


4.3 DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE RETENCIÓN DE ORGANISMOS PLANCTÓNICOS EN LA ZONA COSTERA DE LA XI REGIÓN POR MEDIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA CIRCULACIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SEAWIFS.

Víctor Marín & Luisa Delgado
Laboratorio de Modelación Ecológica,
Departamento de Ciencias Ecológicas,
Facultad de Ciencias, Universidad de Chile

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este proyecto fue implementar un modelo de circulación 2D para un sector del Mar Interior de la XI región, basado en las corrientes de mareas y los caudales de las cuencas aportantes como principales forzantes. Los objetivos específicos fueron:

- Implementar un modelo 2D de la circulación superficial (RMA2) por medio de la interfase de modelación SMS 8.0.
- Determinar las zonas de mayor potencial para la retención de organismos planctónicos por medio de un modelo de difusión (RMA4) acoplado al modelo de circulación.
- Comparar los resultados de los modelos con la distribución de la clorofila superficial determinada por medio del análisis de imágenes SeaWIFS, y con la distribución de la abundancia de los organismos planctónicos (datos de otros proyectos Cimar 9 Fiordos)

El propósito de este informe es relatar el estado de avance del proyecto respecto de los objetivos específicos enumerados.

RESULTADOS

Implementación de los modelos de circulación

Plataforma de modelación

De acuerdo a lo propuesto, se está desarrollando un modelo de circulación 2D para la zona de los fiordos. El área de modelación específica se ilustra en la Figura 1.

El modelo se está implementando por medio del programa Surface-water Modeling System versión 8.1 (SMS 8.1, <http://www.ems-i.com>). El SMS 8.1 es una interfase gráfica para el pre- y post-procesamiento de variados modelos de circulación. La plataforma SMS 8.1 fue escogida por su versatilidad para el procesamiento de la infor-

mación necesaria para generar la grilla numérica sobre la cual se implementa el modelo de circulación, por su facilidad para la visualización de los resultados, así como por su capacidad gráfica para analizar la estructura de los modelos implementados. El modelo numérico escogido fue el RMA2 (<http://chl.wes.army.mil/software/tabs/rma2.htm>). Este modelo es mantenido y actualizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory). El RMA2 es un modelo numérico hidrodinámico de elementos finitos, que entrega soluciones promediadas en z . A través del modelo se pueden computar la elevación superficial y los componentes horizontales de la velocidad en campos de flujo bi-dimensionales. El RMA2 computa una solución de las ecuaciones de Navier-Stokes en la formulación de Reynolds para flujos turbulentos. El modelo se ha usado para analizar las características y patrones de la circulación de ríos, reservorios y estuarios. El RMA2 se escogió sobre la base de su versatilidad para el estudio de flujos en zonas costeras, por su facilidad para correr en computadores personales de capacidad mediana (1 Gbyte en RAM, y doble CPU) y por su fácil acoplamiento a modelos de difusión (e.g. RMA4). Debido a que el RMA2 genera una solución promediada en z , solo se está modelando la capa superficial de la zona de estudios.

Características de los modelos implementados

La estructura básica del modelo es de una grilla numérica de 22.000 elementos y 49.000 nodos, cuyos tamaños son menores en la zona de interés (distancia internodal promedio = 0,7 km) y mayores en las zonas externas (distancia internodal promedio = 10 km), (Fig. 2). La información para la generación de las condiciones de borde (altura del nivel del mar) fue obtenida de los datos disponibles en el Centro Nacional de datos Oceanográficos (CENDOC). La información sobre los caudales de los ríos en la región fue obtenida a partir de los registros de la Dirección General de Aguas (DGA). Los datos batimétricos así como la línea de costa, fueron proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y a través del servidor de datos de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/>).

