

## Empirical relations to estimate underwater PAR attenuation in San Quintín Bay using Secchi depth and horizontal sighting range

### Relaciones empíricas para estimar la atenuación subacuática de PAR en Bahía San Quintín utilizando la profundidad de Secchi y la distancia horizontal de desaparición de objetos

Martín A. Montes-Hugo<sup>1</sup>  
Saúl Álvarez-Borrego<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EOS Lab, College of Marine Science  
University of South Florida  
140 7th Ave S  
St. Petersburg, FL 33701, USA  
E-mail: mmontes@mail.usf.edu

<sup>2</sup> División de Oceanología  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)  
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, CP 22860, Baja California, México

*Recibido en septiembre de 2004; aceptado en agosto de 2005*

#### Abstract

Empirical relationships to estimate vertical attenuation coefficient of photosynthetically available radiation ( $K_{PAR}$ ) using Secchi disk, vertical black disk, and horizontal sighting ranges for San Quintín Bay, Baja California, were developed. Radiometric PAR profiles were used to calculate  $K_{PAR}$ . Vertical ( $Z_D$ ) and horizontal (HS) sighting ranges were measured with white (Secchi depth or  $Z_{SD}$ ,  $HS_W$ ) and black ( $Z_{BD}$ ,  $HS_B$ ) targets. The empirical power models  $K_{PAR} = 1.48 Z_{SD}^{-1.16}$ ,  $K_{PAR} = 0.87 Z_{BD}^{-1.52}$ ,  $K_{PAR} = 0.54 HS_W^{-0.65}$  and  $K_{PAR} = 0.53 HS_B^{-0.92}$  were developed for the corresponding relationships. The parameters of these models are not significantly different from those of models developed for Punta Banda Estuary, another Baja California lagoon, with the exception of the one for the  $K_{PAR}$ - $HS_W$  relationship. Also, parameters of the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  model for San Quintín Bay and Punta Banda Estuary are not significantly different from those developed for coastal waters near Santa Barbara, California. A set of general models is proposed that may apply to coastal water bodies of northwestern Baja California and southern California ( $K_{PAR} = 1.45 Z_{SD}^{-1.10}$ ,  $K_{PAR} = 0.92 Z_{BD}^{-1.45}$ , and  $K_{PAR} = 0.70 HS_B^{-1.10}$ ). While this approach may be universal, more data are needed to explore the variability of the parameters between different water bodies.

*Key words:* PAR attenuation, horizontal sighting range, Secchi disk, coastal lagoons, Baja California.

#### Resumen

Se desarrollaron relaciones empíricas para estimar el coeficiente vertical de atenuación de la radiación fotosintéticamente disponible ( $K_{PAR}$ ) basado en distancias de desaparición de objetos en la componente vertical ( $Z_D$ ) y horizontal (HS) en Bahía San Quintín, Baja California. Las mediciones visuales verticales se hicieron con discos blancos (profundidad del Secchi o  $Z_{SD}$ ) y negros ( $Z_{BD}$ ). Las mediciones horizontales consistieron en la detección de esferas blancas ( $HS_W$ ) y negras ( $HS_B$ ). Se generaron perfiles radiométricos de PAR para calcular  $K_{PAR}$ . Se midieron distancias verticales ( $Z_D$ ) y horizontales (HS) con objetos blancos y negros. Se desarrollaron los modelos empíricos potenciales  $K_{PAR} = 1.48 Z_{SD}^{-1.16}$ ,  $K_{PAR} = 0.87 Z_{BD}^{-1.52}$ ,  $K_{PAR} = 0.54 HS_W^{-0.65}$  y  $K_{PAR} = 0.53 HS_B^{-0.92}$  para las relaciones correspondientes. Los parámetros de estos modelos no son significativamente diferentes a los de modelos desarrollados para el Estero de Punta Banda, otra laguna de Baja California, con excepción del modelo para la relación  $K_{PAR}$ - $HS_W$ . Además, los parámetros para el modelo de la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  para Bahía San Quintín y el Estero de Punta Banda no son significativamente diferentes de los de un modelo desarrollado para aguas costeras cerca de Santa Bárbara, California. Se propone un conjunto de modelos que se puede aplicar a las aguas costeras del noroeste de Baja California y del sur de California ( $K_{PAR} = 1.45 Z_{SD}^{-1.10}$ ,  $K_{PAR} = 0.92 Z_{BD}^{-1.45}$  y  $K_{PAR} = 0.70 HS_B^{-1.10}$ ). Si bien este método puede tener aplicación universal, se requieren más datos para explorar la variabilidad de los parámetros para cuerpos de agua diferentes.

*Palabras clave:* atenuación de PAR, disco de Secchi, distancia horizontal de desaparición de objetos, lagunas costeras, Baja California.

## Introduction

Light appears as the major limiting variable of primary producers in most coastal water bodies. Autotrophic organisms are only able to use a portion of the electromagnetic radiation spectrum, 400–700 nm, which is known as photosynthetically available radiation (PAR). Temporal and spatial distribution of phytoplankton, macroalgae and seagrass in estuaries and coastal lagoons are greatly affected by PAR attenuation throughout the water column (Garza-Sánchez *et al.*, 2000; Cabello-Pasini *et al.*, 2003; Montes-Hugo and Álvarez-Borrego, 2003). PAR attenuation in coastal water bodies influences the larval settlement of many invertebrates, including bivalves of commercial interest (Baker and Mann, 1999), and the feeding success of various ichthyoplankton species (Breitbart, 1988). Water transparency is also a key parameter for monitoring water quality and can be used for detecting the anthropogenic impact due to dredging, erosion and eutrophication (Iannuzzi *et al.*, 1996; Ruffink, 1998; Wang *et al.*, 1999). Visual water clarity (measured as Secchi or black disk visibility) has been recognized as the relevant variable to measure in water-quality monitoring programs, instead of the more traditional suspended solid concentration or turbidity measurements. Contrary to common perception, visual clarity measurement is not particularly subjective and is more precise than turbidity measurement (Davies-Colley and Smith, 2001).

The underwater PAR attenuation can be quantified with the vertical attenuation coefficient ( $K_{PAR}$ ). PAR readings are often obtained with a light meter. The vertical attenuation coefficient is sometimes estimated with Secchi depth ( $Z_{SD}$ ) in which a white disk is lowered into the water until it disappears from view (Tyler, 1968; Holmes, 1970; Smith, 2001; Steel and Neuhausser, 2002). Coastal lagoons often have strong tidal currents and large shallow areas that make the vertical sighting observation ( $Z_D$ ) difficult. Secchi disk readings cannot be performed when  $Z_{SD}$  is greater than bottom depth ( $Z_B$ ). A possible solution to these methodological problems is presented by the horizontal sighting (HS) range or the maximum distance a target can be seen when viewed horizontally (Davies-Colley, 1988). In this case, the visual target can be positioned just below the water surface so as to avoid some of the drag effect of the water current.

Measurement of visual water clarity involves attenuation of contrast of an image with respect to background. According to Preisendorfer (1986),  $Z_{SD} = [\ln(C_0/C_T)/(c + K_{PAR})]$ , where  $C_0$  is the Secchi disk contrast at depth zero,  $C_T$  is the threshold contrast where the maximum visual range occurs, and  $c$  is the beam attenuation coefficient, equal to the sum of the total absorption and scattering coefficients ( $c = a + b$ ). The value of  $C_0$  varies with water reflectance—the ratio of upwelling to downwelling irradiance (Davies-Colley and Vant, 1988). Reflectance is an apparent optical property and varies with the ambient light field, or angular distribution of light, and the optical components of water-organic detritus, inorganic suspended matter, phytoplankton, and gelbstoff (Kirk, 1994).

## Introducción

La luz es la principal limitante para los productores primarios en la mayoría de los cuerpos de agua costeros. Los organismos autótrofos sólo pueden utilizar la porción del espectro de radiación electromagnética (400–700 nm) conocida como radiación fotosintéticamente disponible (PAR, por sus siglas en inglés). Tanto la distribución temporal como la espacial del fitoplancton, las macroalgas y los pastos marinos en estuarios y lagunas costeras se ven fuertemente afectadas por la atenuación de PAR a lo largo de la columna de agua (Garza-Sánchez *et al.*, 2000; Cabello-Pasini *et al.*, 2003; Montes-Hugo y Álvarez-Borrego, 2003). La atenuación de PAR en cuerpos de agua costeros influye sobre el asentamiento de larvas de muchos invertebrados, incluyendo bivalvos de interés comercial (Baker y Mann, 1999), así como en el éxito de la alimentación de varias especies de ictioplancton (Breitbart, 1988). La transparencia del agua es otro parámetro clave para monitorear la calidad de ésta y puede ser usada para detectar el impacto antropogénico debido a dragado, erosión y eutroficación (Iannuzzi *et al.*, 1996; Ruffink, 1998; Wang *et al.*, 1999). La claridad del agua (medida como la visibilidad del disco de Secchi o disco negro) ha sido reconocida como la variable relevante a medir en programas de monitoreo de la calidad del agua, en vez de la más tradicional medición de concentración de sólidos suspendidos o turbidez. Contrariamente a lo que se cree, la medición de la claridad del agua no es particularmente subjetiva y es más precisa que la medición de turbidez (Davies-Colley y Smith, 2001).

