

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y CLOROFILA *a* EN LA PARTE
CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA (OTOÑO 1987)**

**PRIMARY PRODUCTIVITY AND CHLOROPHYLL *a* IN THE CENTRAL
PART OF THE GULF OF CALIFORNIA (AUTUMN 1987)**

Roberto Millán Núñez¹
Ramón Cajal Medrano^{1,2}
Eduardo Santamaría del Angel¹
Eduardo Millán Núñez³

¹ Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado Postal 453
Ensenada, Baja California, México

² Departamento de Ecología
Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada (CICESE)
Apartado Postal 2702
Ensenada, Baja California, México

³ Secretaría de Marina
Estación Oceanográfica de Ensenada
Vicente Guerrero 133-altos, Fracc. Bahía
Ensenada, Baja California, México

Recibido en enero de 1992; aceptado en octubre de 1992

RESUMEN

Se realizó un crucero oceanográfico en la parte central del Golfo de California, del 27 de octubre al 7 de noviembre de 1987. Se tomaron muestras de agua de mar a profundidades de 0, 5, 15, 25 y 50 m, para determinar la concentración de clorofila *a* y feofitina *a* en 22 estaciones. Se realizaron seis experimentos de productividad en la zona eufótica y uno de fotosíntesis-irradiancia. El perfil vertical de la concentración de clorofila *a* en el Canal de Ballenas tendió a ser más homogéneo al sur del canal, por la mezcla y el incremento de la zona eufótica. En la región de las islas se observó una distribución variable de la concentración de clorofila *a*, debida al efecto de los procesos de mezcla que ocurren en esta zona. En la región sur las concentraciones decrecen de la costa hacia mar abierto. En el experimento de productividad contra irradiancia (P-E) en el Canal de Ballenas, se obtuvieron valores similares de productividad primaria y de número de asimilación, con muestras recolectadas a 22 y 60% de irradiancia superficial, de donde se infiere transporte vertical del fitoplancton en la columna de agua. En toda el área de estudio, los valores de productividad en superficie fueron de tres a cuatro veces mayores en la parte norte que en la sur, mientras que los valores integrados fueron de uno a dos veces mayores en el norte.

ABSTRACT

A cruise was carried out in the central part of the Gulf of California from 27 October to 7 November, 1987. Seawater samples were taken from 0, 5, 15, 25 and 50 m depth to determine chlorophyll *a* and phaeophytin *a* content at 22 stations. Six experiments of productivity in the euphotic zone and one experiment of photosynthesis-irradiance were generated. The vertical

profile of chlorophyll *a* in Ballenas Channel was more homogeneous at the southern end of the channel due to mixing and the increase in the euphotic zone. In the region of the islands, the distribution of chlorophyll *a* was more variable due to mixing processes that occur in that area. In the southern part of the study area, chlorophyll *a* decreased from the coast to the open sea. Similar assimilation numbers and photosynthetic rates were obtained with samples collected at 22 and 60% of surface irradiance in one productivity *versus* irradiance (P-E) experiment in Ballenas Channel. It is inferred that vertical transport of phytoplankton occurred in the water column. Surface primary productivity values were three to four times higher in the northern part of the study area than in the southern part, whereas integrated productivity values were one to two times higher in the northern part.

INTRODUCCION

Se ha informado de la gran variabilidad en espacio y tiempo de la abundancia del fitoplancton y su productividad primaria en el Golfo de California, desde los primeros estudios hasta la fecha (Allen, 1938; Zeitzschel, 1969; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). En el área de las grandes islas de la región central del Golfo de California ocurren fuertes procesos de mezcla en la columna de agua, debidos principalmente a corrientes de marea y surgencias estacionales (Paden *et al.*, 1991). Los vientos del noroeste causan surgencias en la costa este durante invierno y primavera, y los vientos del sur causan surgencias en la costa oeste durante el verano (Roden y Groves, 1959; Roden y Emilson, 1979). La productividad del fitoplancton en el Golfo de California ha sido relacionada con eventos estacionales en diferentes años y con las condiciones fisicoquímicas del agua de mar (Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lara-Lara y Valdez-Holguín, 1988). Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) indicaron que hasta la fecha los trabajos llevados a cabo en el Golfo de California no son suficientes para entender con claridad la variación espacial y temporal de la productividad primaria en todo el golfo.