Debido a que el objetivo fue modelar la capa superficial, se consultó la literatura respecto del grosor de esta capa en la zona de estudios. Para ello se revisaron los resúmenes de las investigaciones realizadas en forma previa en la zona durante el crucero Cimar 8 Fiordos. Por ejemplo, el trabajo de Cáceres et al. (2003) muestra que la capa superficial influenciada por la escorrentía de los ríos puede variar desde los 15 m hasta los 50 m. Las velocidades medidas por los autores desde los 0,05 hasta los 0,8 m s⁻¹. Estas fueron utilizadas para calibrar los parámetros del modelo de manera de poder obtener un rango de velocidades similares. Por otra parte, el trabajo de Bello et al. (2003) muestra que la zona más afectada por cambios de salinidad, entre estados de la marea son los primeros 10 m. Sus datos de correntometría confirman la presencia de una capa superficial de al menos 14 m influenciada por la marea, que puede extenderse hasta los 50 m. Finalmente, Montecino et al. (2003) muestran que la zona eufótica es menor de 23 m. Basados en esta información, decidimos implementar dos modelos: uno con una profundidad homogénea inicial de 10 m y otro con una profundidad de 50 m.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al modelo somero (10 m). Este modelo es forzado por una variación semidiurna de nivel del mar en su frontera oeste (Fig. 3). La condición de borde para el ingreso de agua dulce, así como sus caudales, se muestra en la Figura 2.

El modelo de circulación, en su versión actual, ha mostrado ser estable respecto de los forzantes generando velocidades en el rango de los valores reportados por Cáceres et al. (2003). La Figura 3 muestra un ejemplo de las variaciones en velocidad para cuatro puntos seleccionados en el área de estudios. Las mayores velocidades ($0,7 \text{ m s}^{-1}$) se observan en el sector de la Boca del Guafo (St_7). Estas tienden a disminuir hacia el interior del canal Moraleda (St_5 a St_1). Queda todavía realizar nuevos experimentos con otros forzantes como viento y temporales de viento, así como correr el modelo con una profundidad de 50 m, que esperamos implementar durante el siguiente año.

Implementación del modelo de difusión

Se han realizado, hasta el momento, experimentos preliminares de acoplamiento entre el modelo de circulación (descrito en los párrafos anteriores) y el modelo de difusión. El modelo usado es el RMA4. Este modelo acepta las soluciones del RMA2 para el campo de circulación, pudiendo al mismo tiempo incorporar la difusión de elementos disueltos. El RMA4 es un modelo de calidad del agua diseñado para simular procesos de advección-difusión en ambientes acuáticos (King y Donnell, 2001). Los experimentos realizados hasta el momento consisten en simular el crecimiento del fitoplancton en puntos específicos de la zona de estudio. La ecuación que describe el proceso de crecimiento y difusión es la siguiente:

$$h\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} - v\frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial c}{\partial y} + kc\right) = 0$$

donde

- h = profundidad (10 m o 50 m)
- c = concentración de clorofila
- t = tiempo
- u, v = velocidad en x e y respectivamente
- D_x, D_y = coeficientes turbulentos de dispersión
- k = tasa de crecimiento

Esperamos implementar los modelos acoplados durante el siguiente año.

Análisis de imágenes SeaWIFS

Disponibilidad de imágenes y frecuencia de días sin nubes

El "Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor" (SeaWIFS) es un sensor remoto instalado a bordo del satélite Seastar (NASA). El propósito del proyecto SeaWIFS es proveer datos cuantitativos de la bio-óptica de los océanos a escala global. El sensor obtiene, por medio de métodos pasivos, información sobre la irradianza en ocho longitudes de onda. Esta información, obtenida con una resolución de 1 km, es posterior-

mente procesada por medio del programa SEADAS. Este programa contiene los algoritmos para calcular, a partir de los datos de irradianza, archivos meteorológicos y de ozono una variedad de variables (e.g. clorofila-a, K₄₉₀, aerosoles). En este proyecto hemos utilizado el algoritmo OC4 para estimar la concentración de clorofila. Este algoritmo es un polinomio de cuarto orden:

$$\text{chl}a = 10.0 \left(0.405 - 2.9 R + 1.69 R^2 + 0.530 R^3 - 1.144 R^4 \right)$$

$$\text{donde: } R = \log_{10} \left(\frac{\text{Rad } 443}{565} > \frac{\text{Rad } 490}{565} > \frac{\text{Rad } 520}{565} \right)$$

El SeaWiFS, debido a que es un sensor pasivo, requiere de condiciones sin nubes para poder captar la información de la superficie del océano. La zona de estudios es caracterizada por su alta nubosidad, por ello es que analizamos una gran cantidad de imágenes (N= 609) distribuidas en varios años (2001-2003) con el propósito de poder establecer la probabilidad de días claros. La Figura 4 muestra el resultado de dicho análisis. En promedio, en un mes, solo un 15% (\pm 5%) de los días es despejado. Pese a ello, logramos obtener un total de 92 imágenes a partir de las cuales realizamos el análisis de los patrones de distribución espacial de la clorofila en la zona de estudios.