La atenuación subacuática de PAR puede ser cuantificada utilizando el coeficiente de atenuación vertical ( $K_{PAR}$ ). Las lecturas de PAR frecuentemente se obtienen con un medidor de luz. En ocasiones se estima  $K_{PAR}$  mediante la profundidad de Secchi ( $Z_{SD}$ ), para lo que se sumerge un disco blanco en el agua hasta que desaparece de la vista (Tyler, 1968; Holmes, 1970; Smith, 2001; Steel y Neuhausser, 2002). Las lagunas costeras comúnmente presentan fuertes corrientes de marea y extensas zonas someras que dificultan la observación de la distancia vertical ( $Z_D$ ). No es posible llevar a cabo mediciones con el disco de Secchi cuando  $Z_{SD}$  es mayor que la profundidad del fondo ( $Z_B$ ). Una posible solución a estos problemas metodológicos es la distancia horizontal de desaparición de objetos (*horizontal sighting range*: HS), esto es, la máxima distancia a la que puede verse un objeto cuando se observa horizontalmente (Davies-Colley, 1988). En este caso, el objeto visual puede ser colocado justo debajo de la superficie del agua para así evitar algo del efecto de arrastre de la corriente de agua.

La medición de la claridad del agua incluye la atenuación del contraste de una imagen con respecto al fondo. Según Preisendorfer (1986),  $Z_{SD} = [\ln(C_0/C_T)/(c + K_{PAR})]$ , donde  $C_0$  es el contraste del disco de Secchi a una profundidad cero,  $C_T$  es el umbral de contraste donde se encuentra el intervalo máximo visual y  $c$  es el coeficiente de atenuación del haz, igual a la suma de los coeficientes totales de absorción y dispersión ( $c = a + b$ ). El valor de  $C_0$  varía con la reflectancia del agua—la

Because the inherent contrast of the Secchi disk varies between waters, it is not possible to use the Secchi depth in any simple way to precisely estimate the optical properties  $c$  or  $K_{\text{PAR}}$ , or even their sum,  $c + K_{\text{PAR}}$  (Preisendorfer, 1986). Many studies have attempted to estimate  $K_{\text{PAR}}$  from visual water clarity measurements with a Secchi disk, using the simple inverse relationship  $K_{\text{PAR}} = \text{constant}/Z_{\text{SD}}$ ; however, Davies-Colley and Vant (1988) have shown that the product  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  varies appreciably between waters.

In contrast to the bright Secchi disk, an all-black target (black body) reflects no light and thus is seen as a silhouette. Visibility depends only on the attenuation coefficients for the water and is independent of the ambient light field. The maximal vertical distance of visual extinction for a black body is  $Z_{\text{BD}} = [\ln(-1/C_T)/(c + K_{\text{PAR}})]$ , and for horizontal sighting of a black target it is  $\text{HS}_B = \ln(-1/C_T)/c$  (Davies-Colley, 1988).

Holmes (1970) performed radiometric measurements and Secchi disk readings in coastal waters near Santa Barbara, California, to obtain a simple  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  relationship ( $K_{\text{PAR}} = 1.44 Z_{\text{SD}}^{-1}$ ). Montes-Hugo *et al.* (2003) developed empirical power models for the  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{D}}$  and  $K_{\text{PAR}} \cdot \text{HS}$  relationships for Punta Banda Estuary, a coastal lagoon of the southern California Current System, ~100 km south of the US-Mexico border. Montes-Hugo *et al.* (2003) indicated that although their approach seems to be valid in other shallow coastal water bodies, more data are needed to explore the variability of the parameters between different water bodies. Nevertheless, it is interesting to note that their result for the  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  relationship for Punta Banda Estuary is not significantly different from that of Holmes (1970). To explore the possibility that the parameters of Montes-Hugo *et al.*'s (2003) empirical models may apply to other coastal water bodies of northwestern Baja California, simultaneous HS,  $Z_{\text{D}}$  and  $K_{\text{PAR}}$  measurements were performed in San Quintín Bay, a shallow coastal lagoon (mean depth ~ 2 m) 200 km south of Punta Banda Estuary. The underlying hypothesis is that these coastal water bodies have similar water reflectance ranges. The final objective was to explore the possibility of "regional"  $K_{\text{PAR}} \cdot \text{HS}$  and  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{D}}$  empirical relationships for shallow coastal waters of northwestern Baja California and southern California. Since reflectance range is large in these coastal waters (Montes-Hugo *et al.*, 2003), some scatter of data points is expected causing relatively low correlation coefficients of the regression models. Thus, the objective of this work is not to build models to predict instantaneous local values of  $K_{\text{PAR}}$ , but rather models that can be used with several visibility readings (at least ten) covering a certain region and time period. This would allow an estimate of a more representative and precise average  $K_{\text{PAR}}$  that may be used to characterize the light regime for that region and period.

## Material and methods

### Study area

San Quintín Bay is a coastal lagoon in the southern California Current System, located ~300 km south of the US-

razón de irradiancia ascendente a irradiancia descendente (Davies-Colley y Vant, 1988). La reflectancia es una propiedad óptica aparente y fluctúa con el campo de luz ambiental, o distribución angular de luz, así como con los componentes ópticos de agua-detrito orgánico, material inorgánico suspendido, fitoplancton y sustancias amarillas (Kirk, 1994). En vista de que el contraste inherente al disco de Secchi varía entre aguas, no es posible usar la profundidad de Secchi de forma sencilla para estimar con precisión las propiedades ópticas  $c$  o  $K_{\text{PAR}}$ , o inclusive su suma:  $c + K_{\text{PAR}}$  (Preisendorfer, 1986). Varios estudios han intentado estimar  $K_{\text{PAR}}$  a partir de mediciones de la claridad visual del agua con el disco de Secchi utilizando la simple relación inversa  $K_{\text{PAR}} = \text{constante}/Z_{\text{SD}}$ ; sin embargo, Davies-Colley y Vant (1988) demostraron que el producto  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  varía apreciablemente entre aguas.

Al contrario del disco de Secchi, un objeto completamente negro (cuerpo negro) no refleja luz y por tanto se ve como una silueta. La visibilidad sólo depende de los coeficientes de atenuación para el agua y es independiente del campo de luz ambiental. La máxima distancia vertical de extinción visual para un cuerpo negro es  $Z_{\text{BD}} = [\ln(-1/C_T)/(c + K_{\text{PAR}})]$ , y para el HS de un objeto negro es  $\text{HS}_B = \ln(-1/C_T)/c$  (Davies-Colley, 1988).

Holmes (1970) realizó mediciones radiométricas y lecturas del disco de Secchi en aguas costeras cerca de Santa Bárbara, California, para obtener una relación simple  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  ( $K_{\text{PAR}} = 1.44 Z_{\text{SD}}^{-1}$ ). Montes-Hugo *et al.* (2003) desarrollaron modelos empíricos potenciales para las relaciones  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{D}}$  y  $K_{\text{PAR}} \cdot \text{HS}$  para el Estero de Punta Banda, una laguna costera de la región sur de la Corriente de California ~100 km al sur de la frontera de México con Estados Unidos. Montes-Hugo *et al.* (2003) indicaron que, aunque su planteamiento parece ser válido para otros cuerpos de agua someros, se requieren más datos para explorar la variabilidad de los parámetros entre diferentes cuerpos de agua. Aun así, es interesante notar que su resultado para la relación  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{SD}}$  para el Estero de Punta Banda no es significativamente diferente del obtenido por Holmes (1970). Para explorar la posibilidad de que los parámetros de los modelos empíricos de Montes-Hugo *et al.* (2003) sean aplicables a otros cuerpos de agua costeros en el noroeste de Baja California se llevaron a cabo mediciones simultáneas de HS,  $Z_{\text{D}}$  y  $K_{\text{PAR}}$  en Bahía San Quintín, una laguna somera (profundidad media ~ 2 m) localizada 200 km al sur del Estero de Punta Banda. La hipótesis básica es que estos cuerpos de agua costeros tienen un intervalo de reflectancia del agua similar. El objetivo final de este trabajo fue examinar la posibilidad de tener relaciones empíricas  $K_{\text{PAR}} \cdot \text{HS}$  y  $K_{\text{PAR}} \cdot Z_{\text{D}}$  "regionales" para las aguas someras de la costa noroeste de Baja California y el sur de California. En vista de que el intervalo de reflectancia es grande en estas aguas costeras (Montes-Hugo *et al.*, 2003), es de esperarse cierta dispersión en los datos, produciendo coeficientes relativamente bajos de los modelos de regresión. Por tanto, este trabajo no pretende construir modelos para predecir valores locales instantáneos de  $K_{\text{PAR}}$ , sino más bien modelos que puedan utilizarse con varias lecturas (al

