

## Phytoplankton biomass profiles in San Jorge Bay (Antofagasta, Chile) based on color imagery

### Obtención de perfiles de biomasa fitoplanctónica en bahía San Jorge (Antofagasta, Chile) a partir de imágenes en color

Paola M. Dávila<sup>1,4</sup>, Sue-Hellen Díaz<sup>2</sup>, Jorge Valdés<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Acuáticas y Ambientales, Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Biológicos, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Biológicos, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt, Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Biológicos, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile.

<sup>4</sup> Laboratorio Mixto Internacional PALEOTRACES (Institut de Recherche pour le Développement, Univeridade Federal Fluminense, Universidad de Antofagasta), Casilla 170, Antofagasta, Chile.

\* Corresponding author. E-mail: paola.davila@uantof.cl

**ABSTRACT.** Fluorometric measurements were taken from a CTD at San Jorge Bay (northern Chile) to adjust a Gaussian model, in order to determine the vertical distribution of phytoplankton biomass using satellite-derived chlorophyll *a* data. Calibration was done using two *in situ* data sets. Each chlorophyll *a* profile was smoothed by a moving average and adjusted with a Gaussian model, obtaining the mean Gaussian parameters for both data sets. The mean Gaussian model obtained for one of the data sets was valid for a chlorophyll *a* range between 1.17 and 51.8 mg m<sup>-3</sup>, and the maximum concentration was located at 19.20 and 0.25 m depth, respectively. The 20 January 2011 color image was analyzed for the study area, and the modal concentration was 0.78 mg m<sup>-3</sup>, with 95% of the data varying between 0.5 and 20.0 mg m<sup>-3</sup>. The adjusted mean Gaussian model was valid for 80.26% of the study area. The analysis was expanded to the rest of January 2011 (14 images), and the model was valid for 84.40% (±12.48%) of the study area. The same procedure was followed but without applying the moving average to the *in situ* data, and the Gaussian model obtained in this case was valid for 93.72% (±8.89%) of the study area. Other studies of the optical properties of water are required for a better interpretation of the color images for this coastal system.

*Key words:* chlorophyll *a*, Antofagasta Bay, MODIS-Aqua, remote sensing.

**RESUMEN.** Se realizaron mediciones de clorofila *a* mediante fluorimetría (CTD) con el fin de ajustar un modelo gaussiano y posteriormente obtener la distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica en bahía San Jorge (norte de Chile) a partir de imágenes satelitales en color (MODIS-Aqua). Se realizó una calibración con datos *in situ* a partir de dos bases de datos. Los perfiles de clorofila *a* fueron suavizados con un promedio móvil, y se les ajustó un modelo gaussiano. Se obtuvieron los parámetros gaussianos promedio para ambas bases de datos. El modelo gaussiano promedio obtenido para una de las bases de datos fue válido para un intervalo de clorofila *a* de 1.17 a 51.8 mg m<sup>-3</sup>, y la máxima concentración subsuperficial se ubicó a los 19.20 y 0.25 m de profundidad, respectivamente. En la imagen en color del 20 de enero de 2011 analizada para el área de estudio, se observaron concentraciones de clorofila *a* con valor modal de 0.78 mg m<sup>-3</sup>, y el 95% de los datos fluctuó entre 0.5 y 20.0 mg m<sup>-3</sup>. El modelo gaussiano promedio ajustado fue válido para el 80.26% del área estudiada. Se amplió este estudio para el resto de enero (14 imágenes), y el modelo gaussiano fue válido para el 84.40% (±12.48%) del área estudiada. Al realizar un procedimiento similar sin aplicar un promedio móvil a los datos *in situ*, el modelo gaussiano ajustado promedio fue válido para el 93.72% (±8.89%) del área de estudio. Aún se requieren estudios sobre las propiedades ópticas del agua para mejorar la interpretación de las imágenes en color de este sistema costero.

*Palabras clave:* clorofila *a*, bahía Antofagasta, MODIS-Aqua, detección remota.

## INTRODUCTION

Coastal areas are affected by a variety of human activities (industrial, shipping, fishing, recreational) (Holt *et al.* 2009), and tools are thus needed to monitor and study the bio-oceanographic characteristics associated with the processes controlling coastal dynamics. Monitoring the distribution of phytoplankton biomass is important because phytoplankton

## INTRODUCCIÓN

En las zonas costeras se desarrolla el mayor número de actividades antropogénicas (industriales, portuarias, pesqueras y recreativas) (Holt *et al.* 2009), y es por ello que se necesitan herramientas para monitorear y estudiar las características bio-oceanográficas asociadas a los procesos dinámicos costeros. Es importante monitorear la distribución

are an essential component of marine ecosystems, capable of transforming inorganic nutrients into organic compounds (Hecky and Kilham 1988). Phytoplankton biomass is defined as the total weight of phytoplankton per unit volume or area, but it can also be estimated based on chlorophyll *a* concentrations, even though chlorophyll *a* represents only 1% of the cell dry weight (Cullen 1982). With current remote sensing techniques it is possible to measure chlorophyll *a* concentrations in the first optical depth of the ocean, which represents between 20% and 22% of the euphotic zone (Ulloa *et al.* 1995).

The phytoplankton biomass distributed in the water column can be estimated from satellite-derived chlorophyll *a* data, using mathematical algorithms that represent the true vertical distribution of this variable such as Gaussian distributions (Platt *et al.* 1988, Ulloa *et al.* 1995) or simple regression models between the surface chlorophyll concentration and the subsurface maximum concentration and/or its position in the water column (Millán-Núñez *et al.* 1996). The primary productivity of oceans can be estimated using the distribution of chlorophyll *a* and the vertical distribution of light (Platt and Sathyendranath 1988, Longhurst *et al.* 1995). The vertical distribution of chlorophyll *a* is characterized by a subsurface maximum, which depends on many factors that present spatial and temporal variabilities such as the concentration of nutrients, the distribution and extinction of light, the stability of the water column, and the sinking rates of phytoplankton (Steel and Yentsch 1960, Cullen 1982, Varela *et al.* 1992).

In coastal zones, chlorophyll *a* concentrations generally range from 0.5 to 10.0 mg m<sup>-3</sup> (O'Reilly *et al.* 1998, Gohin *et al.* 2008, Patti *et al.* 2008), but can be higher in areas affected by coastal upwelling. Oceanic areas present lower phytoplankton productivity and chlorophyll *a* concentrations, which generally range from 0.01 to 0.3 mg m<sup>-3</sup>, but can reach 1 mg m<sup>-3</sup> at high latitudes. Chlorophyll content depends on nutrient, micronutrient, and light availability, among other factors (Mann and Lazier 1991). Primary productivity can be determined by estimating phytoplankton biomass in the water column using chlorophyll imagery (Platt *et al.* 1988, Ulloa *et al.* 1995). Though this method is preferably used for oceanic regions, its effectiveness for monitoring and studying the spatial and temporal variability of phytoplankton in coastal zones should be evaluated.

The objective of this study was to evaluate the distribution of phytoplankton biomass in the water column from satellite-derived chlorophyll concentrations during the austral summer in San Jorge Bay (northern Chile).

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

San Jorge Bay (SJB), also known as Antofagasta Bay, is located in the southern part of the Mejillones Peninsula,

de la biomasa fitoplanctónica porque el fitoplancton constituye un componente esencial de los ecosistemas marinos, ya que transforma los nutrientes inorgánicos en compuestos orgánicos (Hecky y Kilham 1988). La biomasa fitoplanctónica se define como el peso total del fitoplancton por unidad de volumen o de área, pero también puede ser estimada mediante la concentración de clorofila *a*, aun cuando la clorofila *a* representa sólo el 1% del peso seco de una célula (Cullen 1982). Hoy en día, la detección remota basada en radiometría permite medir concentraciones de clorofila *a* en la primera profundidad óptica del océano, la cual representa entre el 20% y 22% de la capa eufótica (Ulloa *et al.* 1995).

Con los datos satelitales de clorofila *a*, es posible estimar la biomasa fitoplanctónica distribuida en la columna de agua a través de algoritmos matemáticos que se ajusten a la distribución vertical y real de esta variable como, por ejemplo, las distribuciones gaussianas (Platt *et al.* 1988, Ulloa *et al.* 1995) o los modelos de regresión simple entre la concentración de clorofila superficial y su máxima concentración subsuperficial y/o la profundidad de esta última concentración (Millán-Núñez *et al.* 1996). La distribución de la clorofila *a* y la distribución vertical de la luz permiten estimar la productividad primaria de los océanos (Platt y Sathyendranath 1988, Longhurst *et al.* 1995). La distribución vertical de la clorofila *a* se caracteriza por un máximo subsuperficial, el cual depende de numerosos factores que presentan variabilidades espaciotemporales como la concentración de nutrientes, la distribución y extinción de la luz, la estabilidad de la columna de agua y las tasas de hundimiento del fitoplancton (Steel y Yentsch 1960, Cullen 1982, Varela *et al.* 1992).

En general, las zonas costeras presentan concentraciones de clorofila *a* de 0.5 a 10.0 mg m<sup>-3</sup> (O'Reilly *et al.* 1998, Gohin *et al.* 2008, Patti *et al.* 2008), pero la concentración puede ser aún mayor en zonas afectadas por surgencias costeras. Las zonas oceánicas presentan menor productividad fitoplanctónica; las concentraciones de clorofila *a* varían de 0.01 a 0.3 mg m<sup>-3</sup>, alcanzando concentraciones de 1 mg m<sup>-3</sup> en zonas de altas latitudes. Las concentraciones de clorofila dependen de la disponibilidad de nutrientes, micronutrientes y luz solar, entre otros factores (Mann y Lazier 1991). Es necesario estimar la biomasa fitoplanctónica en la columna de agua a través de datos satelitales de clorofila para determinar la productividad primaria (Platt *et al.* 1988, Ulloa *et al.* 1995). Si bien este tipo de metodología se aplica preferentemente en regiones oceánicas, es necesario evaluar sus resultados en zonas costeras para monitorear y estudiar la variabilidad de la biomasa fitoplanctónica en distintas escalas espaciotemporales.

Este trabajo tiene por objeto evaluar la distribución de la biomasa fitoplanctónica en la columna de agua a partir de estimaciones de clorofila obtenidas de imágenes satelitales en color durante el verano austral en la bahía San Jorge (norte de Chile).

Chile (23° S, fig. 1), and is associated with the Humboldt Current (Strub *et al.* 1998, Escribano and Hidalgo 2001) and the Atacama Desert. It is one of the few southward-facing bays in Chile and, therefore, exposed to southerly and south-westerly winds (upwelling-favorable winds). Upwelling occurs to the north and south of SJB (off Cape Angamos and off Cape Coloso, respectively), affecting the hydrographic characteristics of the bay (Rodríguez *et al.* 1991, Escribano *et al.* 2002, Piñones *et al.* 2007) (fig. 1).