Patrones espaciales de la clorofila-s en la zona de estudios

Condiciones promedio para los meses primavera-verano

Por medio de promedios espaciales, calculados sobre las imágenes claras disponibles en un mes calendario, analizamos la estructura de la clorofila satelital (clorofila-s) en la zona de estudios. Las Figuras 5 a 8 muestran la distribución de la clorofila-s en los meses de noviembre, diciembre, febrero-mar 2002 y febrero 2004, respectivamente. El análisis de estas imágenes permitió identificar cuatro zonas de alta concentración ($> 5 \text{ mg m}^{-3}$) de clorofila-s:

- Canal Moraleda
- Boca del Guafo
- La costa oeste (exterior) de la Isla de Chiloé)
- Golfo de Ancud-Seno Reloncaví

El Golfo Corcovado, salvo excepciones, presenta consistentemente bajos valores de clorofila-s. La secuencia temporal de los valores de clorofila-s muestra que estos permanecen altos durante el período noviembre-febrero, produciéndose una disminución notoria durante marzo. La Figura 9, generada mediante el análisis conjunto de todas las imágenes disponibles en un Sistema de Información Geográfica

(Arcview GIS 3.3), muestra un resumen de las zonas donde son esperables altos valores de clorofila-s.

Debido a las condiciones de nubosidad de la zona de estudios, sólo fue posible disponer de tres imágenes SeaWiFS (2, 17 y 19 de noviembre) a partir de las cuales se pudo analizar la distribución de clorofila-s. Con excepción de la imagen del día 2, la zona se presentó parcial-nublada por lo que sólo ha sido posible un análisis parcial del patrón de la clorofila mientras se desarrollaba el crucero Cimar 9 Fiordos. La Figura 10 muestra la secuencia de las imágenes de la zona.

La secuencia muestra el desarrollo de una alta concentración de clorofila en la zona del Golfo de Ancud y seno de Reloncaví, el 02 de noviembre, la cual disminuye al 17 de noviembre, para presentarse en la zona de Boca del Guafo y el sector Sur del Golfo Corcovado. Ambas zonas muestran menores concentraciones al día 19 de noviembre.

DISCUSIÓN

Nuestros resultados aún son preliminares, sin embargo muestra una tendencia clara. La zona de mayor concentración de clorofila-s, y donde se presenta la mayor probabilidad de encontrar parches de alta concentración es el canal Moraleda. Esta zona es, al mismo tiempo, la de menores velocidades. Por tanto, nuestra hipótesis inicial (i.e. las áreas de retención de organismos planctónicos se caracterizan por poseer bajas velocidades que aumentan el tiempo de residencia), parece ser apoyada por los resultados obtenidos. Para poder avanzar en nuestro análisis sería interesante conocer los resultados de otros proyectos respecto de las zonas donde se presentan las mayores concentraciones de organismos planctónicos. Nuestra proposición es que debería ser en el canal Moraleda.

REFERENCIAS

- CÁCERES, M., A. VALLE-LEVINSON, J. FIERRO, M. BELLO & M. CASTILLO (2003). Variabilidad longitudinal del flujo en canales con influencia batimétrica y topográfica. Resultados Crucero Cimar 8 Fiordos. CONA, Chile, pp. 17-24.
- BELLO, M., H. REYES, Y. GUERRERO & M. CASTILLO (2003). Patrones de corrientes, temperatura y salinidad en el área de Fiordos del Sur de Chile (Canales Darwin, Ninualac y Memory) durante invierno y primavera de 2002. Resultados Crucero Cimar 8 Fiordos. CONA, Chile, pp. 33- 40.
- MONTECINO, V., M. A. PAREDES, M. MANLEY & G. PIZARRO (2003) Composición por tamaños del fitoplancton, abundancia de clorofila y gradientes de productividad primaria en la Región de Aisén. Resultados Crucero Cimar 8 Fiordos. CONA, Chile, pp. 123-137.
- KING, I. P. & B. P. DONNELL (2001). Users Guide to RMA4 WES Version 4.5 US Army, Engineer Research and Development Center. Waterways Experiment Station. Coastal and Hydraulics Laboratory. 174 pp.



