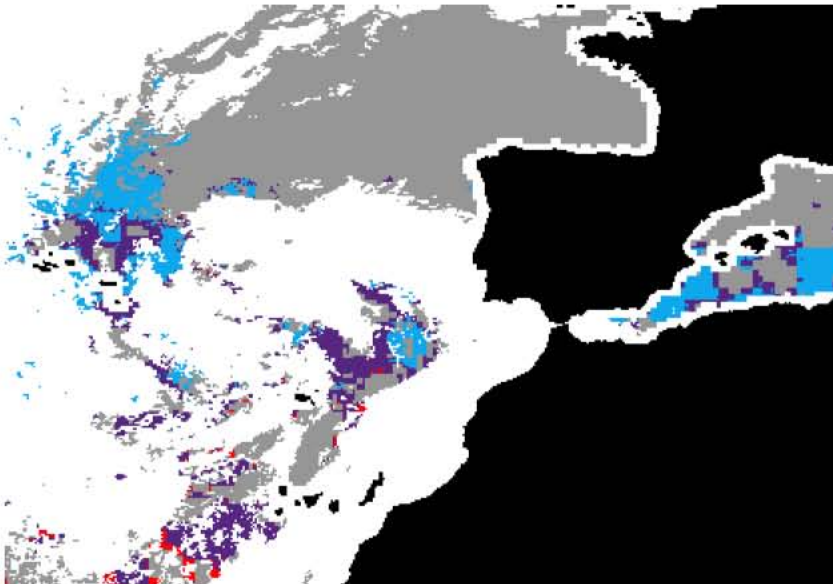
**Figura AII-1:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de marzo de 2000 con límites 320-720.



**Figura AII-2:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 9 de marzo de 2000 con límites 320-720.

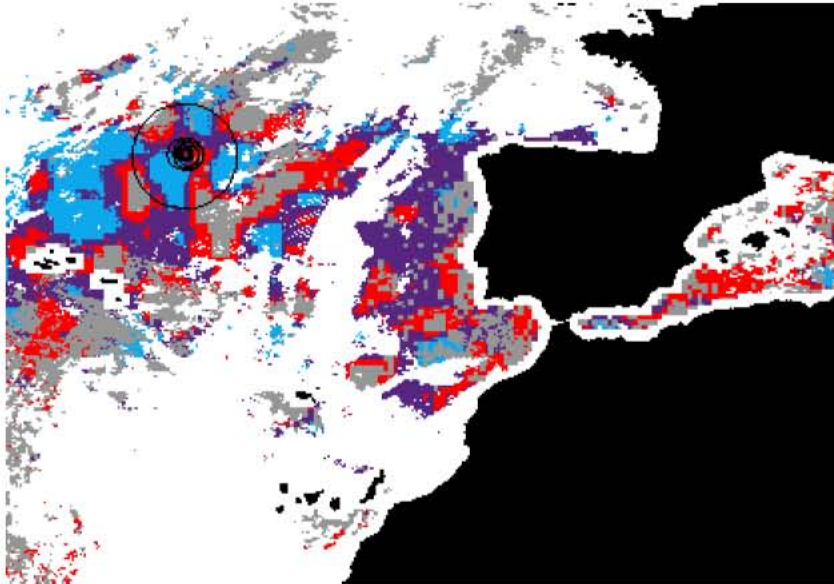


**Figura AII-3:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de marzo de 2000 con límites 500-1000.

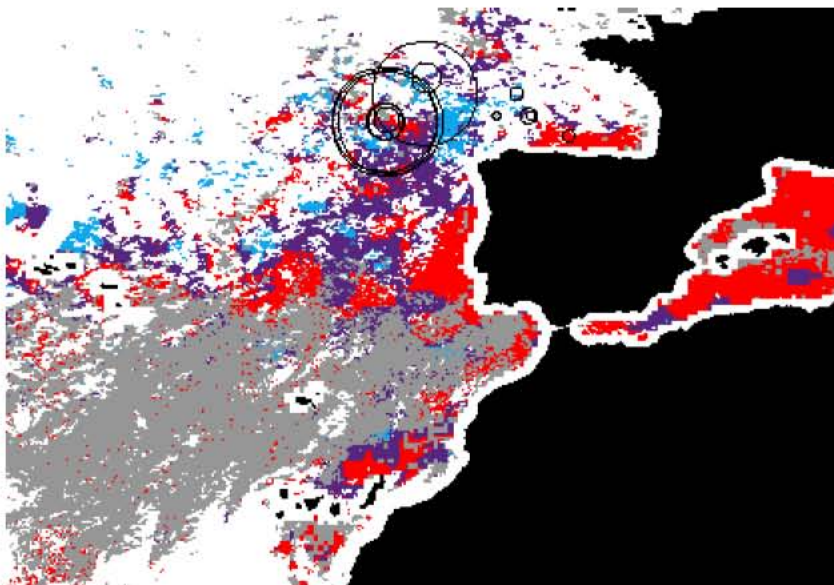


**Figura AII-4:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 9 de marzo de 2000 con límites 500-1000.

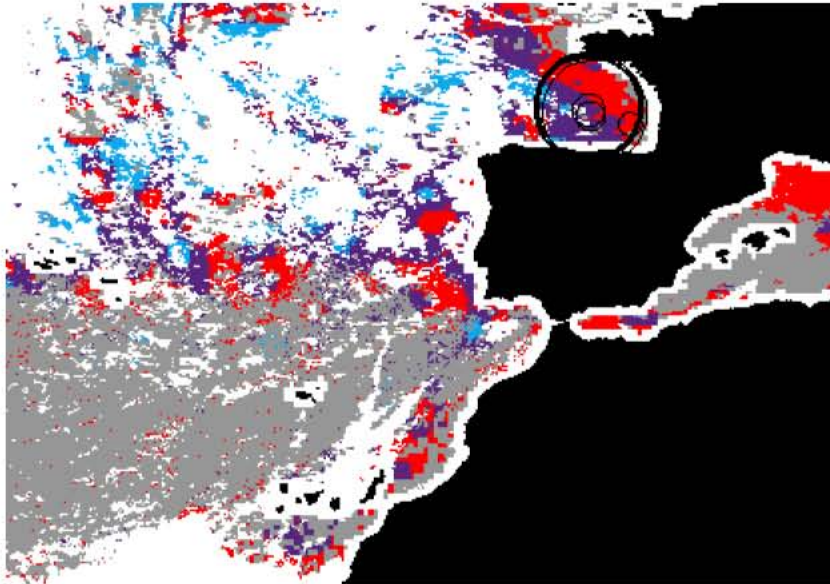




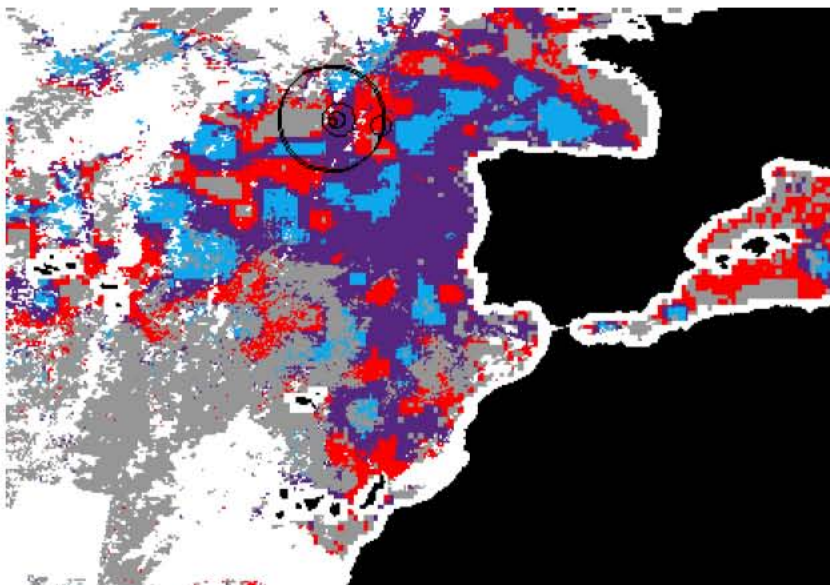
**Figura AII-5:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 13 de junio 2000 con límites 320-720.



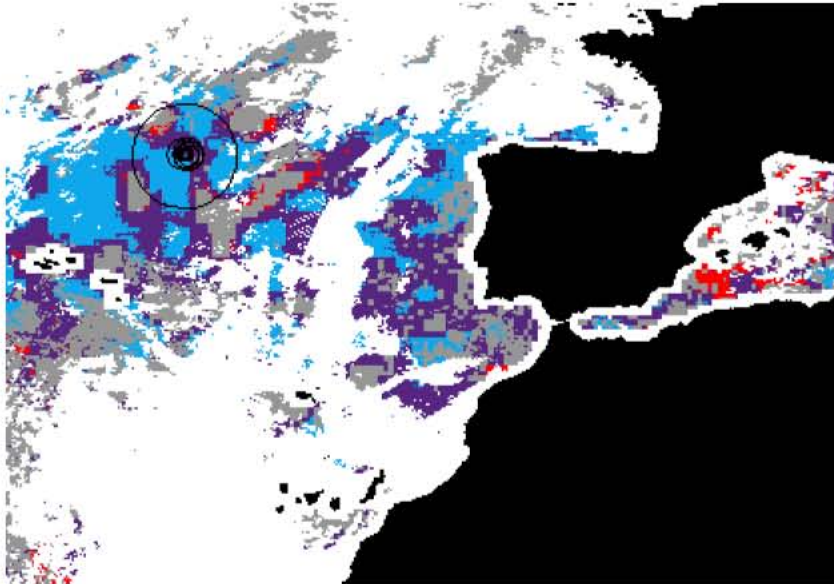
**Figura AII-6:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 1 de julio de 2000 con límites 320-720.



