

**THE DETERMINATION OF PAR LEVELS FROM ABSORPTION
COEFFICIENT PROFILES AT 490 nm**

**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE PAR A PARTIR DE PERFILES DEL
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN A 490 nm**

Andrew H. Barnard^{1*}
J. Ronald V. Zaneveld¹
W. Scott Pegau¹
James L. Mueller²
Helmut Maske³
Rubén Lara-Lara³
Saúl Álvarez-Borrego^{3,4}
Rafael Cervantes-Duarte⁵
Eduardo Valdez-Holguín⁶

¹ College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University
Corvallis, Oregon 97331, USA
* E-mail: abarnard@oce.orst.edu

² Center for Hydro-Optics and Remote Sensing, San Diego State University
San Diego, California 92120, USA

³ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Apartado postal 2732, Ensenada, CP 22800, Baja California, México

⁴ Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453, Ensenada, CP 22800, Baja California, México

⁵ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Apartado postal 592, La Paz, CP 23000, Baja California Sur, México

⁶ Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora
Apartado postal 1819, Hermosillo, CP 83000, Sonora, México

Recibido en abril de 1999; aceptado en julio de 1999

ABSTRACT

A model is presented that allows the prediction of percent photosynthetically available radiation (PAR) levels from measured profiles of the absorption coefficient at 490 nm in the Gulf of California. Percent PAR levels depend on the diffuse attenuation coefficients of the wavelengths that make up PAR, which in turn depend on the absorption coefficient. The emphasis is on developing a simple but robust

model that can be used by researchers to plan deployments of photosynthesis experiments in the Gulf of California.

Key words: percent light levels, absorption coefficient, optical depth, downwelling irradiance.

RESUMEN

Se presenta un modelo que permite predecir el porcentaje de los niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR) a partir de perfiles del coeficiente de absorción medidos a 490 nm en el Golfo de California. El porcentaje de los niveles de PAR depende de los coeficientes de atenuación difusa de las longitudes de onda que constituyen la PAR, que a su vez dependen del coeficiente de absorción. Se pretende desarrollar un modelo simple pero robusto que puede ser empleado por los investigadores para planear sus experimentos de fotosíntesis en el Golfo de California.

Palabras clave: porcentaje de niveles de luz, coeficiente de absorción, profundidad óptica, irradiancia descendente.

INTRODUCTION

In situ primary productivity measurements often require *a priori* knowledge of the structure of the underwater light field (i.e., percent light levels) for ^{14}C incubation bottle deployment. Typically, incubation bottles are deployed prior to sunrise in order to fully integrate over the light reaction cycle of photosynthesis. However, this poses a problem as the vertical structure of the solar photosynthetically available radiation (PAR) can only be measured during the daytime. Furthermore, radiometric measurements, such as PAR, are difficult to interpret near the surface due to waves, ship reflections, varying sky conditions, etc. It is thus useful to have a model for the prediction of percent PAR levels for the next daylight period using measurements made prior to sunrise.

Recent instrument development efforts (Moore *et al.*, 1992; Zaneveld *et al.*, 1992, 1994) have made the *in situ* measurement of the inherent optical properties (IOP) such as the spectral absorption and attenuation coefficients routine. As the IOP are not dependent on the ambient daylight field, and since these parameters can now be measured accurately *in situ*, it is of interest to determine if nighttime measurements of the IOP can be used to predict daytime PAR

INTRODUCCIÓN

Las mediciones *in situ* de productividad primaria a menudo requieren conocimiento *a priori* de la estructura del campo de luz submarino (i.e., porcentaje de los niveles de luz) para la colocación de botellas de incubación de ^{14}C . Generalmente, las botellas de incubación se colocan antes del amanecer para integrar completamente el ciclo de reacción de luz de fotosíntesis. Sin embargo, esto presenta un problema debido a que la estructura vertical de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) solar solamente se puede medir durante el día. Además, las mediciones radiométricas como PAR son difíciles de interpretar cerca de la superficie, debido a las olas, el reflejo de los barcos, las condiciones variables del cielo, etc. Sería, entonces, útil tener un modelo para predecir el porcentaje de los niveles de PAR para el siguiente periodo de luz del día, a partir de mediciones tomadas antes del amanecer.

Avances recientes en el desarrollo de instrumentos (Moore *et al.*, 1992; Zaneveld *et al.*, 1992, 1994) han facilitado la medición *in situ* de las propiedades ópticas inherentes (POI), tales como los coeficientes espectrales de absorción y atenuación. Ya que las POI no dependen del campo de luz del día ambiental, y que estos parámetros ya se pueden medir con exactitud *in situ*, sería

levels. The connection between the IOP and the apparent optical properties (AOP) is via the equation of radiative transfer, which solves for the radiance distribution as a function of depth when the absorption and scattering properties of the seawater as well as the incident radiance distribution are known. In this paper we develop a method for the prediction of PAR based on the vertical profile of a single parameter, the absorption coefficient at 490 nm. We show that with knowledge of the absorption profile at 490 nm, profiles of PAR relative to surface PAR can be calculated with a high degree of accuracy.

The waters of the Gulf of California have been shown to contain various biogeographic regions (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994) based on a long time-series analysis of ocean color imagery. It is thus an ideal location to investigate how the biological parameters and the IOP are related to the underwater light field. As such, we have been participating in an internationally coordinated measurement program to study the biological and optical properties in the Gulf of California over the past five years. One of the parameters that is being routinely measured during this work in the Gulf of California is ^{14}C estimates of primary production. In this paper we examine the relationship between the absorption and PAR irradiance profiles and we derive a model to predict percent light levels based on the depth integrated absorption profile at a single wavelength. The intent of this work is to provide a method to estimate the daytime euphotic zone depth using nighttime measurements of the IOP in the Gulf of California.

METHODS

Three research cruises in the Gulf of California aboard the R/V *Francisco de Ulloa* were carried out during October and November 1996, March 1998 and November 1998. Stations were taken on the shelf near Guaymas,

interesante determinar si las mediciones nocturnas de las POI se pueden usar para predecir los niveles de PAR diurnos. La relación entre las POI y las propiedades ópticas aparentes (POA) es a través de la ecuación de transferencia radiativa, la cual resuelve para la distribución de radiancia como una función de profundidad cuando se conocen las propiedades de absorción y de esparcimiento del agua de mar, así como la distribución de radiancia incidente. En este trabajo, se desarrolla un método para predecir la PAR a partir del perfil vertical de un solo parámetro, el coeficiente de absorción a 490 nm. Se muestra que con el conocimiento del perfil de absorción a 490 nm, los perfiles de PAR relativos a PAR superficial se pueden calcular con un alto grado de exactitud.

Se ha mostrado que las aguas del Golfo de California presentan varias regiones biogeográficas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994), con base en el análisis de series de tiempo largas de imágenes de color del océano. Por tanto, es una localidad ideal para investigar cómo los parámetros biológicos y las POI se relacionan con el campo de luz submarino. Durante los pasados cinco años, hemos participado en un programa internacional de medición de las propiedades biológicas y ópticas del Golfo de California. Uno de los parámetros que se está midiendo rutinariamente en este estudio es la estimación de producción primaria con ^{14}C . Se examina la relación entre los perfiles de absorción e irradiancia PAR y se propone un modelo para predecir el porcentaje de los niveles de luz con base en el perfil de absorción integrado con la profundidad para una sola longitud de onda. El objetivo de este trabajo es proporcionar un método para estimar la profundidad de la zona eufótica diurna utilizando mediciones nocturnas de las POI en el Golfo de California.

MÉTODOS

Se realizaron tres cruceros de investigación en el Golfo de California a bordo del B/O *Francisco de Ulloa* durante octubre y noviembre de 1996,

Sonora, in the central gulf in deep water, on the sill just southwest of the central band of islands, and in the northwest section of the gulf (fig. 1).

The spectral absorption coefficients were determined by means of a WET Labs ac-9 meter mounted on a free-falling profiling platform. The details of this platform are described in Pegau *et al.* (1999). The ac-9 measures the absorption and the beam attenuation coefficients at nine wavelengths (412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 and 715 nm) at 6 Hz. The ac-9 was routinely calibrated in the field to a clean water standard. The absorption data were temperature and salinity corrected following the methods of Pegau *et al.* (1997) using CTD data collected simultaneously on the same profiling system. The absorption profile data were further corrected for scattering errors (Zaneveld *et al.*, 1994; Moore *et al.*, 1996). The spectral absorption coefficients of pure water given by Pope and Fry (1997) were added to the measured wavelengths as the ac-9 measures absorption in reference to water.