Figura 1: Área usada en el desarrollo del modelo de circulación. Las flechas corresponden a los bordes internos donde hay ingreso de agua dulce. La línea azul mar afuera corresponde al borde externo cuya función principal es el ingreso de la marea.

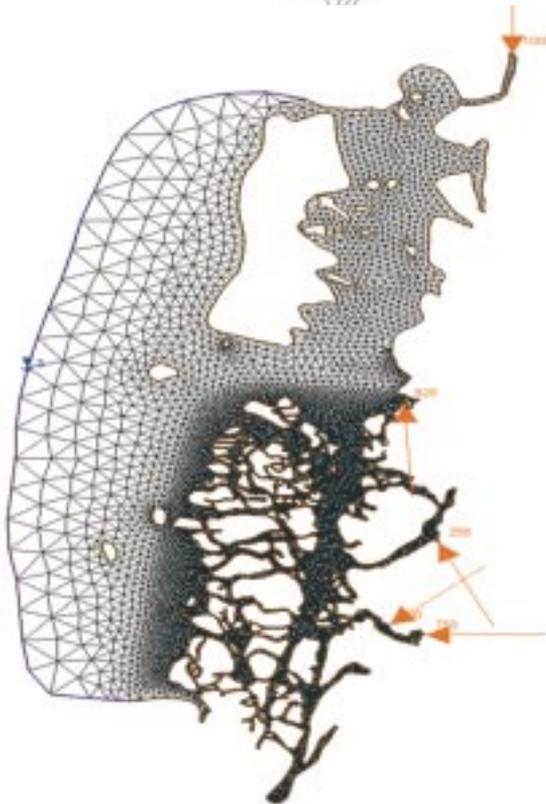


Figura 2: Distribución espacial de los elementos de la grilla numérica del modelo de circulación 2D.

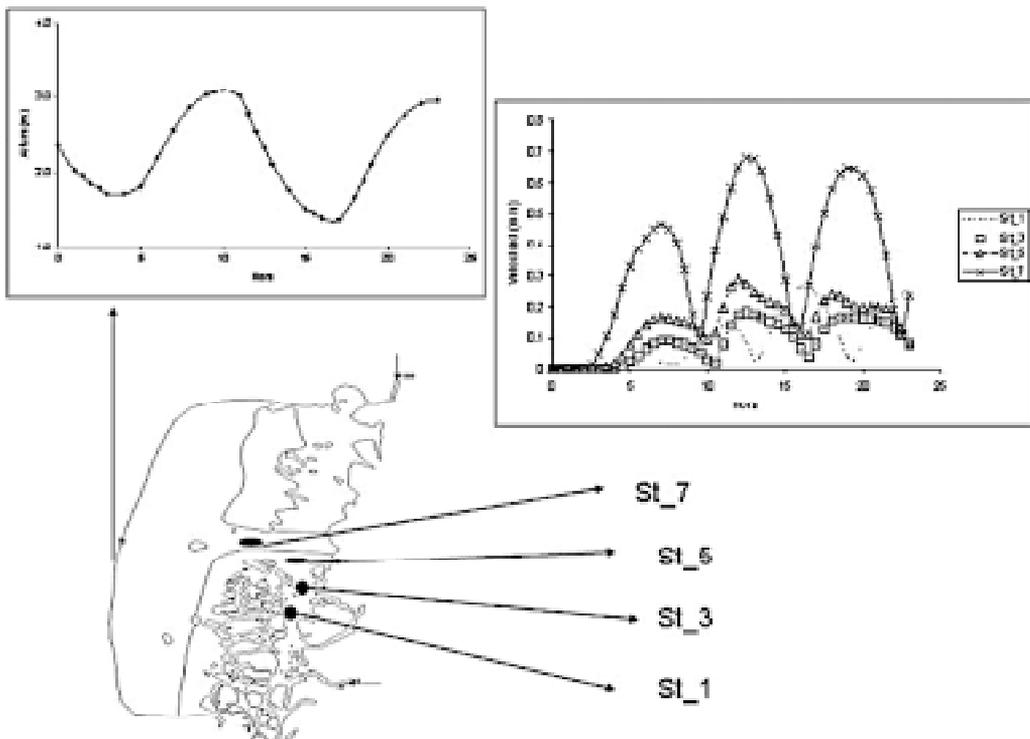


Figura 3: Condición de borde para la marea y salida del modelo para la velocidad en cuatro puntos seleccionados de la zona de estudio.