En el Golfo de California y en otros mares, se ha determinado que la concentración de clorofila *a* y productividad máxima se encuentran subsuperficialmente (Lara-Lara y Valdez-Holguín, 1988; Platt y Sathyendranath, 1988). Considerando lo anterior, el propósito de este trabajo es observar la distribución de clorofila *a* en la zona eufótica y estimar la tasa de producción primaria del fitoplancton en la capa superficial (0 a 50 m), en la parte central del Golfo de California durante el otoño de 1987.

INTRODUCTION

The high variability in space and time of phytoplankton abundance and primary productivity in the Gulf of California, has been reported since the first studies (Allen, 1938; Zeitzschel, 1969; Alvarez-Borrego and Lara-Lara, 1991). In the area of the big islands in the central region of the Gulf of California, strong mixing processes occur in the water column due mainly to tidal currents and seasonal upwelling (Paden *et al.*, 1991). Northwesterly winds cause upwelling on the eastern coast during winter and spring, and southerly winds cause upwelling on the western coast during summer (Roden and Groves, 1959; Roden and Emilson, 1979). Phytoplankton primary productivity in the Gulf of California has been related to seasonal events in different years and to the physicochemical conditions of the seawater (Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro, 1988; Alvarez-Borrego and Lara-Lara, 1991; Lara-Lara and Valdez-Holguín, 1988). Alvarez-Borrego and Lara-Lara (1991) reported that the existing data on the Gulf of California are not enough to clearly understand the seasonal variability of primary productivity in the Gulf.

It has been reported that in the Gulf of California and other seas, maximum chlorophyll *a* concentrations and primary productivity are found below the surface (Lara-Lara and Valdez-Holguín, 1988; Platt and Sathyendranath, 1988). The purpose of this paper is to determine the distribution of chlorophyll *a* in the euphotic zone and to estimate the rate of phytoplankton primary productivity in the surface layer (0-50 m), in the central part of the Gulf of California during autumn 1987.

MATERIALES Y METODOS

Durante el otoño de 1987 (27 de octubre a 7 de noviembre) a bordo del B/I *El Puma*, se realizó un crucero en la parte central del Golfo de California, en la región comprendida desde un transecto perpendicular a Guaymas hasta el norte de la Isla Angel de la Guarda. Se muestrearon un total de 22 estaciones hidrográficas (Fig. 1). Se tomaron muestras de agua de mar a cinco profundidades, 0, 5, 15, 25 y 50 m, utilizando botellas Niskin de siete litros de capacidad.

Para determinar la concentración de clorofila *a* y feofitina *a* de cada profundidad se filtró un litro de agua utilizando filtros de membrana de 0.45 μm de poro y de 47 mm de diámetro, siguiendo el método de Strickland y Parsons (1972). El cálculo de las concentraciones se realizó con las ecuaciones determinadas por Millán-Núñez y Alvarez-Borrego (1978).

Se llevaron a cabo seis experimentos de fotosíntesis en la zona eufótica (Fig. 1), con muestras de agua de mar correspondientes al 100, 60, 22, 10 y 1% de la irradiancia (E_0), medida justo abajo de la superficie con un fotómetro submarino Kahlsico No. 268WA310. A cada profundidad se llenaron dos botellas de vidrio claras y una oscura de 125 ml de capacidad. Para la estación E-112, se tomaron a cada profundidad diez botellas claras y se colocaron dos en cada uno de los porcentajes de irradiancia del incubador (80, 60, 22, 10 y 1%). Cada botella se inoculó con 5 μCi de $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$, siguiendo la técnica descrita por Strickland y Parsons (1972). Las incubaciones se hicieron a bordo de la embarcación con luz natural, entre las 11:00 y 14:00 horas. Se utilizaron tubos de acrílico forrados con mallas de plástico de color neutro para simular la irradiancia de la profundidad de las muestras recolectadas. La temperatura fue controlada utilizando flujo de agua de mar dentro de los tubos. Después de dos horas de incubación, las muestras fueron pasadas a través de filtros de membrana de 0.45 μm de poro y 25 mm de diámetro. Los filtros fueron expuestos a vapores de HCl para eliminar el carbono catorce inorgánico en ellos. Posteriormente, se colocaron en viales de centelleo líquido con 15 ml de solución Betaphase. La radiactividad se midió en un contador para centelleo líquido Beckman LSC-100 en la Institución Scripps de Oceanografía, en

MATERIAL AND METHODS

In autumn 1987 (27 October to 7 November), a cruise was conducted to the central region of the Gulf of California aboard the research vessel *El Puma*. The study area is located within a perpendicular transect of the Guaymas coast and the northern end of Angel de la Guarda Island. A total of 22 hydrographic stations were occupied (Fig. 1). Water samples were taken from five depths, 0, 5, 15, 25 and 50 m, with 7-l Niskin bottles.