Profiles of the spectral downwelling irradiance (E_d) were determined by means of a Satlantic SeaWiFS Profiling Multichannel Radiometer (SPMR) sensor. The SPMR sensor measures the downwelling irradiance at seven wavelengths (412, 444, 490, 533, 556, 590 and 670 nm). PAR levels relative to the surface were obtained by spectral integration of the downwelling irradiance using the algorithm provided in the Satlantic software. In this analysis we extracted the above parameters at the 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 and 1 percent PAR levels relative to the surface. The absorption coefficients were determined using filters with a bandwidth of 10 nm and a central wavelength of 488 nm, whereas the irradiance was determined with a central wavelength of 490 nm. These are sufficiently similar, so that in this paper we use 490 nm for both data in the model development that follows.

marzo de 1998 y noviembre de 1998. Las estaciones se establecieron sobre la plataforma cerca de Guaymas, Sonora, en agua profunda en la parte central del golfo, sobre el umbral al sudoeste de la banda central de islas, y en la parte noroeste del golfo (fig. 1).

Los coeficientes de absorción espectral se determinaron con un medidor WETLabs ac-9, montado en una plataforma perfiladora de caída libre. La descripción de esta plataforma se encuentra en Pegau *et al.* (1999). El ac-9 mide los coeficientes de absorción y atenuación de haz en nueve longitudes de onda (412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 y 715 nm) a 6 Hz. Se calibró el ac-9 rutinariamente en el campo a un estándar de agua pura. Los datos de absorción se corrigieron por temperatura y salinidad de acuerdo con los métodos de Pegau *et al.* (1997), con datos de CTD recolectados simultáneamente con el mismo sistema perfilador. Los datos del perfil de absorción también se corrigieron por errores de esparcimiento (Zaneveld *et al.*, 1994; Moore *et al.*, 1996). Los coeficientes de absorción espectral de agua pura reportados por Pope y Fry (1997) se sumaron a las longitudes de onda medidas, ya que el ac-9 mide absorción con respecto al agua.

Los perfiles de irradiancia descendente espectral (E_d) se determinaron por medio de un sensor Satlantic SeaWiFS Profiling Multichannel Radiometer (SPMR). El sensor SPMR mide la irradiancia descendente en siete longitudes de onda (412, 444, 490, 533, 556, 590 y 670 nm). Los niveles de PAR relativos a la superficie se obtuvieron por integración espectral de la irradiancia descendente con el algoritmo proveído en el programa Satlantic. En este análisis, se extrajeron los parámetros anteriores en el 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 y 1 por ciento de los niveles de PAR relativos a la superficie. Los coeficientes de absorción se determinaron con filtros con un ancho de banda de 10 nm y una longitud de onda central de 488 nm, mientras que la irradiancia se determinó con una longitud de onda central de 490 nm. Estas longitudes de onda son suficientemente similares y, por tanto, se usó 490 nm para ambos datos en

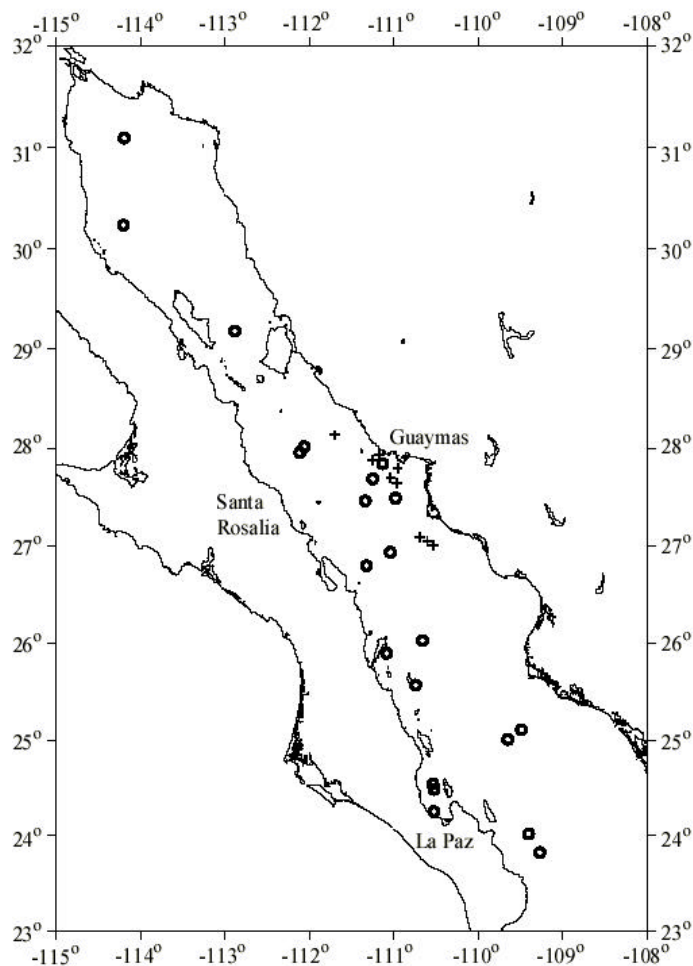


Figure 1. Sampling locations in the Gulf of California for the three cruises used in this study. Circles indicate the “clear” water stations and plus signs the “green” water locations.

Figura 1. Localidades de muestreo en el Golfo de California de los tres cruceros realizados en este estudio. Los círculos indican las estaciones de agua “clara” y las cruces, las localidades de agua “verde”.

Profiles of IOP and AOP were typically made at the same location within an hour of each other. A total of 30 nearly coincident profiles of the total absorption coefficient and irradiance were collected during these three cruises in the Gulf of California.

el desarrollo del modelo que se describe a continuación.

Los perfiles de POI y POA se hicieron en la misma localidad con una hora de diferencia entre sí. Se recolectaron un total de 30 perfiles casi coincidentes del coeficiente de absorción total e irradiancia durante los tres cruceros en el golfo.

Semi-analytical model and results

The integration over solid angle of the equation of radiative transfer in plane parallel media without internal sources and inelastic scattering is given by Gershun's equation:

$$\frac{dE(\lambda, z)}{dz} = -a(\lambda, z)E_o(\lambda, z), \tag{1}$$

$$\frac{1}{E(\lambda, z)} \frac{dE(\lambda, z)}{dz} = -a(\lambda, z) \frac{E_o(\lambda, z)}{E(\lambda, z)} = -\frac{a(\lambda, z)}{\mu(\lambda, z)}, \text{ where}$$

$$\mu(\lambda, z) = \frac{E(\lambda, z)}{E_o(\lambda, z)} \text{ and } K(\lambda, z) = -\frac{dE(\lambda, z)}{E(\lambda, z)dz} = \frac{a(\lambda, z)}{\mu(\lambda, z)}$$

where λ is the wavelength in nm, $E(\lambda, z)$ is the net plane irradiance, $E_o(\lambda, z)$ is the scalar irradiance, $a(\lambda, z)$ is the total absorption coefficient, $K(\lambda, z)$ is the diffuse attenuation coefficient of the irradiance, and $\mu(\lambda, z)$ is the average cosine of the light field (Jerlov, 1976). The parameter that is typically measured by *in situ* radiometers such as the Satlantic SPMR is the downwelling irradiance, $E_d(\lambda, z)$. Using $E_d(\lambda, z)$ rather than $E(\lambda, z)$ is in error by approximately the irradiance reflectance ($R = E_u/E_d$), since $E = E_d(1-R)$. Since the reflectance R is typically a few percent, only a small error is made when using E_d rather than E in equation 1. We can thus state that for a given wavelength:

Modelo semianalítico y resultados

La integración sobre ángulo sólido de la ecuación de transferencia radiativa en medios paralelos planos sin fuentes internas y esparcimiento no elástica se resuelve con la ecuación de Gershun:

donde λ es la longitud de onda en nm, $E(\lambda, z)$ es la irradiancia neta, $E_o(\lambda, z)$ es la irradiancia escalar, $a(\lambda, z)$ es el coeficiente de absorción total, $K(\lambda, z)$ es el coeficiente de atenuación difusa de la irradiancia, y $\mu(\lambda, z)$ es el coseno promedio del campo de luz (Jerlov, 1976). El parámetro que típicamente se mide con radiómetros *in situ*, como el SPMR Satlantic, es la irradiancia descendente, $E_d(\lambda, z)$. Utilizando $E_d(\lambda, z)$ en vez de $E(\lambda, z)$ es en error por aproximadamente la reflectancia de la irradiancia ($R = E_u/E_d$), ya que $E = E_d(1-R)$. Debido a que la reflectancia R es típicamente unos cuantos por ciento, solamente se tiene un error pequeño cuando se usa E_d en vez de E en la ecuación 1. Por tanto, se puede decir que para una longitud de onda dada:

$$E_d(\lambda, z) \cong E_d(\lambda, 0) e^{-\int_0^z \frac{a(\lambda, z') dz'}{\mu(\lambda, z')}} \tag{2}$$

For measurements of photosynthesis, it is useful to estimate the percent PAR as a fraction of the surface (0⁻) value, to provide an estimate of the amount of light available for photosynthesis as a function of depth. PAR is defined as the integration of irradiance in the visible

Para la medición de la fotosíntesis, es conveniente estimar el porcentaje de PAR como una fracción del valor superficial (0⁻), para proveer una estimación de la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis como una función de la profundidad. PAR se define como la integración

region, i.e., 400 to 700 nm. Scalar irradiance (E_o) is the best measurement of the availability of light for photosynthesis, as phytoplankton cells can potentially collect photons regardless of the direction of the incoming light, assuming that the cells are randomly oriented. The percent PAR light levels can thus be obtained using:

$$\frac{E_o^{PAR}(z)}{E_o^{PAR}(0^-)} * 100\% = \frac{\int_{400}^{700} E_o(\lambda, z) d\lambda}{\int_{400}^{700} E_o(\lambda, 0^-) d\lambda} * 100\% \quad (3)$$

However, as noted above, the parameter that is typically measured is E_d . As scalar irradiance includes the light from all directions, by definition scalar irradiance must always be greater than the downwelling irradiance. The difference between the scalar and downwelling irradiance at a single wavelength is dependent on the ratio of the scattering and absorption coefficients. As the scattering to absorption ratio increases, the light field becomes more diffuse and the difference between the scalar and downwelling irradiance increases. In terms of PAR, Monte Carlo simulations by Kirk (1994) showed that the downwelling irradiance estimates of PAR are up to 20% lower than scalar PAR in clear oceanic waters. Thus, using downwelling irradiance instead of the scalar irradiance may underestimate the PAR optical depths by as much as 20% in equation 3.

From the above equations, we may define optical depth (τ_E) in the following manner:

$$E(\lambda, z) = E(\lambda, 0^-) e^{-\int_0^z K(\lambda, z') dz'} = E(\lambda, 0^-) e^{-\tau_E(\lambda, z)}, \text{ so that} \quad (4)$$

$$\tau_E(\lambda, z) = \int_0^z \frac{a(\lambda, z')}{\mu(\lambda, z')} dz' = -\ln \frac{E_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, 0)}$$

de irradiancia en la región visible, i.e., 400 a 700 nm. La irradiancia escalar (E_o) es la mejor medida de la disponibilidad de luz para la fotosíntesis, ya que las células de fitoplancton pueden potencialmente recolectar fotones independientemente de la dirección de la luz entrante, suponiendo que las células están orientadas aleatoriamente. El porcentaje de los niveles de luz de PAR se puede obtener con:

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, E_d es el parámetro que típicamente se mide. Como la irradiancia escalar incluye la luz proveniente de todas las direcciones, por definición la irradiancia escalar siempre debe ser mayor que la irradiancia descendente. La diferencia entre la irradiancia escalar y descendente en una sola longitud de onda depende de la razón de los coeficientes de esparcimiento y absorción. Conforme aumenta la razón de esparcimiento a absorción, el campo de luz se hace más difuso y la diferencia entre la irradiancia escalar y descendente aumenta. En términos de PAR, las simulaciones de Monte Carlo por Kirk (1994) mostraron que las estimaciones de irradiancia descendente de PAR son de hasta 20% menos que la PAR escalar en aguas oceánicas claras. Por tanto, el uso de irradiancia descendente en vez de irradiancia escalar puede subestimar la profundidad óptica de PAR por hasta 20% en la ecuación 3.

Con las ecuaciones anteriores, se puede definir la profundidad óptica (τ_E) de la siguiente manera:

for a single wavelength and

para una sola longitud de onda y

$$\tau_{PAR}(z) = -\ln \frac{E_d^{PAR}(z)}{E_d^{PAR}(0^-)} \quad (5)$$

for E_d^{PAR} . As we will demonstrate, it is possible to determine percent PAR levels from the downwelling irradiance measurements at a single wavelength. Here we use 490 nm since it is near the wavelength of maximum penetration into clear natural waters and is often used in remote sensing observations.

Figure 2 shows the relationship between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ for the 30 profiles used in this study. Upon initial inspection of this relationship, we hypothesized that there are two separate relationships for $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ based on the water type. Figure 3a shows the spectrum of downwelling irradiance transmittance from the surface to 10 m for the 30 profiles obtained in the Gulf of California. Two spectral shapes are apparent: one where the transmittance is relatively high and constant in the blue and green portions of the spectrum, and one where the transmittance is lower and where the transmittance is less in the blue than in the green portion of the spectrum. This is more clearly seen in figure 3b, where the spectrum of the irradiance transmittance in the surface layer has been normalized by the transmittance at 556 nm. These two spectral shapes are due to the composition of the materials in the water, with those that are relatively clear containing lower concentrations of absorbing materials.

The different water type classification can also be clearly seen in the surface average spectra of the absorption coefficient. Figure 4 shows the spectra of the total absorption coefficient for the 30 profiles averaged over the surface waters (1–10 m). The two different water types are clearly evident in the absorption spectra: one type with low absorption coefficients in the blue and green portions of the spectrum,

para E_d^{PAR} . Como se mostrará, es posible determinar el porcentaje de los niveles de PAR con las mediciones de irradiancia descendente en una sola longitud de onda. Aquí se usó 490 nm porque está cerca de la longitud de onda de máxima penetración en aguas naturales claras y se usa a menudo en las observaciones de sensores remotos.

La figura 2 muestra la relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ para los 30 perfiles utilizados en este estudio. En la inspección inicial de esta relación, se planteó la hipótesis de que hay dos relaciones separadas para $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ basadas en el tipo de agua. La figura 3a muestra el espectro de transmitancia de irradiancia descendente desde la superficie hasta 10 m para los 30 perfiles obtenidos para el Golfo de California. Se aprecian dos formas espectrales: una donde la transmitancia es relativamente alta y constante en las porciones azul y verde del espectro, y otra donde la transmitancia es más baja y menor en la porción azul que en la porción verde del espectro. Esto se ve más claramente en la figure 3b, donde el espectro de la transmitancia de irradiancia en la capa superficial ha sido normalizado por la transmitancia a 556 nm. Estas dos formas espectrales se deben a la composición de los materiales en el agua, con aquellos que son relativamente claros con concentraciones menores de material absorbente.

La clasificación de los diferentes tipos de agua también se aprecia claramente en el espectro promedio superficial del coeficiente de absorción. La figura 4 muestra el espectro del coeficiente de absorción total para los 30 perfiles promediados sobre las aguas superficiales (1–10 m). Los dos tipos diferentes de agua se evidencian claramente en el espectro de absorción: uno con coeficientes de absorción bajos en las porciones azul y verde del espectro y otro con valores mayores y con

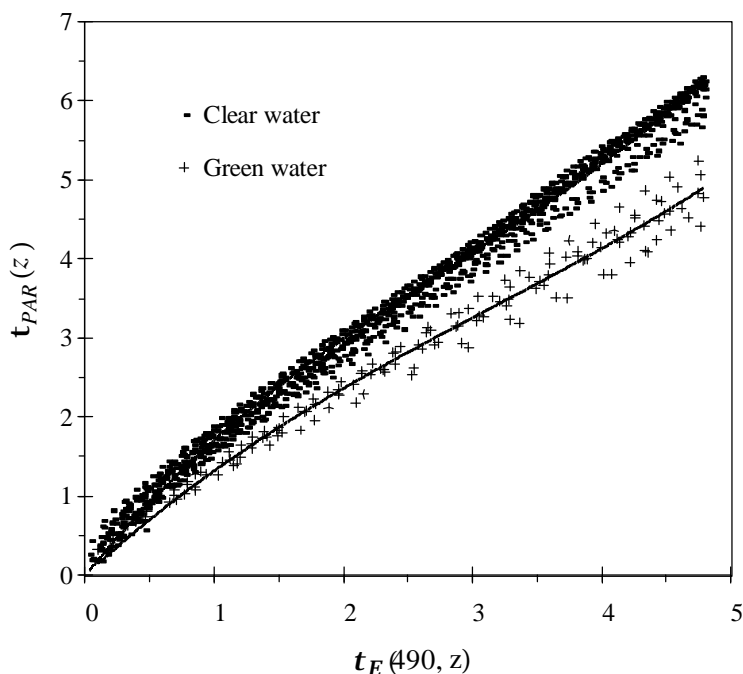


Figure 2. $\tau_{PAR}(z)$ versus $\tau_E(490, z)$ for the 30 profiles taken in the Gulf of California. “Clear” water stations are shown as dashes and plus symbols mark the “green” water stations. Also plotted are the 3rd order polynomial fits (see equations 6a and 6b).