Mexico border (California) and ~200 km south of Ensenada, Baja California (fig. 1). According to Kjerfve's (1994) classification, it is a restricted lagoon, with a permanent single connection to the ocean and tides that co-oscillate with tides in the coastal ocean with little reduction of amplitude inside the lagoon. The lagoon is a 49-km<sup>2</sup> Y-shaped embayment. It is characterized by extensive intertidal flats, shallow subtidal shoals, and narrow tidal channels (Barnard, 1962). The lagoon is quite shallow, about 85% of the eastern arm lying in depths of 1.8 m or less at mean high water. Depths greater than this occur in channels that are strongly differentiated from the shallow bay flats by sharp depth changes. Maximum water depth is at the main channel and near the mouth (~15 m). The mouth, most of the western arm, and the Y base are characterized by sandy sediments. The rest of the lagoon, including the eastern arm and the inner part of the western arm, has a predominantly clay-silt sediment type (Gorsline and Stewart, 1962).

Vertical distribution of water properties is generally homogeneous due to turbulence caused by tidal currents (Martori-Oxamendi, 1989). Also, tidal currents produce large local changes of water properties, including optical properties (Álvarez-Borrego, 2004). Average  $K_{PAR}$  values (main channel and shallows) are highest in the western arm and lowest at the mouth (Montes-Hugo, 2001). High turbidity in the western arm is caused by the effect of waves on the shallow bathymetry due to the wind action. Barnard (1962) reported Secchi disk readings of 2–2.7 m for the mouth, 1.2–1.5 m for the eastern arm, and ~1 m for the western arm. Osorno-Velázquez (2000) reported 3–3.5 m for the eastern arm and 1–3 m for the western arm. These Secchi disk readings are very low and imply a strong light attenuation, in some cases up to 50% in the first 0.5 m depth (Álvarez-Borrego, 2004). Fresh-water input to the bay is not considerable, and it is mainly derived from the San Simón stream during the rainy season (November to March) (Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

#### Field measurements

Measurements were carried out during 1999 and 2003. Underwater PAR was measured with a profiling PAR irradiator PNF-300 (precision:  $\pm 1\%$ , as quoted by the manufacturer, Biospherical Instr. Inc., Los Angeles, California) during the 1999 surveys, and with a PAR irradiator LiCor (LI-190SB, LI-192SB) (precision:  $\pm 5\%$ , as quoted by the manufacturer, LiCor Inc., Lincoln, Nebraska) during 2003. For each sampling, an average PAR profile was generated with at least ten consecutive PAR measurements for each water depth. Average values of radiometric vertical PAR attenuation ( $K_{PAR}$ ) were calculated for the water column. For the calculation of these averages we did not consider the first 0.5 m since PAR data for near-surface waters were noisy because of focusing and defocusing effects of small gravity waves. Linear regressions of  $\ln(\text{PAR}_{0.5m} \text{ PAR}_z^{-1})$  vs  $z$  were run to estimate the average of  $K_{PAR}$  as the slope (Lambert-Beer Law). Readings of

menos diez) de visibilidad cubriendo una cierta región y un determinado periodo de tiempo. Esto permitirá obtener un  $K_{PAR}$  promedio más representativo y preciso que se puede usar para caracterizar el régimen de luz para tal región y periodo.

## Material y métodos

### Área de estudio

Bahía San Quintín es una laguna costera en la región sur de la Corriente de California, localizada ~300 km al sur de la frontera de México con Estados Unidos (California) y ~200 km al sur de Ensenada, Baja California (fig. 1). Según la clasificación de Kjerfve (1994), ésta es una laguna restringida, con una sola conexión al océano y mareas que cooscilan con las mareas oceánicas con poca reducción de amplitud dentro de la laguna; cubre una superficie de 49 km<sup>2</sup> en forma de Y, y se caracteriza por extensas planicies intermareales, bajos submareales y estrechos canales de marea (Barnard, 1962). Es una laguna bastante somera, con profundidades de 1.8 m o menos durante la marea alta media en alrededor de 85% del brazo este. Existen en ella canales con profundidades mayores que se diferencian marcadamente de los bajos someros de la bahía por cambios abruptos de profundidad. La parte más profunda de la laguna (~15 m) se encuentra en el canal principal y cerca de la boca. La boca, la mayor parte del brazo oeste y la base de la Y presentan sedimentos arenosos, mientras que el resto de la laguna, incluyendo el brazo este y la parte interna del brazo oeste, tiene un tipo de sedimento predominantemente limo arcilloso (Gorsline y Stewart, 1962).

La distribución vertical de las propiedades del agua es generalmente homogénea debido a la turbulencia generada por las corrientes de marea (Martori-Oxamendi, 1989), las cuales también provocan grandes cambios locales en dichas propiedades, incluyendo en las ópticas (Álvarez-Borrego, 2004). Los valores medios de  $K_{PAR}$  (canal principal y bajos) son mayores en el brazo oeste y menores en la boca (Montes-Hugo, 2001). La elevada turbidez en el brazo oeste se genera por efecto del oleaje forzado por el viento sobre la batimetría somera. Barnard (1962) registró lecturas del disco de Secchi de 2 a 2.7 m en la boca, de 1.2 a 1.5 m en el brazo este y de ~1 m en el brazo oeste. Osorno-Velázquez (2000) obtuvo de 3 a 3.5 m en el brazo este y de 1 a 3 m en el brazo oeste. Estas lecturas son muy bajas e indican una fuerte atenuación de luz, en algunos casos de hasta 50%, en los primeros 0.5 m de profundidad (Álvarez-Borrego, 2004). El aporte de agua dulce a la bahía no es considerable y proviene principalmente del Arroyo San Simón durante la época de lluvias, de noviembre a marzo (Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

### Mediciones de campo

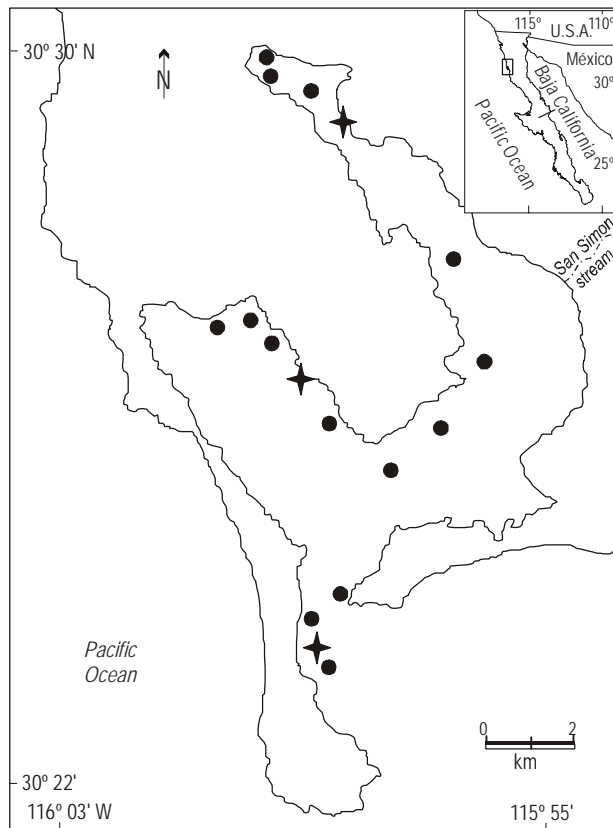
Las mediciones de PAR subacuáticas se realizaron en 1999 y 2003. Se utilizó un radiómetro PNF-300 (con precisión de  $\pm 1\%$ , según el fabricante Biospherical Instr. Inc., Los Angeles,