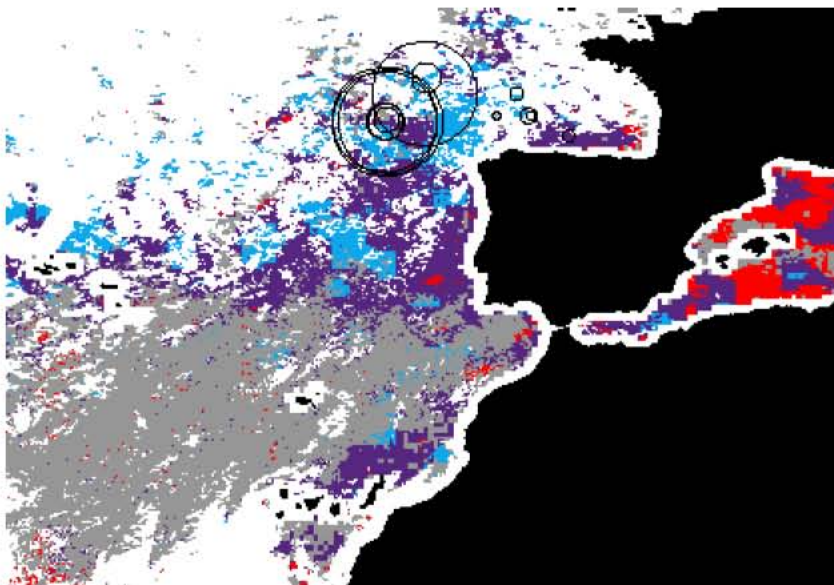
**Figura AII-7:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de julio de 2000 con límites 320-720.



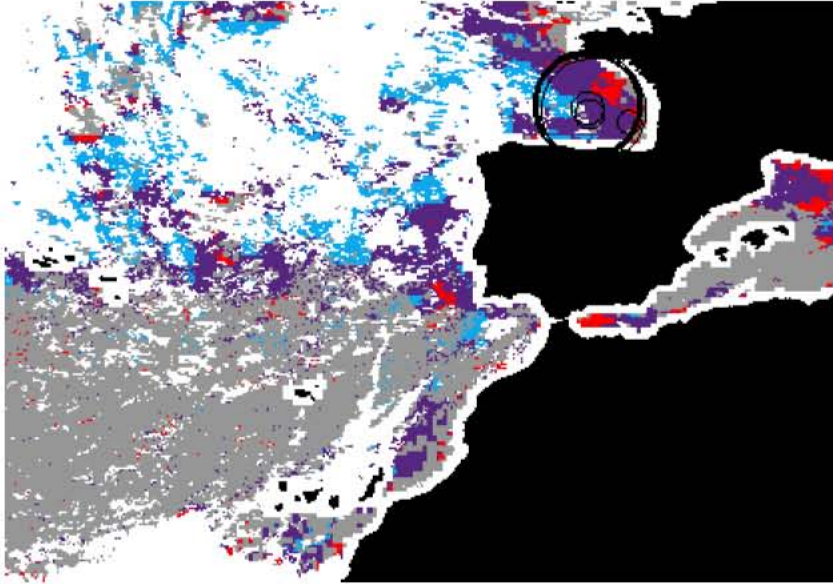
**Figura AII-8:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 20 de junio de 2001 con límites 320-720.



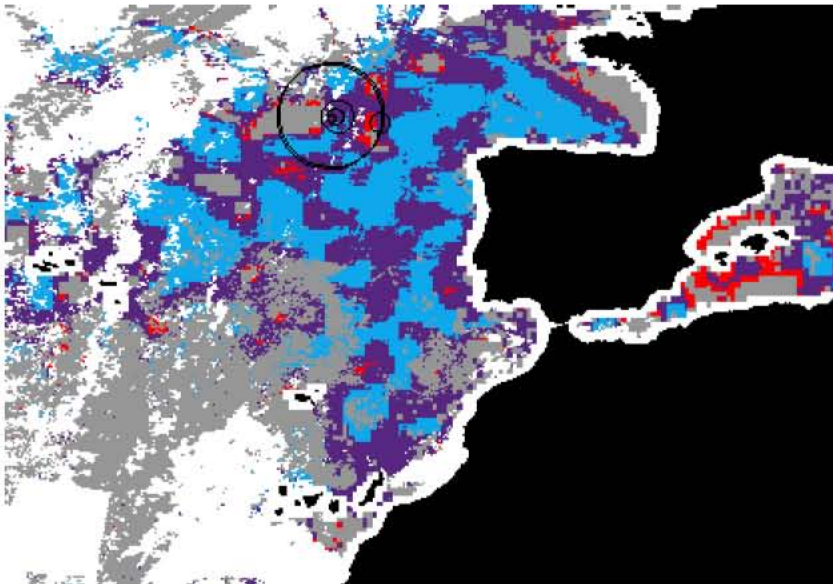
**Figura AII-9:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 13 de junio de 2000 con límites 500-1000.



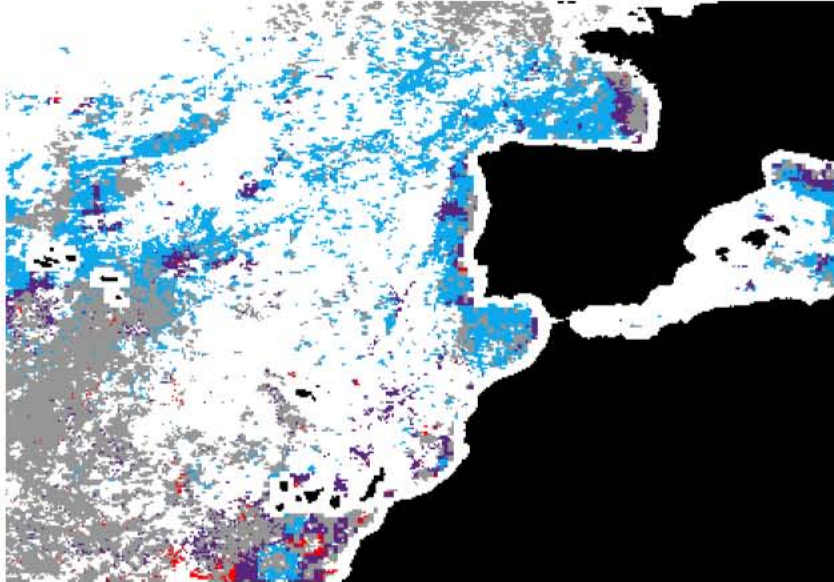
**Figura AII-10:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 1 de julio de 2000 con límites 500-1000.



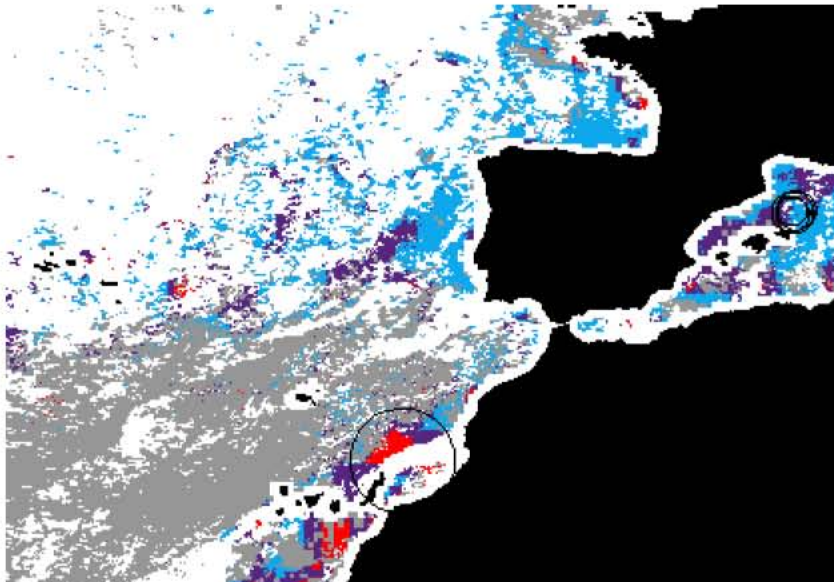
**Figura AII-11:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de julio de 2000 con límites 500-1000.



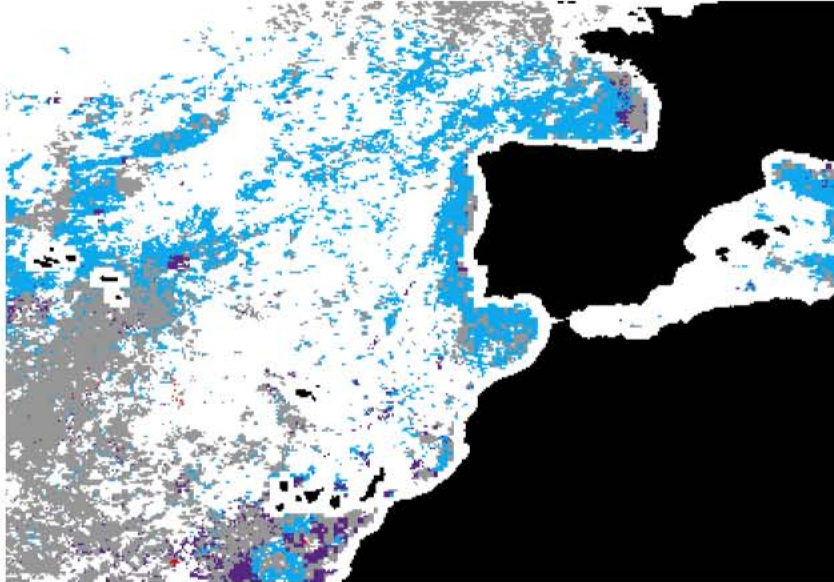
**Figura AII-12:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 20 de junio de 2001 con límites 500-1000.