### Data acquisition

Profiles of physical and chemical parameters were obtained with a Seabird SBE 19 plus CTD at 20 stations located within SJB (fig. 1). In this paper we only analyze the distribution of chlorophyll *a* measured with an *in situ* fluorometer. One survey was conducted on 20 January 2011 and another on 6 April 2011, and 20 and 18 profiles, respectively, were obtained. The January profiles were obtained between 37 and 102 m depth ( $89.1 \pm 15.93$  m, mean  $\pm$  standard deviation) and the April profiles between 20 and 97 m depth ( $81.17 \pm 20.57$  m) depth. On 25 March 2011, chlorophyll *a* measurements were also taken with the same CTD at 8 stations along a transect between the port of Antofagasta and Cape Jorge in SJB (fig. 1); these profiles were taken between 31 and 116 m ( $83.125 \pm 33.53$  m) depth. The fluorometer profiles (January, March, and April) were analyzed and those that presented preferably a subsurface maximum or at least a surface maximum were selected to fit the Gaussian algorithm. The 34 profiles selected are considered to represent the austral summer. The depth range for this set of profiles was 20 to 116 m ( $86.88 \pm 22.97$  m).

The CTD was equipped with a Wet Labs WETStar fluorometer. The concentration of chlorophyll *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) was obtained using a mathematical algorithm that allows the transformation of voltage to chlorophyll *a* content:

$$\text{Chlorophyll } a = (V_{\text{output}} - V_{\text{target}}) \times \text{SF} \quad (1)$$

where  $V_{\text{output}}$  is the output voltage,  $V_{\text{target}}$  is the target voltage, and SF is the scale factor. The target voltage was 0.057 V and the scale factor was  $28.300 \text{ mg m}^{-3} \text{ V}^{-1}$ , according to the manufacturer's calibration on 27 April 2010. This applies for all the fluorometry profiles obtained in this study.

Pearson's correlation coefficient was used to measure the relationship between the *in situ* bio-oceanographic data (i.e., between surface temperature and surface chlorophyll concentration and between surface chlorophyll and the subsurface chlorophyll maximum). Normality was previously verified at 95% significance level, based on the combined data set (34 profiles).

### Color images

Color images derived from the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard NASA's

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La bahía San Jorge (BSJ), también conocida como bahía Antofagasta, se ubica en el extremo sur de la península de Mejillones (Chile) (23° S, fig. 1), y está asociada al sistema de corriente de Humboldt (Strub *et al.* 1998, Escribano e Hidalgo 2001) y al desierto de Atacama. Es una de las pocas bahías de Chile orientada hacia el sur y, por lo tanto, está expuesta a los vientos del sur y suroeste (vientos favorables a la surgencia). Al norte y al sur de BSJ existen focos de surgencia como punta Angamos y punta Coloso, respectivamente, que afectan las características hidrográficas de la bahía (Rodríguez *et al.* 1991, Escribano *et al.* 2002, Piñones *et al.* 2007).

### Obtención de datos

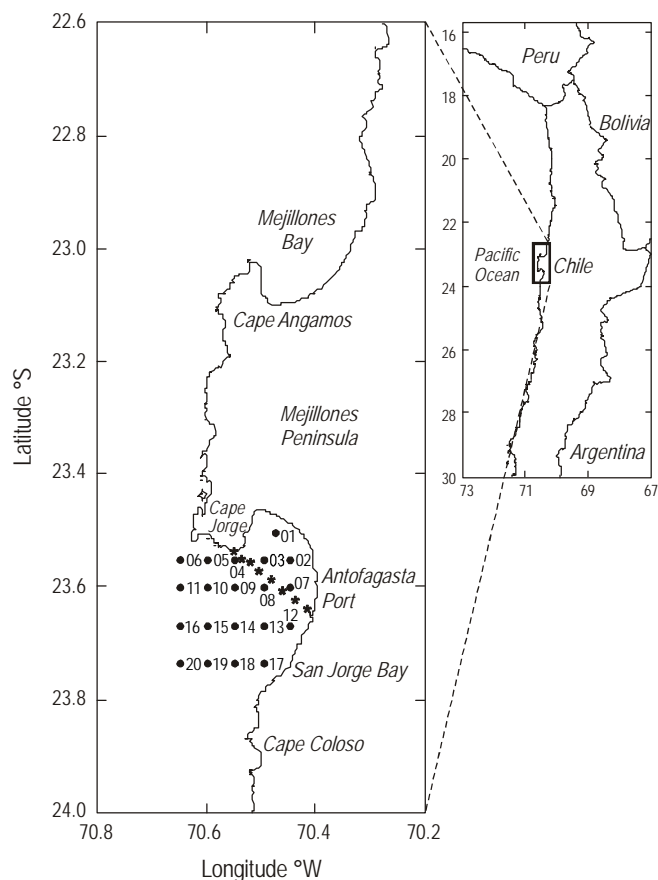
Se obtuvieron perfiles de parámetros físico-químicos con un CTD Seabird SBE 19 plus en 20 estaciones localizadas dentro de BSJ (fig. 1). En este trabajo sólo se analizó la distribución de la clorofila *a* medida con fluorómetro *in situ*. Se realizó un muestreo el 20 de enero y otro el 6 de abril de 2011, y se obtuvieron 20 y 18 perfiles, respectivamente. Los perfiles del 20 de enero corresponden a un intervalo de profundidad de 37 a 102 m ( $89.1 \pm 15.93$  m, promedio  $\pm$  desviación estándar), y los del 6 de abril a un intervalo de profundidad de 20 a 97 m ( $81.17 \pm 20.57$  m). El 25 de marzo de 2011 se tomaron otras mediciones de clorofila *a* con el mismo CTD en 8 estaciones a lo largo de un transecto entre el puerto de Antofagasta y punta Jorge en BSJ (fig. 1); estos perfiles se obtuvieron entre 31 y 116 m de profundidad ( $83.125 \pm 33.53$  m). Del total de perfiles de flurometría analizados (enero, marzo y abril), se seleccionaron aquellos que presentaron preferentemente un máximo subsuperficial o, en última instancia, superficial para ajustar el algoritmo gaussiano. Se supuso que los 34 perfiles seleccionados representaban las condiciones del verano austral. La profundidad para este conjunto de perfiles varió entre 20 y 116 m ( $86.88 \pm 22.97$  m).

El CTD que se utilizó tenía un sensor de flurometría Wet Labs WETStar. La concentración de clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) se obtuvo a partir de un algoritmo matemático que permite transformar el voltaje a concentración de clorofila *a*:

$$\text{Clorofila } a = (V_{\text{salida}} - V_{\text{blanco}}) \times \text{FS} \quad (1)$$

donde  $V_{\text{salida}}$  es el voltaje de salida,  $V_{\text{blanco}}$  es el voltaje del blanco y FS es el factor de escala. El voltaje del blanco fue de 0.057 V y el factor de escala fue de  $28.300 \text{ mg m}^{-3} \text{ V}^{-1}$ , de acuerdo con la calibración realizada en fábrica el 27 de abril de 2010. Esto aplica para todos los perfiles de flurometría obtenidos en este estudio.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para medir la relación entre los datos bio-oceanográficos *in situ*



**Figure 1.** Map of the study area showing the location of the stations where CTD measurements were taken on 20 January and 6 April 2011 and of the eight-station transect (\*) sampled on 25 March 2011.

**Figura 1.** Mapa del área de estudio que muestra la ubicación de las estaciones muestreadas con el CTD el 20 de enero y 6 de abril de 2011 y del transecto de 8 estaciones (\*) muestreado el 25 de marzo de 2011.

Aqua satellite were used (available at <http://ocean-color.gsfc.nasa.gov/>). MODIS measures the radiation emitted from the sea surface in 36 spectral bands ranging in wavelength from 0.4 to 14.4  $\mu\text{m}$ . The images correspond to the chlorophyll *a* estimate obtained with the OC3 algorithm proposed by O'Reilly *et al.* (2000). This algorithm incorporated the radiation emitted by seawater at three wavelengths: 443, 488, and 551 nm, corresponding to spectral bands 9, 10, and 12, respectively. Aqua travels from south to north over the Equator during daylight hours; hence, the images analyzed here were taken between 18:00 and 19:00 hours UTM, that is, between 15:00 and 16:00 local time. Level-2 chlorophyll *a* data (i.e., resolution of 1 km and atmospherically corrected) were used. The images were processed with SeaDAS v6.0 (<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>). For this, we selected an area representative of the bay (23.4–24° S, 71.0–70.2° W).

(i.e., entre temperatura superficial y concentración de clorofila superficial y entre clorofila superficial y la concentración del máximo de clorofila subsuperficial). Se hizo una previa verificación de la normalidad con un nivel de significación del 95%, a partir de la base de datos ampliada (34 perfiles).

### Imágenes en color

Se utilizaron imágenes en color obtenidas del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montado en el satélite Aqua de la NASA (disponibles en <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Este sensor mide la radiancia emitida desde la superficie del océano en 36 bandas espectrales con longitudes de onda de entre 0.4 y 14.4  $\mu\text{m}$ . Las imágenes corresponden a la estimación de clorofila *a* obtenida con el algoritmo OC3 propuesto por O'Reilly *et al.* (2000). En este algoritmo se utilizó la radiancia emitida por el agua de mar en tres longitudes de onda: 443, 488 y 551 nm, correspondientes a las bandas 9, 10 y 12, respectivamente. Aqua transita de sur a norte por la zona del Ecuador durante las horas de luz; por lo tanto, las imágenes aquí analizadas se tomaron entre las 18:00 y 19:00 horas UTM, es decir, entre 15:00 y 16:00 hora local. Se utilizaron datos de clorofila *a* estimados del nivel 2, los cuales tienen una resolución de 1 km e incluyen las correcciones atmosféricas correspondientes. Las imágenes utilizadas se procesaron con el programa SeaDAS v6.0 (<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>). Para ello, se seleccionó un área representativa de la bahía (23.4–24° S, 71.0–70.2° W).

Para estimar la biomasa fitoplanctónica distribuida en la columna de agua a partir de imágenes satelitales de clorofila *a*, se seleccionaron los perfiles de fluimetría *in situ* que presentaron preferentemente un máximo subsuperficial. A cada perfil se le ajustó un algoritmo gaussiano que describe la distribución de la clorofila en la columna de agua de acuerdo con la metodología propuesta por Platt *et al.* (1988) y Ulloa *et al.* (1995), y utilizada por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2008) en el golfo de México, según la siguiente ecuación:

$$Chl_z = Chl_o + \left[ \frac{h}{\sigma(2\pi)^{0.5}} \right] e^{-\left[ \frac{(Z-Z_m)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (2)$$

donde  $Chl_z$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) es la distribución de la clorofila *a* en la columna de agua,  $Chl_o$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) es un valor de clorofila *a* base o constante,  $h$  es la concentración de clorofila *a* integrada bajo la curva gaussiana ( $\text{mg m}^{-2}$ ) por arriba de  $Chl_o$ ,  $\sigma$  (m) controla el grosor de la capa de la profundidad del máximo de clorofila,  $Z$  (m) es la variable de profundidad y  $Z_m$  (m) es la profundidad donde se ubica la máxima concentración subsuperficial de clorofila *a* (MCSC).

