

Efecto de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California

Effect of Santa Ana winds on bio-optical properties off Baja California

Ramón Sosa-Ávalos^{1,2,*}

Gilberto Gaxiola-Castro²

Reginaldo Durazo³

B. Greg Mitchell⁴

¹ Facultad de Ciencias Marinas
Universidad de Colima
Km 20 carretera Manzanillo-Cihuatlán
Manzanillo, Colima, México
* E-mail: rsosa@ucol.mx

² Departamento de Oceanografía Biológica
Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, Baja California, México
E-mail: ggaxiola@cicese.mx

³ Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, Baja California, México
E-mail: rdurazo@uabc.mx

⁴ Scripps Institution of Oceanography
University of California, San Diego
La Jolla, California, EUA
E-mail: gmitchell@ucsd.edu

Recibido en julio de 2004; aceptado en noviembre de 2004

Resumen

A partir de las propiedades bio-ópticas, los coeficientes de absorción por partículas, detritos y fitoplancton (a_p , a_{dT} , a_ϕ) se evaluó el efecto de los vientos Santa Ana en el océano frente a Baja California ocurridos durante octubre de 1999. Los vientos medidos en la estación meteorológica frente a la Bahía de Todos Santos y los determinados a partir de información de satélite indicaron tres eventos Santa Ana, caracterizados por baja humedad relativa, alta temperatura del aire y vientos con dirección predominante del este-noreste. Los valores del coeficiente de absorción de detritos (a_{dT}) fueron hasta diez veces mayores en las muestras superficiales de octubre, con relación a las de enero, abril y agosto de 1999. Los altos valores de a_{dT} se debieron al material inorgánico aero-transportado por los vientos tierra-mar ocurridos del 9 al 11 y del 17 al 20 de octubre. Los coeficientes de absorción de las partículas (a_p) y el fitoplancton (a_ϕ) en la zona eufótica fueron mayores en abril, como resultado de la abundancia del fitoplancton. Los valores de a_p , a_ϕ y K_d para la zona eufótica fueron ajustados a una función de potencia con la clorofila como variable independiente, con una variancia explicada de 37%, 72% y 16%, respectivamente. Cuando se excluyeron del ajuste los valores de a_{dT} medidos en la superficie durante octubre, la clorofila explicó 82% de la variabilidad en los coeficientes de absorción (a_p y a_ϕ) y 87% en K_d . A partir de la ecuación que relaciona la reflectancia de la radiancia espectral ascendente (R_{rs}) con la clorofila, se determinó que ~80% de la variabilidad en la clorofila superficial es explicada por la razón de reflectancia $R_{rs(443)}/R_{rs(555)}$ medida en la zona de estudio. Las estimaciones regionales de clorofila a partir de información bio-óptica obtenida en la columna de agua no fueron afectadas fuertemente por el polvo aero-transportado durante los vientos Santa Ana ocurridos en octubre de 1999.

Palabras clave: coeficiente de absorción de partículas, vientos Santa Ana, Corriente de California.

Abstract

The effect of Santa Ana winds on bio-optical properties (absorption coefficients of particles, detritus and phytoplankton) off Baja California (Mexico) was evaluated using data obtained during four cruises in January, April, August and October 1999. Meteorological data from a station at Todos Santos Bay and satellite-derived wind data indicated three Santa Ana events during October 1999, with low relative humidity, high air temperature and persistent ENE winds. The absorption coefficient of detritus (a_{DT}) in surface samples was ten-fold higher in October because of the inorganic material wind-driven by the Santa Ana events that occurred from 9 to 11 and from 17 to 20 October, 1999. The absorption coefficients of particles (a_p) and phytoplankton (a_ϕ) in the euphotic zone were higher in the April survey as a result of higher phytoplankton abundance. The a_p , a_ϕ and K_d values in the euphotic zone were fitted to chlorophyll using a power function, with an explained variance of 37%, 72% and 16%, respectively. On excluding the October a_{DT} surface values, chlorophyll explained 82% of the changes in the absorption coefficients (a_p and a_ϕ), and 87% of the K_d variability. Approximately 80% of the chlorophyll concentration can be explained by the water column spectral reflectance relationship: $R_{rs(443)}/R_{rs(555)}$. According to our results, regional chlorophyll estimates from water column bio-optical information were not greatly affected by wind-borne dust transported during the October 1999 Santa Ana events.

Key words: particle absorption coefficient, Santa Ana winds, California Current.

Introducción

La absorción de la luz solar por material particulado en el océano (incluyendo el fitoplancton y la materia inorgánica) y el coeficiente de atenuación de la luz difusa, son propiedades importantes que muestran la variabilidad óptica dentro de la zona eufótica del mar (Mitchell y Kiefer, 1988; Bricaud *et al.*, 1995; Sosik y Mitchell, 1995). Los cambios en estas propiedades afectan la penetración de la luz en la columna de agua, la concentración de los pigmentos fotosintéticos, la producción primaria y el calentamiento de la capa de mezcla (Sosik y Mitchell, 1995).

Una de las fuentes más importantes de partículas hacia los océanos son los escurrimientos pluviales. En zonas donde el aporte de ríos es casi nulo, los vientos son sus principales transportadores. Esto es todavía más evidente en las regiones desérticas donde los fuertes vientos que soplan de tierra hacia el mar son los mecanismos por medio de los cuales ocurre una resuspensión de material inorgánico particulado y su transporte posterior hacia el océano. Ejemplos de esto son los vientos intensos conocidos como Mistral en el Mar Mediterráneo (Guerzoni *et al.*, 1997) y los vientos Santa Ana en el Océano Pacífico frente a California y Baja California (Sommers, 1978; Castro *et al.*, 2003; Trasviña *et al.*, 2003). En Baja California, los eventos de vientos Santa Ana transportan material desde la región desértica y están asociados a alta temperatura ambiente y baja humedad relativa. Los vientos se presentan generalmente entre octubre y marzo, con intensidades de hasta 80 km h^{-1} (Castro *et al.*, 2003) y su efecto es perceptible desde la costa hasta cientos de kilómetros mar adentro.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los efectos de los vientos Santa Ana en los coeficientes de absorción de la luz medidos en la columna de agua, mediante un análisis de datos *in situ* obtenidos durante cruceros realizados en 1999. En particular, se analiza con mayor detalle la información de octubre, cuando se observaron fuertes vientos tierra-mar en la Península de Baja California. Se presenta además una evaluación preliminar de los efectos que estas variaciones podrían ocasionar en el

Introduction

Absorption of sunlight by particulate matter in the ocean (including phytoplankton and inorganic matter) and the diffuse attenuation coefficient of irradiance are important properties that show optical variability within the euphotic zone (Mitchell and Kiefer, 1988; Bricaud *et al.*, 1995; Sosik and Mitchell, 1995). Changes in these properties affect the concentration of photosynthetic pigments, light penetration through the water column, primary production and heating of the mixed layer (Sosik and Mitchell, 1995).

One of the most important sources of particles to the oceans is rain runoff. In areas with almost no river input, wind is the main transporter. This is particularly evident in arid regions where the strong winds that blow from land out to sea are the mechanism through which particulate inorganic matter is resuspended and then transported offshore. Examples of this are the strong Mistral winds of the Mediterranean Sea (Guerzoni *et al.*, 1997) and the Santa Ana winds of the Pacific Ocean, off California and Baja California (Sommers, 1978; Castro *et al.*, 2003; Trasviña *et al.*, 2003). In Baja California (Mexico), Santa Ana events generally occur between October and March and are associated with high air temperature and low relative humidity. These winds transport material from the arid region and reach intensities of up to 80 km h^{-1} (Castro *et al.*, 2003), their effect being perceptible from the coast to hundreds of kilometers offshore.