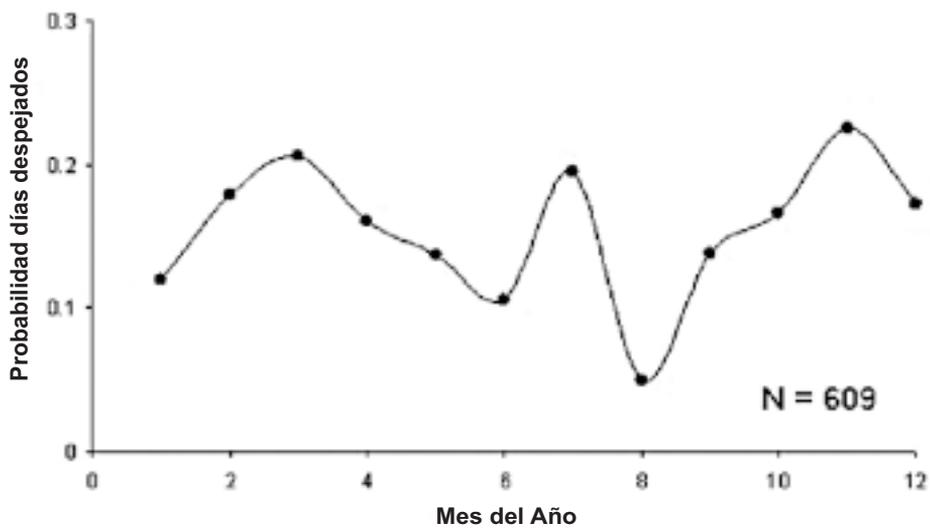


Figura 4: Distribución de la probabilidad de días despejados sobre el área de estudios por medio de imágenes SeaWiFS (2000-2003).

Noviembre

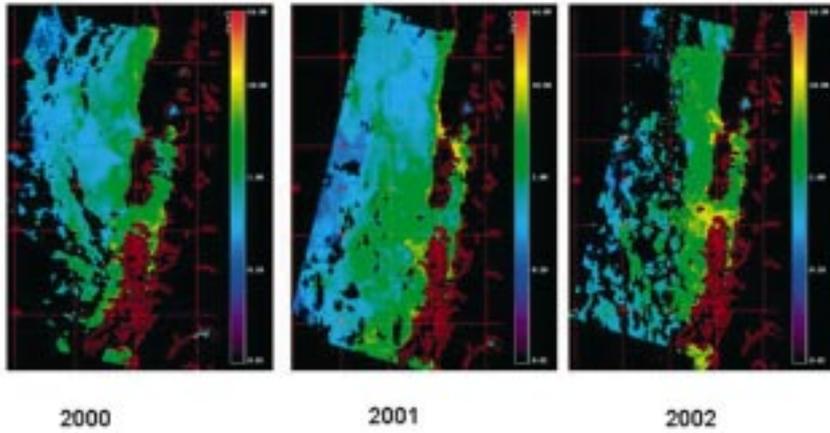


Figura 5: Distribución de la clorofila-s (mg m^{-3}) para el mes de noviembre. Las imágenes corresponden al promedio espacial de imágenes individuales para cada año.