For the analysis of chlorophyll *a* and phaeophytin *a* at each depth, one litre of seawater was filtered using 0.45 μm pore membrane filters with 47 mm diameter, following Strickland and Parsons (1972). Chlorophyll *a* and phaeophytin *a* concentrations were calculated using the equations reported by Millán-Núñez and Alvarez-Borrego (1978).

Six experiments of photosynthesis in the euphotic zone were carried out (Fig. 1), with seawater samples taken at 100, 60, 22, 10 and 1% of irradiance (E_0) measured just below the surface with a Kahlsico 268WA310 submarine photometer. Two 125-ml clear glass bottles and one dark bottle were filled at each depth. At station E-112, 10 clear glass bottles were filled at each depth and two of these were placed at appropriate irradiance in the incubator (80, 60, 22, 10 and 1%). Each bottle was inoculated with 5 μCi of $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$, following the method of Strickland and Parsons (1972). Sunlight incubation was done on board between 11:00 and 14:00 hours, using acrylic tubes with neutral plastic to simulate the irradiance. Water temperature was controlled using a water flow inside the tubes. After two hours of incubation, samples were passed through 0.45 μm pore membrane filters of 25 mm diameter. The filters were exposed to HCl fumes to eliminate the inorganic carbon in the filter. Subsequently, the filters were placed in liquid scintillation vials with 15 ml of Betaphase solution. Radioactivity was measured with a Beckman LSC-100 liquid scintillation counter at the Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, California. Carbon assimilation was calculated following Strickland and Parsons (1972).

RESULTS

For a better presentation of the results, the area was divided into four zones with