$Z_D$  were taken on the sunny side of the boat with a 30-cm diameter disk (white,  $Z_{SD}$ , and black,  $Z_{BD}$ ), and each value was corrected for the wire angle caused by tidal current drag. Care was taken to avoid the effect of surface glitter (Preisendorfer, 1986) using a small cloth cover close to the water surface and waiting ~30 s for eye accommodation to the water light field. For the 2003 readings, we employed a viewer box to minimize uncertainty on visual measurements due to sea-surface reflected light during the vertical sighting measurements, following Smith (2001). In some cases, errors for  $Z_D$  could have been caused by non-zero sighting angle and by light reflection from the bottom at very shallow locations. Both errors yield lower  $Z_D$  readings. Horizontal sighting range was measured ~0.3 m below the water surface with a horizontal sighting viewer assembled at CICESE. The basic design was similar to that of Davies-Colley (1988) and Steel and Neuhausser (2002). We used both black ( $HS_B$ ) and white ( $HS_W$ ) spheres as targets. The viewer was placed at a 90° angle with respect to the sun. To avoid sun glitter during HS measurements, a diving mask was attached to the observer's window. Distilled water was used between HS measurements to clean the windows. Special

California) durante los muestreos de 1999, y un radiómetro LiCor (LI-190SB, LI-192SB) (precisión de  $\pm 5\%$ , según LiCor Inc., Lincoln, Nebraska) en los de 2003. Durante cada muestreo se generó un perfil promedio de PAR con al menos diez mediciones consecutivas de PAR para cada profundidad. Se calcularon los valores medios de la atenuación vertical radiométrica de PAR ( $K_{PAR}$ ) para la columna de agua. Para el cálculo de éstos no se consideraron los primeros 0.5 m ya que los datos de PAR para aguas cerca de la superficie tenían ruido a causa de los efectos de enfoque y desenfoque de pequeñas ondas de gravedad. Se corrieron regresiones lineales de  $\ln(PAR_{0.5m} PAR_z^{-1})$  vs  $z$  para estimar tanto el promedio de  $K_{PAR}$  como la pendiente (Ley de Lambert-Beer). Se obtuvieron lecturas de  $Z_D$  del lado soleado de la embarcación usando un disco de 30 cm de diámetro (blanco,  $Z_{SD}$ , y negro,  $Z_{BD}$ ), y cada valor fue corregido para el ángulo del cable provocado por el arrastre de la corriente de marea. Se evitó el efecto de centelleo superficial (Preisendorfer, 1986) colocando una cubierta de tela pequeña cerca de la superficie del agua y esperando ~30 s para que el ojo se ajustara al campo de luz del agua. Para las lecturas tomadas en 2003, se adaptó una caja como visera para evitar el reflejo de la luz por objetos en la superficie durante las mediciones de  $Z_D$ , de acuerdo con Smith (2001). En algunos casos, los errores de  $Z_D$  podrían haber sido causados por el ángulo no nulo de observación y por el reflejo de la luz del fondo en sitios muy someros. Ambos errores reducen las lecturas de  $Z_D$ . El HS se midió ~0.3 m por debajo de la superficie del agua con un visor de distancia horizontal armado en el CICESE. Su diseño básico es similar a los de Davies-Colley (1988) y Steel y Neuhausser (2002). Se utilizaron esferas negras ( $HS_B$ ) y blancas ( $HS_W$ ) como objetos. El visor fue colocado a un ángulo de 90° con respecto al sol. Para evitar el centelleo solar durante las mediciones de HS, se colocó un visor de buceo en la ventana del observador. Se usó agua destilada para limpiar las ventanas entre mediciones de HS. Se tuvo cuidado de eliminar las hojas de algas flotantes pegadas a los objetos visuales y sensores radiométricos.

Las mediciones se realizaron en diversos sitios de la laguna el 11 de marzo y 15 de julio de 1999, y el 1 de octubre de 2003 (fig. 1). Los muestreos coincidieron con las mareas vivas y cubrieron los bajos y el canal principal. Las mediciones de luz y las lecturas de claridad del agua fueron realizadas entre las 10:00 y 14:00 h por un observador, durante la marea alta. Para caracterizar la relación empírica  $K_{PAR}-Z_{SD}$  bajo diferentes condiciones de marea (flujo y reflujo), se realizaron mediciones cada 30 min en tres lugares fijos en el canal principal el 13 de julio de 1999 (la boca), así como el 29 (brazo oeste) y el 30 (brazo este) de septiembre de 2003 (fig. 1). El fondo del canal estaba libre de vegetación. Durante los muestreos de 1999 sólo se llevaron a cabo mediciones radiométricas y de la profundidad de Secchi, pero en los de 2003 también se realizaron lecturas de  $Z_{BD}$  y HS para determinar las relaciones  $K_{PAR}-Z_{BD}$ ,  $K_{PAR}-HS_W$  y  $K_{PAR}-HS_B$ .

Durante todas las observaciones se registraron la fracción de nubosidad visualmente estimada y la altura del oleaje. La



**Figure 1.** Study area. Sampling locations are in the main channel. Locations sampled during the spatial surveys are represented with solid circles. Time series were generated at the sites indicated with a star.

**Figura 1.** Área de estudio. Los sitios de muestreo se localizan en el canal principal. Los sitios ocupados durante los muestreos espaciales se indican con círculos negros. Se generaron series de tiempo en los sitios indicados con una estrella.

care was paid to eliminate floating seagrass leaves attached to visual targets and radiometric sensors.

Measurements were performed at different locations throughout the lagoon on 11 March and 15 July 1999, and 1 October 2003 (fig. 1). Sampling coincided with spring tides and covered shoals and main channel. Light measurements and visual water clarity readings were performed between 10:00 and 14:00 h by one observer, at high tide. In order to characterize the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  empirical relationship under different tidal conditions (flood and ebb flow), measurements were performed every 30 min at three fixed locations in the main channel on 13 July 1999 (the mouth), and on 29 (western arm) and 30 (eastern arm) September 2003 (fig. 1). The bottom of the channel was free of vegetation. During the 1999 studies, only radiometric and Secchi depth measurements were performed, but during the 2003 studies, readings for  $Z_{BD}$  and HS were also performed to determine the  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$ ,  $K_{PAR}$ - $HS_W$  and  $K_{PAR}$ - $HS_B$  relationships.

Visually estimated cloud fraction and wave height were recorded during all observations. Wind speed and direction were measured with a manual anemometer 2 m above the sea surface.

### Statistical analysis

The  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ ,  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$ ,  $K_{PAR}$ - $HS_W$ , and  $K_{PAR}$ - $HS_B$  relationships were evaluated with regression analysis (Sokal and Rohlf, 1995). Linear regression on log-transformed variables was applied to data from the 1999 and 2003 samplings to obtain power equations such as:

$$K_{PAR} = m Z_{SD}^{-n} \quad (1)$$

where  $m$  and  $n$  are the regression parameters. Regression parameters of  $K_{PAR}$ -HS and  $K_{PAR}$ - $Z_D$  relationships for different regions of the lagoon (eastern and western arms) and for different tidal conditions (ebb and flood flow) were compared. For each regression coefficient, the null hypothesis  $\mu = 0$  was tested (Student's  $t$ -test), where  $\mu$  is the estimated regression parameter ( $m$  or  $n$ ). To avoid errors due to bottom reflectance,  $Z_{SD} > 0.5 Z_B$  values were excluded from the fitted curves, following Tyler (1968). To explore the possibility of a common set of regression parameters for northwestern Baja California coastal lagoons, for each  $K_{PAR}$  empirical relationship additional comparisons of  $m$  and  $n$  for San Quintín Bay and Punta Banda Estuary (data from Montes-Hugo *et al.*, 2003) were carried out. Also, in the particular case of the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationship, comparisons of the  $m$  and  $n$  parameters for northwestern Baja California and southern California (data from Holmes, 1970) coastal waters were done (Student's  $t$ -test).

### Results

Sampling for this work was done during very dry non-El Niño years. There were no significant differences between

velocidad y dirección del viento fueron medidos 2 m por arriba de la superficie del mar con un anemómetro manual.