Figura 2. $\tau_{PAR}(z)$ versus $\tau_E(490, z)$ para los 30 perfiles obtenidos en el Golfo de California. Las estaciones de agua “clara” se indican con guiones y las estaciones de agua “verde” con cruces. También se incluyen los ajustes polinomiales de 3er orden (ver ecuaciones 6a y 6b).

and one type with higher values and more steeply sloped absorption spectra in the blue and green regions.

Jerlov (1976) has classically defined these two water types as oceanic and coastal. Strong coastal upwelling events in the Gulf of California can advect coastal waters well into the center of the gulf, where clearer waters are usually present. As clear oceanic waters can often be found near the coast in the gulf, and as coastal water types can be advected well offshore to the center of the gulf, we chose to rename these two classifications based on the irradiance transmittance and absorption coefficient spectral shapes. Thus, we have chosen to describe Jerlov’s oceanic water

espectros de absorción más empinados en las regiones azul y verde.

Jerlov (1976) definió clásicamente estos dos tipos de agua como oceánica y costera. Eventos fuertes de surgencia costera en el Golfo de California pueden advectar aguas costeras hacia el centro del golfo, donde normalmente hay agua más clara. Debido a que aguas oceánicas claras frecuentemente se encuentran cerca de la costa en el golfo, y como aguas costeras pueden ser advectadas fuera de la costa hacia el centro del golfo, se decidió renombrar estas dos clasificaciones con base en la transmitancia de irradiancia y las formas espectrales del coeficiente de absorción. Así, se nombró al agua oceánica de Jerlov como

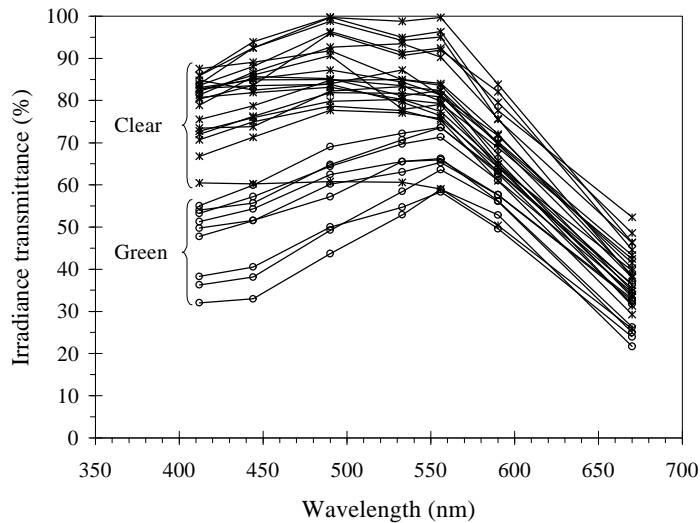


Figure 3a. Percent downwelling irradiance transmittance spectra from the surface to approximately 10 m for the 30 profiles taken in the Gulf of California. Also shown are the spectra identified as “clear” and “green” water types.

Figura 3a. Porcentaje de los espectros de transmitancia de irradiancia descendente desde la superficie hasta aproximadamente 10 m para los 30 perfiles obtenidos en el Golfo de California. También se incluyen los espectros identificados como agua “clara” y “verde”.

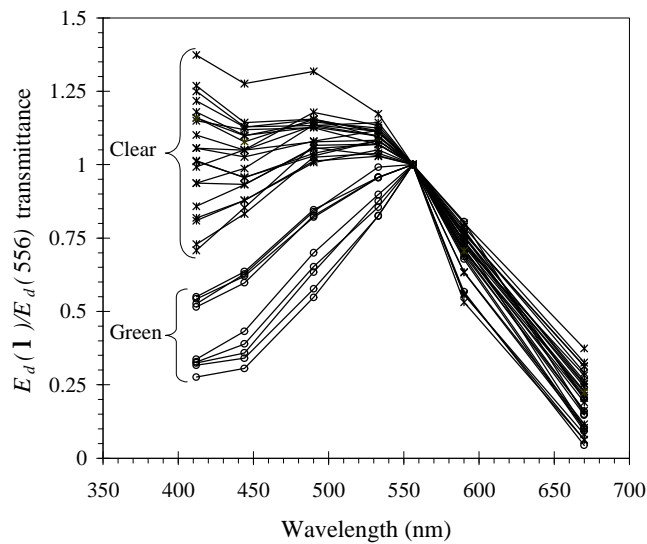


Figure 3b. Same as for figure 3a where the irradiance transmittance has been normalized by the 556 nm value.

Figura 3b. Igual que la figura 3a donde la transmitancia de irradiancia ha sido normalizada con el valor de 556 nm.

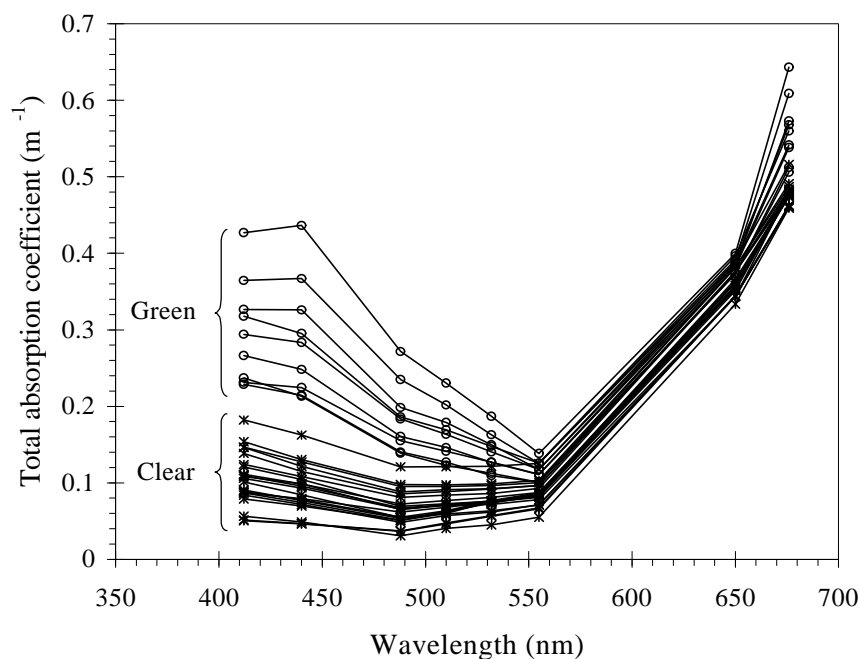


Figure 4. Total absorption coefficient spectra averaged over the first 10 m for the 30 profiles taken in the Gulf of California. Also shown are the spectra identified as “clear” and “green” water types.

Figura 4. Los espectros del coeficiente de absorción total promediados a lo largo de los primeros 10 m para los 30 perfiles obtenidos en el Golfo de California. También se incluyen los espectros identificados como agua “clara” y “verde”.

types as “clear” and the coastal water types as “green” to better delineate water type based on a fundamental property as opposed to one based on location. Of the 30 profiles taken in the Gulf of California, 9 profiles were classified as “green” water type and 21 were “clear” water type. Most of the “green” stations are located near Guaymas and were collected during the 1996 cruise (see fig. 1).