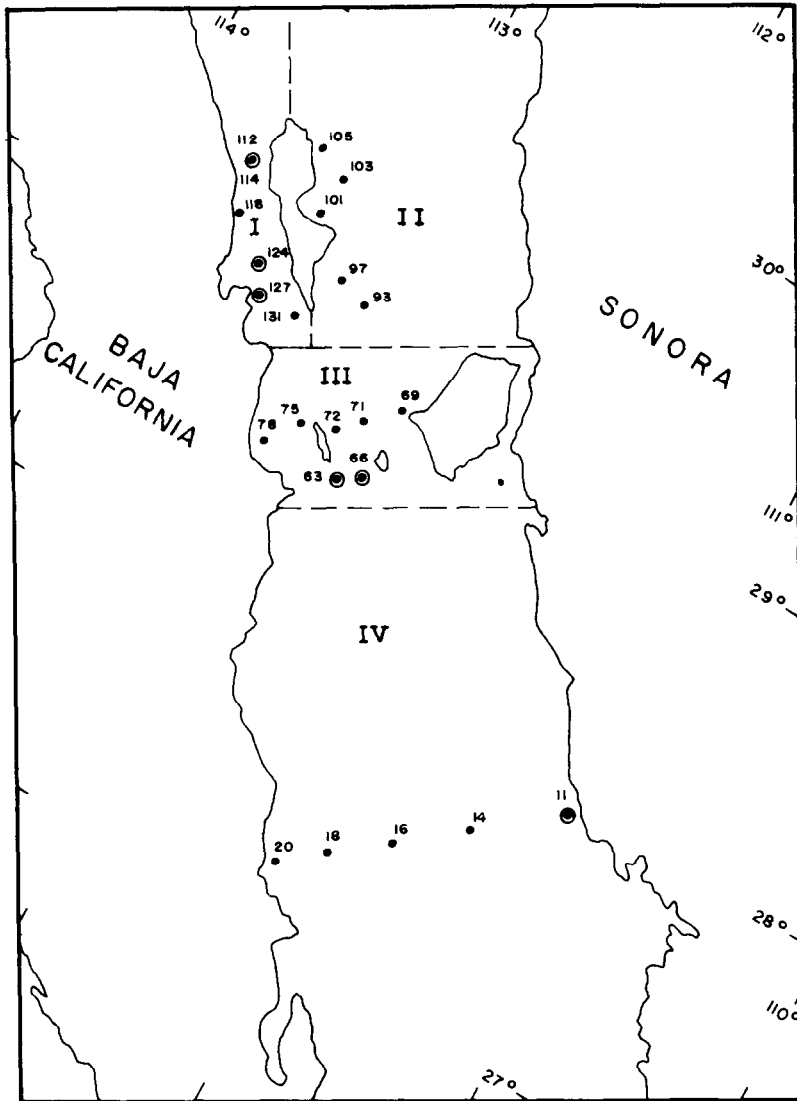


Figura 1. Area de estudio. Estaciones de muestreo para los perfiles verticales de la concentración de clorofila *a* y feofitina *a* (●) Estaciones para los experimentos de productividad (⊙).
Figure 1. Study area. Sampling stations for vertical profiles of chlorophyll *a* and phaeophytin *a* concentration (●). Stations for productivity experiments (⊙).

la Jolla, California. Los cálculos de carbono asimilado se hicieron de acuerdo con Strickland y Parsons (1972).

RESULTADOS

Para la presentación de los resultados, el área de estudio se dividió en cuatro zonas con distintas características hidrográficas, que fueron detectadas en este mismo crucero (Cajal-Medrano *et al.*, 1992; Fig. 1). Para cada una de las zonas definidas se presenta un transecto de perfiles verticales de la concentración de clorofila *a*.

Para la zona I, que comprende el Canal de Ballenas, la concentración de clorofila *a* presentó una variación tanto vertical como horizontal muy marcada a lo largo del canal, con máximos subsuperficiales (15 a 25 m) hasta de 3 mg m^{-3} para la parte norte, mientras que la parte sur tuvo una concentración de clorofila *a* más homogénea en la columna de agua. La concentración de feofitina *a* solamente se detectó en la parte norte y sur del canal, a profundidades de 25 y 50 m, con concentraciones hasta de 1.0 y 1.2 mg m^{-3} a los 50 m (Fig. 2).

La parte este de la Isla Angel de la Guarda corresponde a la zona II, en cuyo transecto la concentración de clorofila *a* fue similar en la columna de agua a partir de los 5 m con concentraciones de 1 mg m^{-3} y ligeramente menores en superficie. Las concentraciones máximas de feofitina *a* se presentaron por abajo de la superficie (10 a 20 m), excepto para la estación E-103, donde fue en superficie y a 25 m (Fig. 2).

Para la zona III, situada entre las islas (Fig. 2), las concentraciones de clorofila *a* fueron muy homogéneas en la columna de agua, en las estaciones cercanas a Isla Tiburón (2.0 mg m^{-3}); mientras que en las estaciones centrales de este transecto los valores máximos fueron subsuperficiales (25 m), hasta de 2.5 mg m^{-3} . Las concentraciones de feofitina *a* sólo se presentaron en las estaciones del lado oeste del transecto, con valores cercanos a 3.0 mg m^{-3} , y en la estación E-75 se observa una distribución inversa a la concentración de clorofila *a* en toda la columna de agua, con valores menores de 1.0 mg m^{-3} .

El transecto de los perfiles verticales de la concentración de clorofila *a* (Fig. 2) de la zona IV, que comprende el área al sur de las

different hydrographic characteristics, detected on this cruise (Cajal-Medrano *et al.*, 1992; Fig. 1). A transect of vertical profiles of chlorophyll *a* concentration is presented for each zone.

In zone I (Ballenas Channel), chlorophyll *a* concentration presented a strong vertical and horizontal variation along the channel, with a maximum (3.0 mg m^{-3}) below the surface (15 to 25 m) at the northern end. In contrast, in the southern part of the channel, chlorophyll *a* was homogeneous in the water column. Phaeophytin *a* concentration was only detected in the northern and southern parts of the channel, at 25 and 50 m, with values up to 1.0 and 1.2 mg m^{-3} at 50 m (Fig. 2).