### Análisis estadístico

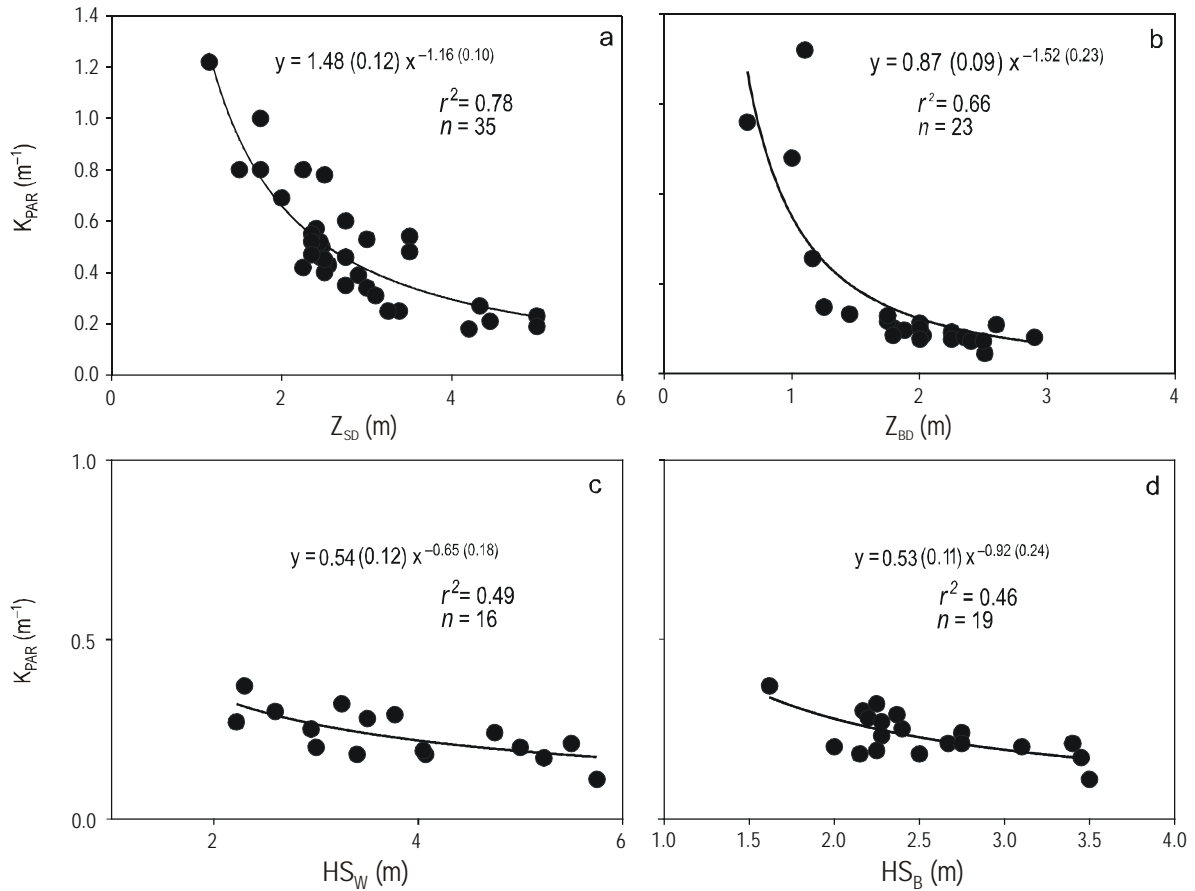
Se evaluaron las relaciones  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ ,  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$ ,  $K_{PAR}$ - $HS_W$  y  $K_{PAR}$ - $HS_B$  mediante un análisis de regresión (Sokal y Rohlf, 1995). Se aplicaron regresiones lineales a las variables transformadas a logaritmos de los datos de los muestreos de 1999 y 2003 para obtener ecuaciones potenciales del tipo:

$$K_{PAR} = m Z_{SD}^{-n} \quad (1)$$

donde  $m$  y  $n$  son los parámetros de regresión. Se compararon los parámetros de regresión de las relaciones  $K_{PAR}$ -HS y  $K_{PAR}$ - $Z_D$  para las diferentes zonas de la laguna (brazos este y oeste) y las diferentes condiciones de marea (flujo y refluo). Para cada coeficiente de regresión se probó la hipótesis nula  $\mu = 0$  (prueba  $t$  de Student), donde  $\mu$  es el parámetro de regresión estimado ( $m$  o  $n$ ). De acuerdo con Tyler (1968), para evitar errores a causa de la reflectancia se excluyeron los valores de  $Z_{SD} > 0.5 Z_B$  de las curvas ajustadas. Para explorar la posible existencia de un conjunto de parámetros de regresión común a las lagunas costeras del noroeste de Baja California, se realizaron comparaciones adicionales de  $m$  y  $n$  para cada relación empírica de  $K_{PAR}$  para Bahía San Quintín y el Estero de Punta Banda (datos de Montes-Hugo *et al.*, 2003). Asimismo, en el caso particular de la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ , también se realizaron comparaciones (prueba  $t$  de Student) de los parámetros  $m$  y  $n$  para las aguas costeras del noroeste de Baja California y el sur de California (datos de Holmes, 1970).

### Resultados

Los muestreos para este trabajo se realizaron durante años muy secos (no Niño). No se encontraron diferencias significativas entre los valores de los parámetros  $m$  y  $n$  para el modelo de  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  al comparar diferentes condiciones de marea o zonas de la laguna ( $P \gg 0.05$ , el intervalo de  $P$  fue de 0.76 a 0.95, prueba  $t$  de Student). Las mediciones utilizadas para obtener estas relaciones  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  fueron tomadas en 1999 y 2003, y en verano e invierno, sin ningún efecto significativo en función del tiempo sobre los parámetros de regresión. Esto sugiere que no hubo un efecto sistemático de las diferentes condiciones ambientales (i.e., nubosidad, oleaje, viento, flujo y refluo de marea, etc.) sobre  $m$  y  $n$ . Por tanto, los conjuntos de datos de 1999 y 2003 fueron combinados en una sola relación empírica (fig. 2a). El parámetro  $n$  estimado a partir de este modelo no fue significativamente diferente a uno ( $P > 0.05$ , prueba  $t$  de Student). Los valores mínimo y máximo de  $Z_{SD}$  fueron 1.15 m para el brazo oeste y 5 m para el brazo este, respectivamente. En general, el brazo oeste presentó un intervalo más amplio de valores de  $Z_{SD}$  que el brazo este. Los valores consistentemente menores de  $Z_{SD}$  en el brazo oeste coincidieron con vientos más



**Figure 2.** Empirical relations between optical measurements obtained for San Quintín Bay:  $K_{PAR}$  vs  $Z_D$  (a and b);  $K_{PAR}$  vs HS (c and d). The equations are the best fit to the complete data sets. Numbers within parentheses are the standard errors.

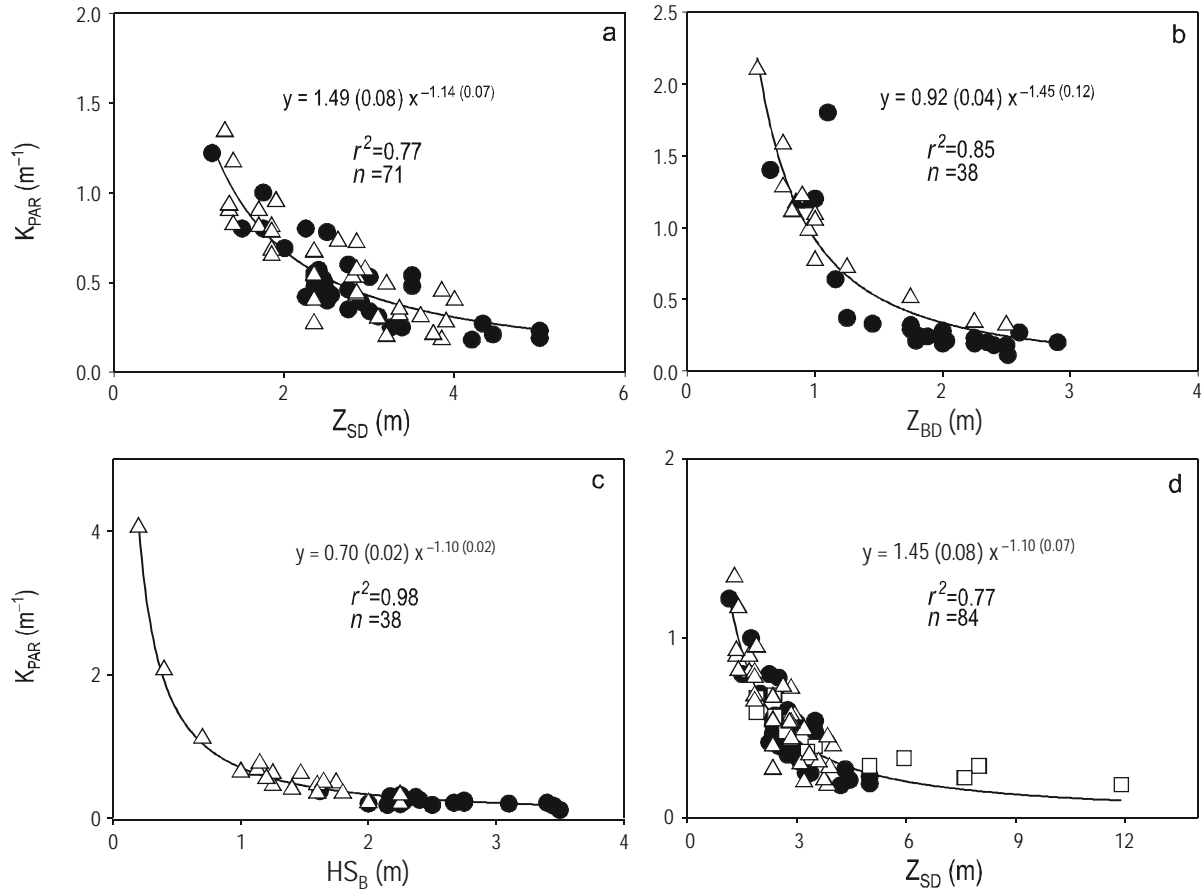
**Figura 2.** Relaciones empíricas entre las mediciones ópticas obtenidas para Bahía San Quintín:  $K_{PAR}$  vs.  $Z_D$  (a y b);  $K_{PAR}$  vs. HS (c y d). Las ecuaciones corresponden al mejor ajuste a los conjuntos de datos. Los números entre paréntesis son los errores estándar.