The present study aims to determine the effect of Santa Ana winds on the light absorption coefficients measured in the water column, by analyzing *in situ* data obtained during four cruises conducted in 1999. In particular, a more detailed analysis was made of the information recorded in October, when the Baja California peninsula was subjected to strong offshore winds. We also present a preliminary evaluation of the effect that these variations may have on the calculation of the absorption coefficients for the regional estimate of surface chlorophyll, calculated with global algorithms that use data from remote sensing.

cálculo de los coeficientes de absorción para las estimaciones regionales de la clorofila superficial, calculada con algoritmos globales que utilizan información de sensores remotos.

Materiales y métodos

Durante 1999 se realizaron cuatro cruceros oceanográficos (14 de enero al 2 de febrero, 30 de marzo al 17 de abril, 8 al 22 de agosto y 3 al 22 de octubre) en la región sur de la Corriente de California frente a Baja California como parte del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) (fig. 1). Tres de estos cruceros se efectuaron a bordo del B/O Francisco de Ulloa del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE; enero, abril y octubre) y uno a bordo del B/O El Puma de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM; agosto). Asimismo, se obtuvo información meteorológica en una estación costera frente a la Bahía de Todos Santos utilizando una estación marca Aanderaa. De acuerdo a las especificaciones del fabricante, la precisión en los sensores es de 0.1% en temperatura, $\pm 2\%$ del rango de humedad relativa y $\pm 5\%$ en rapidez y dirección de viento.

En cada estación oceanográfica seleccionada de la red IMECOCAL se recolectaron 2 L de agua por medio de botellas Niskin de 5 L acopladas a una roseta, para determinar la concentración de clorofila y los coeficientes de absorción de luz por partículas y fitoplancton a seis profundidades ópticas (100%, 50%, 30%, 20%, 10% y 1% de la irradiancia superficial [$E_{0(\text{PAR})}$]). Únicamente en el crucero de octubre la recolecta superficial se realizó con una cubeta de plástico. Las muestras para ambos análisis se pasaron a través de filtros GF/F usando presión positiva. Los pigmentos fueron extraídos con acetona al 90% por 24 horas en oscuridad y en refrigeración ($\sim 4^\circ\text{C}$) (Venrick y Hayward, 1984). La concentración de pigmentos fue cuantificada por el método fluorimétrico (Yentsch y Menzel, 1963; Holm Hansen *et al.*, 1965), con un fluorímetro Turner Designs 10-AU-005 calibrado con clorofila-*a* pura (Sigma). Los coeficientes de absorción por partículas (a_p) se determinaron con un espectrofotómetro Varian Cary 1E UV-Visible con doble haz de luz de 300 a 800 nm (Mitchell *et al.*, 2003). Los espectros de absorción fueron corregidos por la amplificación de la trayectoria (factor β) por medio de la técnica cuantitativa de filtro (QFT) (Mitchell, 1990; Mitchell *et al.*, 2003). Posteriormente, los filtros fueron colocados en metanol frío para extraer los pigmentos de acuerdo al método descrito por Kishino *et al.* (1985) y la absorbancia fue medida de nuevo a las mismas longitudes de onda. Esto produce la componente de absorción por partículas no pigmentadas (a_d) más la absorción por seston (a_i), referida como detritos totales ($a_{dT} = a_d + a_i$). A partir de la absorbancia obtenida se calcularon los coeficientes de absorción por partículas (a_p) y por detritos (a_{dT}). De la diferencia entre ambos se obtuvieron los coeficientes de absorción del fitoplancton ($a_\phi = a_p - a_{dT}$).

En las mismas localidades se tomaron perfiles verticales de irradiancia espectral descendente ($E_d(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$) y de

Materials and methods

In 1999, four oceanographic cruises (14 January to 2 February, 30 March to 17 April, 8 to 22 August and 3 to 22 October) were conducted in the southern region of the California Current, off Baja California, as part of the IMECOCAL (Mexican research in the California Current) program (fig. 1). Three of these cruises (January, April and October) were carried out aboard the R/V *Francisco de Ulloa* of the Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) and one (August) aboard the R/V *El Puma* of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Meteorological information was also obtained from a coastal station off Todos Santos Bay using an Aanderaa meteorological station. According to the manufacturer's specifications, the accuracy of the sensors is: temperature, 0.1%; relative humidity, $\pm 2\%$ of range; and wind speed and direction, $\pm 5\%$.

At each oceanographic station selected from the IMECOCAL grid, 2 L of water were collected in 5-L Niskin bottles secured to a rosette to determine chlorophyll concentration and light absorption coefficients of particles and phytoplankton at six optical depths (100%, 50%, 30%, 20%, 10% and 1% of surface irradiance [$E_{0(\text{PAR})}$]). Only during the October cruise was a plastic bucket used for the surface collection. The samples for both analyses were passed through GF/F filters using positive pressure. The pigments were extracted with 90% acetone for

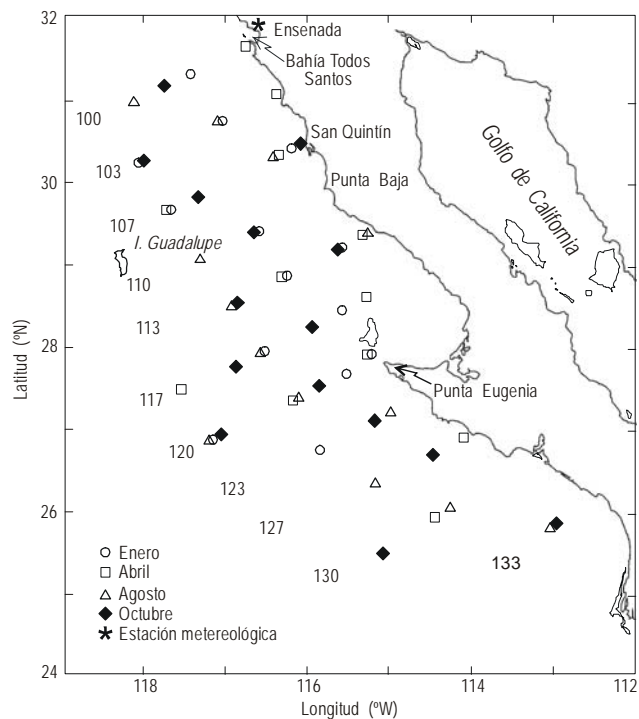


Figura 1. Localización de estaciones cubiertas en cada uno de los cruceros IMECOCAL. Los números indican las líneas hidrográficas donde se muestreó en cada crucero.