In zone II, off the eastern shore of Angel de la Guarda Island, chlorophyll *a* concentration was similar in the water column from the 5-m depth, with concentrations of 1.0 mg m^{-3} and slightly lower at the surface. Maximum phaeophytin *a* concentrations were recorded below the surface (10 to 20 m), except at station E-103 where they occurred at the surface and 25 m (Fig. 2).

In zone III, area between the islands (Fig. 2), chlorophyll *a* concentration was homogeneously distributed in the water column at the station close to Tiburón Island (2.0 mg m^{-3}), whereas at the other stations in the middle of this transect, the maximum values (up to 2.5 mg m^{-3}) were recorded below the surface (25 m). Phaeophytin *a* concentrations were only detected in the eastern side of the transect, with values close to 3.0 mg m^{-3} . At station E-75, inverse phaeophytin to chlorophyll *a* concentration was detected for the whole water column, with values lower than 1.0 mg m^{-3} .

The transect of the vertical profiles of chlorophyll *a* (Fig. 2) for zone IV, area to the south of the big islands, shows that maximum concentrations were below the surface, between 15 and 25 m, with 2.2 mg m^{-3} at the stations near the coast. Two maxima were observed at the stations far from the coast, one at the surface and the other between 15 and 25 m. Phaeophytin *a* was present only in the eastern side of this transect, with a tendency to increase with depth at the stations far from the coast (Fig. 2).