values of the regression parameters  $m$  and  $n$  for the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  model when comparing different tidal conditions or regions in the lagoon ( $P \gg 0.05$ ,  $P$  range was 0.76–0.95, Student's  $t$ -test). Measurements used to derive these  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationships were taken in 1999 and 2003, and in summer and winter, with no significant time-dependent effects on the regression parameters. This suggests that there was no systematic effect of different environmental conditions (i.e., cloudiness, waves, winds, flood flow, ebb flow, etc.) on  $m$  and  $n$ . Therefore, 1999 and 2003 data sets were pooled into a single empirical relation (fig. 2a). Parameter  $n$ , estimated from this model, was not significantly different from one ( $P > 0.05$ , Student's  $t$ -test). Minimum and maximum  $Z_{SD}$  values were 1.15 m for the western arm and 5 m for the eastern arm, respectively. In general, the western arm had a wider range of  $Z_{SD}$  values than the eastern arm. Consistently lower  $Z_{SD}$  readings in the western arm coincided with stronger winds (up to 9 m s<sup>-1</sup>) having a dominant NW direction (not illustrated).

Similar to Secchi depth, there were no significant differences between values of the regression parameters for the

fuerzas (de hasta 9 m s<sup>-1</sup>) con dirección predominante del noroeste (no ilustrado).

Al igual que para la profundidad de Secchi, no se encontraron diferencias significativas entre los valores de los parámetros de regresión para los modelos de  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  y  $K_{PAR}$ -HS al comparar condiciones de flujo y refluo de marea en ambos brazos de la laguna ( $P \gg 0.05$ , el intervalo de  $P$  fue de 0.72 a 0.85, prueba  $t$  de Student). Así, se utilizó el conjunto de datos de 2003 para desarrollar modelos generales de  $K_{PAR}$ . Al contrario que para la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ , para la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  resultó un exponente  $n$  significativamente diferente a uno (fig. 2b) ( $P < 0.05$ , prueba  $t$  de Student), y un parámetro  $m$  no significativamente diferente a uno ( $P > 0.05$ , prueba  $t$  de Student). Para las relaciones  $K_{PAR}$ -HS se obtuvo lo opuesto (fig. 2c, d). A pesar de que los valores de  $HS_B$  siempre fueron menores que los de  $HS_W$ , la dispersión de los datos (que resultó en errores estándar grandes de  $m$  y  $n$ ) y el reducido intervalo de  $K_{PAR}$  generaron modelos potenciales para las relaciones  $K_{PAR}$ -HS que no difieren estadísticamente entre sí (fig. 2c, d). No fue posible obtener datos de HS para los valores más altos de  $K_{PAR}$



**Figure 3.** Regional empirical relations between optical measurements obtained for San Quintín Bay and Punta Banda Estuary together (a, b and c) (data are from this work and from Montes-Hugo *et al.*, 2003), and for these two Baja California lagoons and Goleta Bay (d) (same data plus those from Holmes, 1970). Data from San Quintín are circles, those from Punta Banda Estuary are triangles, and those from Goleta Bay, California, are rectangles. Numbers within parentheses are the standard errors.

**Figura 3.** Relaciones empíricas regionales entre las mediciones ópticas obtenidas para Bahía San Quintín y el Estero de Punta Banda en conjunto (a, b y c) (los datos son de este trabajo y de Montes-Hugo *et al.*, 2003), así como para estas dos lagunas de Baja California y la Bahía de Goleta, California (d) (los mismos datos más los de Holmes, 1970). Los datos de San Quintín se indican con círculos, los de Punta Banda con triángulos y los de Goleta con rectángulos. Los números entre paréntesis son los errores estándar.

$K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  and  $K_{PAR}$ - $HS$  models when comparing ebb- and flood-flow conditions, or when comparing the two arms of the lagoon ( $P \gg 0.05$ ,  $p$  range was 0.72–0.85, Student's  $t$ -test). Thus, the whole 2003 data set was used to develop general  $K_{PAR}$  models. Contrary to the case for the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationship, the  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  relationship had an exponent  $n$  significantly different from one (fig. 2b) ( $P < 0.05$ , Student's  $t$ -test), and a parameter  $m$  not significantly different from one ( $p > 0.05$ , Student's  $t$ -test). The opposite resulted for the  $K_{PAR}$ - $HS$  relations (fig. 2c, d). Although  $HS_B$  values were always smaller than  $HS_W$  values, the scattering of data (which resulted in large standard errors for the parameters  $m$  and  $n$ ) and the small range for  $K_{PAR}$  produced power models for the  $K_{PAR}$ - $HS$  relationships that are not statistically different from each other (fig. 2c, d). Horizontal sighting range data could not be obtained when highest  $K_{PAR}$  values were produced because during the spatial

ya que el intenso oleaje durante el muestreo espacial impidió tomar medidas precisas desde la embarcación.

Se obtuvo una covariación lineal de 1:1 entre  $Z_D$  y  $HS$  al utilizar el objeto negro ( $Z_{BD} = 1.11 (0.36) HS_B - 0.32 (0.82)$ ), en la que los números entre paréntesis representan un error estándar,  $r^2 = 0.61$ ,  $n = 8$ ) (no ilustrado).

En vista de que los parámetros de regresión de los modelos de  $K_{PAR}$ - $Z_D$  y  $K_{PAR}$ - $HS_B$  para Bahía San Quintín no fueron significativamente diferentes a los registrados por Montes-Hugo *et al.* (2003) para el Estero de Punta Banda, se combinaron los dos conjuntos de datos (fig. 3a–c). Asimismo, los parámetros de la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  para estas dos lagunas no fueron significativamente diferentes a los estimados para la Bahía de Goleta, cerca de Santa Bárbara, California, con datos de Holmes (1970). Por tanto, se generó un solo modelo  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  para San Quintín, Punta Banda y Goleta (fig. 3d). Nótese que



survey there was intense wave activity and precise HS measurements from the boat were not possible.

A 1:1 linear covariation between vertical and horizontal sighting range was found when the black target was used ( $Z_{BD} = 1.11 (0.36) HS_B - 0.32 (0.82)$ , where numbers within parentheses are one standard error,  $r^2 = 0.61$ ,  $n = 8$ ) (not illustrated).

Since the regression parameters of the  $K_{PAR}-Z_D$  and  $K_{PAR}-HS_B$  models for San Quintín Bay were not statistically different from those reported by Montes-Hugo *et al.* (2003) for Punta Banda Estuary, the two sets of data were pooled together (fig. 3a–c). Likewise, parameters of the  $K_{PAR}-Z_{SD}$  relationship for these two lagoons were not significantly different from those estimated for Goleta Bay, near Santa Barbara, California, with data from Holmes (1970). Thus, a single model was derived for the  $K_{PAR}-Z_{SD}$  relationship for San Quintín Bay, Punta Banda Estuary and Goleta Bay (fig. 3d). Note that Punta Banda Estuary is characterized by a broader range of  $K_{PAR}$  values than those of San Quintín Bay and Goleta Bay (fig. 3).

## Discussion

The product  $K_{PAR}-Z_{SD}$  for San Quintín Bay (this work), Punta Banda Estuary (Montes-Hugo *et al.*, 2003) and Goleta Bay (Holmes, 1970) varied from 0.76 to 1.95, from 0.64 to 2.05, and from 1.12 to 2.31, respectively. Since the product  $K_{PAR}-Z_{SD}$  is influenced by water reflectance, these results suggest that southern California coastal waters have a water reflectance range similar to that of coastal lagoons of north-western Baja California.