Dividing our data set into “clear” and “green” water types, figure 2 shows the relationship between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ for each water type. Zaneveld *et al.* (1993) have examined the relationship between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ for data obtained in the North Pacific. In that paper a piecewise linear relationship was deduced, based on three ranges of optical depth at 490 nm. They found that the rapid attenuation of the longer

“clara” y al agua costera como “verde” para delinear mejor el tipo de agua con base en una propiedad fundamental en vez de una basada en localidad. De los 30 perfiles obtenidos para el Golfo de California, nueve perfiles se clasificaron como agua “verde” y 21 como agua “clara”. La mayoría de las estaciones “verdes” se localizaron cerca de Guaymas y se muestrearon durante el crucero de 1996 (ver fig. 1).

Al dividir el conjunto de datos en agua “clara” y “verde”, la figura 2 muestra la relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ para cada tipo de agua. Zaneveld *et al.* (1993) han examinado la relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ de datos obtenidos en el Pacífico Norte. Ellos dedujeron una relación lineal por secciones, con base en tres intervalos de profundidad óptica a 490 nm. Encontraron que la atenuación rápida de las longitudes de onda más

Table 1. Piecewise linear relationship between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ reproduced from Zaneveld *et al.* (1993) and for the 30 stations taken in the Gulf of California divided into the “clear” and “green” water types defined in the text.

Tabla 1. La relación lineal por sección entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ tomada de Zaneveld *et al.* (1993) y para las 30 estaciones en el Golfo de California, divididas en agua “clara” y “verde” como se define en el texto.

| | Slope | Y intercept | r^2 |
|---------------------------------------|--------|-------------|--------|
| To 1 optical depth | | | |
| Zaneveld <i>et al.</i> (1993) | 1.6243 | 0.0085 | 0.952 |
| “Clear” water type | 1.5285 | 0.2537 | 0.9119 |
| “Green” water type | 1.1069 | 0.2401 | 0.9604 |
| From 1 to 2.3 optical depths | | | |
| Zaneveld <i>et al.</i> (1993) | 1.2144 | 0.3175 | 0.935 |
| “Clear” water type | 1.1836 | 0.5666 | 0.9265 |
| “Green” water type | 0.9973 | 0.3421 | 0.9358 |
| From 2.3 to 4.6 optical depths | | | |
| Zaneveld <i>et al.</i> (1993) | 1.1676 | 0.3570 | 0.973 |
| “Clear” water type | 1.1622 | 0.5969 | 0.9656 |
| “Green” water type | 0.8998 | 0.5551 | 0.9001 |

wavelengths (due to the strong absorption dependency of water in the red) causes an offset in the relationship of $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ when $\tau_E(490, z) > 0.2$. For a comparison with their data set we also fit our data to the same linear relationships (table 1). We found a close correspondence between the relationships given by Zaneveld *et al.* (1993) and our “clear” water data set, the slopes being within 0.1 of each other. Note that the offsets of the “clear” water type are greater than those given by Zaneveld *et al.* (1993). Offsets are due to the composition of the water itself, since more strongly absorbed wavelengths are removed in the upper layers and the weakly absorbed wavelengths penetrate further. The offset difference between our results and Zaneveld *et al.* (1993) indicates that

largas (debido a la dependencia fuerte de absorción del agua en el rojo) causa un desplazamiento en la relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ cuando $\tau_E(490, z) > 0.2$. Para propósitos de comparación, también se ajustó nuestro conjunto de datos a las mismas relaciones lineales (tabla 1). Se encontró una correspondencia estrecha entre las relaciones de Zaneveld *et al.* (1993) y nuestro conjunto de datos de agua “clara”, con pendientes a 0.1 entre sí. Note que los desplazamientos del agua “clara” son mayores que los reportados por Zaneveld *et al.* (1993). Los desplazamientos se deben a la composición de la misma agua, ya que las longitudes de onda más fuertemente absorbidas son removidas en las capas superiores y las longitudes de onda más débilmente absorbidas penetran más. La diferencia de desplazamiento entre nuestros

the background concentrations are different between the two locations. Note that the “green” water relationship slopes are very different from the “clear” water slopes and those given by Zaneveld *et al.* (1993). This is a consequence of the different absorption spectra as shown in figure 4. The higher absorption coefficient values for the “green” water types attenuate the downwelling light more rapidly, so that differences in the spectral shape of the absorption ultimately cause changes in the PAR integration of irradiance.

While the piecewise model for both the “clear” and “green” water cases fits well, we chose to model the relationship using a 3rd order polynomial with a zero intercept based on two factors. First, we expect that both $\tau_E(490, z)$ and $\tau_{PAR}(z)$ shown in figure 2 should be equal to zero at $z = 0$, and thus that the intercept should be zero; second, that the ratio of $\tau_E(490, z)$ to $\tau_{PAR}(z)$ is continuous with depth. Using a polynomial to model this relationship allows for the variation in the above relationship to change with depth. The models we used are:

$$\tau_{PAR}(z) = 0.039\tau_E^3(490, z) - 0.331\tau_E^2(490, z) + 2.003\tau_E(490, z) \quad (6a)$$

for the “clear” water case and

$$\tau_{PAR}(z) = 0.022\tau_E^3(490, z) - 0.206\tau_E^2(490, z) + 1.506\tau_E(490, z) \quad (6b)$$

for the “green” water case. Compared to the piecewise model, the polynomial fit is improved with $r^2 = 0.991$ and 0.982 for the “clear” and “green” models, respectively.

If we apply the mean value theorem to equation 4, we see that:

$$\tau_E(\lambda, z) = \frac{1}{\mu(\lambda, \zeta)} \int_0^z a(\lambda, z') dz' \quad (7)$$

resultados y los de Zaneveld *et al.* (1993) indica que las concentraciones de fondo son diferentes entre las dos localidades. Note que las pendientes de la relación de agua “verde” son muy diferentes que los pendientes de agua “clara” y que los reportados por Zaneveld *et al.* (1993). Esto es una consecuencia de los diferentes espectros de absorción como se muestra en la figure 4. Los valores mayores del coeficiente de absorción para el agua “verde” atenúan la luz descendente más rápidamente, y las diferencias en la forma espectral de la absorción causan cambios en la integración de PAR de irradiancia.

Mientras que el modelo por sección para ambos casos de agua “clara” y “verde” se ajustan bien, se decidió modelar la relación usando el polinomio de tercer orden con un intersección de cero basado en dos factores. Primero, se espera que tanto $\tau_E(490, z)$ como $\tau_{PAR}(z)$ mostrados en la figura 2 sean igual a cero en $z = 0$ y, por tanto, que el intersección sea cero. Segundo, que la razón de $\tau_E(490, z)$ a $\tau_{PAR}(z)$ es continua con la profundidad. El uso del polinomio para modelar esta relación permite que la variación de la relación anterior cambie con la profundidad. Los modelos utilizados son:

para el caso de agua “clara” y

para el caso de agua “verde”. Comparado con el modelo por sección, el ajuste del polinomio mejora con $r^2 = 0.991$ y 0.982 para los modelos de agua “clara” y “verde”, respectivamente.

Si se aplica el teorema de valor medio a la ecuación 4, vemos que

where ζ is some value of z' where $0 \leq z' \leq z$. If we form the "absorption optical depth", τ_a , where

$$\tau_a(\lambda, z) = \int_0^z a(\lambda, z') dz' \quad (8)$$

one can readily see that the ratio of $\tau_E(\lambda, z)$ and $\tau_a(\lambda, z)$ will be $[\mu(\lambda, \zeta)]^{-1}$. Figure 5 shows the relationship between $\tau_E(490, z)$ and $\tau_a(490, z)$ for the 30 profiles in the Gulf of California. Much of the variation in the relationship is due to changes in the average cosine, $\mu(490, \zeta)$. However, the figure indicates that optical depth can be predicted well from the integrated profiles of absorption at 490 nm using the linear regression:

$$\tau_E(490, z) = 1.270 \tau_a(490, z) \quad (9)$$

with $r^2 = 0.949$ and standard error = 0.382. Note that the deviation from the regression increases with increasing optical depth. As optical depth is an integration over depth, the deviations, due to variations in the average cosine, increase with depth. Because $\mu(490, z)$ has a small range in the vertical (Gordon *et al.*, 1993), it can be argued that the depth dependence of $\mu(490, z)$ can be folded into a functional relationship of $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_a(490, z)$ via $\tau_E(490, z)$. This should entail little loss of accuracy and avoids the complication of modeling $\mu(490, z)$ in stratified media when the input light field (sky conditions) is not known. Also, note that there is no need to delineate between "clear" and "green" water types as we are dealing with a single wavelength.