Figure 1. Location of the stations visited during the IMECOCAL cruises. The numbers indicate the hydrographic lines where sampling was conducted on each cruise.

radiancia espectral ascendente ($L_u(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) a las longitudes de onda de 412, 443, 490, 510, 555 y 565 nm con un perfilador de radiancia-irradiancia (PRR-600, Biospherical Instruments). El coeficiente de atenuación de la irradiancia espectral descendente ($K_d(\lambda)$; m^{-1}) se calculó con la ecuación de Gordon y Morel (1983): $K_d(z, \lambda) = d(\text{Ln}[E_d(z, \lambda)])/dz$. El coeficiente de atenuación de la irradiancia fue normalizado a partir del promedio del coseno de la luz descendente (μ_d) de 0.72, tomado de Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000). La reflectancia de la radiancia espectral ($R_{rs}(\lambda)$; sr^{-1}) para las seis diferentes longitudes de onda fue calculada en la columna de agua dividiendo la radiancia espectral ascendente ($L_u(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) entre la irradiancia espectral descendente ($E_d(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$).

Resultados

Los valores medios de los coeficientes de absorción por partículas ($a_{p(440)}$) y fitoplancton ($a_{\phi(440)}$) fueron mayores en abril, relacionados con la abundancia del fitoplancton en la zona eufótica (tabla 1). Durante el crucero de octubre se observaron valores superficiales muy altos de $a_{p(440)}$ y $a_{dT(440)}$, hasta cinco y diez veces mayores que en los otros cruceros. Sin embargo, en ese mes $a_{\phi(440)}$ fue muy bajo, excepto a la profundidad correspondiente al 10% de $E_{0(\text{PAR})}$, donde se registró el máximo subsuperficial de clorofila.

Los valores de $a_{dT(440)}$ para la superficie (100% $E_{0(\text{PAR})}$) durante el crucero de octubre fueron al menos un orden de magnitud mayores que los registrados en los otros tres cruceros (figs. 2a–f), mientras que $a_{dT}(\lambda)$ de las profundidades de 50%, 30%, 20%, 10% y 1% de $E_{0(\text{PAR})}$ mostraron valores muy similares en los cuatro cruceros (figs. 2b–f). En general, el crucero de abril presentó los valores espectrales de detritos más bajos en la columna de agua (figs. 2c, e, f).

Los valores de $a_{p(440)}$ y $a_{\phi(440)}$ de todos los cruceros fueron agrupados y ajustados a una función de potencia ($y = a[\text{Chl} - a]^b$). La concentración de clorofila explicó 37% y 82% de la variabilidad de $a_{\phi(440)}$ cuando se incluyeron (fig. 3a) y excluyeron (fig. 3b) los datos superficiales del crucero de octubre, respectivamente. El ajuste entre la clorofila *in situ* y $a_{\phi(440)}$ tuvo un incremento de 10% en el coeficiente de determinación cuando se excluyeron los valores superficiales del crucero de octubre (figs. 3c–d). Esto sugiere que la mayor variabilidad en $a_{p(440)}$ y la menor en $a_{p(440)}$ estuvieron determinadas por partículas no pigmentadas o con muy baja pigmentación presentes en las muestras superficiales del crucero de octubre (figs. 3e–f). En la figura 3e se aprecia una alta concentración de detritos relacionada con clorofila entre 0.2 a 1.0 mg m^{-3} . Posiblemente esto se debe al transporte eólico de partículas inorgánicas ricas en hierro provenientes de zonas desérticas (Garget y Marra, 2002), a las cuales se les adhieren células autotróficas muy pequeñas (picoplanton: por ejemplo, cianofitas). Estas células del picoplanton, cuando crecen cerca de la superficie, contienen generalmente altas concentraciones de pigmentos

24 h in darkness and under refrigeration ($\sim 4^\circ\text{C}$) (Venrick and Hayward, 1984). The concentration of pigments was quantified by the fluorimetric method (Yentsch and Menzel, 1963; Holm Hansen *et al.*, 1965), using a Turner Designs 10-AU-005 fluorometer calibrated with pure chlorophyll *a* (Sigma). The particle absorption coefficients (a_p) were determined with a Varian Cary 1E UV-Visible double-beam spectrophotometer (300–800 nm) (Mitchell *et al.*, 2003). The absorption spectra were corrected by amplification of the trajectory (β factor) using the quantitative filter technique (QFT) (Mitchell, 1990; Mitchell *et al.*, 2003). The filters were then placed in cold methanol to extract the pigments according to the method described by Kishino *et al.* (1985) and absorbance was measured again at the same wavelengths. This yields the component of absorption by nonpigmented particles (a_d) plus absorption by seston (a_i), referred to as total detritus ($a_{dT} = a_d + a_i$). Based on the absorbance obtained, the absorption coefficients of particles (a_p) and detritus (a_{dT}) were calculated. The difference between both gave the absorption coefficients of phytoplankton ($a_\phi = a_p - a_{dT}$).

At the same sampling stations, vertical profiles of downwelling spectral irradiance ($E_d(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$) and upwelling spectral radiance ($L_u(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) were determined at wavelengths of 412, 443, 490, 510, 555 and 565 nm, using a PRR-600 profiling reflectance radiometer (Biospherical Instruments). The downward spectral irradiance attenuation coefficient ($K_d(\lambda)$; m^{-1}) was calculated using Gordon and Morel's (1983) equation: $K_d(z, \lambda) = d(\text{Ln}[E_d(z, \lambda)])/dz$. The irradiance attenuation coefficient was normalized using the average cosine for downward light (μ_d) of 0.72, taken from Giles-Guzmán and Álvarez-Borrego (2000). The spectral radiance reflectance ($R_{rs}(\lambda)$; sr^{-1}) for the six different wavelengths was calculated in the water column, dividing the upwelling spectral radiance ($L_u(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) by the downwelling spectral irradiance ($E_d(\lambda)$; $\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$).

Results

The mean values of the absorption coefficients of particles ($a_{p(440)}$) and phytoplankton ($a_{\phi(440)}$) were higher in April, associated with the abundance of phytoplankton in the euphotic zone (table 1). During the October cruise, very high surface values of $a_{p(440)}$ and $a_{dT(440)}$ were observed, up to five- and ten-fold higher than in the other cruises; however, $a_{\phi(440)}$ was very low, except at the depth of 10% $E_{0(\text{PAR})}$, where the subsurface chlorophyll maximum was recorded.

The $a_{dT(440)}$ values for the surface (100% $E_{0(\text{PAR})}$) during the October cruise were at least one order of magnitude higher than those recorded on the other three cruises (fig. 2a–f), whereas the $a_{dT}(\lambda)$ values for 50%, 30%, 20%, 10% and 1% $E_{0(\text{PAR})}$ were very similar for the four cruises (fig. 2b–f). In general, the lowest spectral values for detritus in the water column were obtained during the April cruise (fig. 2c, e, f).

Tabla 1. Promedio de los coeficientes de absorción por partículas (a_p), detritos (a_{dT}) y fitoplancton (a_ϕ) a 440 nm para cada nivel de irradiancia (100, 50, 30, 20, 10 y 1% $E_{0(PAR)}$) en los cruceros IMECOCAL de 1999. Los números entre paréntesis se refieren al error estándar de la media. Los valores de los coeficientes de absorción son expresados en m^{-1} .

Table 1. Mean absorption coefficient values (expressed in m^{-1}) of particles (a_p), detritus (a_{dT}) and phytoplankton (a_ϕ) at 440 nm for each level of irradiance (100%, 50%, 30%, 20%, 10% and 1% $E_{0(PAR)}$) during the 1999 IMECOCAL cruises. Numbers in parentheses indicate mean standard error.