Diciembre

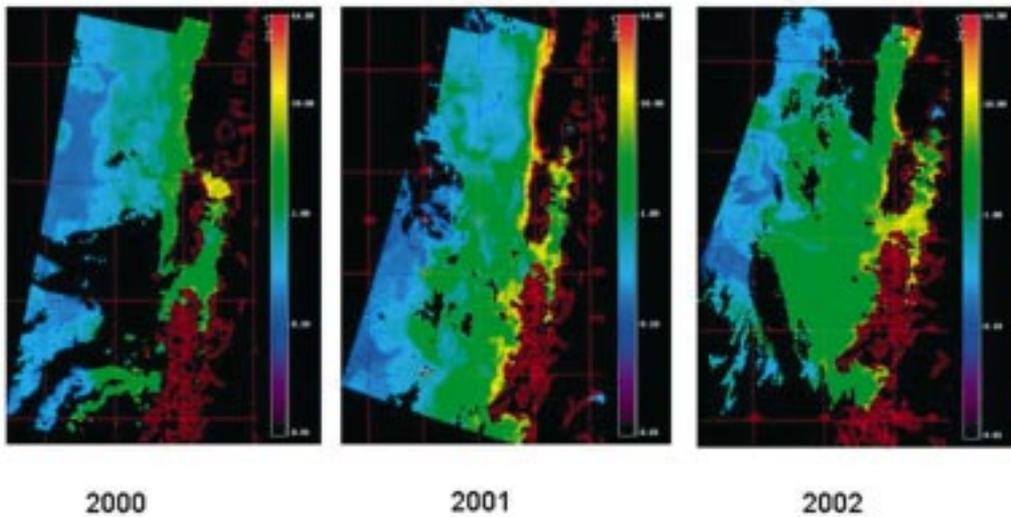


Figura 6: Distribución de la clorofila-s (mg m^{-3}) para el mes de diciembre. Las imágenes corresponden al promedio espacial de imágenes individuales para cada año.



2002

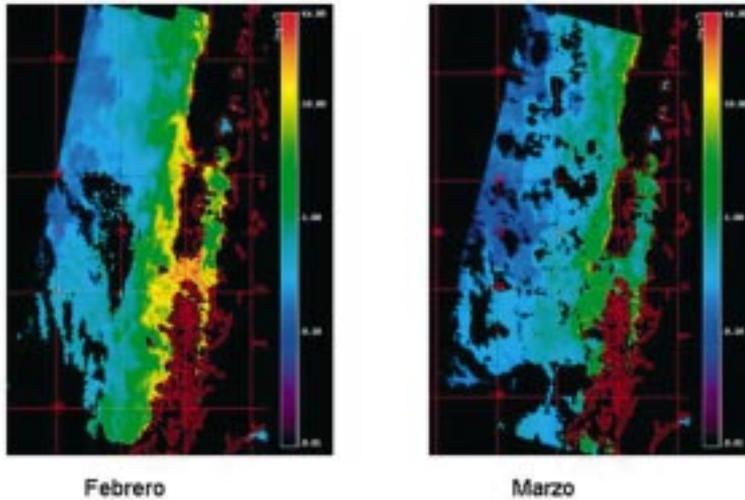


Figura 7: Distribución promedio de la clorofila-s (mg m^{-3}) para los meses de febrero y marzo 2002. Las imágenes corresponden al promedio espacial de imágenes individuales para cada mes.