A partir del total de las curvas gaussianas ajustadas, se obtuvo un modelo gaussiano promedio representativo de

To estimate phytoplankton biomass distributed in the water column using chlorophyll *a* imagery, we selected the *in situ* fluorometry profiles that preferably presented a subsurface maximum. Each profile was fitted with a Gaussian algorithm describing the distribution of chlorophyll in the water column according to the method proposed by Platt *et al.* (1988) and Ulloa *et al.* (1995), and used by Hidalgo-González and Álvarez-Borrego (2008) in the Gulf of Mexico, as follows:

$$Chl_z = Chl_o + \left[ \frac{h}{\sigma(2\pi)^{0.5}} \right] e^{-\left[ \frac{(Z-Z_m)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (2)$$

where  $Chl_z$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) is the distribution of chlorophyll *a* in the water column,  $Chl_o$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) is the background chlorophyll *a* value,  $h$  is the concentration of integrated chlorophyll *a* below the Gaussian curve ( $\text{mg m}^{-2}$ ) above  $Chl_o$ ,  $\sigma$  (m) controls the thickness of the depth of the chlorophyll maximum layer,  $Z$  (m) is the depth variable, and  $Z_m$  (m) is the depth of the subsurface chlorophyll *a* maximum (SCM).

Based on all the fitted Gaussian curves, a mean Gaussian model representative of all the profiles was obtained by calculating the mean values of all the Gaussian parameters defined in equation 2 ( $Chl_o$ ,  $Z_m$ ,  $\sigma$ ,  $h$ ). Finally, from the surface chlorophyll data derived from satellite imagery ( $Chl_{sat}$ ) taken on the day the *in situ* measurements were carried out, the depth of the SCM was calculated according to equation 3 and considering the values of the representative Gaussian parameters:

$$Z_m = \sigma \sqrt{2 \ln \left( \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi} (Chl_{sat} - Chl_o)} \right)} \quad (3)$$

Thus, equation 3 gives several values of  $Z_m$  depending on the chlorophyll value obtained from the different satellite images. The distribution of phytoplankton biomass in the water column can be estimated by applying the estimated  $Z_m$  values to equation 2, as well as the mean values of the Gaussian parameters estimated for the study area. All the hydrographic variables measured at all stations were smoothed considering a moving average of 5 m in vertical distribution; however, to verify the result, the 20 January 2011 data were also processed without smoothing.

The Gaussian parameters obtained from the mean fitted curve were used to estimate the depth of the chlorophyll *a* maximum using surface chlorophyll data obtained from 14 satellite images taken on different dates in January 2011. We determined the percentage of validity of the Gaussian model for the chlorophyll *a* range of each image in the study area. Both the daily temporal and spatial variability of phytoplankton biomass was analyzed in SJB.

todos los perfiles calculando los valores promedio de todos los parámetros gaussianos definidos en la ecuación 2 ( $Chl_o$ ,  $Z_m$ ,  $\sigma$ ,  $h$ ). Finalmente, con los datos de clorofila superficial extraídos de la imagen satelital ( $Chl_{sat}$ ) del día en el cual se realizaron las mediciones *in situ*, se calculó el valor de la profundidad de MCSC de acuerdo con la ecuación 3 y considerando los valores de los parámetros gaussianos representativos:

$$Z_m = \sigma \sqrt{2 \ln \left( \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi} (Chl_{sat} - Chl_o)} \right)} \quad (3)$$

Por lo tanto, con la ecuación 3 se obtienen varios valores de  $Z_m$  según el valor de clorofila observado en las distintas imágenes satelitales. La distribución de la biomasa fitoplanctónica en la columna de agua se puede estimar aplicando los valores estimados de  $Z_m$  a la ecuación 2, además de los valores de los parámetros gaussianos promedio representativos del área de estudio. Todas las variables hidrográficas medidas en todas las estaciones fueron suavizadas considerando un promedio móvil de 5 m en su distribución vertical; sin embargo, para la base de datos del 20 de enero de 2011, también se trabajó sin aplicar un promedio móvil para verificar el resultado sin aplicar un suavizado.

Los parámetros gaussianos obtenidos de la curva ajustada promedio fueron utilizados para estimar la profundidad del máximo de clorofila *a* a partir de datos de clorofila superficial obtenidos de las 14 imágenes satelitales de distintas fechas de enero de 2011. Se calculó el porcentaje de validez del modelo gaussiano para el intervalo de clorofila *a* de cada imagen en el área de estudio. Se analizó la variabilidad tanto temporal diaria como espacial de la biomasa fitoplanctónica en la BSJ.

## RESULTADOS

Los datos de clorofila *a in situ* del 20 de enero de 2011 sin la aplicación del promedio móvil mostraron que las concentraciones variaron entre 0.62 y 15.32  $\text{mg m}^{-3}$  ( $4.78 \pm 4.18 \text{ mg m}^{-3}$ ) en la superficie, y entre 2.48 y 33.88  $\text{mg m}^{-3}$  ( $15.12 \pm 8.86 \text{ mg m}^{-3}$ ) a 1 m de profundidad. Los perfiles presentaron una distribución tipo gaussiana, y la MCSC varió entre 21.04 y 142.32  $\text{mg m}^{-3}$ ; estos valores se registraron a 11 m de profundidad en las estaciones 7 y 11, respectivamente (fig. 1), pero las otras MCSC se encontraron entre 4 y 13 m de profundidad. Por debajo de los 50 m, las concentraciones de clorofila *a* fueron menores que 1  $\text{mg m}^{-3}$ , excepto en las estaciones 2 y 4 (fig. 1), que presentaron concentraciones superiores a 1.5  $\text{mg m}^{-3}$  pero inferiores a 2  $\text{mg m}^{-3}$ .

Con la aplicación de un promedio móvil de 5 m de extensión, las concentraciones de clorofila *a* variaron entre 2.87 (estación 20) y 50.62  $\text{mg m}^{-3}$  (estación 8) ( $27.21 \pm 13.80 \text{ mg m}^{-3}$ ) a 1 m de profundidad, y entre 2.59 y 62.67  $\text{mg m}^{-3}$  ( $34.54 \pm 17.45 \text{ mg m}^{-3}$ ) a 2 m de profundidad. La MCSC

## RESULTS

The unsmoothed *in situ* chlorophyll *a* data for 20 January 2011 showed that concentrations ranged from 0.62 to 15.32 mg m<sup>-3</sup> ( $4.78 \pm 4.18$  mg m<sup>-3</sup>) at the surface, and from 2.48 to 33.88 mg m<sup>-3</sup> ( $15.12 \pm 8.86$  mg m<sup>-3</sup>) at 1 m depth. The profiles presented a Gaussian-type distribution, with SCM between 21.04 and 142.32 mg m<sup>-3</sup>; these values were recorded at 11 m depth at stations 7 and 11, respectively (fig. 1), but the other SCM were recorded between 4 and 13 m depth. Below 50 m, chlorophyll *a* concentrations were less than 1 mg m<sup>-3</sup>, except at stations 2 and 4 (fig. 1), where they were higher than 1.5 mg m<sup>-3</sup> but less than 2 mg m<sup>-3</sup>.

After applying a 5-m moving average, chlorophyll *a* concentrations ranged from 2.87 (station 20) to 50.62 mg m<sup>-3</sup> (station 8) ( $27.21 \pm 13.80$  mg m<sup>-3</sup>) at 1 m depth, and from 2.59 to 62.67 mg m<sup>-3</sup> ( $34.54 \pm 17.45$  mg m<sup>-3</sup>) at 2 m depth. The SCM ranged from 14.03 to 125.78 mg m<sup>-3</sup>; these values were recorded at 11 and 6 m at stations 20 and 9, respectively. The SCM for the total of stations occurred between 2 and 11 m depth. Below 45 m, chlorophyll *a* concentrations were less than 1 mg m<sup>-3</sup>, except at stations 2 and 4 where they were close to 2 mg m<sup>-3</sup>. The minimum value of this data set was 0.28 mg m<sup>-3</sup>.

With the combined data set (34 profiles), an inverse correlation was observed between temperature and chlorophyll *a* concentration, both measured at 1 m depth ( $r = -0.435$ ;  $P = 0.010$ ), whereas a positive, but less significant ( $r = 0.302$ ;  $P = 0.083$ ), correlation was observed between chlorophyll *a* (at 1 m depth) and SCM.

Table 1 shows the mean Gaussian parameters from the combined data set (34 profiles) and from the 20 January 2011 data set (20 profiles, with and without applying the moving average). The  $Z_m$  values were used to determine the range of satellite-derived chlorophyll concentration needed for the estimated  $Z_m$  values to be real numbers, which can vary from 1.55 to 47.8 mg m<sup>-3</sup>. This means that the depth of the SCM may vary between 18.38 and 0.19 m, respectively. When the mean Gaussian parameters from only the 20 January 2011 data set (20 profiles) were used, the satellite chlorophyll data ranged from 1.17 to 51.8 mg m<sup>-3</sup> and the SCM was located at 19.20 m and 0.25 m depth, respectively. Note that the lowest chlorophyll *a* concentration occurred at a greater depth (19.20 m) than in the previous case (18.38 m). Table 2 shows the  $Z_m$  values for different surface chlorophyll concentrations, both for the combined data set and for the 20 January 2011 data set (with and without the moving average). An inverse relation was observed between both variables; that is, as surface chlorophyll concentration increased, the depth of the SCM became shallower.

As an example, figure 2 shows the smoothed chlorophyll *a* profiles from 20 January 2011 for stations 3 (98 m depth) and 4 (72 m depth), the adjusted Gaussian model for each profile, and the mean adjusted Gaussian model for the 20-profile data set. The *in situ* profile and the adjusted

vario entre 14.03 y 125.78 mg m<sup>-3</sup>; estos dos valores se registraron a los 11 y 6 m de profundidad en las estaciones 20 y 9, respectivamente. La MCSC para la totalidad de las estaciones se ubicó entre 2 y 11 m de profundidad. Por debajo de los 45 m de profundidad, las concentraciones de clorofila *a* fueron inferiores a 1 mg m<sup>-3</sup>, excepto en las estaciones 2 y 4 en donde se mantuvieron cercanas a 2 mg m<sup>-3</sup>. La concentración mínima de clorofila *a* para este conjunto de datos fue de 0.28 mg m<sup>-3</sup>.