Crucero	Nivel	$a_{p(440)}$	$a_{dT(440)}$	$a_{\phi(440)}$
Enero	100%	0.027 (0.004)	0.0058 (0.0007)	0.021 (0.004)
Abril		0.041 (0.009)	0.0052 (0.0007)	0.036 (0.008)
Agosto		0.029 (0.007)	0.0110 (0.0010)	0.017 (0.006)
Octubre		0.120 (0.016)	0.1040 (0.0130)	0.016 (0.003)
Enero	50%	0.033 (0.005)	0.0072 (0.0015)	0.025 (0.004)
Abril		0.045 (0.008)	0.0072 (0.0010)	0.038 (0.008)
Agosto		0.028 (0.009)	0.0065 (0.0008)	0.021 (0.008)
Octubre		0.021 (0.004)	0.0055 (0.0008)	0.016 (0.003)
Enero	30%	0.038 (0.005)	0.0095 (0.0009)	0.030 (0.005)
Abril		0.047 (0.011)	0.0057 (0.0008)	0.041 (0.010)
Agosto		0.028 (0.009)	0.0072 (0.0007)	0.021 (0.009)
Octubre		0.025 (0.003)	0.0074 (0.0006)	0.018 (0.003)
Enero	20%	0.037 (0.005)	0.0086 (0.0010)	0.029 (0.004)
Abril		0.050 (0.013)	0.0067 (0.0009)	0.043 (0.013)
Agosto		0.038 (0.017)	0.0076 (0.0009)	0.030 (0.016)
Octubre		0.034 (0.007)	0.0072 (0.0005)	0.027 (0.007)
Enero	10%	0.039 (0.005)	0.0085 (0.0008)	0.031 (0.005)
Abril		0.044 (0.012)	0.0055 (0.0008)	0.038 (0.011)
Agosto		0.049 (0.022)	0.0084 (0.0012)	0.040 (0.021)
Octubre		0.051 (0.009)	0.0097 (0.0012)	0.041 (0.009)
Enero	1%	0.036 (0.005)	0.0077 (0.0009)	0.029 (0.005)
Abril		0.038 (0.008)	0.0065 (0.0010)	0.032 (0.007)
Agosto		0.036 (0.005)	0.0087 (0.0010)	0.027 (0.0040)
Octubre		0.027 (0.004)	0.0086 (0.0010)	0.019 (0.003)

fotoprotectores, los cuales se ha demostrado que no son extraídos totalmente por el metanol en frío (Bidigare *et al.*, 1990). Se requiere mayor información para explicar y probar estas hipótesis relacionadas con el aporte de partículas por los vientos Santa Ana frente a Baja California y las altas abundancias de picoplancton asociadas a ellas.

Los valores de $K_d(\lambda)$ calculados para la zona eufótica fueron relacionados con la clorofila medida *in situ* y ajustados a una función de potencia (figs. 4a–f). Cuando se incluyeron en el ajuste los datos superficiales del crucero de octubre, la clorofila explicó solamente 16% de la variabilidad total de $K_d(412)$ (fig. 4a), comparado con 87% explicado al excluir estos valores y ajustar los datos nuevamente a la misma función de potencia (fig. 4b). Estas diferencias fueron mucho mayores al

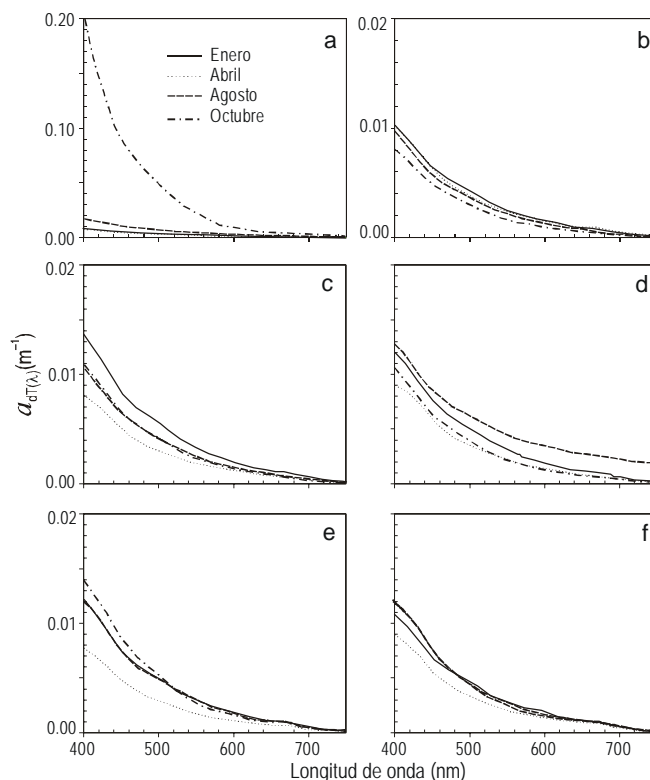


Figura 2. Espectros de absorción por detritos totales en cada nivel de profundidad de los cuatro cruceros realizados (enero, abril, agosto y octubre). (a) 100%, (b) 50%, (c) 30%, (d) 20%, (e) 10% y (f) 1% $E_{0(PAR)}$. Nótese que la escala en la figura (a) es un orden de magnitud mayor.

Figure 2. Total detritus absorption spectra for each depth level sampled during the four cruises (January, April, August and October): (a) 100%, (b) 50%, (c) 30%, (d) 20%, (e) 10% and (f) 1% $E_{0(PAR)}$. Note that the scale in plot (a) is one order of magnitude higher.

The $a_{p(440)}$ and $a_{\phi(440)}$ values from all the cruises were grouped and fitted to a power function ($y = a[Chl - a]^b$). The concentration of chlorophyll explained 37% and 82% of the $a_{p(440)}$ variability when the October surface data were included (fig. 3a) and excluded (fig. 3b), respectively. The fit between *in situ* chlorophyll and $a_{\phi(440)}$ showed an increase of 10% in the determination coefficient when the October surface values were excluded (fig. 3c–d). This suggests that the highest variability in $a_{p(440)}$ and the lowest in $a_{\phi(440)}$ were determined by particles with no or very little pigmentation found in the surface samples from the October cruise (fig. 3e–f). Figure 3e shows a high concentration of detritus related to chlorophyll between 0.2 and 1.0 $mg\ m^{-3}$. This is probably due to aeolian transport from arid areas of inorganic particles rich in iron (Garget and Marra, 2002), to which very small autotrophic cells adhere (picoplankton: for example, cyanophytes). When these picoplankton cells grow near the surface they generally contain high concentrations of photoprotector pigments, which are not entirely extracted by the cold methanol (Bidigare *et al.*, 1990). More information is required to explain and prove these hypotheses related to the transport of particles by Santa Ana