FEBRERO 2004

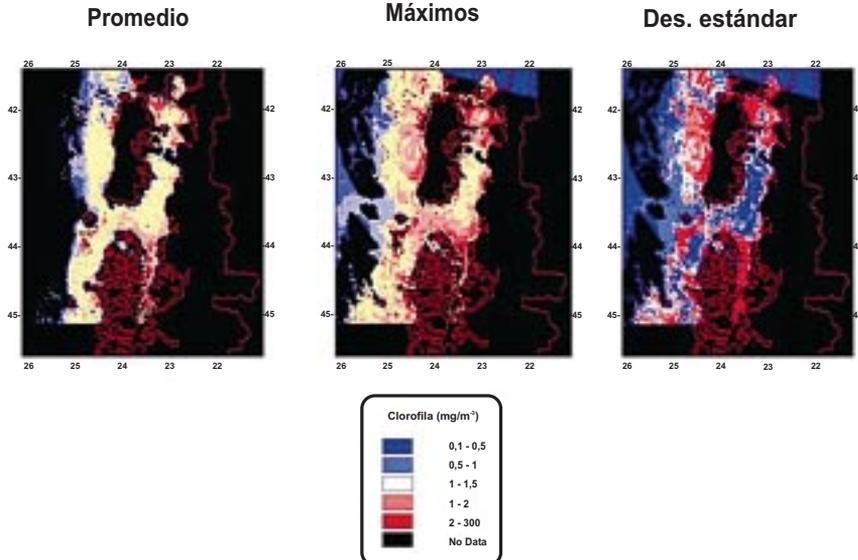


Figura 8: Distribución espacial de las condiciones promedio, valores máximos y desviación estándar de la clorofila-s durante febrero-2004. Los máximos fueron obtenidos mediante un análisis, píxel por píxel, de los valores de clorofila-s en cada una de las cuatro imágenes individuales disponibles. Por tanto, esta imagen muestra las zonas donde es esperable encontrar altas concentraciones de clorofila durante el mes de febrero.

Zonas con altos valores de clorofila ($> 5,0 \text{ mg/m}^3$)

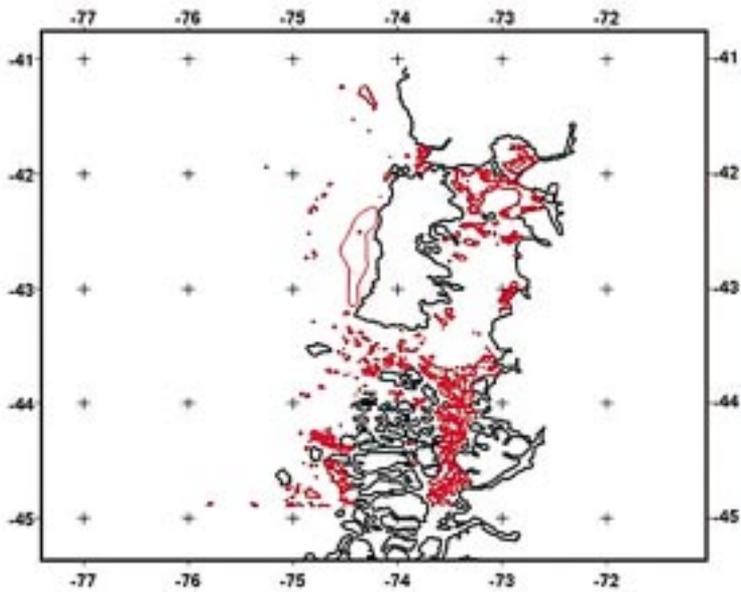


Figura 9: Resumen de la distribución espacial de altas concentraciones de clorofila-s en el área de estudios.

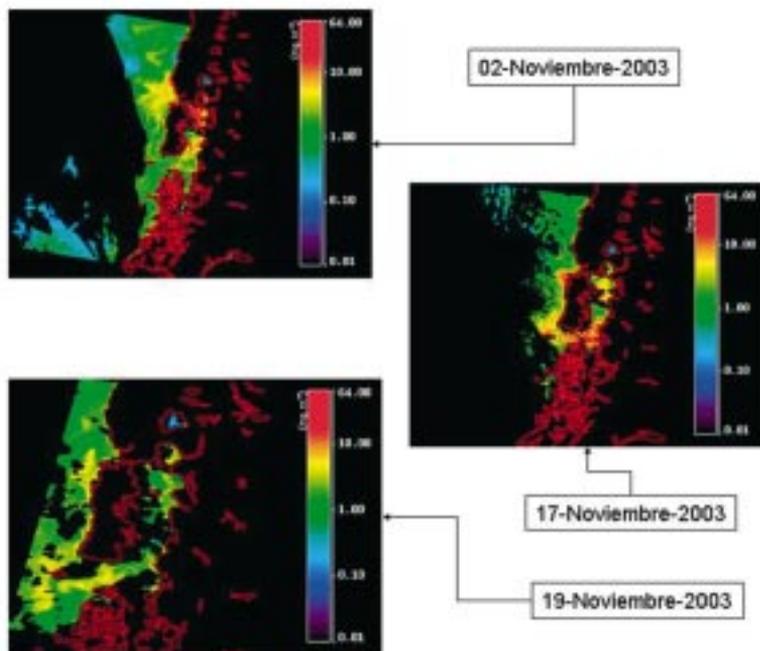


Figura 10: Secuencia de tres imágenes SeaWiFS durante el desarrollo del crucero científico Cimar 9 Fiordos.