Since we have shown excellent relationships between $\tau_E(490, z)$ and $\tau_a(490, z)$, on the one hand, and between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$, on the other, one would also expect a good relationship between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_a(490, z)$. Substituting equation 9 into equations 6a and 6b, we can estimate the PAR optical depth from the $\tau_a(490, z)$ profile

donde ζ es algún valor de z' , donde $0 \leq z' \leq z$. Si se forma la "profundidad óptica de absorción", τ_a , donde

se puede apreciar fácilmente que la razón de $\tau_E(\lambda, z)$ y $\tau_a(\lambda, z)$ será $[\mu(\lambda, \zeta)]^{-1}$. La figura 5 muestra la relación entre $\tau_E(490, z)$ y $\tau_a(490, z)$ para los 30 perfiles en el Golfo de California. Mucha de la variación en la relación se debe a cambios en el coseno promedio $\mu(490, \zeta)$. Sin embargo, la figura muestra que la profundidad óptica se puede predecir adecuadamente con los perfiles de absorción integrados a 490 nm con la regresión lineal:

con $r^2 = 0.949$ y error estándar = 0.382. Note que la desviación de la regresión aumenta con el incremento en la profundidad óptica. Como la profundidad óptica es una integración sobre profundidad, las desviaciones, debidas a variaciones en el coseno promedio, aumentan con la profundidad. Dado que $\mu(490, z)$ tiene un intervalo pequeño en la vertical (Gordon *et al.*, 1993), se puede argumentar que la dependencia de profundidad de $\mu(490, z)$ se puede incorporar/doblar en una relación funcional de $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_a(490, z)$ mediante $\tau_E(490, z)$. Esto no debe causar pérdida de exactitud y evita la complicación de modelar $\mu(490, z)$ en medios estratificados cuando el campo de luz de entrada (condiciones de cielo) no se conoce. Asimismo, no es necesario delinear entre aguas "claras" y "verdes" ya que se trata de una sola longitud de onda.

Como se han mostrado relaciones excelentes entre $\tau_E(490, z)$ y $\tau_a(490, z)$ y entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$, también se puede esperar una buena relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_a(490, z)$. Al sustituir la ecuación 9 en las ecuaciones 6a y 6b, se puede estimar la profundidad óptica de PAR a partir del perfil de $\tau_a(490, z)$ utilizando:

$$\tau_{PAR}(z) = 0.080\tau_a^3(490, z) - 0.534\tau_a^2(490, z) + 2.544\tau_a(490, z) \quad (10a)$$

using:

$$\tau_{PAR}(z) = 0.045\tau_a^3(490, z) - 0.332\tau_a^2(490, z) + 1.913\tau_a(490, z) \quad (10b)$$

for the “clear” water case, and for the “green” water case. The euphotic depth for which $\tau_{PAR}(z) = 4.6$ and other PAR depths can then be readily determined from $\tau_a(490, z)$ values, as in table 2.

Figure 6 shows the modeled versus the measured $\tau_{PAR}(z)$ relationship for the 30 stations in the Gulf of California, combining both “clear” and “green” water models. In general, the absorption model for predicting the vertical profile of $\tau_{PAR}(z)$ does well when compared with percent PAR depths derived from the Satlantic irradiance observations with an $r^2 = 0.947$ and standard error = 0.368. Table 2 shows the percent PAR levels and the corresponding $\tau_a(490, z)$ values derived using the above process. In practice, one could thus integrate the observed absorption coefficient measurement at 490 nm with depth, as in equation 8, and use the derived $\tau_a(490, z)$ versus depth plot to obtain the percent PAR depths using table 2.

Using the 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 and 1 percent light levels as inputs to the model, we extracted the depths at which these light levels are estimated by the model and compared them to the measured light level depths. Figure 7 shows the comparison of the modeled and measured depth of the above light levels, for both the “clear” and “green” water type models. The models do well, with a general tendency to predict the light levels slightly deeper than the measured depths ($r^2 = 0.965$, slope = 1.027, intercept = 0.534). The standard error using all light levels is 2.425 m. Table 2 shows the standard error between the modeled and measured depths at the individual light levels used in this study. The error increases with decreasing light level. This is likely due to the combined effects of variations in the average

para el caso de agua “clara”, y

para el caso de agua “verde”. La profundidad eufótica para la cual $\tau_{PAR}(z) = 4.6$ y otras profundidades de PAR se pueden determinar fácilmente con valores de $\tau_a(490, z)$, como en la tabla 2.

La figura 6 muestra la relación de $\tau_{PAR}(z)$ modelada versus medida para las 30 estaciones en el Golfo de California, combinando los dos modelos de agua “clara” y “verde”. En general, el modelo de absorción para predecir el perfil vertical de $\tau_{PAR}(z)$ es bueno en comparación con el porcentaje de profundidades de PAR a partir de las observaciones de irradiancia de Satlantic con $r^2 = 0.947$ y error estándar = 0.368. La tabla 2 muestra el porcentaje de los niveles de PAR y los valores correspondientes de $\tau_a(490, z)$ derivados con el proceso anterior. En la práctica, se podría integrar la medición del coeficiente de absorción observada a 490 nm con la profundidad, como en la ecuación 8, y utilizar la gráfica derivada de $\tau_a(490, z)$ versus profundidad para obtener el porcentaje de profundidades de PAR utilizando la tabla 2.

Utilizando el porcentaje de los niveles de luz de 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 y 1 como entradas al modelo, se extrajeron las profundidades a las cuales estos niveles de luz se estiman con el modelo y se compararon con las profundidades de nivel de luz medidas. La figura 7 muestra la comparación de la profundidad modelada y medida de todos los niveles de luz anteriores para los dos modelos de agua “clara” y “verde”. Los modelos funcionan bien, con una tendencia general de predecir los niveles de luz un poco más profundos que las profundidades medidas ($r^2 = 0.965$, pendiente = 1.027, intersección = 0.534). El error estándar de todos los niveles de luz es 2.425 m. La tabla 2 muestra el error estándar entre las profundidades modeladas y medidas en los niveles de luz

Table 2. Percent PAR light level using the “clear” and “green” models (see equations 10a and 10b) from the integrated absorption coefficient at 490 nm profile. Also shown is the standard error using the models to predict the various percent PAR light level depths.

Tabla 2. El porcentaje del nivel de luz de PAR utilizando los modelos de agua “clara” y “verde” (ver ecuaciones 10a y 10b) a partir del perfil del coeficiente de absorción integrado a 490 nm. También se incluye el error estándar utilizando los modelos para predecir los diferentes porcentajes de las profundidades del nivel de luz de PAR.

| % PAR light level | $\tau_{PAR}(z)$ | “Clear” $\tau_a(490, z)$ | “Green” $\tau_a(490, z)$ | Standard error (m) |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 75 | 0.29 | 0.105 | 0.143 | 0.704 |
| 50 | 0.69 | 0.275 | 0.375 | 1.499 |
| 37 | 1.0 | 0.420 | 0.567 | 1.756 |
| 20 | 1.61 | 0.25 | 0.982 | 2.007 |
| 10 | 2.3 | 1.119 | 1.517 | 2.292 |
| 5 | 3.00 | 1.576 | 2.127 | 2.495 |
| 3 | 3.51 | 1.945 | 2.592 | 3.159 |
| 1 | 4.60 | 2.745 | 3.543 | 4.150 |

cosine and the difficulty in measuring the surface PAR value accurately. However, note that the error in predicting the lowest light level (1%), i.e., the euphotic depth, is only 4.15 m. Thus, this model is useful in predicting the PAR light levels to within approximately 4.15 m in the Gulf of California.