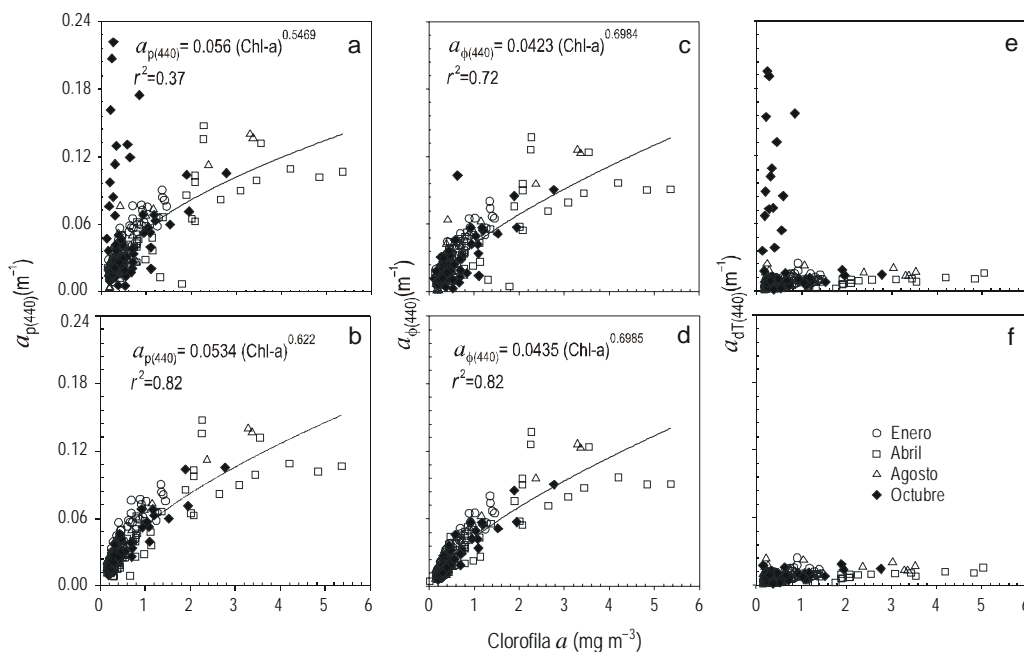


Figura 3. Relación entre la clorofila y los coeficientes de absorción de luz por partículas ($a_{p(440)}$), fitoplancton ($a_{\phi(440)}$) y detritos ($a_{IT(440)}$) a 440 nm. Los datos de $a_{p(440)}$ (a, b) y $a_{\phi(440)}$ (c, d) fueron ajustados a una función de potencia ($y = a[Chl - a]^b$). (a) Ajuste de $a_{p(440)}$ incluyendo los valores de las muestras superficiales de octubre. (b) Ajuste de $a_{p(440)}$ excluyendo únicamente los valores de $a_{IT(440)}$ de las muestras de superficie de octubre. (c) Ajuste de $a_{\phi(440)}$ incluyendo todos los valores de $a_{IT(440)}$. (d) Ajuste de $a_{\phi(440)}$ excluyendo los valores de $a_{IT(440)}$ de las muestras superficiales de octubre. (e) Datos de $a_{IT(440)}$ mostrando todos los valores de los cuatro cruceros. (f) Datos de $a_{IT(440)}$ excluyendo los valores de superficie de las muestras de octubre. La línea continua representa el ajuste de la regresión.

Figure 3. Relation between chlorophyll and the light absorption coefficients of particles ($a_{p(440)}$), phytoplankton ($a_{\phi(440)}$) and detritus ($a_{IT(440)}$) at 440 nm. The $a_{p(440)}$ (a, b) and $a_{\phi(440)}$ (c, d) data were fitted to a power function ($y = a[Chl - a]^b$). (a) Fit of $a_{p(440)}$ including the $a_{IT(440)}$ values of the October surface samples. (b) Fit of $a_{p(440)}$ excluding only the $a_{IT(440)}$ values of the October surface samples. (c) Fit of $a_{\phi(440)}$ including all the $a_{IT(440)}$ values. (d) Fit of $a_{\phi(440)}$ excluding the $a_{IT(440)}$ values of the October surface samples. (e) The $a_{IT(440)}$ data showing the values for the four cruises. (f) The $a_{IT(440)}$ data excluding the values of the October surface samples. The continuous line represents the regression fit.

considerar las otras longitudes de onda (fig. 4c–l), lo que representó una mayor contribución de las partículas inorgánicas a la variabilidad del $K_d(\lambda)$ con respecto a los cambios en $a_{p(440)}$ y $a_{\phi(440)}$.

Discusión

Los altos valores de $a_{p(440)}$ y $a_{\phi(440)}$ registrados en el mes de abril están relacionados con la abundancia de algunos grupos del fitoplancton (principalmente diatomeas y dinoflagelados), lo que ha sido ya documentado por diversos autores (Sosik y Mitchell, 1995; Bricaud *et al.*, 1998; Bouman *et al.*, 2000; Millán-Núñez *et al.*, 2004). En contraste, los altos valores superficiales de $a_{p(440)}$ y $a_{IT(440)}$ determinados para el crucero de octubre se debieron a la presencia de partículas no pigmentadas. Estas altas concentraciones de partículas fueron transportadas hacia la zona de estudio por los vientos Santa Ana observados durante el período del crucero (figs. 5a; 6a–b).

El patrón de vientos de la estación frente a la Bahía de Todos Santos durante octubre de 1999 mostró una dominancia de vientos del WNW (fig. 5a), aunque con contribuciones

winds off Baja California and the high abundances of picoplankton associated with them.

The $K_d(\lambda)$ values calculated for the euphotic zone were related to the chlorophyll measured *in situ* and fitted to a power function (fig. 4a–f). When the October surface data were included in the fit, chlorophyll explained only 16% of the total variability of $K_d(412)$ (fig. 4a), compared with the 87% explained when these values were excluded and the data were fitted again to the same power function (fig. 4b). These differences were much greater when the other wavelengths were considered (fig. 4c–l), representing a greater contribution of inorganic particles to the variability of $K_d(\lambda)$ relative to the changes in $a_{p(440)}$ and $a_{\phi(440)}$.

Discussion

The high values of $a_{p(440)}$ and $a_{\phi(440)}$ recorded in April are related to the abundance of phytoplankton groups (mainly diatoms and dinoflagellates); this has been documented by several authors (Sosik and Mitchell, 1995; Bricaud *et al.*, 1998; Bouman *et al.*, 2000; Millán-Núñez *et al.*, 2004). In contrast,