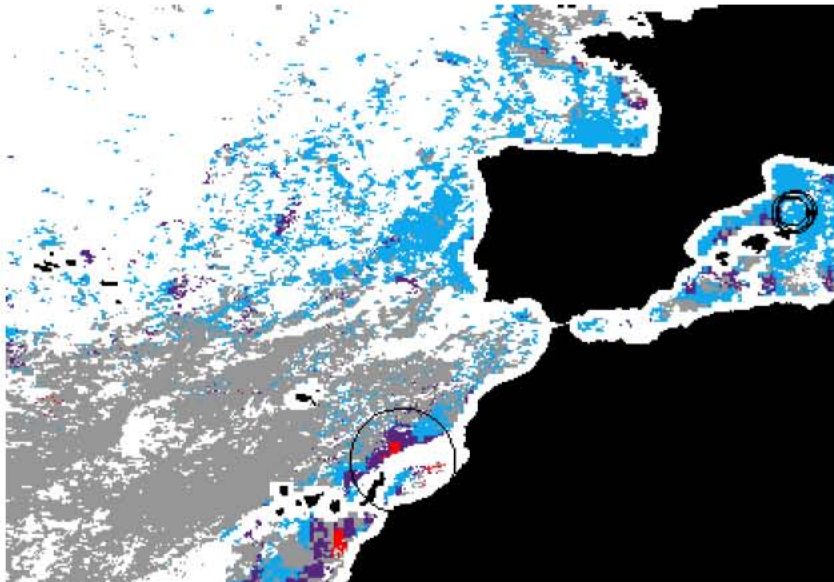
**Figura AII-13:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de octubre de 2000 con límites 320-720.



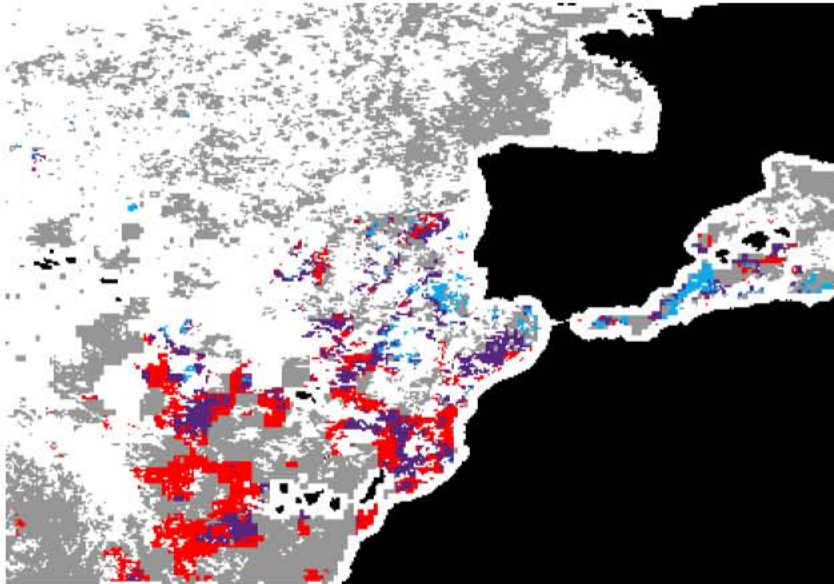
**Figura AII-14:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 16 de octubre de 2001 con límites 320-720.



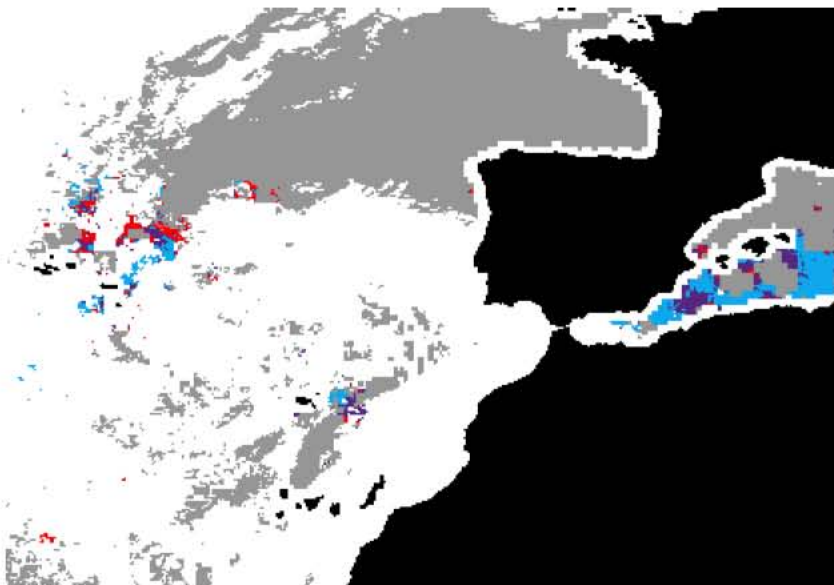
**Figura AII-15:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 23 de octubre de 2000 con límites 500-1000.



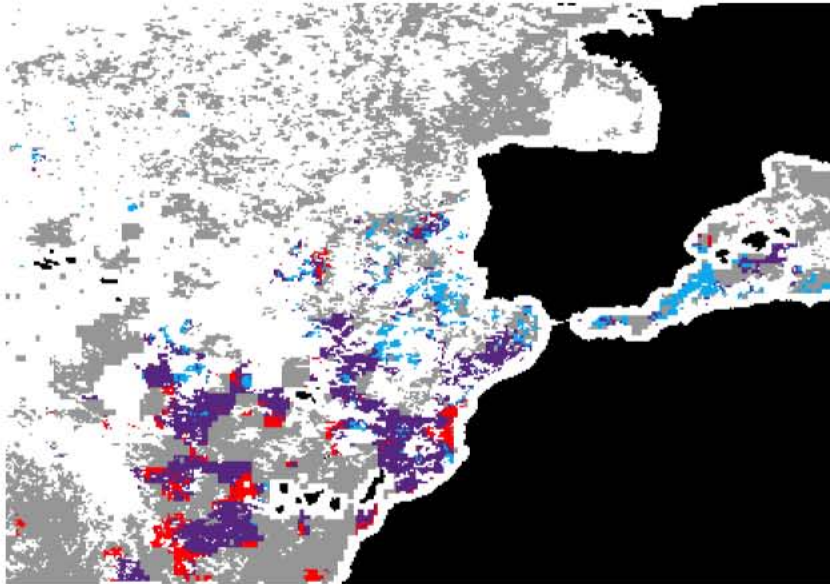
**Figura AII-16:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión lineal para el día 16 de octubre de 2001 con límites 500-1000.



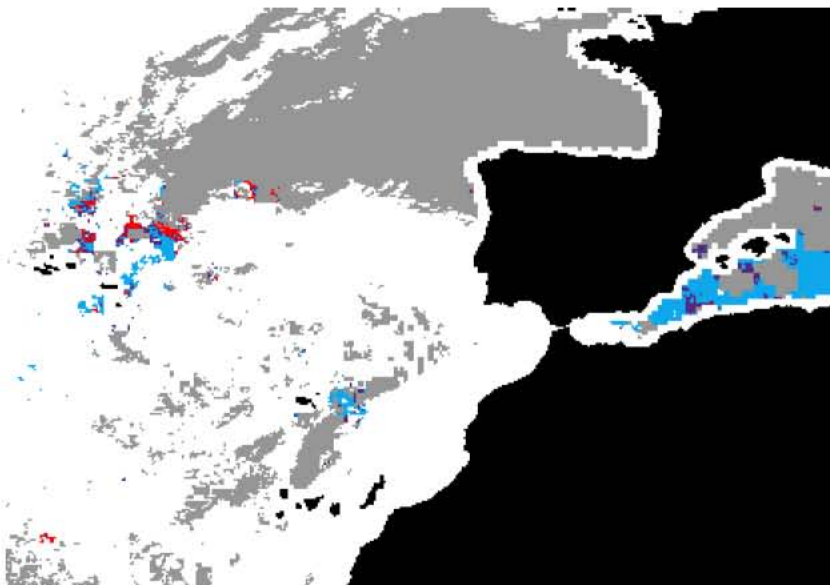
**Figura AII-17:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de marzo 2000 con límites 320-720.