Con la base de datos ampliada (34 perfiles), se observó una correlación inversa entre la temperatura y la concentración de clorofila *a*, ambas medidas a 1 m de profundidad ( $r = -0.435$ ;  $P = 0.010$ ), mientras que la correlación entre la clorofila *a* (a 1 m de profundidad) y la MCSC fue positiva, aunque de menor significancia ( $r = 0.302$ ;  $P = 0.083$ ).

La tabla 1 muestra los parámetros gaussianos promedio de la base de datos ampliada (34 perfiles) y de la base de datos del 20 de enero de 2011 (20 perfiles, con y sin aplicación del promedio móvil). Con la estimación de  $Z_m$ , se determinó el intervalo de la concentración de clorofila estimada de datos satelitales necesario para que los valores del  $Z_m$  estimados sean números reales, los cuales pueden variar entre 1.55 y 47.8 mg m<sup>-3</sup>. Esto implica que la profundidad de MCSC podrá variar entre 18.38 y 0.19 m, respectivamente. Sin embargo, al considerar los parámetros gaussianos promedio sólo para la base de datos del 20 de enero de 2011 (20 perfiles), las concentraciones de clorofila estimadas de datos satelitales variaron entre 1.17 y 51.8 mg m<sup>-3</sup> y, en consecuencia, la profundidad de MCSC se ubicó a 19.20 m y 0.25 m, respectivamente. Cabe destacar que el valor de concentración mínima de clorofila *a* se ubicó a mayor profundidad (19.20 m) que en el caso anterior (18.38 m). La tabla 2 muestra los valores de la  $Z_m$  estimada para distintas concentraciones de clorofila superficial, tanto para la base de datos ampliada como para la base de datos del 20 de enero de 2011 (con y sin el promedio móvil). Se observó una relación inversa entre ambas variables; es decir, que a medida que la concentración de la clorofila superficial se incrementó, la profundidad del máximo de concentración de clorofila fue más somera.

A modo de ejemplo, en la figura 2 se muestra el perfil de clorofila *a* del 20 de enero de 2011 para las estaciones 3 (98 m de profundidad) y 4 (72 m de profundidad) con aplicación de un promedio móvil de 5 m de extensión, el modelo gaussiano ajustado para cada perfil y el modelo gaussiano ajustado promedio de la base de datos de 20 perfiles. El perfil *in situ* y el modelo gaussiano ajustado mostraron que el máximo de clorofila se ubicó a los 9 y 6 m de profundidad en las estaciones 3 y 4, respectivamente. Las concentraciones máximas a estas profundidades fueron 52.31 y 75.23 mg m<sup>-3</sup>, mientras que cerca de la superficie se registraron valores de 13.45 y 46.8 mg m<sup>-3</sup> en las estaciones 3 y 4, respectivamente.

La figura 3 muestra el modelo gaussiano ajustado promedio, obtenido de las curvas ajustadas a cada uno de los perfiles de clorofila *a* considerados para la base de datos del 20 de

**Table 1.** Gaussian parameters (mean  $\pm$  standard deviation) obtained from the adjustments applied to the combined data set of 34 fluorometric profiles and to the data set of 20 fluorometric profiles from 20 January 2011 (with and without a moving average of 5-m extension).  $N$ , number of profiles;  $Chl_o$ , background chlorophyll  $a$  value;  $Z_m$ , depth of the subsurface chlorophyll maximum;  $\sigma$ , thickness of the depth of the chlorophyll maximum layer (m);  $h$ , concentration of integrated chlorophyll  $a$  above  $Chl_o$ .

**Tabla 1.** Parámetros gaussianos (promedio  $\pm$  desviación estándar) obtenidos de los ajustes realizados a la base de datos ampliada de 34 perfiles de flurometría y a la base de datos de 20 perfiles del 20 de enero de 2011 (con y sin el promedio móvil de 5 m de extensión).  $N$ , número de perfiles;  $Chl_o$ , valor de clorofila  $a$  base o constante;  $Z_m$ , profundidad donde se ubica el máximo de concentración subsuperficial de clorofila;  $\sigma$ , grosor de la capa de la profundidad del máximo de clorofila (m);  $h$ , concentración de clorofila  $a$  integrada bajo la curva.

Variable	Combined data set (with a 5-m moving average)	20 January 2011 data set (with a 5-m moving average)	20 January 2011 data set (without a moving average)
$N$	34	20	20
$Chl_o$ (mg m <sup>-3</sup> )	1.52 $\pm$ 0.68	1.16 $\pm$ 0.53	0.67 $\pm$ 0.43
$Z_m$ (m)	5.48 $\pm$ 3.04	5.90 $\pm$ 2.38	8.30 $\pm$ 3.04
$\sigma$ (m)	4.82 $\pm$ 2.17	4.65 $\pm$ 1.99	4.35 $\pm$ 2.61
$h$ (mg m <sup>-2</sup> )	560.00 $\pm$ 263.95	591.15 $\pm$ 283.87	678.00 $\pm$ 416.40

**Table 2.** Estimated values of the depth of the subsurface chlorophyll maximum ( $Z_m$ ) as a function of different satellite-derived chlorophyll concentrations ( $Chl_{sat}$ ) for the combined data set of 34 fluorometric profiles and for the data set of 20 profiles from 20 January 2011 (with and without a 5-m moving average [MA]).

**Tabla 2.** Valores estimados de la profundidad de la máxima concentración subsuperficial de clorofila ( $Z_m$ ) en función de distintas concentraciones de clorofila estimadas de datos satelitales ( $Chl_{sat}$ ) para la base de datos ampliada de 34 perfiles de flurometría y para la base de datos de los 20 perfiles del 20 de enero de 2011 (con y sin el promedio móvil [MA] de 5 m de extensión).

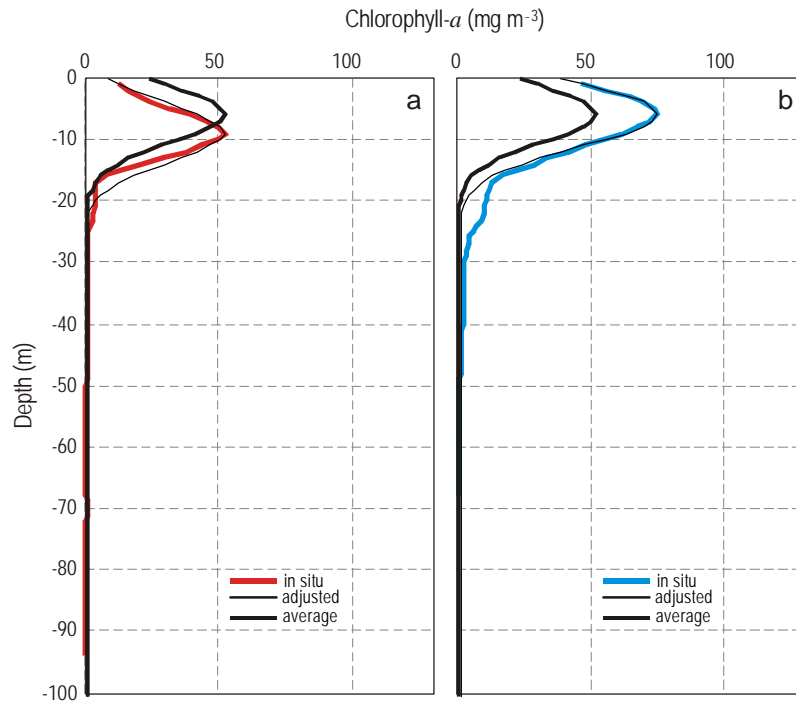
$Chl_{sat}$ (mg m <sup>-3</sup> )	$Z_m$ (m)	$Chl_{sat}$ (mg m <sup>-3</sup> )	$Z_m$ (m)	$Chl_{sat}$ (mg m <sup>-3</sup> )	$Z_m$ (m)
Combined data set (with MA)	Combined data set (with MA)	20 January 2011 (with MA)	20 January 2011 (with MA)	20 January 2011 (without MA)	20 January 2011 (without MA)
1.55	18.38	1.17	19.20	0.70	17.00
5.00	10.97	5.00	10.56	5.00	10.04
10.00	8.88	10.00	8.69	10.00	8.47
30.00	4.75	30.00	4.94	15.00	5.33
45.00	1.71	45.00	2.51	45.00	3.58
47.80	0.19	51.80	0.25	62.80	0.17

Gaussian model show that the chlorophyll maximum occurred at 9 and 6 m depth at stations 3 and 4, respectively. The maximum concentrations at these depths were 52.31 and 75.23 mg m<sup>-3</sup>, whereas the near-surface values were 13.45 and 46.8 mg m<sup>-3</sup> at stations 3 and 4, respectively.

Figure 3 shows the mean adjusted Gaussian model, obtained from the curves fitted to each smoothed chlorophyll  $a$  profile considered for the 20 January 2011 data set (table 1), and the Gaussian model estimated for different satellite-derived surface chlorophyll concentrations. As the chlorophyll concentration increased, the SCM occurred at a shallower depth. The shape of the Gaussian curve did not change; only a vertical displacement of the chlorophyll maximum was observed. The mean Gaussian model fit obtained for the January data set was applicable to a broader range of satellite-derived chlorophyll concentrations when using the adjusted Gaussian model without the moving average: chlorophyll concentrations ranged from 0.7 to 62.8 mg m<sup>-3</sup>, but

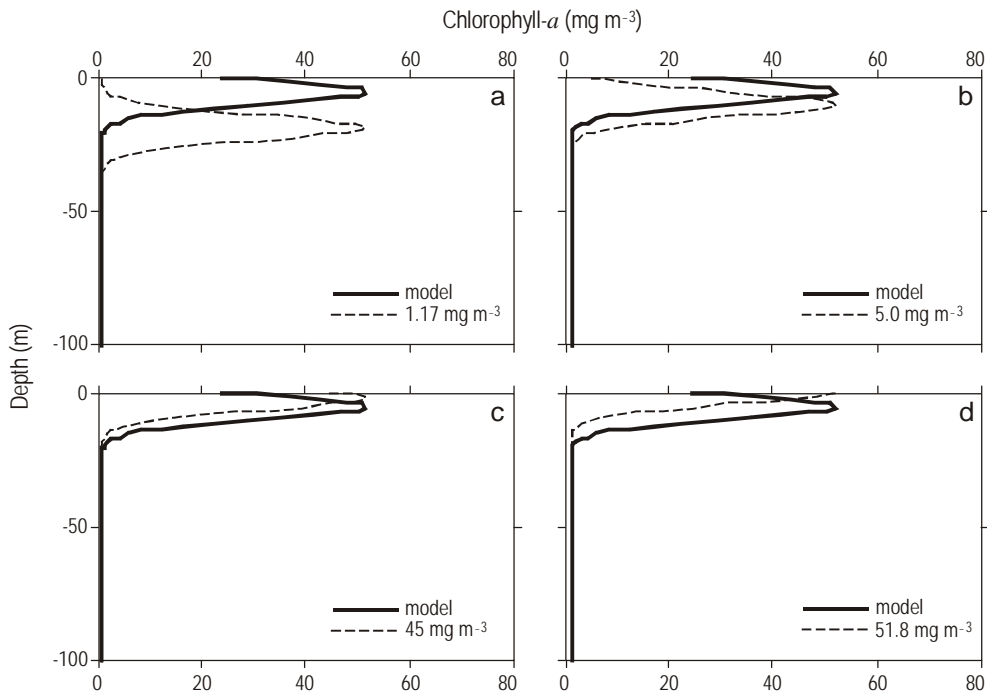
enero de 2011 con el promedio móvil (tabla 1), y el modelo gaussiano estimado para distintas concentraciones de clorofila superficial obtenidas a partir de los datos de la imagen satelital. A medida que la concentración de clorofila (valor superficial satelital) se incrementó, la profundidad de MCSC fue más somera. La forma de la curva gaussiana se conservó, registrándose sólo un desplazamiento vertical del máximo de clorofila. El ajuste del modelo promedio gaussiano obtenido para la base de datos de enero de 2011 fue aplicable para un intervalo más extenso de concentraciones de clorofila estimadas de datos satelitales al considerar el modelo gaussiano ajustado sin el promedio móvil; la clorofila varió entre 0.7 y 62.8 mg m<sup>-3</sup>, pero con un intervalo de extensión vertical más estrecho (entre 17.0 y 0.17 m, respectivamente).