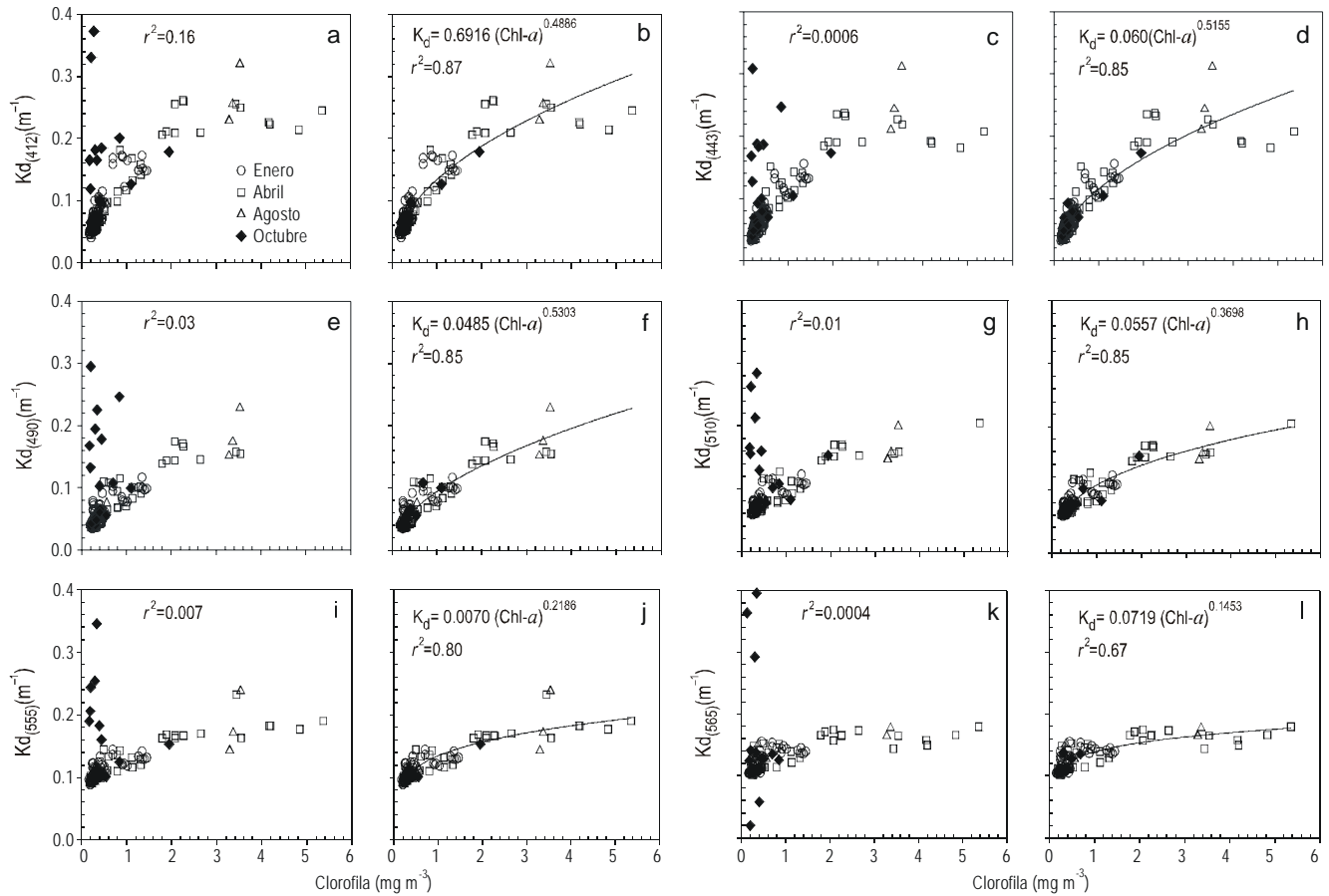


Figura 4. Relación entre la clorofila y los coeficientes de atenuación de la irradiancia espectral descendente durante enero, abril, agosto y octubre de 1999 frente a Baja California. Los coeficientes de atenuación de las seis diferentes longitudes de onda fueron ajustados a una función de potencia ($y = a[Chl - a]^b$), incluyendo los valores de las muestras superficiales de octubre (a, c, e, g, i, k). En estos gráficos únicamente se muestran los coeficientes de determinación. Los coeficientes de atenuación fueron ajustados a la misma función, sin incluir las muestras superficiales de octubre (b, d, f, h, j, l). Se presentan los coeficientes derivados de la regresión y el coeficiente de determinación para cada caso. Nótese que en las figuras (a, c, e, g, i, k) la escala en el eje vertical es el doble.

Figure 4. Relation between chlorophyll and the downwelling spectral irradiance attenuation coefficients for January, April, August and October 1999 off Baja California. The attenuation coefficients of the six different wavelengths were fitted to a power function ($y = a[Chl - a]^b$), including the values of the October surface samples (a, c, e, g, i, k). Only the coefficients of determination are shown in these plots. The attenuation coefficients were fitted to the same function, without including the October surface samples (b, d, f, h, j, l). The regression-derived coefficients and the coefficient of determination are presented for each case. Note that the vertical axis scale in plots (a, c, e, g, i, k) is double that of the others.

importantes de vientos del NE (Santa Ana) y del ESE (brisas nocturnas locales). Durante el mismo período, el aumento en la temperatura del aire (fig. 5b) así como el decremento de la humedad relativa a valores por debajo de 50% (fig. 5c), indican dos eventos fuertes de vientos Santa Ana durante el crucero: del 9 al 11 y del 17 al 20 de octubre de 1999. Para mostrar la influencia espacial de estos eventos sobre el océano se obtuvo una combinación de vientos medidos por los satélites NSCAT/ERS-2 y de resultados del modelo NCEP de circulación atmosférica ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) (Milliff *et al.*, 1999). La figura 6 muestra el campo espacial de viento sobre la superficie para los días 10 y 17 de octubre. El patrón de vientos confirma la existencia de eventos tierra-mar en ambos períodos. Durante el primer evento (9 al 11 de octubre) la influencia del evento Santa Ana parece estar restringida a regiones cercanas a la costa (50–

the high surface values of $a_{p(440)}$ and $a_{dT(440)}$ determined for the October cruise are associated with the presence of nonpigmented particles. These high concentrations of particles were transported to the study area by the Santa Ana winds observed in October (figs. 5a, 6a–b).

The wind pattern established at the station off Todos Santos Bay in October 1999 showed predominance of WNW winds (fig. 5a), though with important contributions of NE winds (Santa Ana) and ESE winds (local nocturnal breezes). During the same period, the increase in air temperature (fig. 5b) and the decrease in relative humidity to values below 50% (fig. 5c) indicate two strong Santa Ana events: 9–11 and 17–20 October 1999. To show the spatial influence of these events on the ocean, we used wind data measured by the NSCAT/ERS-2 satellites and results from the NCEP atmospheric circulation

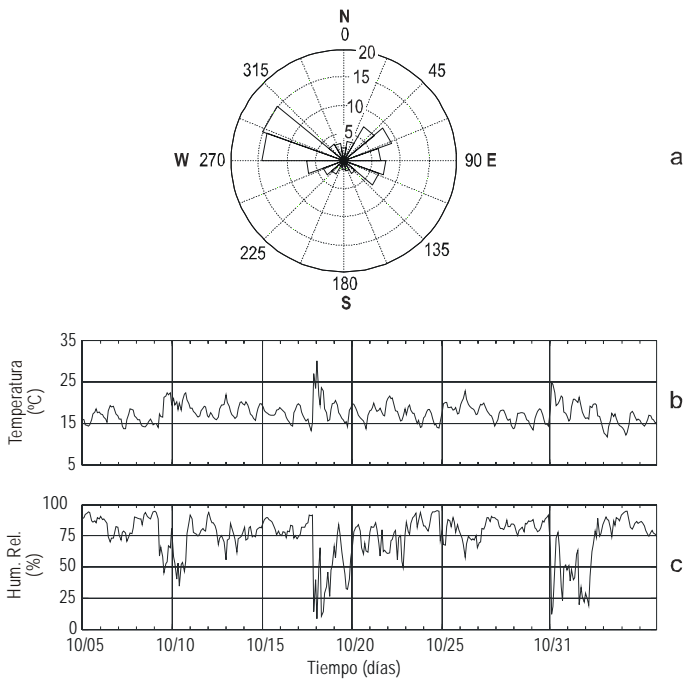


Figura 5. Datos meteorológicos medidos en la estación costera de Punta Morro, Baja California, durante octubre de 1999. (a) Rosa de frecuencias de la dirección y velocidad del viento, (b) temperatura del aire y (c) humedad relativa.

Figure 5. Meteorological data measured at the Punta Morro coastal station (Baja California) in October 1999. (a) Rose showing frequencies of wind speed and direction, (b) air temperature and (c) relative humidity.