**Figura AII-18:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 9 de marzo de 2000 con límites 320-720.

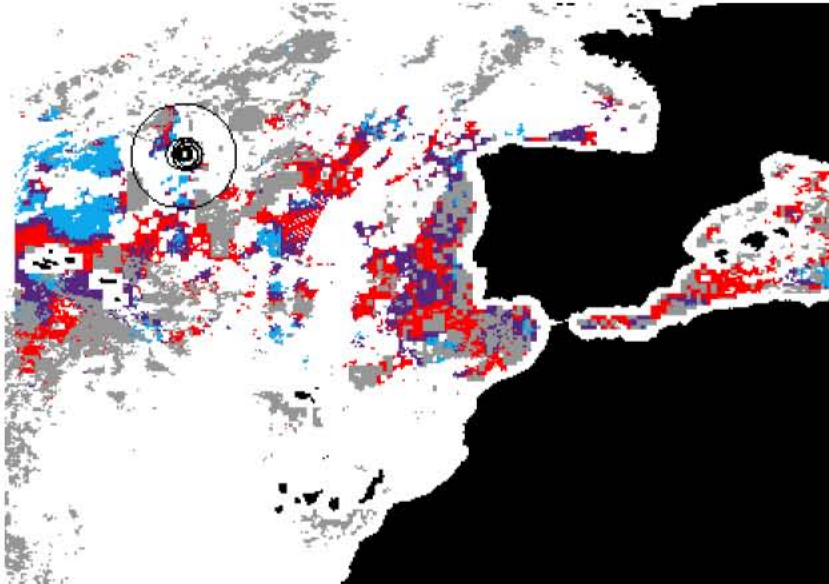


**Figura AII-19:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de marzo de 2000 con límites 500-1000.

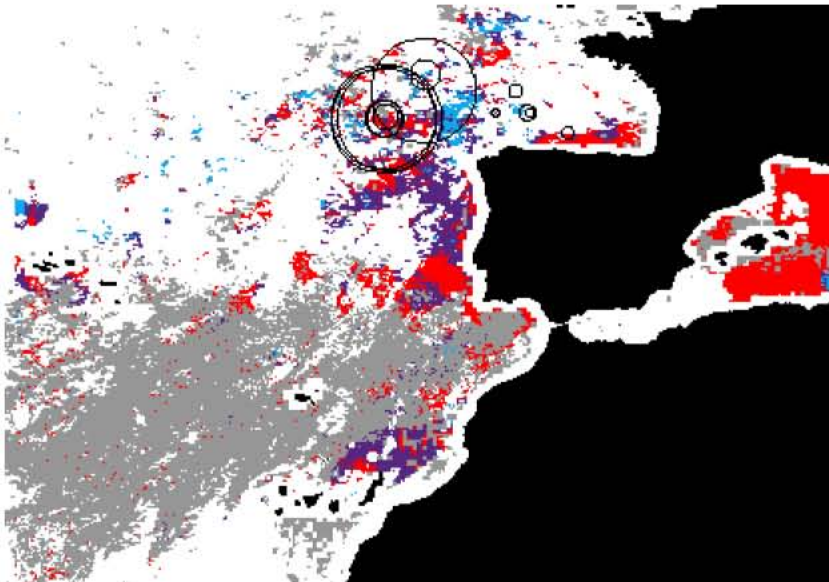


**Figura AII-20:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 9 de marzo de 2000 con límites 500-1000.

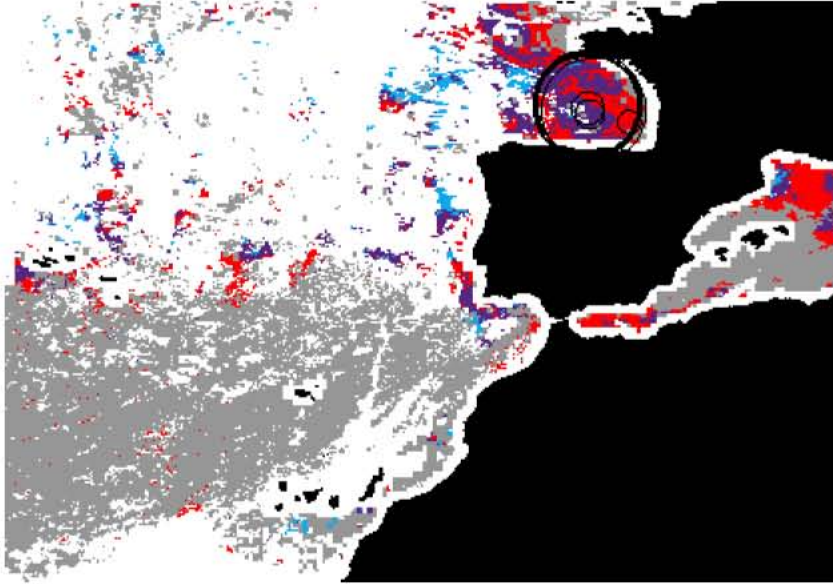




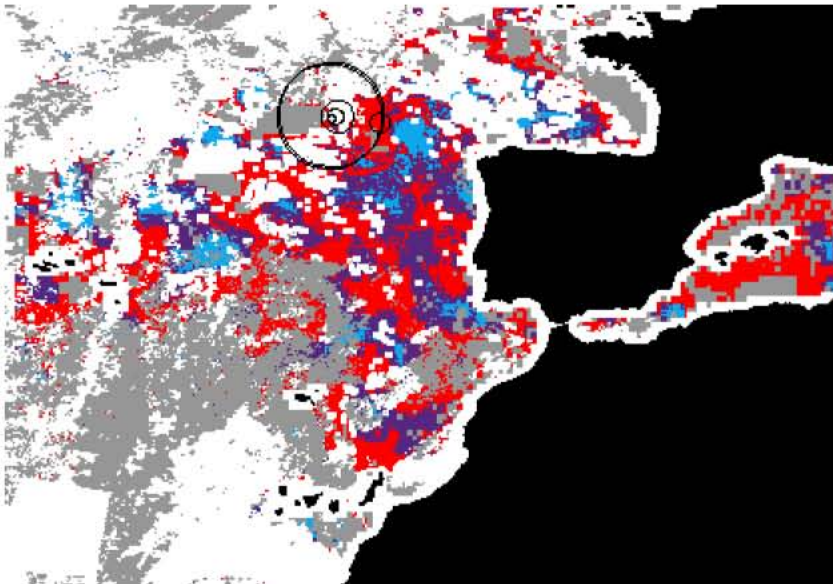
**Figura AII-21:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 13 de junio de 2000 con límites 320-720.



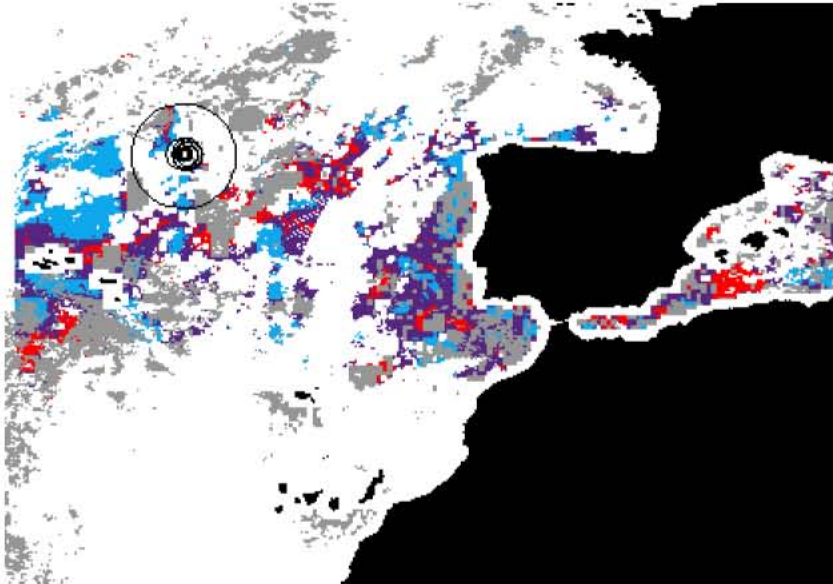
**Figura AII-22:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 1 de julio de 2000 con límites 320-720.



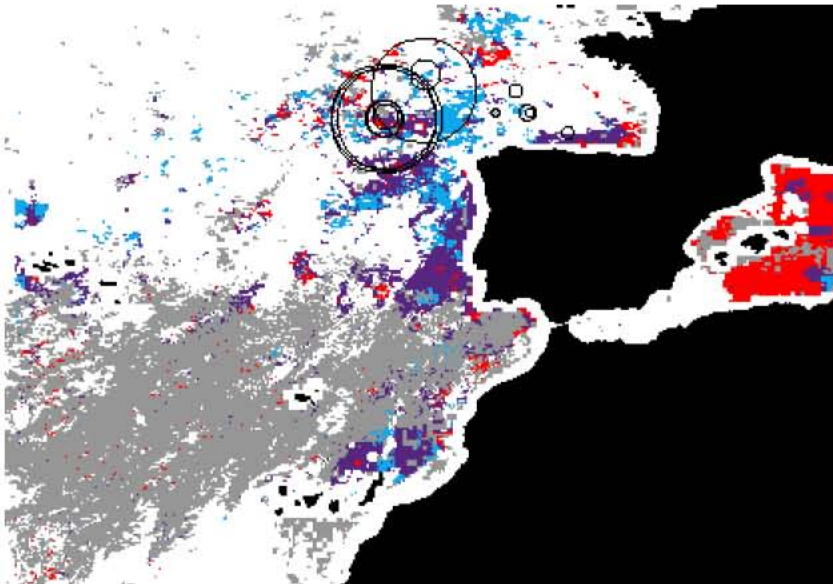
**Figura AII-23:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de julio de 2000 con límites 320-720.



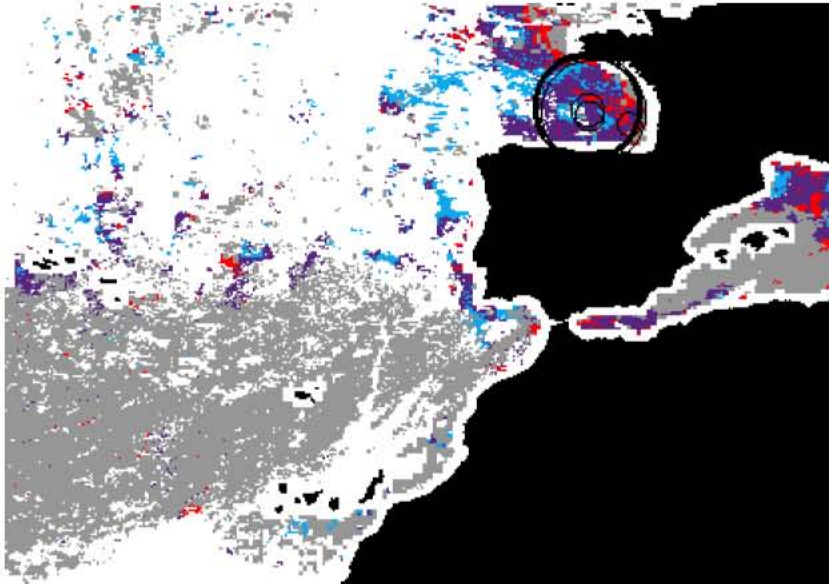
**Figura AII-24:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 20 de junio de 2001 con límites 320-720.