Holmes' (1970), Montes-Hugo *et al.*'s (2003), and our results show that there is a large scattering of the  $K_{PAR}-Z_{SD}$  data, which indicates a relatively large water reflectance range in these lagoons. Nevertheless, our  $K_{PAR}-Z_{SD}$  regression model may be an appropriate tool to estimate  $K_{PAR}$  if, as mentioned above, average  $Z_{SD}$  from several readings are used instead of single instantaneous local measurements (the larger the number of readings the smaller the standard error). Furthermore, to attain a high precision for a local instantaneous optical measurement may not be relevant for coastal lagoons. Cabello-Pasini *et al.* (2002) reported that light attenuation in Punta Banda Estuary and adjacent coastal waters increased six-fold as a result of sediment resuspension caused by storms in the area. There is a large variability of water properties in coastal lagoons due to patchiness and tidal currents, and gravity waves cause patchiness and temporal variation in sediment concentration (Millán-Núñez *et al.*, 1982). Such variability invalidates the usefulness of instantaneous local measurements and leaves us representative averages as an acceptable alternative. Montes-Hugo and Álvarez-Borrego (2003) proposed representative averages of optical properties and chlorophyll concentration for large areas of Punta Banda Estuary and for large periods (i.e., seasons) for the purpose of monitoring phytoplankton production. Averages of optical properties and other variables over large areas and periods minimize errors. Our algorithms may provide very precise representative averages of

los valores de  $K_{PAR}$  para el Estero de Punta Banda presentan un intervalo mayor que los de las bahías de San Quintín y Goleta (fig. 3).

## Discusión

El producto  $K_{PAR}-Z_{SD}$  para Bahía San Quintín (este trabajo), el Estero de Punta Banda (Montes-Hugo *et al.*, 2003) y la Bahía de Goleta (Holmes, 1970) varió de 0.76 a 1.95, de 0.64 a 2.05 y de 1.12 a 2.31, respectivamente. Dado que el producto  $K_{PAR}-Z_{SD}$  es influenciado por la reflectancia del agua, estos resultados sugieren que las aguas costeras del sur de California tienen un intervalo de reflectancia del agua similar al de las lagunas costeras del noroeste de Baja California.

Los resultados de Holmes (1970), Montes-Hugo *et al.* (2003) y este trabajo muestran que existe gran dispersión de los datos de  $K_{PAR}-Z_{SD}$ , lo que indica un amplio intervalo de reflectancia del agua en estas lagunas. No obstante, nuestro modelo de regresión para  $K_{PAR}-Z_{SD}$  puede ser una herramienta adecuada para estimar  $K_{PAR}$  si, como se mencionó anteriormente, si se utilizan los valores medios de  $Z_{SD}$  de varias lecturas en vez de sólo mediciones locales instantáneas (entre más grande el número de lecturas, menor será el error estándar). Además, para las lagunas costeras podría no ser relevante lograr una gran precisión en las mediciones ópticas locales instantáneas. Cabello-Pasini *et al.* (2002) indicaron que la atenuación de la luz en el Estero de Punta Banda y aguas costeras adyacentes incrementa seis veces como resultado de la resuspensión de sedimento generada por tormentas en la región. Existe gran variabilidad de las propiedades del agua en las lagunas costeras debido a heterogeneidades naturales, y las corrientes de marea, y ondas de gravedad que generan discontinuidad y variación temporal en la concentración de sedimento (Millán-Núñez *et al.*, 1982). Tal variabilidad hace inútiles las mediciones locales instantáneas y convierte a los promedios representativos en alternativas aceptables. Montes-Hugo y Álvarez-Borrego (2003) propusieron utilizar medias representativas de las propiedades ópticas y la concentración de clorofila de grandes áreas del Estero de Punta Banda y por periodos largos (i.e., estaciones del año) para el monitoreo de la producción de fitoplancton. Al utilizar promedios de propiedades ópticas y otras variables obtenidos por zonas y en periodos grandes los errores se minimizan. Nuestros algoritmos pueden proveer promedios representativos pero muy precisos de  $K_{PAR}$  para zonas grandes dentro de Bahía San Quintín cuando se toman un buen número de lecturas. Asimismo, el carácter general de la relación  $K_{PAR}-Z_{SD}$  para las aguas costeras del noroeste de Baja California y el sur de California puede representar una manera de convertir datos históricos del disco de Secchi en estimaciones más útiles de  $K_{PAR}$ . Esto podría ser de utilidad en la determinación de patrones históricos y tendencias de largo plazo en la transparencia a la luz.

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la capacidad para predecir profundidades en la parte media y el

$K_{PAR}$  for large areas within San Quintín Bay when a high number of readings are performed. Furthermore, the generality of the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationship for coastal waters of northwestern Baja California and southern California may provide a means to convert historical Secchi disk data into more useful estimates of  $K_{PAR}$ . This could be useful for determining historical patterns and long-term trends in light transparency.

A sensitivity analysis was performed to test the ability to predict depths at the middle and bottom of the euphotic zone (10% and 1% light levels) given the uncertainties in the parameters  $m$  and  $n$ . For example, for a  $K_{PAR} = 0.5 \text{ m}^{-1}$ , local instantaneous visual clarity readings would yield estimates of these two depths with errors of  $\pm 1.3$  and  $2.7 \text{ m}$  with the Secchi depth,  $3.1$  and  $6.1 \text{ m}$  with the black disk ( $Z_{BD}$ ),  $1.5$  and  $3.1 \text{ m}$  with the white sphere ( $HS_W$ ), and  $1.2$  and  $2.4$  with the black sphere ( $HS_B$ ). But, with several readings the uncertainties of the averages would decrease with the number of readings. With the exception of the black disk, even the errors of single instantaneous measurements are acceptable given the fact that plants attached to the bottom suffer changes of water column depth of up to  $>2 \text{ m}$  with the tides, and phytoplankton have large vertical excursions due to turbulence. In coastal lagoons, bottom depth is often smaller than the 10% light depth.

Unlike  $HS_B$ , parameters  $m$  and  $n$  of the  $K_{PAR}$ - $HS_W$  relationship for San Quintín Bay were significantly different from those for Punta Banda Estuary. Possibly, different sediment type in the two lagoons could explain these differences. As a whole, Punta Banda Estuary has finer sediments (up to  $6.7 \text{ phi}$ ) than San Quintín Bay (up to  $1.5 \text{ phi}$ ) (Gorsline and Stewart, 1962). Silt and clay particles ( $<63 \mu\text{m}$ ) scatter light more strongly than sand particles ( $>63 \mu\text{m}$ ) producing smaller contrast (Davies-Colley *et al.*, 1993), and this could cause lower  $HS_W$  values for Punta Banda Estuary than for San Quintín Bay for the same  $K_{PAR}$  values. We could expect that changes of sediment type would also have a significant effect on the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationship; however, we were not able to detect such sediment influence possibly because the contribution of finer sediments was more important at very shallow depths where  $Z_{SD}$  data could not be generated.

Empirical  $K_{PAR}$  algorithms were developed in this work for non-El Niño years. Higher fresh-water input during El Niño years would increase PAR attenuation in these coastal lagoons mainly because of a higher input of humic substances and suspended particles, but possibly the same parameters  $m$  and  $n$  could apply. Given that we can use general  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ ,  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$ , and  $K_{PAR}$ - $HS_B$  empirical curves to estimate  $K_{PAR}$  for San Quintín Bay and Punta Banda Estuary from visibility readings, we propose extending the validity of these algorithms to other shallow water bodies of the Pacific coast of the Baja California peninsula since climatic and hydrologic characteristics are very comparable. Since the  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  relationship obtained in this work may also apply to southern California coastal bodies, the  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  and  $K_{PAR}$ - $HS_B$  empirical models obtained for Baja California lagoons may also be valid for southern California

fondo de la zona eufótica (niveles de luz de 10% y 1%) dadas las incertidumbres en los parámetros  $m$  y  $n$ . Por ejemplo, para  $K_{PAR} = 0.5 \text{ m}^{-1}$ , las lecturas locales instantáneas de claridad visual arrojarían, para estas dos profundidades, estimaciones con errores de  $\pm 1.3$  y  $2.7 \text{ m}$  con la profundidad de Secchi, de  $3.1$  y  $6.1 \text{ m}$  con el disco negro ( $Z_{BD}$ ), de  $1.5$  y  $3.1 \text{ m}$  con la esfera blanca ( $HS_W$ ), y de  $1.2$  y  $2.4$  con la esfera negra ( $HS_B$ ). No obstante, con varias lecturas las incertidumbres de los promedios disminuirían con el número de lecturas. Con excepción del disco negro, aún los errores en las mediciones instantáneas individuales son aceptables ya que las plantas adheridas al fondo están sujetas a cambios en la profundidad de la columna de agua de hasta  $>2 \text{ m}$  con las mareas, y el fitoplancton experimenta grandes excursiones verticales a causa de la turbulencia. En las lagunas costeras, la profundidad del fondo frecuentemente es menor que 10% de la profundidad de la luz.