La figura 4 muestra la imagen MODIS-Aqua de clorofila  $a$  del 20 de enero de 2011 para BSJ. La concentración máxima y mínima para el área específica (23.4–24° S, 70.7–70.2° W) fue de 201.29 y 0.65 mg m<sup>-3</sup>, respectivamente;



**Figure 2.** Chlorophyll *a* profiles from 20 January 2011 for (a) station 3 and (b) station 4 (location shown in fig. 1), the adjusted Gaussian model for each profile, and the mean adjusted Gaussian model for the 20-station data set.

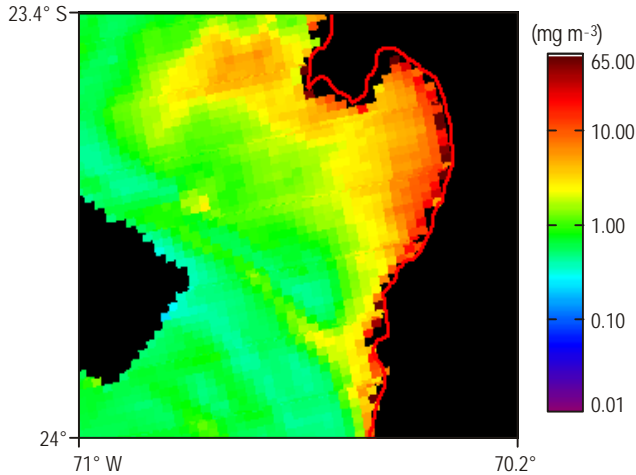
**Figura 2.** Perfil de clorofila *a* del 20 de enero de 2011 para (a) la estación 3 y (b) la estación 4 (ver fig. 1 para la localización), el modelo gaussiano ajustado para cada perfil y el modelo gaussiano ajustado promedio para la base de datos de las 20 estaciones.



**Figure 3.** Chlorophyll *a* profiles of the adjusted mean Gaussian model obtained based on data from 20 stations sampled on 20 January 2011 and the Gaussian model estimated from different surface chlorophyll values, representative of the concentrations that could be obtained from the chlorophyll *a* satellite image for January 2011.

**Figura 3.** Perfiles de clorofila *a* según el modelo gaussiano ajustado promedio obtenido con base en los datos de las 20 estaciones muestreadas el 20 de enero de 2011 y el modelo gaussiano estimado a partir de distintos valores de clorofila superficial, representativos de las concentraciones que se podrían obtener de la imagen satelital de clorofila *a* para enero de 2011.





**Figure 4.** MODIS-Aqua chlorophyll *a* imagery from 20 January 2011 for San Jorge Bay.

**Figura 4.** Imágen MODIS-Aqua de clorofila *a* del 20 de enero de 2011 para la bahía San Jorge.

with a narrower vertical extension range (17.0 to 0.17 m, respectively).

Figure 4 shows the MODIS-Aqua chlorophyll *a* imagery from 20 January 2011 for SJB. The maximum and minimum chlorophyll *a* concentrations for the specific area (23.4–24° S, 70.7–70.2° W) were 201.29 and 0.65 mg m<sup>-3</sup>, respectively; however, note that 95.83% of the concentrations were between 0.50 and 20.0 mg m<sup>-3</sup>, and only 0.47% were higher than 100 mg m<sup>-3</sup>. The mean value was 7.02 mg m<sup>-3</sup>, the mode was 0.78 mg m<sup>-3</sup>, and the arithmetic mean was 4.47 mg m<sup>-3</sup>, indicating a positively skewed distribution of chlorophyll *a* concentration. According to Secchi disk readings, the estimated thickness of the photic zone was 4.95 ± 1.99 m, and the thickness of the first optical depth was approximately 1.1 m. The mean adjusted model was valid for a chlorophyll *a* range of 1.17 to 51.8 mg m<sup>-3</sup>, and the chlorophyll concentrations falling within this range represented 80.26% of all the chlorophyll *a* data for the study area. When we considered only the data close to the position of each of the 20 hydrographic stations (within a radius of 0.02°, approximately 2.22 km) and analyzed the mean maximum (19.05 ± 17.84 mg m<sup>-3</sup>) and minimum (1.37 ± 0.18 mg m<sup>-3</sup>) values of the 20 stations, all fell within the range for which the Gaussian model was valid. When the analysis was expanded to 14 satellite images from January 2011, 8 presented mean chlorophyll values around the 20 hydrographic positions (radius of 0.02°) within the validity range of the Gaussian model estimated for 20 January 2011 with the moving average, 2 images (21 and 22 January 2011) showed 18 hydrographic positions within the validity range, and 4 showed 17 or 19 stations below this range. Stations 12 and 17 had the highest chlorophyll *a* values, and stations 16 and 20 the lowest.

sin embargo, se destaca que el 95.83% de las concentraciones de clorofila *a* variaron entre 0.50 y 20.0 mg m<sup>-3</sup>, y sólo el 0.47% de las concentraciones fueron superiores a 100 mg m<sup>-3</sup>. El valor medio fue de 7.02 mg m<sup>-3</sup>, la moda de 0.78 mg m<sup>-3</sup> y la media aritmética de 4.47 mg m<sup>-3</sup>, lo cual indica una distribución tipo asimétrica positiva de la concentración de clorofila *a*. Según las lecturas con disco de Secchi, el grosor estimado de la capa fótica fue de 4.95 ± 1.99 m, y el espesor de la primera profundidad óptica fue de aproximadamente 1.1 m. Por otra parte, los datos de clorofila *a* satelitales que se ubicaron en el intervalo de clorofila para el cual el modelo ajustado promedio fue válido (1.17–51.8 mg m<sup>-3</sup>) representaron un 80.26% del total de datos de clorofila *a* extraídos del área de estudio. Al considerar sólo los datos cercanos a la posición de cada una de las 20 estaciones hidrográficas, en un radio de 0.02° (aproximadamente 2.22 km), y al analizar el valor promedio máximo (19.05 ± 17.84 mg m<sup>-3</sup>) y mínimo (1.37 ± 0.18 mg m<sup>-3</sup>) en torno a cada una de las 20 estaciones, se observó que todos se encontraron dentro del intervalo para el cual el modelo gaussiano encontrado fue válido. Al considerar este mismo procedimiento para las 14 imágenes satelitales, 8 imágenes presentaron valores promedio de clorofila alrededor de las 20 posiciones hidrográficas (radio de 0.02°) comprendidos en el intervalo de validez del modelo gaussiano estimado con base en los datos del 20 de enero de 2011 con el promedio móvil; 2 imágenes (21 y 22 de enero de 2011) presentaron 18 posiciones hidrográficas comprendidas en dicho intervalo de validez; y 4 imágenes presentaron 17 ó 19 estaciones bajo ese intervalo. Las estaciones 12 y 17 presentaron los valores máximos de clorofila *a*, mientras que las estaciones 16 y 20 presentaron los valores mínimos.

La tabla 3 muestra el valor modal de clorofila para las 14 imágenes satelitales encontradas en enero de 2011 y el porcentaje de datos satelitales de clorofila que se encontraron dentro del intervalo de validez del modelo gaussiano promedio ajustado (1.17–51.8 mg m<sup>-3</sup>) para el área de estudio. Este porcentaje fluctuó entre 54.54% y 99.3% (84.40 ± 12.48%), lo cual demuestra que el modelo gaussiano puede ser aplicado para un gran porcentaje de datos extraídos de cada una de las imágenes analizadas. Según el modelo gaussiano promedio ajustado sin el promedio móvil, el porcentaje de validez incrementó a 93.72% (±8.89%).

Con los parámetros gaussianos del modelo promedio ajustado con base en los perfiles de fluimetría del 20 de enero de 2011, y los valores satelitales de clorofila superficial para tres estaciones hidrográficas representativas de tres áreas características de BSJ, se obtuvo la variabilidad diaria de la clorofila *a* y la profundidad de MCSC para enero de 2011. Se observó una relación inversa entre estas variables en las estaciones 12, 14 y 19. En la estación 12, se observaron las concentraciones máximas de clorofila *a*, entre 3.58 a 17.36 mg m<sup>-3</sup>, y fluctuaciones en la profundidad de MCSC de entre 7.0 y 11.5 m, mientras que en la estación 19, se observaron las concentraciones mínimas, entre 0.81 y 7.68 mg m<sup>-3</sup>,

Table 3 shows the chlorophyll modal value for 14 satellite images from January 2011 and the percentage of chlorophyll data that fell within the range of validity of the mean adjusted Gaussian model (1.17–51.8 mg m<sup>-3</sup>) for the study area. This percentage ranged from 54.54% to 99.3% (84.40 ± 12.48%), indicating that the Gaussian model can be applied to a large percentage of data extracted from each of the analyzed images. For the mean adjusted Gaussian model without applying the moving average, the percentage of validity increased to 93.72% (± 8.89%).

Considering the Gaussian parameters of the mean adjusted model based on fluorometry profiles taken on 20 January 2011, as well as the satellite-derived surface chlorophyll data for three hydrographic stations representative of three characteristic areas of SJB, the daily variability of chlorophyll *a* and of the depth of SCM was determined for January 2011. These variables showed an inverse relationship at stations 12, 14, and 19. At station 12, the chlorophyll *a* concentrations were highest, ranging from 3.58 to 17.36 mg m<sup>-3</sup>, and the SCM fluctuated between 7.0 and 11.5 m depth, whereas at station 19, the chlorophyll *a* concentrations were lowest, ranging from 0.81 to 7.68 mg m<sup>-3</sup> and the SCM fluctuated between 10 and 20 m depth, approximately. At station 14, chlorophyll *a* ranged from 2.55 to 12.0 mg m<sup>-3</sup> and the SCM fluctuated between 8.17 and 12.47 m depth.

y fluctuaciones de MCSC de entre 10 y 20 m, aproximadamente. En la estación 14, la clorofila *a* varió de 2.55 a 12.0 mg m<sup>-3</sup> y la profundidad de MCSC varió entre 8.17 y 12.47 m.