100 km) entre Ensenada y Punta Baja. En contraste, durante el segundo evento (17 al 20 de octubre), los vientos del N y NE sobre las costas del sur de California y Baja California mantienen su dirección por cientos de kilómetros mar adentro y a lo largo de toda la península (fig. 6b). Es evidente por tanto

model ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) (Milliff *et al.*, 1999). Figure 6 shows the spatial field of the wind on the surface for 10 and 17 October. The wind pattern confirms the occurrence of offshore winds in both periods. During the first event (9–11 October), the influence of the Santa Ana winds seems to be restricted to areas close to the coast (50–100 km) between Ensenada and Punta Baja. In contrast, during the second event (17–20 October), the N and NE winds on the southern coasts of California and Baja California maintain their direction for hundreds of kilometers offshore and along all the peninsula (fig. 6b). It is therefore evident that the strong land–sea winds from arid regions transported large amounts of particles and produced changes in the bio-optical properties of the ocean.

In October, $K_d(\lambda)$ was strongly affected by the nonpigmented particulate matter transported out to sea, significantly modifying the expected behaviour of $K_d(\lambda)$ at the surface (fig. 4a–b). In the Sargasso Sea, Siegel and Michaels (1996) measured variations in $K_d(\lambda)$ caused by the presence of detrital particles, affecting its relation with the concentration of chlorophyll. The regression fits of the power function to calculate $a_{p(440)}$, $a_{\phi(440)}$ and $K_d(\lambda)$ as a function of chlorophyll explained 82% of the variability of the absorption coefficients (fig. 3b, d) and more than 80% of $K_d(\lambda)$ in the blue region of the spectrum (fig. 4b, d, f). The bio-optical properties present during anomalous events such as Santa Anas may cause variations in the parameters incorporated in the regional models that calculate chlorophyll *a* based on upwelling spectral radiance that emerges from the ocean measured by colour sensors.

To determine the effect on the chlorophyll estimates by remote sensing when an anomalous concentration of particles occurs at the sea surface, a fit was applied between the ratio of spectral reflectance (R_{rs}) at two wavelengths (443/555) and *in situ* chlorophyll concentration close to the surface (first

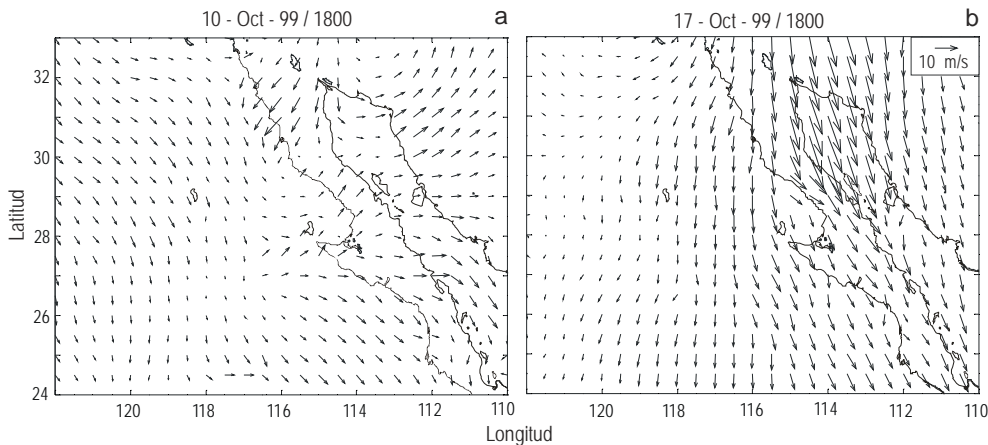


Figura 6. Vectores de velocidad y dirección del viento determinados de mediciones de los satélites NSCAT/ERS-2 y del modelo de circulación atmosférica NCEP ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$), para los periodos de eventos Santa Ana del 9 al 11 y del 17 al 20 de octubre de 1999.

Figure 6. Wind speed and direction vectors determined from NSCAT/ERS-2 satellite measurements and from the NCEP atmospheric circulation model ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) for the Santa Ana events that occurred from 9 to 11 and from 17 to 20 October 1999.

que los fuertes vientos tierra-mar provenientes de las regiones desérticas aportaron grandes cantidades de partículas y originaron cambios en las propiedades bio-ópticas del océano.

Los valores de $K_d(\lambda)$ en el crucero de octubre fueron fuertemente afectados por el material particulado no pigmentado transportado hacia el océano, modificando significativamente el comportamiento esperado de $K_d(\lambda)$ en la superficie (fig. 4a–b). En el Mar de los Sargazos, Siegel y Michaels (1996) midieron variaciones en $K_d(\lambda)$ causadas por la presencia de partículas detríticas, lo cual afectó su relación con la concentración de clorofila. Los ajustes de regresión de la función de potencia para calcular $a_{p(440)}$ y $a_{\phi(440)}$ como una función de la clorofila explicaron 82% de la variabilidad de los coeficientes de absorción (fig. 3b, d) y más de 80% del $K_d(\lambda)$ en la región azul del espectro (fig. 4b, d, f). Las propiedades bio-ópticas presentes durante eventos anómalos como los Santa Ana podrían ocasionar variaciones en los parámetros incorporados a los modelos regionales que calculan la clorofila a partir de la radiancia espectral ascendente que emerge del océano medida por sensores de color.

Con el fin de comprobar el efecto sobre las estimaciones de la clorofila por sensores remotos cuando se presenta una concentración anómala de partículas en la superficie del mar, se realizó un ajuste entre las razones de reflectancia de la radiancia (R_{rs}) a dos longitudes de onda (443/555) y la concentración de clorofila *in situ* cercana a la superficie (primera profundidad óptica) (fig. 7). Aún con la inclusión de los datos superficiales de octubre, se obtuvo un alto coeficiente de determinación ($r^2 = 0.81$). Esto muestra que, a pesar del efecto de estos eventos Santa Ana sobre las propiedades bio-ópticas en la región, se conserva en un alto porcentaje la relación entre las razones de reflectancia (443/555) y la clorofila, la cual se utiliza para calcular la concentración de este pigmento a partir de la información captada por sensores remotos de color del océano. Esto sugiere que el error esperado al estimar la clorofila por sensores remotos (por ejemplo: SeaWiFS) en la región de IMECOCAL podría no aumentar substancialmente debido a condiciones anómalas similares a las medidas en este trabajo. Sin embargo, habría que evaluar el efecto que este tipo de eventos causa en el esparcimiento y atenuación de la radiancia espectral ascendente al pasar por la atmósfera, que es lo que finalmente mide el sensor a bordo del satélite.