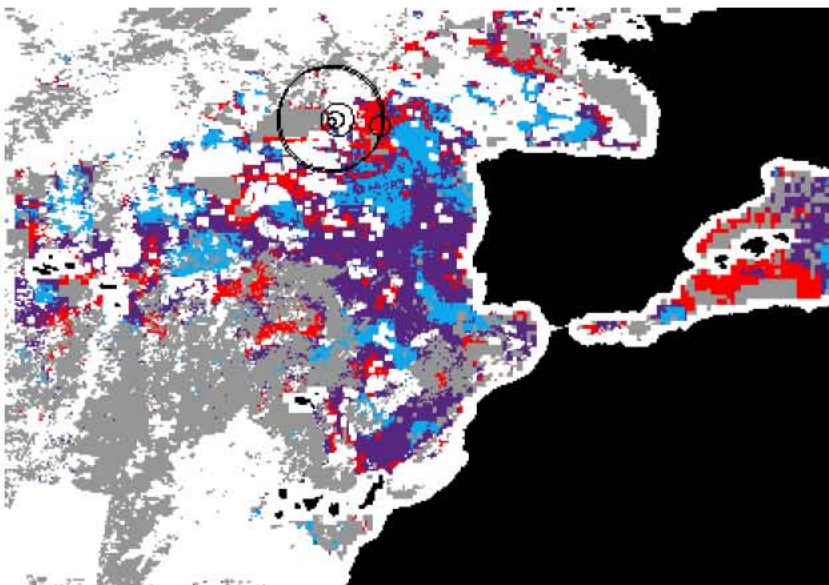
**Figura AII-25:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 13 de junio de 2000 con límites 500-1000.



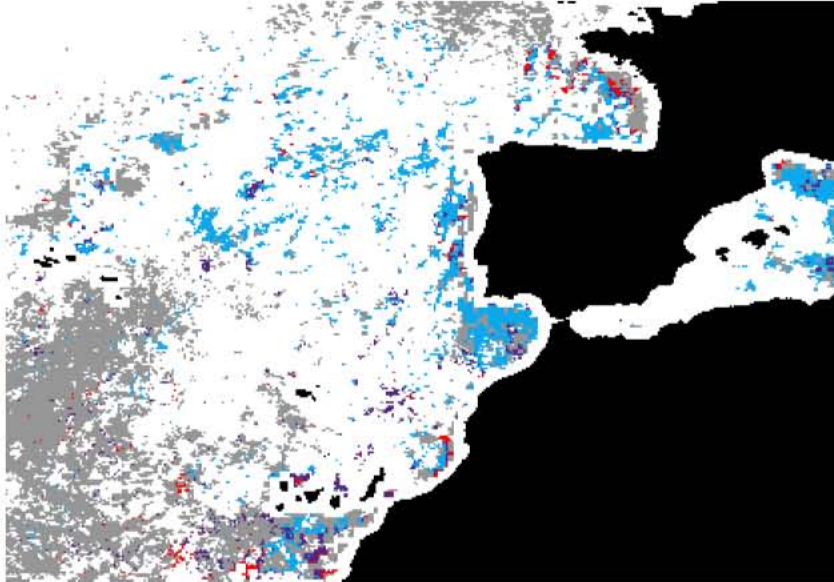
**Figura AII-26:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 1 de julio de 2000 con límites 500-1000.



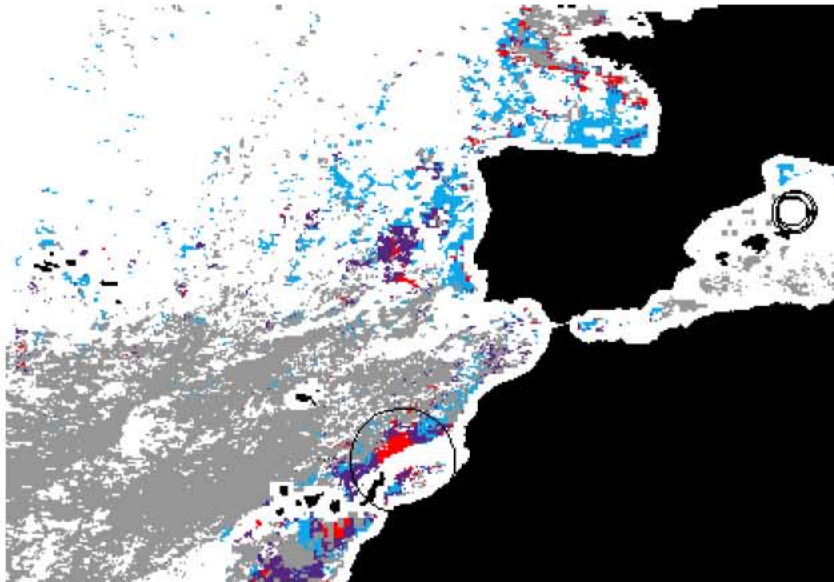
**Figura AII-27:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de julio de 2000 con límites 500-1000.



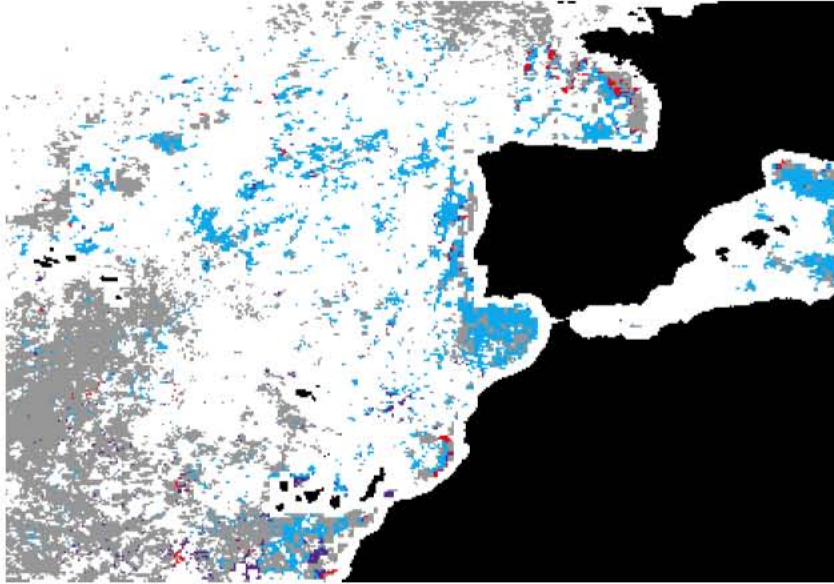
**Figura AII-28:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 20 de junio de 2001 con límites 500-1000.



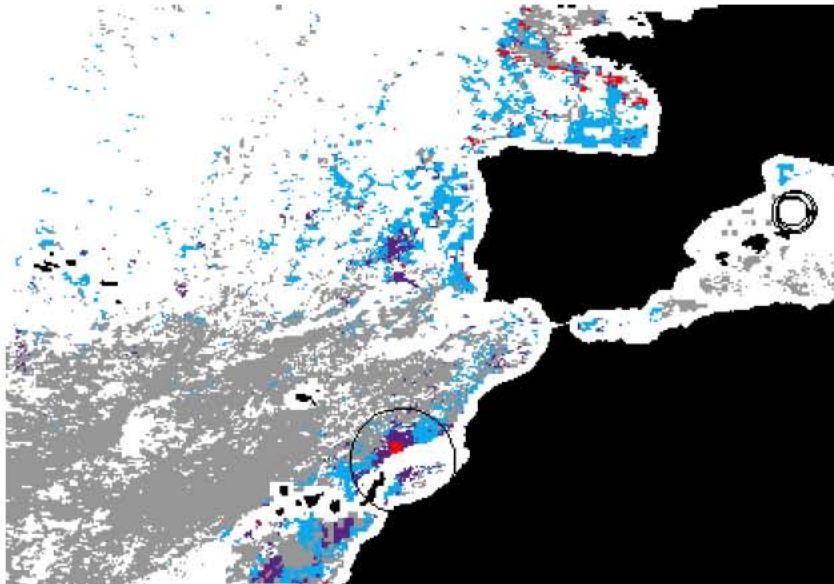
**Figura AII-29:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de octubre de 2000 con límites 320-700.



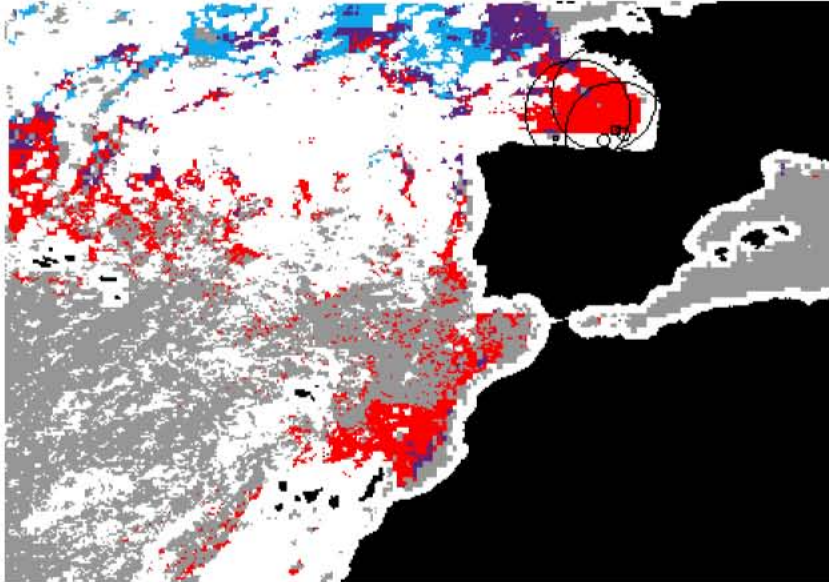
**Figura AII-30:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el 16 de octubre de 2001 con límites 320-700.