The primary productivity rates measured in Ballenas Channel (Figs. 3a,b,c) were

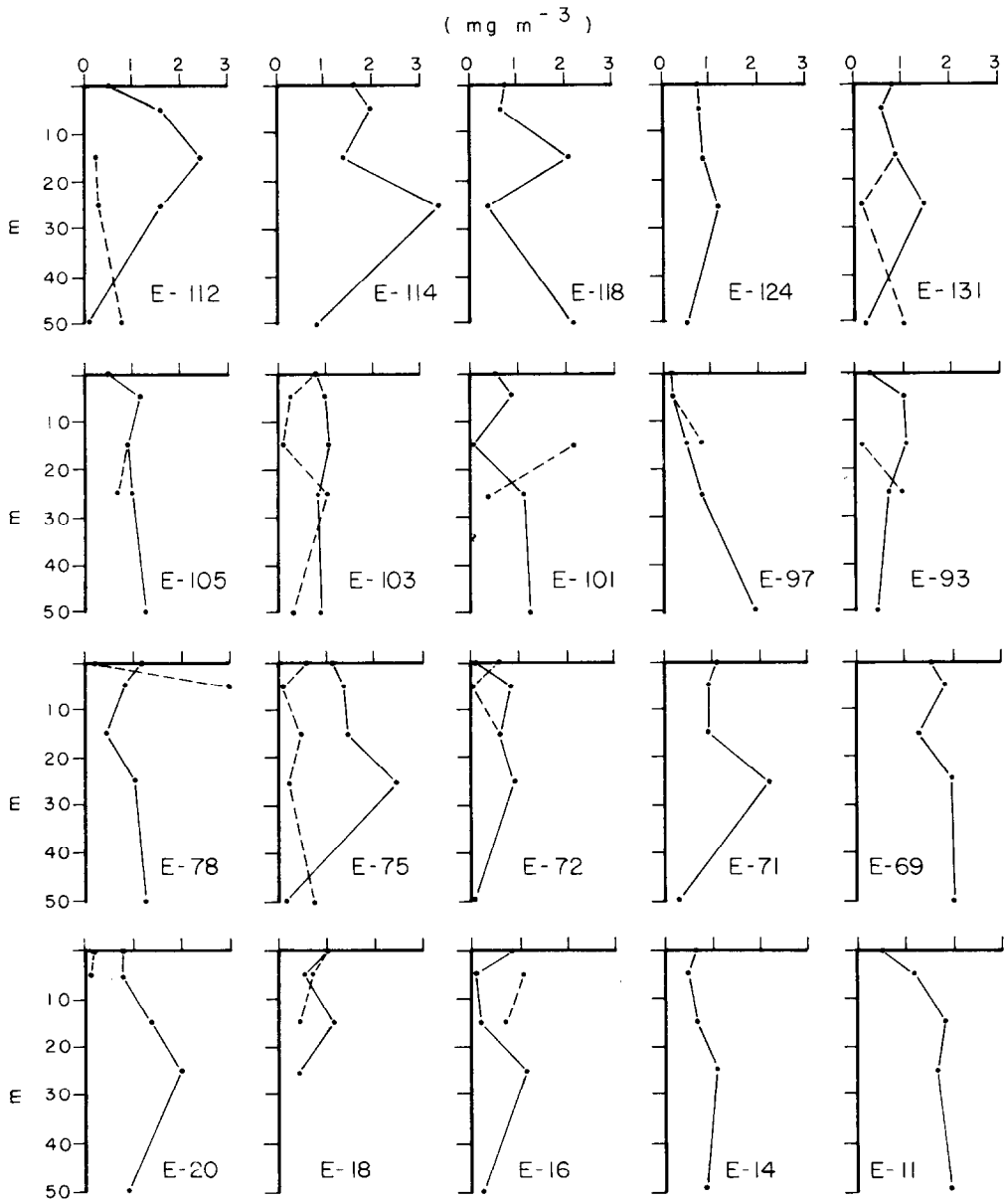


Figura 2. Transectos de perfiles verticales de la concentración de clorofila *a* (—) y feofitina *a* (---) en las cuatro zonas (I a IV, de arriba hacia abajo).

Figure 2. Transects of vertical profiles of chlorophyll *a* (—) and phaeophytin *a* (---) concentration in the four zones (I to IV, from top to bottom).

grandes islas, muestra que en las estaciones cercanas a la costa las concentraciones máximas subsuperficiales fueron entre 15 y 25 m, con 2.2 mg m^{-3} , mientras que en las estaciones alejadas de la costa, hay dos máximos bien marcados, uno superficial y otro entre los 15 y 25 m. Para este transecto, la feofitina *a* se observó sólo en la superficie en el lado oeste, con una tendencia a manifestarse a mayor profundidad a medida que aumenta la distancia de la costa (Fig. 2).

Las tasas de producción primaria medidas en el Canal de Ballenas (Figs. 3a,b,c) son máximas cerca de la superficie, con $32.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en el norte y $16.2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en el sur. Las tasas de producción integradas en la columna de agua se incrementaron de norte a sur del canal de $132 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a $175 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Se observó también un aumento de aproximadamente 10 m en la profundidad de la zona eufótica de norte a sur.

En la zona III, se realizaron en un mismo día experimentos de productividad en la columna de agua en dos estaciones cercanas, E-63 y E-66 (Figs. 3d,e). Estas estaciones presentaron una diferencia marcada en los valores máximos subsuperficiales de 25.5 y $6.7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, respectivamente.

Para la zona IV, tasa máxima de productividad en superficie fue $8.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ con valores integrados de $100 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Fig. 3f).

Para cada estación donde se realizaron experimentos de productividad, se calculó la razón de asimilación (P^B); los máximos fueron 11 y 12 $\text{mg C mg Cla}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en las zonas I y III, respectivamente, y menores al sur (tabla 1).

En la estación E-112 del Canal de Ballenas se realizó un experimento (P-E) en el que las muestras tomadas a cada profundidad fueron colocadas con diferentes porcentajes de irradiancia de luz simulados en el incubador. Los valores máximos de productividad primaria fueron los de las muestras recolectadas a profundidades con el 22 y 60% de irradiancia superficial (E_0), que fueron colocadas al 60% de E_0 (Fig.4). Las muestras puestas al 100% de irradiancia manifestaron fotoinhibición.

DISCUSION

La concentración de clorofila *a* en los perfiles verticales en el Canal de Ballenas tuvo

maximum, $32.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, at the surface in the northern part of the channel, and lower, $16.2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, in the southern part. The integrated primary production in the water column increased from north to south of the channel, from $132 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ to $175 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. An increase (up to 10 m) was observed in the depth of the euphotic zone from north to south of the channel.

Experiments of primary productivity were performed on the same day at two stations (E-63 and E-66) in zone III (Fig. 3d,e). These stations showed a marked difference between the maximum subsurface values of 25.5 and $6.7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, respectively.

In zone IV, the maximum primary productivity rate was $8.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ at the surface, with integrated values of $100 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Fig. 3f).

The assimilation ratio (P^B) was calculated for every station where primary productivity experiments were done. The maximum values were 11 and 12 $\text{mg C mg Cla}^{-1} \text{ h}^{-1}$ for zones I and III, respectively. Lower values were obtained for zone IV (table I).