### DISCUSIÓN

En BSJ, la clorofila *a* medida *in situ*, aplicando un promedio móvil de 5 m de extensión, muestra la típica distribución vertical gaussiana (Steele y Yentsch 1960, Cullen 1982) con una MCSC altamente variable, entre 14.04 y 125.78 mg m<sup>-3</sup>, destacando una relación inversa entre la temperatura y la clorofila superficial, y una relación directa entre la clorofila superficial y MCSC. La relación inversa entre las dos primeras variables se debe principalmente a que las aguas de surgencia son de menor temperatura con respecto a las del entorno y, por lo tanto, al poseer una mayor concentración de nutrientes (dado su origen subsuperficial), posibilitan la existencia de concentraciones de clorofila *a* más elevadas (Mann y Lazier 1991). La relación directa entre las concentraciones de la clorofila superficial y la MCSC obedece a la distribución gaussiana de la clorofila en la columna de agua observada en primavera y verano. Esta distribución también puede representarse a través de un ajuste lineal representativo de la fase creciente de la distribución de la clorofila con la profundidad hasta la ubicación de la MCSC; es decir, a través de

**Table 3.** Mode, maximum, and minimum concentration of chlorophyll *a*, percentage of validation of the Gaussian model, number of valid observations, and total number of observations for the study area (23.4–24° S, 70.2–70.7° W), extracted from MODIS-Aqua images from January 2011.

**Tabla 3.** Moda, máximo y mínimo de concentración de clorofila *a*, porcentaje de validez según el modelo gaussiano, número de observaciones válidas, y número total de observaciones para el área de estudio considerada (23.4–24° S, 70.2–70.7° W), extraídos de imágenes MODIS-Aqua de enero de 2011.

Image number	Image date (d/m/yr)	Mode (mg m <sup>-3</sup> )	Chl <sub>max</sub> (mg m <sup>-3</sup> )	Chl <sub>min</sub> (mg m <sup>-3</sup> )	% Valid data (Chl <sub>a</sub> = 1.17–51.8 mg m <sup>-3</sup> )		Total number of observations	% Data (Chl <sub>a</sub> = 0.5–20 mg m <sup>-3</sup> )	
					Number of valid data	% Data (Chl <sub>a</sub> > 100 mg m <sup>-3</sup> )			
1	02/01/2011	0.88	188.82	0.71	82.53	411	498	94.17	1.20
2	04/01/2011	0.99	434.31	0.75	87.05	746	857	90.08	0.93
3	05/01/2011	0.44	288.18	0.42	86.27	333	386	91.71	1.29
4	09/01/2011	3.49	441.40	0.69	84.32	226	268	86.94	2.61
5	11/01/2011	4.36	330.43	0.90	96.00	624	650	93.53	1.54
6	12/01/2011	2.21	136.87	0.96	96.43	540	560	98.57	0.18
7	13/01/2011	3.90	421.60	1.10	99.30	1610	1069	97.66	0.47
8	15/01/2011	1.80	355.30	0.80	96.60	1316	1363	98.60	0.29
9	19/01/2011	0.90	252.67	0.56	79.73	598	750	94.27	1.33
10	20/01/2011	0.78	201.29	0.65	80.26	675	841	95.83	0.47
11	21/01/2011	0.48	169.95	0.44	64.80	267	412	89.56	0.73
12	22/01/2011	1.00	447.00	0.50	82.70	1029	1245	96.63	0.64
13	27/01/2011	1.71	417.47	0.68	91.14	566	621	92.11	1.61
14	28/01/2011	0.52	386.18	0.38	54.54	282	517	82.59	0.58

## DISCUSSION

In SJB, the *in situ* chlorophyll *a* measured applying a 5-m moving average shows a typical Gaussian vertical distribution (Steele and Yentsch 1960, Cullen 1982) with a highly variable SCM, between 14.04 and 125.78 mg m<sup>-3</sup>, indicating an inverse relationship between temperature and surface chlorophyll concentration, and a direct relationship between surface chlorophyll and SCM. The inverse relationship between the first two variables can be attributed to the upwelling of cooler subsurface waters that are richer in nutrients than the ambient waters and thus promote the occurrence of higher chlorophyll *a* levels (Mann and Lazier 1991). The direct relationship between surface chlorophyll concentration and SCM can be explained by the Gaussian distribution of chlorophyll in the water column in spring and summer. This distribution can also be represented by a linear fit that represents the increasing chlorophyll concentrations with depth until the position of the SCM; that is, using a simple regression between the SCM and surface chlorophyll concentrations (Millán-Núñez *et al.* 1996). Hence, the shallower the SCM, the higher the surface chlorophyll concentration, as observed in this study using an adjusted Gaussian model (fig. 3).

The chlorophyll *a* concentrations reported here are typical of an area of high biological productivity. Other chlorophyll concentrations recorded near our study area vary depending on the sampling time and place. Rodríguez *et al.* (1986) found chlorophyll *a* values ranging from 0.5 to 10.1 mg m<sup>-3</sup> in the 1% light level between September and October 1983 in Mejillones Bay. Rodríguez *et al.* (1991) detected maximum chlorophyll *a* levels of 45 mg m<sup>-3</sup> during a red tide event off the northernmost part of the Mejillones Peninsula. Marín *et al.* (1993) recorded maximum and minimum chlorophyll *a* concentrations of 10 and 2 mg m<sup>-3</sup>, respectively, between September and October 1990 in Mejillones Bay, as well as patches of chlorophyll *a* concentrations higher than 350 mg m<sup>-3</sup> as a result of an algal bloom. Marín and Olivares (1999) found maximum chlorophyll *a* concentrations of 307.6 mg m<sup>-3</sup> at the surface and concentrations of 4 mg m<sup>-3</sup> at 20 m depth. Iriarte and González (2004) recorded values ranging from 10 to 80 mg m<sup>-3</sup> (25.5 mg m<sup>-3</sup> on average) during normal upwelling conditions off Antofagasta. In the present study, SCM varied between 21.04 and 142.32 mg m<sup>-3</sup> when the moving average was not used and between 14.03 and 125.78 mg m<sup>-3</sup> when it was used. Hence, the concentrations recorded by Rodríguez *et al.* (1991), Marín and Olivares (1999), and Iriarte and González (2004) are within the range observed for SCM. Moreover, the mean *in situ* values at 1 m depth (15.12 ± 8.86 mg m<sup>-3</sup>) were representative of an area of high primary productivity.

The chlorophyll *a* concentrations recorded in the present study (>1 mg m<sup>-3</sup>) are typical of areas affected by coastal upwelling (eutrophication). For example, Morales *et al.* (2001) analyzed *in situ* chlorophyll data obtained in 1994 off

una regresión simple entre las concentraciones de clorofila superficial y MCSC (Millán-Núñez *et al.* 1996). Por lo tanto, cuanto más somera la MCSC, mayor será la concentración de la clorofila superficial, tal como se encontró en este estudio a través del modelo gaussiano ajustado estimado (fig. 3).

Las concentraciones de clorofila *a* encontradas en este estudio son típicas de una zona de alta productividad biológica. Existen registros de concentraciones de clorofila *a* cerca de la zona de estudio que varían dependiendo del lugar y el momento de muestreo. Rodríguez *et al.* (1986) encontraron valores de clorofila *a* que variaron entre 0.5 y 10.1 mg m<sup>-3</sup> en el nivel del 1% de penetración de la luz entre septiembre y octubre de 1983 en bahía Mejillones. Rodríguez *et al.* (1991) detectaron máximos de 45 mg m<sup>-3</sup> durante una condición de marea roja frente al extremo norte de la península de Mejillones. Marín *et al.* (1993) observaron concentraciones máximas y mínimas de clorofila *a* de 10 mg m<sup>-3</sup> y de 2 mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, entre septiembre y octubre de 1990 en bahía Mejillones (fig. 1). Estos autores también registraron manchas de concentraciones de clorofila *a* superiores a 350 mg m<sup>-3</sup>, producto de una floración algal. Marín y Olivares (1999) encontraron concentraciones máximas de clorofila *a* de 307.6 mg m<sup>-3</sup> en la superficie y concentraciones de 4 mg m<sup>-3</sup> a 20 m de profundidad. Iriarte y González (2004) registraron valores de 10 a 80 mg m<sup>-3</sup> (25.5 mg m<sup>-3</sup> en promedio) durante condiciones normales de surgencia frente a Antofagasta. En este trabajo, MCSC varió entre 21.04 y 142.32 mg m<sup>-3</sup> utilizando el modelo sin el promedio móvil y entre 14.03 y 125.78 mg m<sup>-3</sup> utilizando el modelo con el promedio móvil. Por lo tanto, las concentraciones observadas por Rodríguez *et al.* (1991), Marín y Olivares (1999) e Iriarte y González (2004) están dentro del intervalo observado para MCSC. Por otra parte, los promedios *in situ* a 1 m de profundidad fueron de 15.12 mg m<sup>-3</sup> (±8.86 mg m<sup>-3</sup>), representativos de una zona de alta productividad primaria.

Las concentraciones de clorofila *a* encontradas en este estudio son típicas de zonas afectadas por surgencias costeras (eutróficas) con concentraciones mayores que 1 mg m<sup>-3</sup>. Por ejemplo, Morales *et al.* (2001) analizaron datos *in situ* recogidos en 1994 frente a las costas del centro-norte de Chile y observaron que las concentraciones más elevadas se localizaron en los primeros 25 m durante verano y otoño; además, observaron un máximo de clorofila en superficie y en el nivel subsuperficial, con valores de entre 16 y 20 mg m<sup>-3</sup> durante febrero y marzo de 1994 y de entre 10 y 15 mg m<sup>-3</sup> durante mayo de 1994. Escalante *et al.* (2013) y Álvarez-Molina *et al.* (2013) analizaron la distribución espaciotemporal de clorofila *a* en el golfo de California a partir de imágenes satelitales MODIS y SeaWiFS. Escalante *et al.* (2013) detectaron condiciones oligotróficas, mesotróficas y eutróficas; las características eutróficas (concentración promedio anual de 1.44 mg m<sup>-3</sup>) fueron observadas en la parte central del golfo de California, donde se ubica una serie de islas y canales. Álvarez-Molina *et al.* (2013), en su estudio focalizado en la parte central del golfo de California, explicaron como los

northern Chile and found that in summer and autumn the highest concentrations occurred in the first 25 m; they also observed a chlorophyll maximum at the surface and in the subsurface layer, with values ranging from 16 to 20 mg m<sup>-3</sup> in February and March 1994 and from 10 to 15 mg m<sup>-3</sup> in May 1994. Escalante *et al.* (2013) and Álvarez-Molina *et al.* (2013) analyzed the spatial and temporal distribution of chlorophyll *a* in the Gulf of California from MODIS and SeaWiFS images. Escalante *et al.* (2013) detected oligotrophic, mesotrophic, and eutrophic conditions; the eutrophic conditions (mean annual chlorophyll *a* concentration of 1.44 mg m<sup>-3</sup>) occurred in the central Gulf of California where a series of islands and basins are located. Álvarez-Molina *et al.* (2013) explained how physical processes such as mixing, stratification, and coastal upwelling are responsible for the spatial and temporal distribution of chlorophyll *a* in the central Gulf of California, with concentrations of up to 9.7 mg m<sup>-3</sup> on the eastern side of the gulf.