A diferencia de  $HS_B$ , los parámetros  $m$  y  $n$  de la relación  $K_{PAR}$ - $HS_W$  de Bahía San Quintín fueron significativamente diferentes a los del Estero de Punta Banda. Una posible explicación para estas diferencias radica en que estas dos lagunas presentan distinto tipo de sedimentos. En general, el Estero de Punta Banda posee sedimentos más finos (hasta  $6.7 \text{ phi}$ ) que Bahía San Quintín (hasta  $1.5 \text{ phi}$ ) (Gorsline y Stewart, 1962; Torres-Moye, 1992). Las partículas de limo y arcilla ( $<63 \mu\text{m}$ ) dispersan más luz que las partículas de arena ( $>63 \mu\text{m}$ ), produciendo un menor contraste (Davies-Colley *et al.*, 1993), lo que podría generar valores de  $HS_W$  menores para el Estero de Punta Banda que para Bahía San Quintín con los mismos valores de  $K_{PAR}$ . Se podría esperar que los cambios en el tipo de sedimento también afecten significativamente la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ ; sin embargo, no fue posible detectar tal influencia del sedimento posiblemente debido a que la contribución de sedimentos más finos fue más importante a profundidades muy someras donde no fue posible generar datos de  $Z_{SD}$ .

En este trabajo se desarrollaron algoritmos empíricos de  $K_{PAR}$  para años en que no se presenta El Niño. Una mayor contribución de agua dulce durante años de El Niño incrementaría la atenuación de PAR en estas lagunas costeras debido al mayor aporte de sustancias húmicas y partículas suspendidas, aunque aún podrían ser pertinentes los mismos parámetros  $m$  y  $n$ . Dado que se pueden utilizar curvas empíricas generales  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$ ,  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  y  $K_{PAR}$ - $HS_B$  para estimar  $K_{PAR}$  para Bahía San Quintín y el Estero de Punta Banda a partir de lecturas de visibilidad, proponemos que se extienda la validez de estos algoritmos a otros cuerpos de agua someros de la costa Pacífica de la Península de Baja California ya que sus características hidrológicas y climáticas son muy comparables. Dado que la relación  $K_{PAR}$ - $Z_{SD}$  obtenida en este trabajo puede aplicarse también a los cuerpos de agua del sur de California, es probable que los modelos empíricos  $K_{PAR}$ - $Z_{BD}$  y  $K_{PAR}$ - $HS_B$  obtenidos para Baja California también sean válidos para los sistemas costeros de esa región; sin embargo, se requieren más datos para verificar esta posibilidad.

coastal systems; however, more data are needed to test this possibility.

### Acknowledgements

We thank Violeta Loya-Núñez for her collaboration during the field work. Silvia Ibarra (CICESE) kindly facilitated the LiCor PAR irradiator. Aquaculture specialists Vicente Guerrero and Alfonso Aguirre supported the logistics of boat and pier surveys. We are very grateful to three anonymous reviewers for their positive criticisms that helped to improve the manuscript significantly.

### References

- Álvarez-Borrego, S. (2004). Nutrient and phytoplankton dynamics in a coastal lagoon strongly affected by coastal upwelling. *Cienc. Mar.*, 30(1A): 1–19.
- Baker, P.K. and Mann, R. (1999). Response of settling oyster larvae, *Crassostrea virginica*, to specific portions of the visible light spectrum. *J. Shellfish Res.*, 17: 1081–1084.
- Barnard, L. (1962). Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960–61. *General. Pac. Nat.*, 3: 249–274.
- Breitburg, D.L. (1988). Effects of turbidity on prey consumption by striped bass larvae. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 117.
- Cabello-Pasini, A., Lara-Turrent, C. and Zimmerman, R.C. (2002). Effect of storms on photosynthesis, carbohydrate content and survival of eelgrass populations from a coastal lagoon and the adjacent open ocean. *Aquat. Bot.*, 74: 149–164.
- Cabello-Pasini, A., Muñiz-Salazar, R. and Ward, D.H. (2003). Annual variation of biomass and photosynthesis in *Zostera marina* at its southern end of distribution in the North Pacific. *Aquat. Bot.*, 76: 31–47.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (2003). Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintín Bay, Mexico. *Estuaries*, 26: 1220–1237.
- Davies-Colley, R.J. (1988). Measuring water clarity with a black disk. *Limnol. Oceanogr.*, 33: 616–623.
- Davies-Colley, R.J. and Vant, W.N. (1988). Estimation of optical properties of water from Secchi disk depths. *Water Resour. Bull.*, 24: 1329–1335.
- Davies-Colley, R.J. and Smith, D.G. (2001). Turbidity, suspended sediment and water clarity: A review. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37: 1–17.
- Davies-Colley, R.J., Vant, W.N. and Smith, D.G. (1993). *Colour and Clarity of Natural Waters: Science and Management of Optical Water Clarity*. Ellis Horwood, New York, 310 pp.
- Garza-Sánchez, F., Zertuche-González, J.A. and Chapman, D.J. (2000). Effect of temperature and irradiance on the release, attachment and survival of spores of *Gracilaria pacifica* Abbott (Rhodophyta). *Bot. Mar.*, 43: 205–212.
- Gorsline, D.S. and Stewart, R.A. (1962). Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California. 1960–61. *Marine and Quaternary Geology. Pac. Nat.*, 3: 283–319.
- Holmes, R.W. (1970). The Secchi disk in turbid coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, 15: 688–694.
- Iannuzzi, T.J., Weinstein, M.P., Sellner, K.G. and Barret, J.G. (1996). Habitat disturbance and marine development: An assessment of ecological effects. I. Changes in primary production due to dredging and marine construction. *Estuaries*, 19: 257–271.
- Kirk, J.T.O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 509 pp.
- Kjerfve, B. (1994). Coastal lagoon processes. In: B. Kjerfve (ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1–15.
- Martori-Oxamendi, J.I. (1989). Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 110 pp.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Nelson, D. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 15: 317–335.
- Montes-Hugo, M. (2001). Modelización de la producción primaria fitoplanctónica en sistemas costeros. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 286 pp.
- Montes-Hugo, M. and Álvarez-Borrego, S. (2003). Spatial and temporal variation of photosynthetic parameters of phytoplankton in a sub-tropical coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 56: 517–525.
- Montes-Hugo, M.A., Álvarez-Borrego, S. and Giles-Guzmán, A.D. (2003). Horizontal sighting range and Secchi depth as estimators of underwater PAR attenuation in a coastal lagoon. *Estuaries*, 26: 1302–1309.
- Osorno-Velázquez, A.I. (2000). Impacto del cultivo de moluscos filtralimentadores en el fitoplancton y calidad del agua de Bahía San Quintín. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 48 pp.
- Preisendorfer, R.W. (1986). Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnol. Oceanogr.*, 31: 909–926.
- Ruffink, K. (1998). The persistence of anthropogenic turbidity plumes in a shallow water estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 47: 579–592.
- Smith, D.G. (2001). A protocol for standardizing Secchi disk measurements, including use of a viewer box. *J. Lake Reservoir Manage.*, 17: 90–96.
- Sokal, R.R. and Rohlf, F.J. (1995). *Biometry*. W.H. Freeman and Co., New York, 498 pp.
- Steel, E.A. and Neuhausser, S. (2002). A comparison of methods for measuring visual water clarity. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 21: 326–335.
- Tyler, J.E. (1968). The Secchi disc. *Limnol. Oceanogr.*, 13: 1–6.
- Wang, P.F., Martin, J. and Morrison, G. (1999). Water quality and eutrophication in Tampa Bay, Florida. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 49: 1–20.

### Agradecimientos

Agradecemos a Violeta Loya-Núñez su colaboración durante el trabajo de campo. Silvia Ibarra (CICESE) amablemente proporcionó el radiómetro LiCor. Los especialistas en acuicultura Vicente Guerrero y Alfonso Aguirre apoyaron la logística para los muestreos realizados con embarcación y desde el muelle. Agradecemos a los tres revisores anónimos sus críticas positivas que ayudaron a mejorar significativamente el manuscrito.

Traducido al español por Christine Harris.