At station E-112 in Ballenas Channel, a P-E experiment was performed in which the samples collected from each depth were placed in the incubator at different irradiance. The maximum values of primary productivity were those obtained for the samples collected at 22 and 60% of E_0 and placed at 60% of E_0 (Fig. 4). The samples at 100% of irradiance showed photoinhibition.

DISCUSSION

The vertical profiles of chlorophyll *a* in Ballenas Channel showed little variability at the southern end, with an increase in the depth of the euphotic layer. In contrast, chlorophyll *a* did not present a defined tendency in zone II. In the island region, a very variable distribution was observed due to strong mixing processes that occur in that area (Roden and Emilson, 1979). In the transect for zone IV, chlorophyll *a* decreased in a general way from the coast towards the open sea. Phaeophytin *a* concentration was inversely related to chlorophyll *a* due to degradation as a result of grazing (Raymont, 1980).

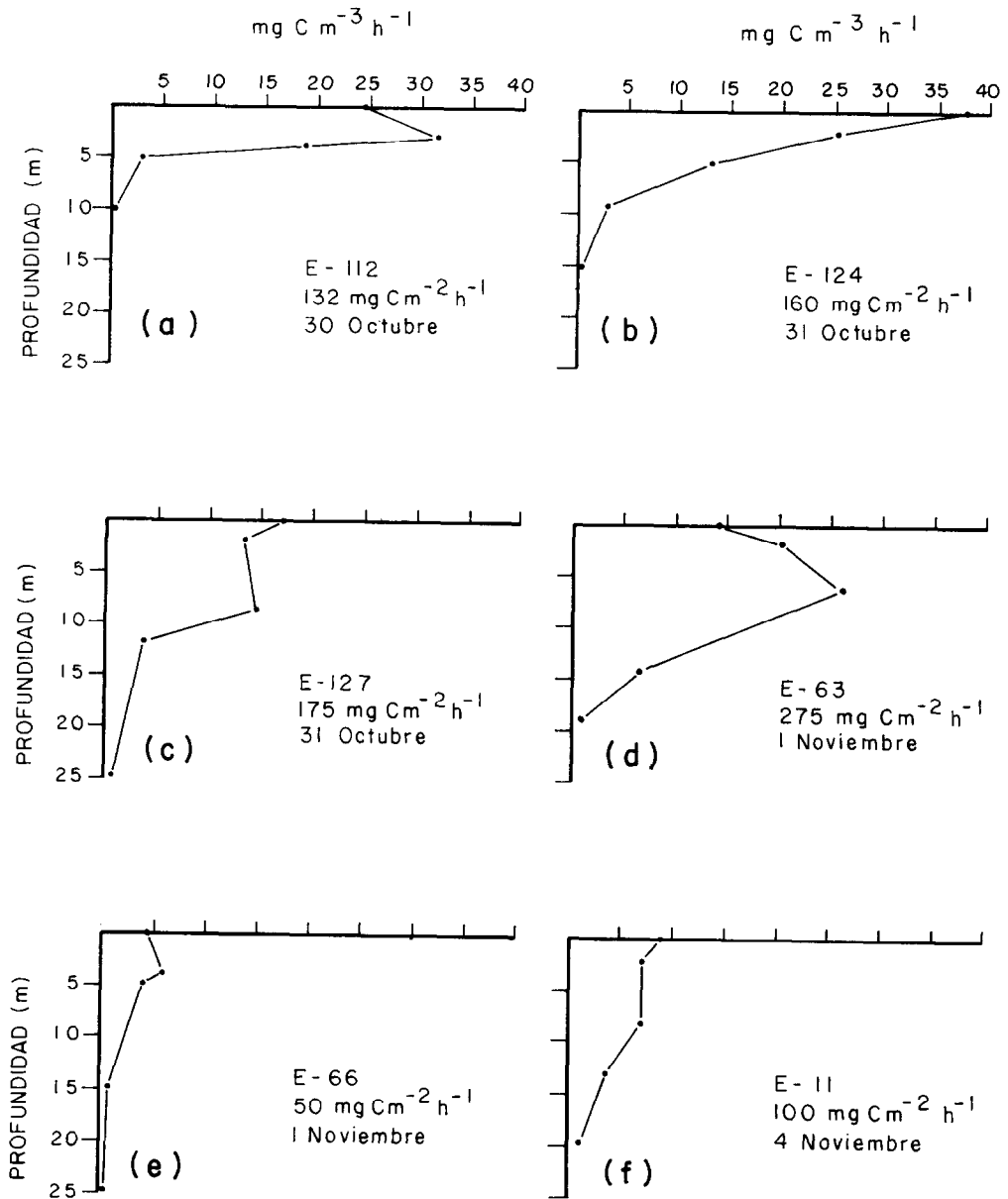


Figura 3. Perfiles verticales de productividad primaria en las diferentes estaciones.
Figure 3. Vertical profiles of primary productivity at different stations.