Agradecimientos

Agradecemos a los oficiales y tripulación de los B/O *Francisco de Ulloa* del CICESE y *El Puma* de la UNAM por su apoyo durante los cruceros. Este trabajo tuvo financiamiento de los proyectos CONACYT G0045-T9607, G35326-T y Fase-1 Oceanografía Satélite (DAJJ002/750/00), del Departamento de Oceanografía Biológica del CICESE y de los programas 1354 y 1359 de la UABC. RSA tuvo beca de la Universidad de Colima, PROMEP (UCO-98/05/01) y un complemento del proyecto G35326-T. Esta es una contribución del programa IMECOCAL a la agenda científica del Consorcio del Este del

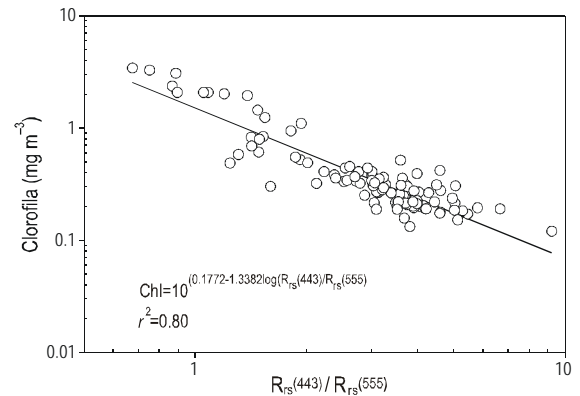


Figura 7. Relación de la reflectancia a 443 y 555 nm ($R_{rs(443)}/R_{rs(555)}$) con la concentración de clorofila *in situ* de la primera profundidad óptica de los cruceros frente a Baja California realizados durante 1999. La línea continua representa el mejor ajuste de los datos.

Figure 7. Relation between reflectance at 443 and 555 nm ($R_{rs(443)}/R_{rs(555)}$) and *in situ* chlorophyll concentration of the first optical depth for the cruises conducted off Baja California in 1999. The continuous line represents the best fit to the data.

optical depth) (fig. 7). A high coefficient of determination was obtained ($r^2 = 0.81$) even when the October surface data were included. This shows that despite the effect of these Santa Ana events on the bio-optical properties of the region, a high percentage of the relation between the reflectance ratios (443/555) and chlorophyll is conserved, which is used to calculate the concentration of this pigment based on the information obtained by ocean colour remote sensors. This suggests that the error expected when estimating chlorophyll by remote sensors (e.g., SeaWiFS) in the IMECOCAL region may not increase substantially because of anomalous conditions similar to those measured in this study. Nevertheless, it is necessary to determine the effect that this type of event has on the scattering and attenuation of the upward spectral radiance as it passes through the atmosphere, as this is what is measured by the sensor aboard the satellite.

Acknowledgements

We thank the officers and crew aboard the R/Vs *Francisco de Ulloa* (CICESE) and *El Puma* (UNAM) for their assistance during the cruises. This work was supported by CONACYT projects G0045-T9607, G35326-T and Phase-1 of Satellite Oceanography (DAJJ002/750/00), of the Department of Biological Oceanography at CICESE, and by UABC projects 1354 and 1359. The first author received a grant from the University of Colima, PROMEP (UCO-98/05/01), and complementary support to project G35326-T. This is a contribution of the IMECOCAL program to the scientific agenda of the Eastern Pacific Consortium (EPCOR) of the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI). Assistance was provided by E. Gil and R. Castro in obtaining wind data from the coastal station and by A. Martínez in obtaining Quikscat wind data.

Pacífico (EPCOR) del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI). E. Gil y R. Castro auxiliaron en la obtención de datos de viento de la estación costera. A. Martínez auxilió en la obtención de los datos de viento Quicksat. Agradecemos el apoyo de Sila Nájera Martínez, Víctor Macías y Javier Álvarez durante los cruceros IMECOCAL. John Wieland y Scott Storm auxiliaron en el análisis de las muestras de absorción. J.M. Domínguez y F. Ponce procesaron las figuras finales.

Referencias

- Bidigare, R.R., Ondrusek, M.E., Marrow, J.H. and Kiefer, D.A. (1990). *In vivo* absorption of algal pigment. *SPIE*, 1302: 290–302.
- Bouman, H.A., Platt, T., Kraay, G.W., Sathyendranath, S. and Irwin, B.D. (2000). Bio-optical properties of the subtropical North Atlantic. I. Vertical variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 200: 3–18.
- Bricaud, A., Babin, M., Morel, A. and Claustre, H. (1995). Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.*, 100: 13321–13332.
- Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K. and Claustre, H. (1998). Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *J. Geophys. Res.*, 103: 31033–31044.
- Castro, R., Parés-Sierra, A. y Marinone, S.G. (2003). Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la península de Baja California. *Cienc. Mar.*, 29(3): 275–281.
- Garget, A. and Marra, J. (2002). Effects of upper ocean physical processes (turbulence, advection, and air-sea interactions) on oceanic primary production. In: A.R. Robinson, J.J. McCarthy and B.J. Rothschild (eds.). *Biological-Physical Interactions in the Sea*. The Sea, Vol. 12, Chap. 2, pp. 19–49.
- Giles-Guzmán, A.D. and Álvarez-Borrego, S. (2000). Vertical attenuation coefficient of photosynthetically active radiation as a function of chlorophyll concentration and depth in case 1 waters. *Appl. Opt.*, 39: 1351–1358.
- Gordon, H.R. and Morel, A. (1983). Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. A Review. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Springer-Verlag, New York, 114 pp.
- Guerzoni, S., Molinaroli, E. and Chester, R. (1997). Saharan dust inputs to the western Mediterranean Sea: Depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications. *Deep-Sea Res.* II, 44: 631–654.
- Holm Hansen, O., Lorenzen, C.J., Holmes, R.W. and Strickland, J.D.H. (1965). Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 30: 3–15.
- We thank Sila Nájera-Martínez, Víctor Macías and Javier Álvarez for their help during the IMECOCAL cruises. John Wieland and Scott Storm assisted in the analysis of the absorption samples, and J.M. Domínguez and F. Ponce processed the final figures.

English translation by Christine Harris.

- Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N. and Ichimura, S. (1985). Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sci.*, 37: 634–642.
- Millán-Núñez, E., Sieracki, M.E., Millán-Núñez, R., Lara-Lara, J.R., Gaxiola-Castro, G. and Trees, C.C. (2004). Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res.* II, 51: 817–826.
- Milliff, R.F., Large, W.F., Morzel, J., Danabasoglu, G. and Chin, T.M. (1999). Ocean general circulation model sensitivity to forcing from scatterometer winds. *J. Geophys. Res.*, 104: 11337–11358.
- Mitchell, B.G. (1990). Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT). *Ocean Optics*, X: 137–148.
- Mitchell, B.G. and Kiefer, D.A. (1988). Chlorophyll *a* specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, 35: 639–663.
- Mitchell, B.G., Kahru, M., Wieland, J. and Malgorzata, S. (2003). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. In: J.L. Muller, G.S. Fargion and C.R. McClain (eds.), *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation*. Revision 4, Vol. IV. Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols. Chap. 4., pp. 39–64.
- Siegel, D.A. and Michaels, A.F. (1996). Quantification of non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: Implications for biogeochemistry and remote sensing. *Deep-Sea Res.* II, 43: 321–345.
- Sommers, W.T. (1978). LFM forecast variables related to Santa Ana wind occurrences. *Mon. Weather Rev.*, 106: 1307–1316.
- Sosik, H. and Mitchell, B.G. (1995). Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System. *Deep-Sea Res.*, 42: 1717–1748.
- Trasviña, A., Ortiz-Figueroa, M., Herrera, H., Cosío, M.A. and González, E. (2003). Santa Ana winds and upwelling filaments off northern Baja California. *Dyn. Atmos. Oceans*, 37: 113–129.
- Venrick, E.L. and Hayward, T.L. (1984). Determining chlorophyll on the 1984 CalCOFI surveys. *CalCOFI Rep.*, 25: 74–79.
- Yentsch, C.S. and Menzel, D.W. (1963). A method for the determination of phytoplankton, chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.*, 10: 221–231.