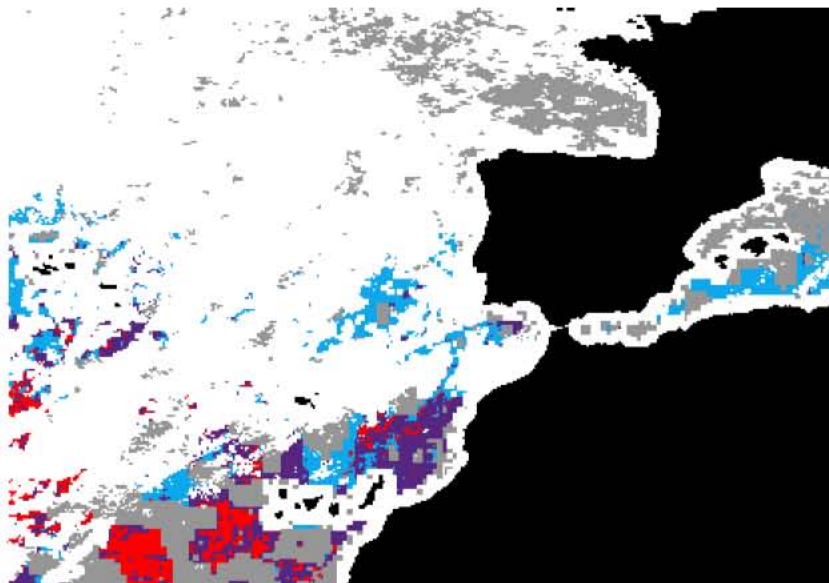
**Figura AII-31:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 23 de octubre 2000 con límites 500-1000.



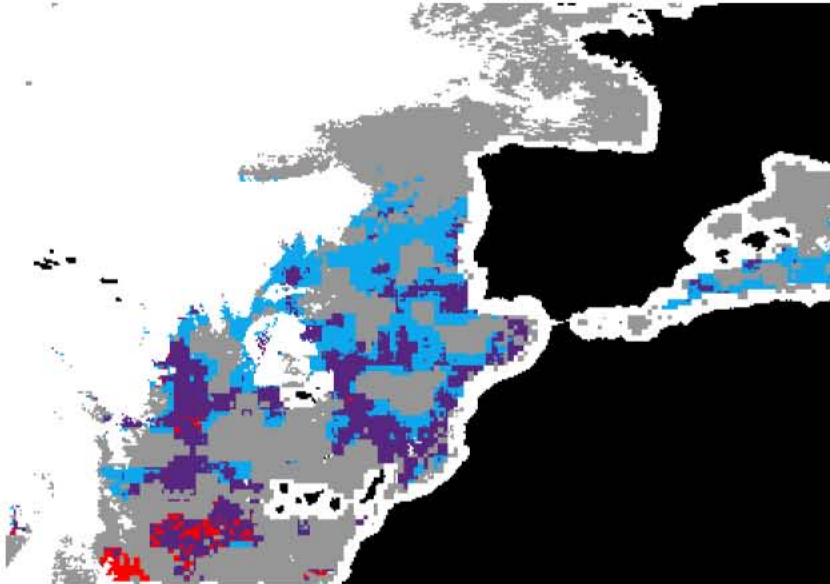
**Figura AII-32:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión lineal para el día 16 de octubre de 2001 con límites 500-1000.



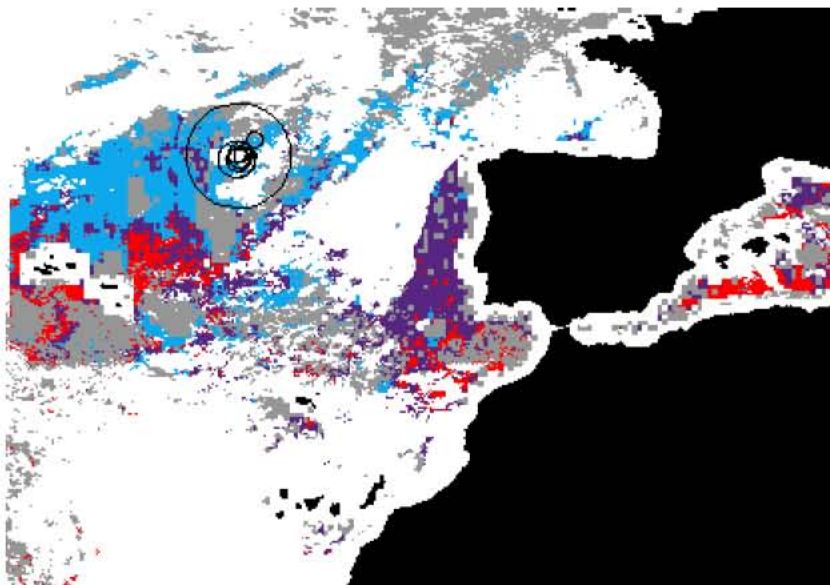
**Figura AII-33:** Mapa de probabilidad modelo 1 de análisis discriminante para el día 30 de agosto de 1999.