The mean adjusted Gaussian model obtained for the combined and the 20 January 2011 data sets indicates a chlorophyll maximum of 50 mg m<sup>-3</sup>, which is typical of coastal upwelling zones. Our chlorophyll *a* concentrations are higher than those obtained by Hidalgo-González and Álvarez-Borrego (2008), whose mean adjusted Gaussian models for different areas of the Gulf of Mexico produced chlorophyll maximum values ranging from 0.32 to 0.93 mg m<sup>-3</sup>, which are representative of both eutrophic and oligotrophic areas of the gulf. Millán-Núñez *et al.* (1996) estimated SCM and its respective depth from surface chlorophyll concentrations measured off the coast of California and obtained highly significant regressions. Simple regression models allow fitting the distribution of chlorophyll *a* between the surface and the SCM depth, whereas Gaussian models allow a better fit of the actual distribution of chlorophyll in the water column and it is possible to estimate chlorophyll *a* concentrations beyond the location of SCM. The Gaussian model estimated based on the 20 smoothed profiles of 20 January 2011 was valid for 80.26% of the chlorophyll data derived from the 20 January 2011 image of the study area and for 84.40% ( $\pm 12.48\%$ ) of the data derived from the 14 images taken in January 2011. Note that reprocessed images were used (May 2012: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/Wiki/ocreproc20120MA.html>) because a new calibration instrument was installed and the chlorophyll *a* values from these images were higher than those prior to the recalibration date. In effect, with the images before the May 2012 calibration, the mean adjusted Gaussian model (estimated from the smoothed 20 January 2011 data set) could only be applied to 62.58% ( $\pm 22.86\%$ ) of the study area.

The comparison of *in situ* and satellite data using Pearson's correlation coefficient was not significant. This can be attributed to several factors, among them that the data are representative of different spatial scales. Each pixel represents 1.21 km<sup>2</sup> and, therefore, a single CTD profile will not necessarily coincide with the value of a given pixel. Only 20

factores físicos como la mezcla, estratificación y surgencia costera son responsables de la variabilidad espaciotemporal de la distribución de la clorofila *a*, observando concentraciones de hasta 9.7 mg m<sup>-3</sup> en el lado oriental del golfo.

El modelo gaussiano ajustado promedio obtenido para la base de datos ampliada y la del 20 de enero de 2011 muestra un máximo de clorofila de 50 mg m<sup>-3</sup>, el cual es típico de zonas de surgencia costera. Las concentraciones de clorofila *a* obtenidas en este estudio son superiores a las registradas por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2008), cuyos modelos gaussianos promedio ajustados y obtenidos para diversas áreas del golfo de México presentaron valores del máximo de clorofila *a* que variaron entre 0.32 y 0.93 mg m<sup>-3</sup>, que son datos representativos de zonas tanto eutróficas como oligotróficas del golfo de México. Millán-Núñez *et al.* (1996) estimaron MCSC y su respectiva profundidad a partir de concentraciones de clorofila superficial medidas frente a las costas de California y obtuvieron regresiones altamente significativas. Los modelos de regresión simple permiten ajustar la distribución de la clorofila *a* entre la superficie y la profundidad de MCSC, mientras que los modelos gaussianos permiten lograr un mejor ajuste a la distribución real de la clorofila *a* en la columna de agua y estimar las concentraciones más allá de la ubicación de MCSC. El modelo gaussiano estimado a partir de los 20 perfiles de enero de 2011 aplicando el promedio móvil fue válido para el 80.26% de los datos de la imagen del 20 de enero de 2011 en el área de estudio y para el 84.40% ( $\pm 12.48\%$ ) de los datos de las 14 imágenes de clorofila *a* de enero de 2011. Hay que considerar que se utilizaron imágenes reprocesadas (mayo de 2012: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/Wiki/ocreproc20120MA.html>), dado que se implementó un nuevo instrumento de calibración, y los valores de clorofila *a* de estas imágenes presentaron concentraciones de clorofila *a* superiores a aquellas anteriores a la fecha de recalibración. En efecto, para las imágenes anteriores a la calibración de mayo de 2012, el modelo gaussiano promedio ajustado estimado (de la base de datos del 20 de enero de 2011 y considerando el promedio móvil) sólo es aplicable en el 62.58% ( $\pm 22.86\%$ ) del área de estudio.

La comparación de datos *in situ* con aquellos de una imagen satelital mediante la correlación de Pearson no fue significativa. Esto puede atribuirse a diversos factores, entre ellos, a que los datos son representativos de distintas escalas espaciales. Cada pixel es representativo de 1.21 km<sup>2</sup> y, por tanto, la toma de un solo perfil de CTD no necesariamente va a coincidir con el valor de un determinado pixel de la imagen. Sólo se tomaron 20 perfiles de CTD para el 20 de enero de 2011, y no es un número suficiente para un estudio de correlación. Los datos *in situ* fueron recogidos entre las 10:20 y 17:00 horas, aproximadamente, mientras que la imagen se tomó a las 18:50 UTM (15:50 hora local). Las metodologías utilizadas para la estimación de clorofila *a* en cada caso fueron distintas; es decir, la imagen satelital mide la radiancia proveniente de la primera profundidad óptica,

CTD profiles were measured on 20 January 2011, not enough for a correlation analysis. The *in situ* data were obtained between 10:20 and 17:00 hours, and the image was taken at 18:50 UTM (15:50 local time). The methods used to estimate chlorophyll *a* in each case differed: MODIS measures the radiance from the first optical depth, whereas the CTD sensor measures the fluorometry. A high correlation between *in situ* and satellite data is therefore not expected. Though chlorophyll satellite data located near each CTD station (0.02° radius, 2.2 km) were correlated, the correlations were not significant.

The use of color images in coastal zones is limited for several reasons. The presence of colored dissolved organic matter in sediments can modify the optical properties of water and lead to errors in the estimation of chlorophyll *a* concentration (Morel *et al.* 2006). Cloud cover can impede the capture of radiation emitted from the sea surface, limiting the acquisition of this type of information, especially in winter when the frequency of overcast skies increases. In general, color images, especially the MODIS-Aqua images, use the OC3 algorithm to estimate phytoplankton biomass from global bioptic data that are not always representative of local optical conditions (Dogliotti 2007), as in the case of the coastal zone of northern Chile. Thus, chlorophyll color images of higher spatial resolution are needed to determine the heterogeneous horizontal distribution of the bio-oceanographic properties of coastal zones resulting from different small-scale oceanographic processes. High-resolution chlorophyll imagery is currently being used (Gitelson *et al.* 2011) that will allow more accurate observations of differences in concentration.

In the area under study, the waters have high chlorophyll *a* concentrations, typical of coastal upwelling zones, and there is no fluvial transport of suspended matter (Morel *et al.* 2006) and negligible wind-induced sediment transport (Marín *et al.* 1993). Almost 30% of the sediments in Mejillones Bay are of terrigenous origin (Valdés *et al.* 2005), deposited by southerly and southwesterly winds acting on the Mejillones Peninsula that transport the sediments northwards. Wind-induced sediment transport in SJB should be lower than in Mejillones Bay because it does not have an important shoreline protuberance (such as the Mejillones Peninsula) to the south. Studies are needed to quantify aeolian sediment transport both from east to west, due mainly to land breeze, and from south to north, typical of upwelling-favorable wind, to estimate the percentage of terrigenous sediment being introduced into SJB. Moreover, SJB waters can be classified as Case II (Morel and Prieur 1977, Sathyendranath *et al.* 1989) because of their turbidity due to the density of phytoplankton organisms, sediments, and suspended organic matter. All these characteristics make it difficult to estimate chlorophyll *a* concentrations by remote sensing (Werdell *et al.* 2007). Morel *et al.* (2006), however, consider that coastal waters with high chlorophyll concentrations associated with arid regions and unaffected by

mientras que el sensor del CTD mide la fluorimetría. Por lo tanto, no se espera encontrar una alta correlación entre los datos *in situ* y aquellos de la imagen satelital. Sin bien se correlacionaron los datos satelitales de clorofila ubicados a 0.02° (2.2 km) alrededor de cada estación de CTD, las correlaciones no fueron significativas.

Existen varias razones por las cuales el uso de imágenes en color en zonas costeras está limitado. La presencia de sedimentos y materia orgánica disuelta coloreada puede modificar las propiedades ópticas del agua e introducir errores en la estimación de la concentración de clorofila *a* (Morel *et al.* 2006). La nubosidad impide captar la radiación emitida por la superficie acuosa, limitando la adquisición de este tipo de información, especialmente en invierno, cuando la frecuencia de cielo cubierto se incrementa. Por lo general, las imágenes en color, particularmente las imágenes MODIS-Aqua, utilizan el algoritmo OC3 para estimar la biomasa fitoplanctónica a partir de una base global de datos biópticos, y éstos no siempre son representativos de las condiciones ópticas locales (Dogliotti 2007), como en el caso de la zona costera del norte de Chile. Es por ello que se necesitan imágenes en color de clorofila *a* de mayor resolución espacial para determinar la distribución horizontal heterogénea de las propiedades bio-oceanográficas que presentan las zonas costeras como consecuencia de los distintos procesos oceanográficos de menor escala. En la actualidad se está implementando el trabajo con imágenes de clorofila de mayor resolución espacial (Gitelson *et al.* 2011), lo cual permitirá observar diferencias de concentraciones con mayor precisión.