DISCUSSION

The most straightforward method of determining the percent PAR light levels is to integrate the spectral downwelling irradiance profile. The error in estimating these depths is due solely to using the downwelling irradiance rather than the scalar irradiance. In highly scattering waters, this error can lead to underestimates in the PAR irradiance as much as 20% (Kirk, 1994). However, in practice, *in situ* measurements of the downwelling irradiance profiles are frequently complicated by factors such as varying sky condi-

individuales usados en este estudio. El error aumenta conforme decrece el nivel de luz. Esto probablemente se debe a una combinación de efectos de variaciones en el coseno promedio y a la dificultad de medir el valor superficial de PAR con exactitud. Sin embargo, note que el error en predecir el nivel de luz más bajo (1%), i.e., la profundidad eufótica, es sólo 4.15 m. Por tanto, el modelo es útil para predecir los niveles de luz de PAR dentro de aproximadamente 4.15 m en el Golfo de California.

DISCUSIÓN

La manera más clara de determinar el porcentaje de los niveles de luz de PAR es integrar el perfil de irradiancia descendente espectral. El error que resulta de estimar estas profundidades se debe solamente al uso de la irradiancia descendente en vez de la irradiancia escalar. En aguas con esparcimiento alto, este error puede llevar a

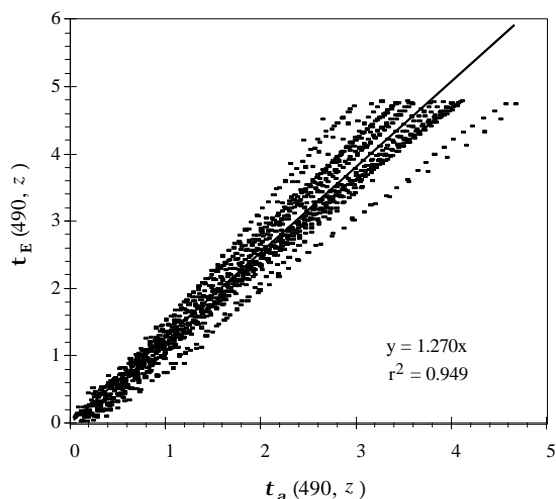


Figure 5. $\tau_E(490, z)$ versus $\tau_a(490, z)$ for the 30 profiles taken in the Gulf of California, with the linear regression shown.

Figura 5. $\tau_E(490, z)$ versus $\tau_a(490, z)$ para los 30 perfiles obtenidos en el Golfo de California, donde se incluye la regresión lineal.

tions, ship shadowing, surface waves, sun angle, etc., especially at the surface. Thus, determinations of the percent PAR light levels relative to the surface value can often be difficult to accurately estimate using *in situ* irradiance measurements. Furthermore, these measurements can only be made during the daylight hours, and thus are not useful for the researcher who is faced with choosing the depths at which to place ^{14}C primary production incubation bottles prior to sunrise. As the inherent optical properties are not dependent on the underwater light field, it is of interest to examine whether these measurements made at night can be useful in predicting daytime percent PAR light levels.

It has been shown by Zaneveld *et al.* (1993) and in this paper that a good relationship exists between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ depending on the water type (fig. 6). Based on the spectrum of the surface downwelling irradiance transmittance and the spectral absorption coefficient, two water types were identified in this paper, corresponding to Jerlov's (1976) classical definition of oceanic

subestimaciones de la irradiancia de PAR de hasta un 20% (Kirk, 1994). Sin embargo, en la práctica, las mediciones *in situ* de los perfiles de irradiancia descendente se complican a menudo con factores tales como las condiciones variables del cielo, sombras de los barcos, olas superficiales, el ángulo del sol, etc., sobre todo en la superficie. Por tanto, puede ser difícil determinar el porcentaje de los niveles de luz de PAR relativos al valor superficial con exactitud a partir de mediciones *in situ* de irradiancia. Además, estas mediciones sólo se pueden tomar durante el día y, por ende, no son útiles para el investigador quien necesita precisar las profundidades donde debe colocar las botellas de incubación de producción primaria de ^{14}C antes del amanecer. Como las propiedades ópticas inherentes no dependen del campo de luz submarino, sería interesante ver si estas mediciones hechas por la noche se podrían usar para predecir el porcentaje de los niveles de PAR diurno.

Se ha mostrado por Zaneveld *et al.* (1993) y por nosotros que hay una buena relación entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ según el tipo de agua (fig. 6).

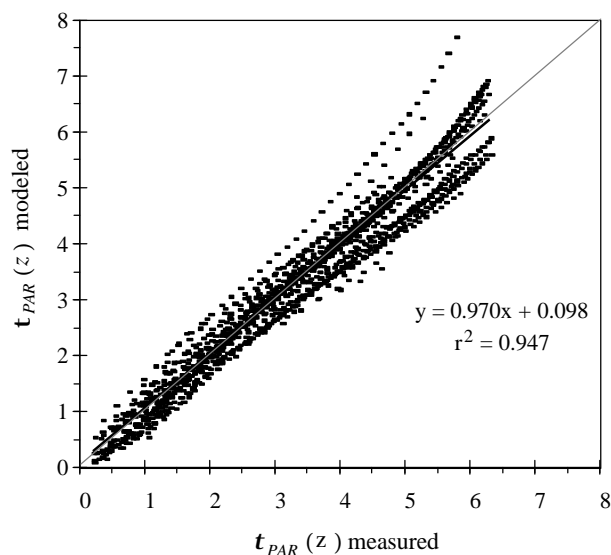


Figure 6. Measured $\tau_{PAR}(z)$ determined from *in situ* radiance profiles versus the modeled $\tau_{PAR}(z)$ determined from the *in situ* absorption coefficient at 490 nm profiles for the 30 stations in the Gulf of California (see equations 10a and 10b), with the linear regression shown.

Figura 6. $\tau_{PAR}(z)$ medido con los perfiles de la radiancia *in situ* versus $\tau_{PAR}(z)$ modelado con los perfiles del coeficiente de absorción *in situ* a 490 nm para las 30 estaciones del Golfo de California (ver ecuaciones 10a y 10b), donde se incluye la regresión lineal.

and coastal water types. In this paper we have chosen to rename these water types based on the spectrum of the absorption coefficient rather than location, as “clear” water (low absorption coefficients in the blue and green wavelengths) and “green” water (high absorption values and steeply sloped in the blue and green regions). Instead of modeling the relationships between $\tau_{PAR}(z)$ and $\tau_E(490, z)$ using a piecewise linear fit as done by Zaneveld *et al.* (1993), we chose to use a polynomial function. The polynomial model used in this paper has the advantage over that given by Zaneveld *et al.* (1993) in that it allows the $\tau_{PAR}(z)$ versus $\tau_E(490, z)$ relationship to be continuous throughout the profile without loss of accuracy. It is interesting to note that the piecewise linear relationships from data taken in the North Pacific are similar to those found in the Gulf of California (table 1), indicating that the “clear” water model given in this study may be generally applicable to

Con base en el espectro de la transmitancia de irradiancia descendente superficial y el coeficiente de absorción espectral, se identificaron dos tipos de agua que corresponden a la definición clásica de Jerlov (1976) para tipos de agua oceánica y costera. En este trabajo, se decidió renombrar estos tipos de agua con base en el espectro del coeficiente de absorción en vez de la localidad, como agua “clara” (coeficientes de absorción bajos en las longitudes de onda azul y verde) y agua “verde” (valores de absorción altos y muy empinados en las regiones azul y verde). En vez de modelar las relaciones entre $\tau_{PAR}(z)$ y $\tau_E(490, z)$ con ajuste lineal por secciones como lo hicieron Zaneveld *et al.* (1993), se utilizó una función polinomial. El modelo polinomial de este trabajo tiene ventaja sobre el dado por Zaneveld *et al.* (1993) en que permite que la relación $\tau_{PAR}(z)$ versus $\tau_E(490, z)$ sea continua a lo largo del perfil sin pérdida de exactitud. Es interesante notar que

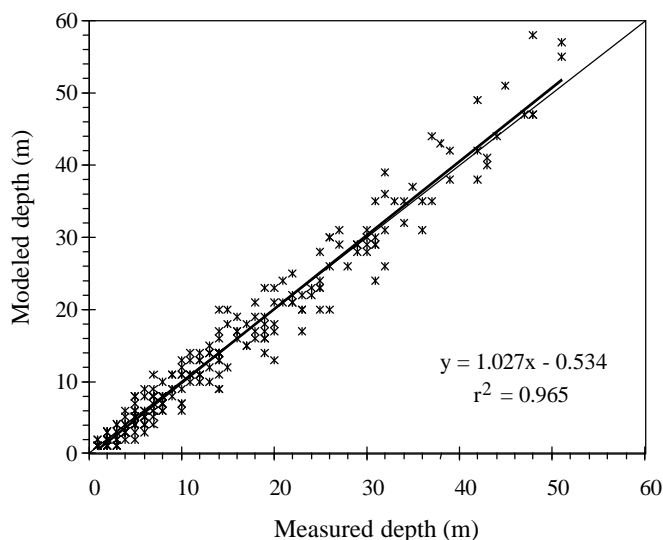


Figure 7. The 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 and 1 percent PAR light level depths estimated from *in situ* spectral irradiance profiles versus the corresponding depths estimated from the absorption optical depth model for the 30 profiles in the Gulf of California.