**Figura AII-34:** Mapa de probabilidad modelo 1 de análisis discriminante para el día 7 de febrero de 2000.

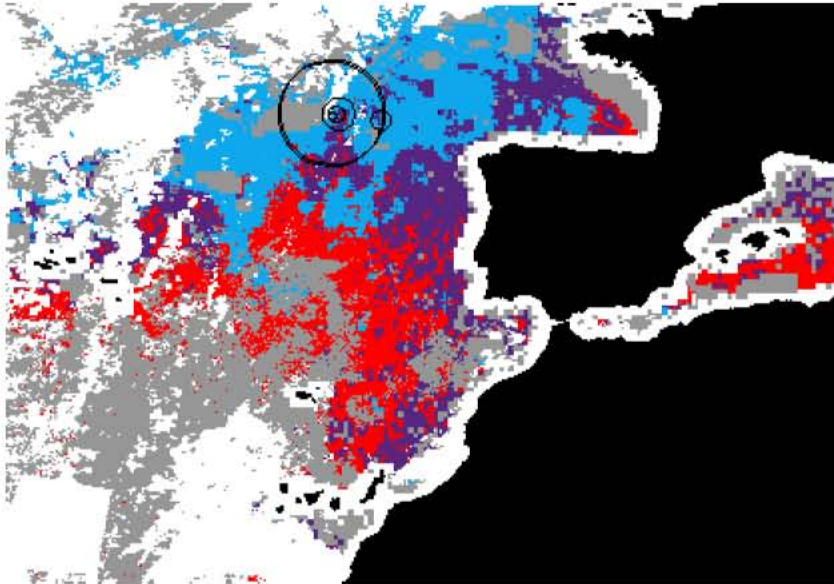


**Figura AII-35:** Mapa de probabilidad modelo 1 de análisis discriminante para el día 17 de marzo de 2000.

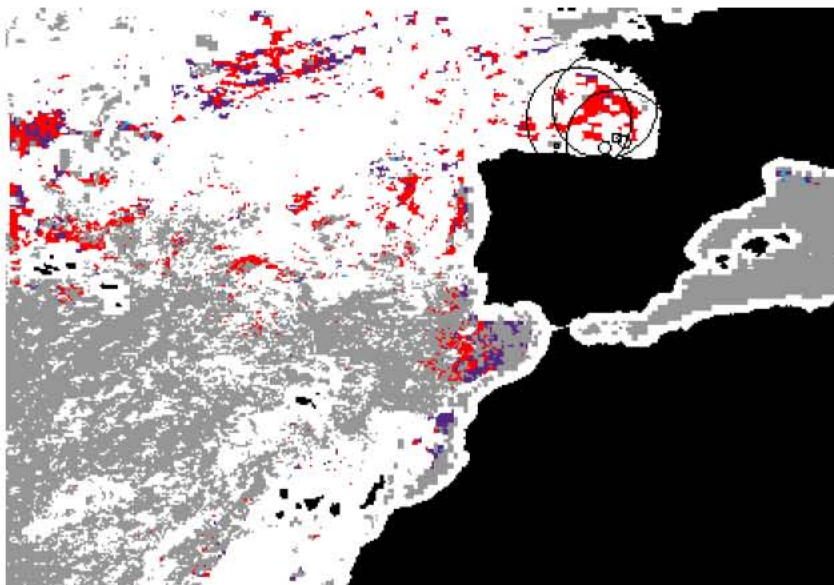


**Figura AII-36:** Mapa de probabilidad modelo 1 de análisis discriminante para el día 11 de junio 2000.

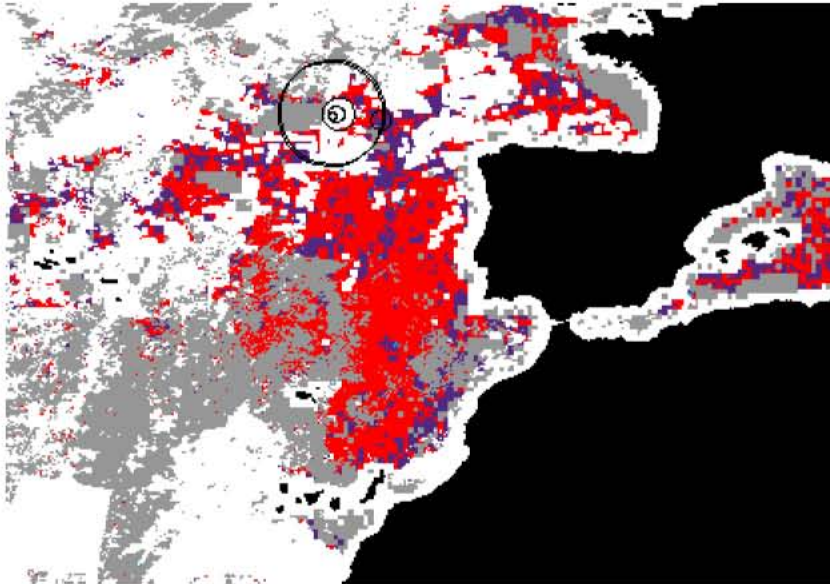




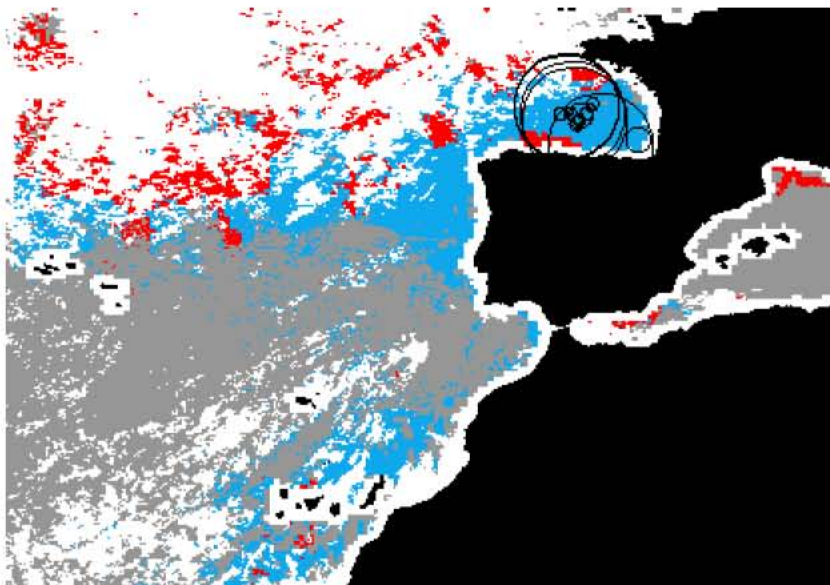
**Figura AII-37:** Mapa de probabilidad modelo 1 de análisis discriminante para el día 20 de junio de 2001.



**Figura AII-38:** Mapa de probabilidad modelo 2 de análisis discriminante para el día 30 de agosto de 1999.



**Figura AII-39:** Mapa de probabilidad modelo 2 de análisis discriminante para el día 20 de junio de 2001.



**Figura AII-40:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 22 de agosto de 1999.

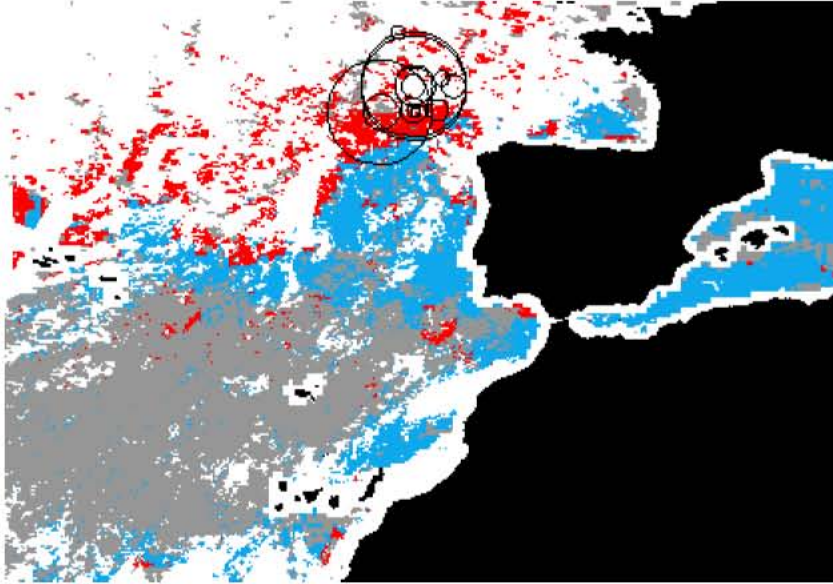


Figura AII-41: Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 29 de junio de 2000.

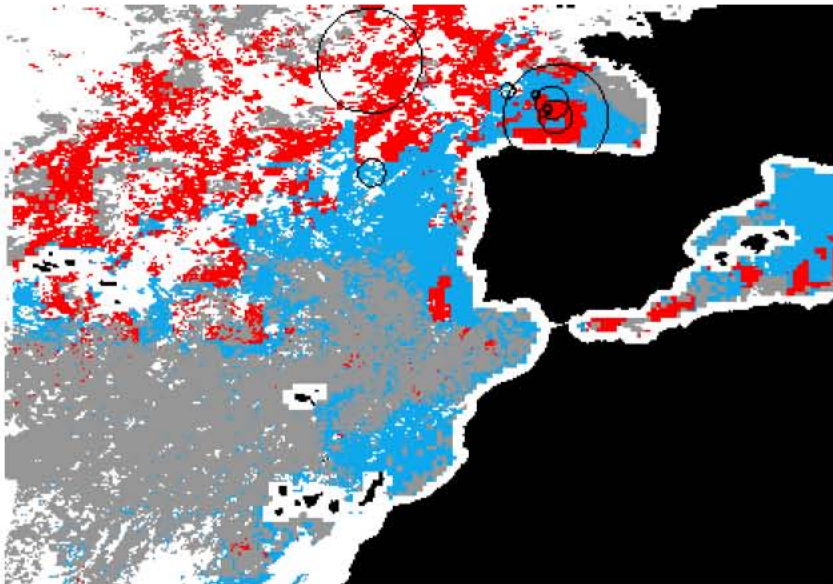
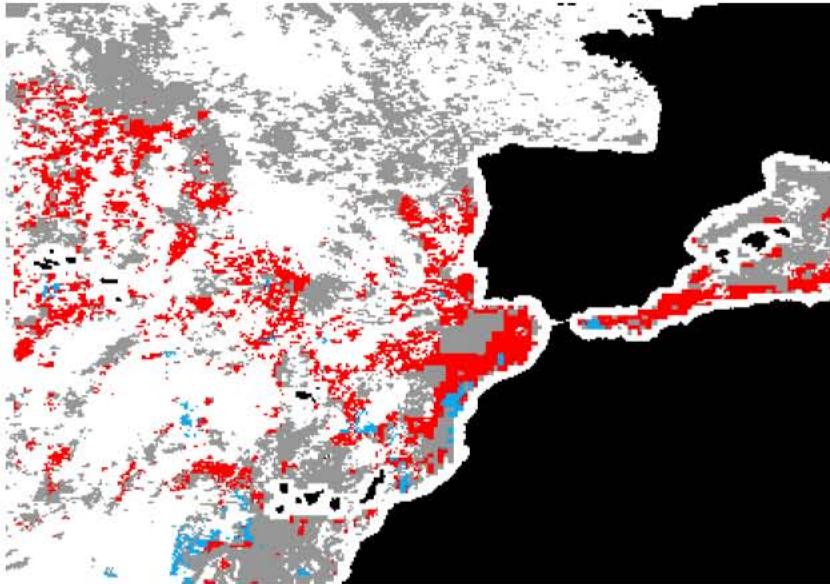
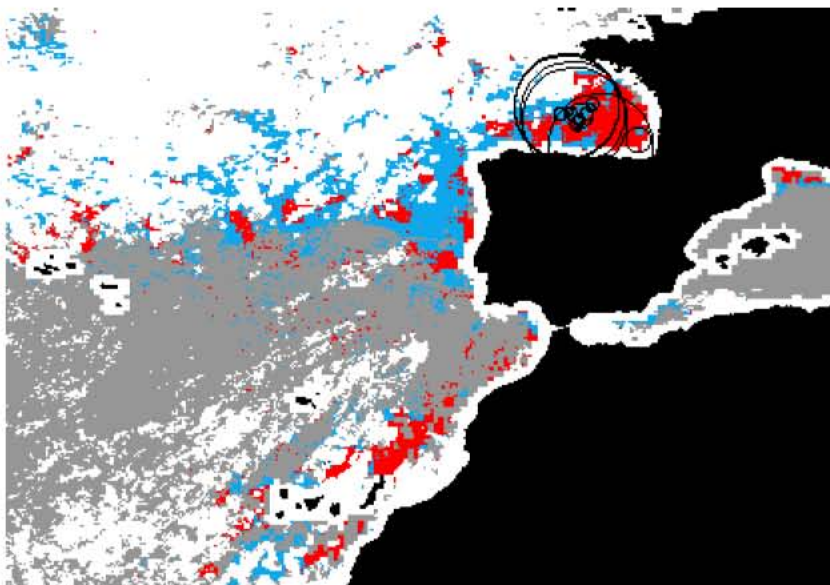


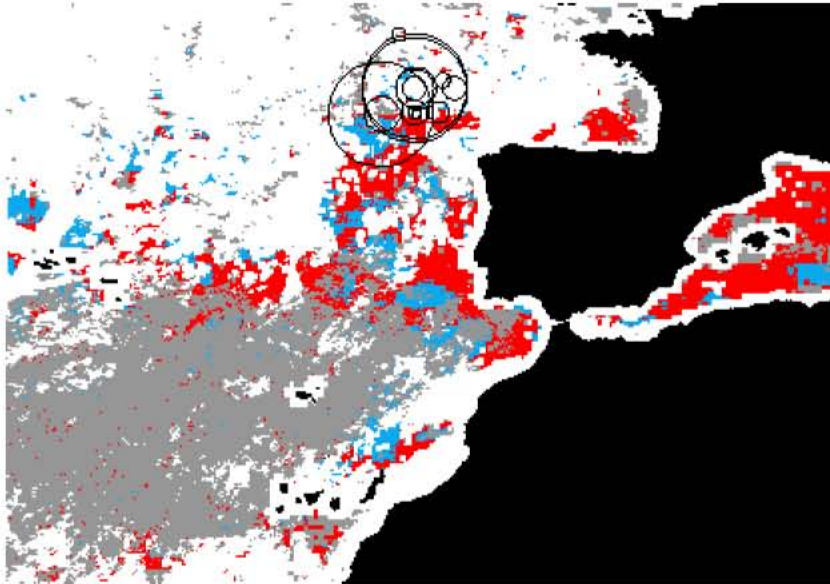
Figura AII-42: Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 27 de julio de 2001.