La zona de estudio presenta aguas con altas concentraciones de clorofila *a* (típicas de zonas de surgencia costera), nulo transporte de material suspendido por parte de ríos (Morel *et al.* 2006) y transporte de sedimento eólico poco significativo (Marín *et al.* 1993). Cerca del 30% de los sedimentos en bahía Mejillones son de origen terrígeno (Valdés *et al.* 2005), ya que los vientos del sur y suroeste que actúan sobre la península de Mejillones favorecen el transporte de sedimentos hacia el norte y su depósito en la bahía. El transporte eólico de sedimento en BSJ debiera ser aún menor que lo registrado para bahía Mejillones porque no hay una protuberancia costera tan significativa, como la península de Mejillones, en el límite sur. Se requieren realizar estudios para cuantificar el transporte eólico del sedimento tanto de este a oeste, debido principalmente a la brisa de tierra, como de sur a norte, típico del viento favorable para la surgencia, para estimar el porcentaje de sedimento terrígeno que podría estar introduciéndose en BSJ. Por otro lado, las aguas de BSJ pueden clasificarse como Caso II (Morel y Prieur 1977, Sathyendranath *et al.* 1989) por la turbidez debida a la alta densidad de organismos fitoplanctónicos, sedimentos y materia orgánica en suspensión. Todas estas características dificultan estimar las concentraciones de clorofila *a* a través de detección remota (Werdell *et al.* 2007). Sin embargo, Morel *et al.* (2006) consideran que las aguas costeras de alta concentración de clorofila asociadas a zonas áridas y sin

terrestrial runoff, such as SJB waters, can be classified as Case I but with high chlorophyll content. Case I waters usually have low chlorophyll content and are generally oceanic and oligotrophic or mesotrophic. This would explain why the adjusted Gaussian model for SJB was more than 75% satisfactory.

In conclusion, a mean adjusted Gaussian model was obtained for two data sets and it was valid for an ample satellite chlorophyll range that can be used to determine the vertical distribution of chlorophyll *a* for a particular time of the year. Nonetheless, only one SCM value can be obtained with a single model for an entire area, and its position in the water column may vary in terms of the satellite chlorophyll concentrations. More studies are needed to be able to compare *in situ* and satellite data, including studies of the optical properties of water to better interpret the color images for this coastal system.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This study was financed by projects FNDR\_CONAMA BIP 30059576, FNDR-CONAMA (2007–2012), and MEL 4579 (2009). We thank the Antofagasta Maritime Office for use of their vessels during this study. We also thank Alexis Castillo, Alexis Maffet, Pablo Morales, Ignacio Cáceres, and Gonzalo Gómez for their collaboration during the oceanographic surveys. Special thanks to the National Aeronautics and Space Administration (NASA) for providing the MODIS-Aqua images.

English translation by Christine Harris.

#### REFERENCES

- Álvarez-Molina LL, Álvarez-Borrego S, Lara-Lara JR, Marinone SG. 2013. Annual and semiannual variations of phytoplankton biomass and production in the central Gulf of California estimated from satellite data. *Cienc. Mar.* 39: 217–230. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v39i2.2189>
- Cullen JJ. 1982. The deep chlorophyll maximum: Comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 39: 791–803.
- Dogliotti AI. 2007. Estimación de la biomasa fitoplanctónica mediante sensoramiento remoto del color del mar y datos de campo en la plataforma continental patagónica. PhD thesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 133 pp.
- Escalante F, Valdez-Holguín JE, Álvarez-Borrego S, Lara-Lara JR. 2013. Temporal and spatial variations of sea surface temperature, chlorophyll *a*, and primary productivity in the Gulf of California. *Cienc. Mar.* 39: 203–215. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233>
- Escribano R, Hidalgo P. 2001. Circulación inducida por el viento en Bahía de Antofagasta, norte de Chile (23°S). *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 36: 43–60.
- Escribano R, Marín VH, Hidalgo P, Olivares G. 2002. Physical-biological interactions in the pelagic ecosystem of the nearshore zone of the northern Humboldt Current System. In: JC Castilla, Lagier JL (eds.), *The Oceanography and Ecology of the Nearshore and Bays in Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 145–175.
- Gitelson AA, Gao BC, Li RR, Berdnikov S, Saprygin V. 2011. Estimation of chlorophyll-*a* concentration in productive turbid waters using a hyperspectral imager for the coastal ocean: The Azov Sea case study. *Environ. Res. Lett.* 6: 024023 (6 pp). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024023>
- Gohin F, Saulquin B, Oger-Jeanneret H, Lozac'h L, Lampert L, Lefebvre A, Riou P, Bruchon F. 2008. Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll *a* concentrations. *Remote Sens. Environ.* 112: 3329–3340.
- Hecky RE, Kilham P. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* 33: 796–822.
- Hidalgo-González RM, Álvarez-Borrego S. 2008. Water column structure and phytoplankton biomass profiles in the Gulf of Mexico. *Cienc. Mar.* 34: 197–212.
- Holt J, Harle J, Proctor R, Michel S, Ashworth M, Batstone C, Allen I, Holmes R, Smyth T, Haines K, Bretherton D, Smith G. 2009. Modelling the global coastal ocean. *Philos. Trans. R. Soc. A* 367: 939–951.

efecto de drenaje de aguas continentales, como es el caso de BSJ, pueden considerarse como Caso I pero de alta concentración de clorofila. Las aguas clasificadas como Caso I son aquellas con baja concentración de clorofila, generalmente oligotróficas o mesotróficas y asociadas a aguas oceánicas. Esto explicaría por qué el modelo gaussiano ajustado para el interior de BSJ resultó satisfactorio en más de un 75%.

En conclusión, se obtuvo un modelo gaussiano promedio ajustado para cada una de las bases de datos válido para un intervalo considerable de clorofila satelital, el cual permite obtener las distribuciones verticales de clorofila *a* para un periodo particular del año. Sin embargo, la existencia de un único modelo para toda un área sólo permite encontrar un valor de MCSC, cuya ubicación en la columna de agua puede variar en función de las concentraciones de la clorofila satelital. Se requieren realizar más estudios que permitan comparar datos *in situ* con datos de imágenes satelitales, incluyendo estudios de las propiedades ópticas del agua, para tener una mejor interpretación de las imágenes en color representativas de este sistema costero.

#### AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por los proyectos FNDR\_CONAMA BIP 30059576, FNDR-CONAMA (2007–2012) y MEL 4579 (2009). Se agradece a la Gobernación Marítima de Antofagasta el uso de sus embarcaciones para realizar este estudio. También se agradece la colaboración de Alexis Castillo, Alexis Maffet, Pablo Morales, Ignacio Cáceres, Gonzalo Gómez y Mauricio Espinoza en los muestreos oceanográficos. Se agradece especialmente a la National Aeronautics and Space Administration (NASA) el facilitar las imágenes satelitales MODIS-Aqua.

- Iriarte JL, González HE. 2004. Phytoplankton size structure during and after the 1997/98 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 269: 83–90.
- Longhurst A, Sathyendranath S, Platt T, Caverhill C. 1995. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *J. Plankton Res.* 17: 1245–1271.
- Mann KH, Lazier JRN. 1991. Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-physical Interactions in the Oceans. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 563 pp.
- Marín VH, Olivares GR. 1999. Estacionalidad de la productividad primaria en Bahía Mejillones del Sur (Chile): Una aproximación proceso-funcional. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 72: 629–641.
- Marín VL, Rodríguez L, Vallejo L, Fuenteseca J, Oyarce E. 1993. Efectos de la surgencia sobre la productividad primaria primaveral de Bahía de Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.* 66: 479–491.
- Millán-Núñez R, Álvarez-Borrego S, Trees CC. 1996. Relationship between deep chlorophyll maximum and surface chlorophyll concentration in the California Current System. *CalCOFI Rep.* 37: 241–250.
- Morales CE, Blanco JL, Braun M, Nelson S. 2001. Chlorophyll-*a* distribution and mesoscale physical processes in upwelling and adjacent oceanic zones off northern Chile (summer–autumn 1994). *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 81: 193–206.
- Morel A, Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22: 709–722.
- Morel A, Gentili B, Chami M, Ras J. 2006. Bio-optical properties of high chlorophyll Case 1 waters and of yellow-substance-dominated Case 2 waters. *Deep-Sea Res. (I)* 53: 1439–1459.
- O'Reilly JE, Maritorena S, Mitchell BG, Siegel DA, Carder KL, Garver SA, Kahru M, McClain CR. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.* 103: 24937–24953.
- O'Reilly JE, Maritorena S, Siegel D, O'Brien M, Toole DT, Mitchell BG, Kahru M, Chavez FP, Strutton P, Cota GF, Hooker SB, McClain CR, Carder KL, Muller-Karger FE, Harding L, Magnuson A, Phinney D, Moore GF, Aiken J, Arrigo KR, Letelier RM, Culver ME. 2000. Ocean color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA/TM 206892 11: 9–23.
- Patti B, Guisande C, Vergara AR, Riveiro I, Maneiro I, Barreiro A, Bonanno A, Buscaino G, Cattitta A, Basilone G, Mazzola S. 2008. Factors responsible for the differences in satellite-based chlorophyll *a* concentrations between the major global upwelling areas. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 76: 775–786.
- Piñones A, Castilla JC, Guiñez R, Largier JL. 2007. Nearshore surface temperatures in Antofagasta Bay (Chile) and adjacent upwelling centers. *Cienc. Mar.* 33: 37–48.
- Platt T, Sathyendranath S. 1988. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science* 241: 1613–1620.
- Platt T, Sathyendranath S, Caverhill CM, Lewis MR. 1988. Ocean Primary production and available light: Further algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.* 35: 855–879.
- Rodríguez L, Zárate O, Oyarce E. 1986. Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la Bahía de Mejillones del Sur. *Rev. Biol. Mar.* 22: 75–96.
- Rodríguez L, Marín V, Farías M, Oyarce E. 1991. Identification of an upwelling zone by remote sensing and *in situ* measurements. *Mejillones del Sur Bay (Antofagasta, Chile). Sci. Mar.* 55: 467–473.
- Sathyendranath S, Prieur L, Morel A. 1989. A three-component model of ocean colour and its applications to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Int. J. Remote Sens.* 10: 1373–1394.
- Steele JH, Yentsch CS. 1960. The vertical distribution of chlorophyll. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 39: 217–226.
- Strub PT, Mesías J, Montecinos V, Rutland J, Salinas S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson A, Brink K (eds.), *The Sea*. Vol. 11. J Wiley, New York, pp. 273–313.
- Ulloa O, Platt T, Sathyendranath S. 1995. Determinación de la producción primaria mediante información satelital. In: Alveal K, Ferrario ME, Oliveira EC, Sar E (eds.), *Manual de Métodos Ficológicos*. Universidad de Concepción, Chile, pp. 375–386.
- Valdés J, Vergara G, Sifeddine A, Ortlieb L, Guiñez M. 2005. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), northern Chile: Geochemical and statistical approach. *Mar. Pollut. Bull.* 50: 1558–1568.
- Varela RA, Cruzado A, Tintoré J, García-Ladona E. 1992. Modelling the deep chlorophyll maximum: A coupled physical-biological approach. *J. Mar. Res.* 50: 441–463.
- Werdell PJ, Franz BA, Bailey SW, Harding Jr LW, Feldman GC. 2007. Approach for the long-term spatial and temporal evaluation of ocean color satellite data products in a coastal environment. *SPIE Proc.* 6680.

*Received September 2013,  
accepted January 2014.*