Figura 7. El 75, 50, 37, 20, 10, 5, 3 y 1 por ciento de las profundidades del nivel de luz de PAR estimadas de los perfiles de irradiancia espectral *in situ* versus las profundidades correspondientes estimadas con el modelo de profundidad óptica de absorción para los 30 perfiles en el Golfo de California.

other open ocean environments.

Although the relationship between $\tau_E(490, z)$ and $\tau_a(490, z)$ is expected to vary from profile to profile due to the changes in the vertical structure in $\mu(\lambda, z)^{-1}$, we find that this relationship is remarkably consistent when considering the 30 profiles in the Gulf of California (fig. 5). The result of using a simple linear relationship to model $\tau_E(490, z)$ from $\tau_a(490, z)$ is that one assumes that there is some average $\mu(\lambda, \zeta)^{-1}$ in these 30 profiles. We find that by assuming that there is some average $\mu(\lambda, \zeta)^{-1}$, there is very little loss of accuracy in using the $\tau_E(490, z)$ versus $\tau_a(490, z)$ linear relationship to predict $\tau_{PAR}(z)$.

Expected daytime $\tau_{PAR}(z)$ depths versus observed depths are very good (fig. 6), considering that the irradiance data was usually collected up to one hour before or after the

las relaciones lineales por sección de los datos obtenidos en el Pacífico Norte son similares a los encontrados en el Golfo de California (tabla 1), lo que indica que el modelo de agua “clara” de este estudio se puede aplicar de forma general a otros ambientes del océano abierto.

Aunque se espera variación en la relación entre $\tau_E(490, z)$ y $\tau_a(490, z)$ de un perfil a otro por los cambios en la estructura vertical en $\mu(\lambda, z)^{-1}$, se encontró que esta relación es notablemente consistente en los 30 perfiles del Golfo de California (fig. 5). El resultado de usar una relación lineal simple para modelar $\tau_E(490, z)$ a partir de $\tau_a(490, z)$ es que se supone que hay algún promedio de $\mu(\lambda, \zeta)^{-1}$ en estos 30 perfiles. Al suponer algún promedio de $\mu(\lambda, \zeta)^{-1}$, hay muy poca pérdida de exactitud al utilizar la relación lineal de $\tau_E(490, z)$ versus $\tau_a(490, z)$ para predecir $\tau_{PAR}(z)$.

Las profundidades de $\tau_{PAR}(z)$ diurnas esperadas versus las profundidades observadas son muy

absorption profile. Any discrepancies could thus be ascribed to spatial variations alone. Other sources of error exist, of course, in all approximations. Instrumental errors are also present. Considering these, the results are surprisingly good. This indicates that the expected daytime euphotic depth and other light levels can be determined with sufficient accuracy to allow appropriate depths to be determined at night, so that samples can be obtained for ^{14}C primary productivity incubations during the following daylight period. The model presented here shows that percent PAR light level depths can be predicted accurately from the IOP using empirical relationships between $\tau_a(490, z)$ and $\tau_{PAR}(z)$ derived from observations at a single wavelength in the Gulf of California.

The applicability of these models to other regions is dependent on the composition of the absorbing and scattering materials in the water. The simple "clear" and "green" water classifications identified in this paper may not encompass all of the water types found in the oceans. However, we find a close similarity between our "clear" water model in the Gulf of California and the models in the North Pacific given by Zaneveld *et al.* (1993). We also find that the variations in the average cosine profile may be encompassed in the $\tau_E(490, z)$ and $\tau_a(490, z)$ relationship with little loss of accuracy. Further investigations are necessary in order to determine how applicable these models are to other environments.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the crew of the *Francisco de Ulloa*. This work was supported by NASA's Ocean Biology/Biogeochemistry Program and the Office of Naval Research's Environmental Optics Program.

REFERENCES

Gordon, H.R., Dong, K. and Gong, W. (1993). Radiative transfer in the ocean: computations

buenas (fig. 6), si consideramos que los datos de irradiancia normalmente se recolectaron hasta una hora antes o después del perfil de absorción. Cualquier discrepancia podría entonces deberse sólo a variaciones espaciales. En toda aproximación hay otras fuentes de error, inclusive por los instrumentos. Si consideramos eso, los resultados son sorprendentemente buenos. Esto indica que la profundidad eufótica diurna esperada y otros niveles de luz se pueden estimar con suficiente exactitud para determinar, por la noche, las profundidades apropiadas para obtener muestras para incubaciones de productividad primaria de ^{14}C durante el siguiente periodo de luz. El modelo presentado muestra que el porcentaje de las profundidades del nivel de luz de PAR se pueden predecir con exactitud a partir de las POI, usando relaciones empíricas entre $\tau_a(490, z)$ y $\tau_{PAR}(z)$ derivadas de observaciones en una sola longitud de onda en el Golfo de California.

La aplicabilidad de estos modelos a otras regiones depende de la composición del material de absorción y dispersión en el agua. Las clasificaciones sencillas de agua "clara" y "verde" identificadas en este trabajo posiblemente no abarcan todo tipo de agua encontrada en los océanos. Sin embargo, se encontró una similitud estrecha entre el modelo de agua "clara" en el Golfo de California y los modelos en el Pacífico Norte dados por Zaneveld *et al.* (1993). También se encontró que las variaciones en el perfil del coseno promedio pueden ser abarcadas en la relación $\tau_E(490, z)$ y $\tau_a(490, z)$ con poca pérdida de exactitud. Se necesitan más estudios para determinar si se pueden aplicar estos modelos en otros ambientes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la tripulación del *Francisco de Ulloa*. Este trabajo recibió apoyo financiero del Ocean Biology/Biogeochemistry Program de la NASA y del Environmental Optics Program de la Office of Naval Research.

Traducido al español por Jennifer Davis.

- relating to the asymptotic and near-asymptotic daylight field. *Appl. Opt.*, 32(9): 1606–1619.
- Jerlov, N.G. (1976). *Marine Optics*. Elsevier, New York, p. 89.
- Kirk, J.T.O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, New York, pp. 151–153.
- Moore, C., Zaneveld, J.R.V. and Kitchen, J.C. (1992). Preliminary results from an *in situ* spectral absorption meter. In: *Ocean Optics XI, Proc. SPIE 1750*, pp. 330–337.
- Moore, C., Bruce, E.J., Pegau, W.S. and Weidemann, A.D. (1996). WET Labs ac-9: Field calibration protocol, deployment techniques, data processing, and design improvements. In: *Ocean Optics XII, Proc. SPIE 2963*, pp. 725–730.
- Pegau, W.S., Gray, D. and Zaneveld, J.R.V. (1997). Absorption of visible and near-infrared light in water: The dependence on temperature and salinity. *Appl. Opt.*, 36: 6035–6046.
- Pegau, W.S., Zaneveld, J.R.V. and Barnard, A.H. (1999). Inherent optical properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(4) (this issue).
- Pope, R.M. and Fry, E.S. (1997). Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.*, 26: 8710–8723.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7411–7421.
- Zaneveld, J.R.V., Kitchen, J.C., Bricaud, A. and Moore, C. (1992). Analysis of *in situ* spectral absorption meter data. In: *Ocean Optics XI, Proc. SPIE 1750*, pp. 187–200.
- Zaneveld, J.R.V., Kitchen, J.C. and Mueller, J.L. (1993). The vertical structure of productivity and its vertical integration as derived from remotely sensed observations. *Limnol. Oceanogr.*, 38: 1384–1393.
- Zaneveld, J.R.V., Kitchen, J.C. and Moore, C. (1994). Scattering error correction of reflecting tube absorption meters. In: *Ocean Optics XII, Proc. SPIE 2258*, pp. 44–55.