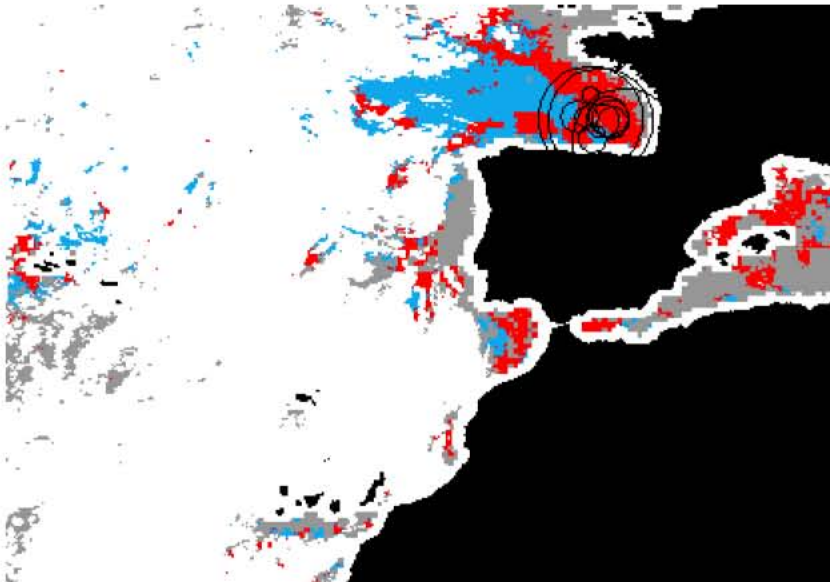
**Figura AII-43:** Mapa de probabilidad modelo 1 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 29 de marzo de 2000.



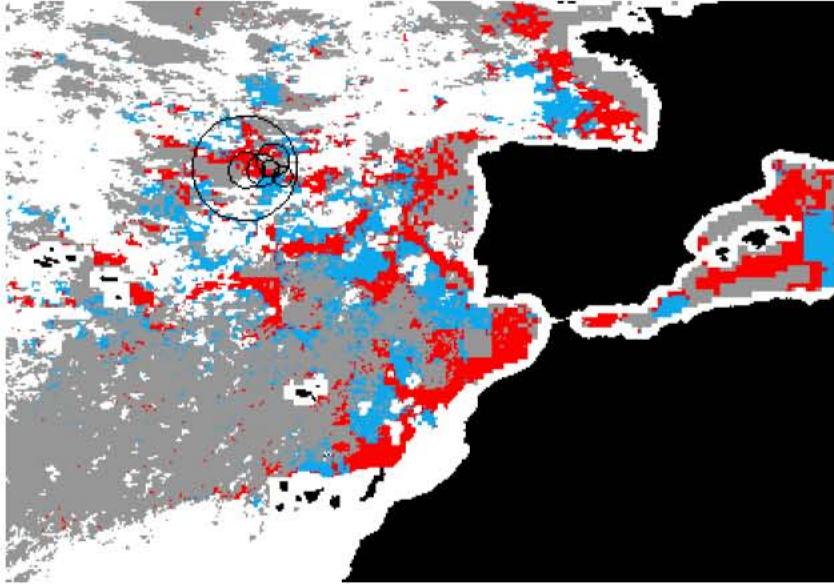
**Figura AII-44:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 22 de agosto de 1999.



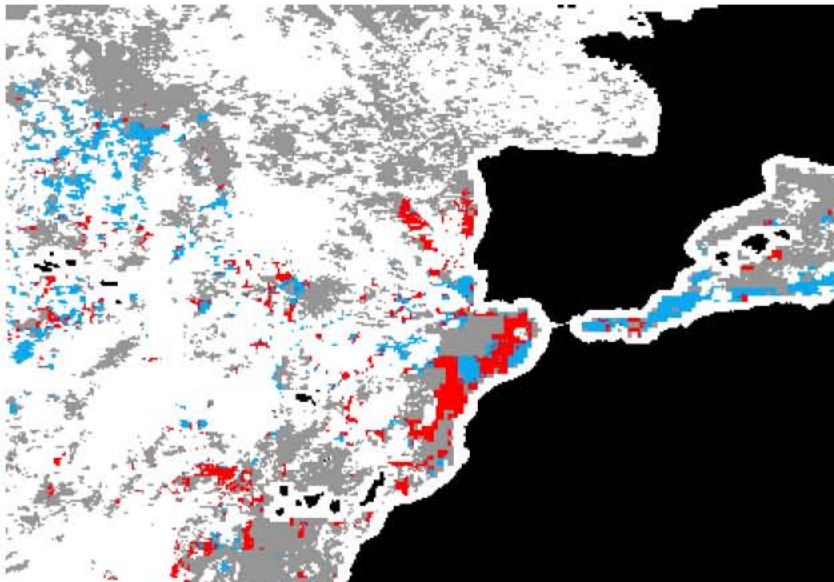
**Figura AII-45:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 29 de junio de 2000.



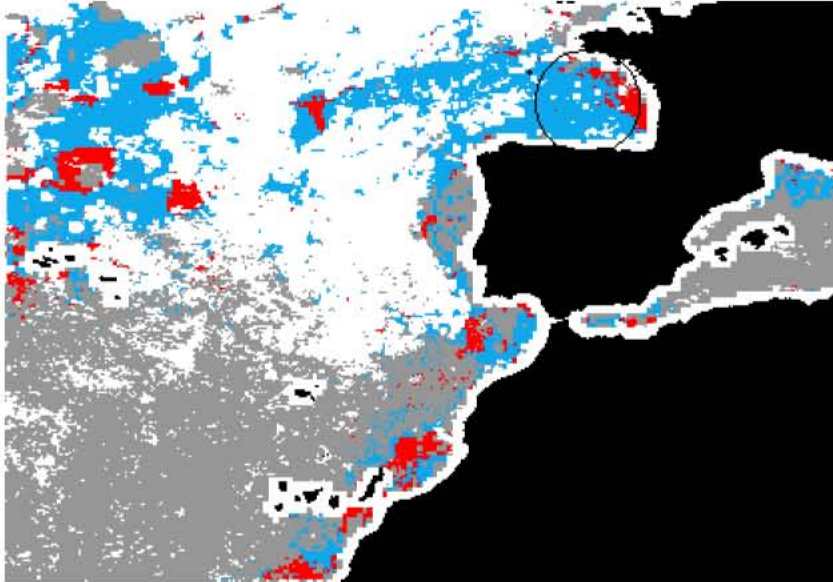
**Figura AII-46:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 17 de julio de 2000.



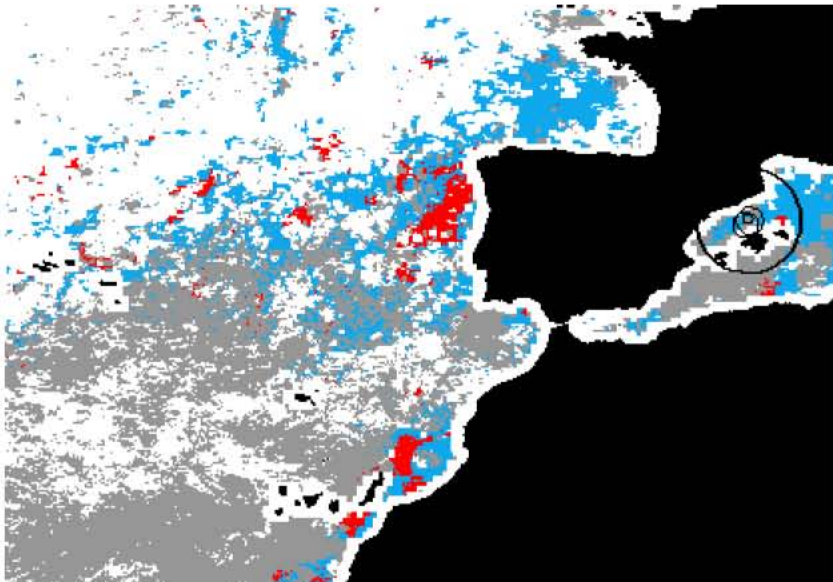
**Figura AII-47:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 3 de junio de 2001.



**Figura AII-48:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 29 de marzo de 2000.



**Figura AII-49:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 3 de septiembre de 2001.



**Figura AII-50:** Mapa de probabilidad modelo 2 de regresión logística con corte en 0,5 para el día 25 de septiembre de 2001.