Tabla 1. Concentración de clorofila *a* máxima, productividad primaria integrada y razón de asimilación máxima para las estaciones de muestreo.

Table 1. Maximum chlorophyll *a* concentration, integrated primary productivity and maximum assimilation ratio at the sampling stations.

Estación	Clorofila <i>a</i> (mg m ⁻³)	P (mg C m ⁻² h ⁻¹)	PB (mg C mg Cla ⁻¹ h ⁻¹)
112	2.7	132	11.3
124	3.0	160	12.3
127	1.5	175	11.0
63	2.1	275	12.1
66	2.1	50	2.8
11	1.0	100	7.7

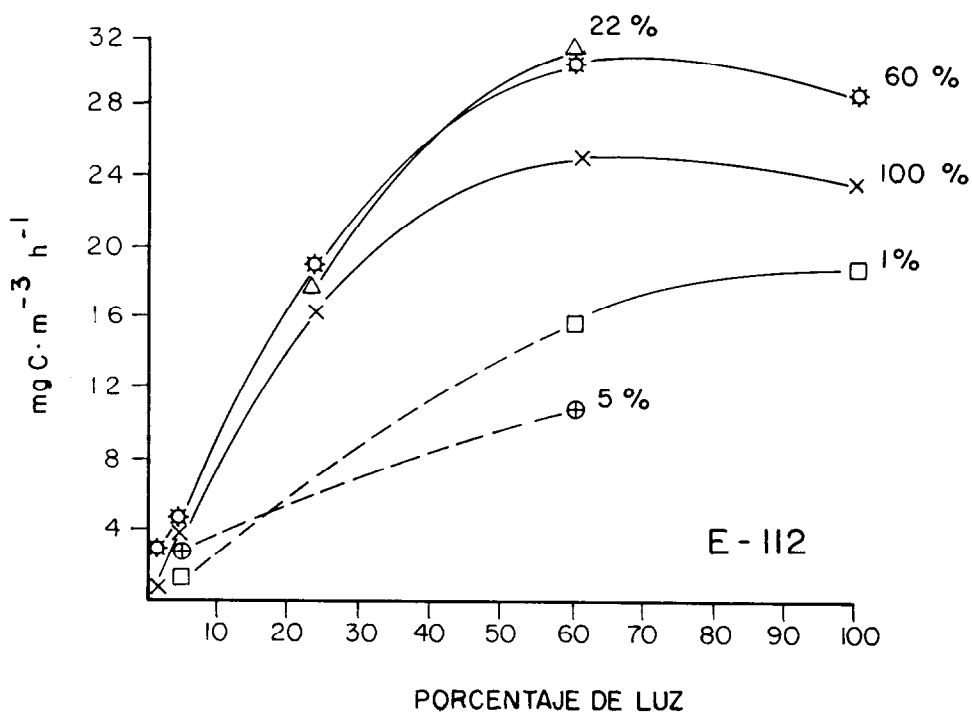


Figura 4. Curvas de productividad contra porcentaje de irradiancia en la estación E-112. El intervalo de variación entre las botellas claras es menor que el tamaño del símbolo.

Figure 4. Curves of productivity versus percentage of irradiance at station E-112. The interval of variation between the light bottles is lower than the symbol size.

poca variabilidad hacia la parte sur, a medida que la capa de la zona eufótica se hacía más profunda, mientras que la zona II no presentó una tendencia definida. En la región de las islas, se observó una distribución muy variable debido a los procesos de mezcla que ocurren en ella (Roden y Emilson, 1979). La concentración de clorofila *a* en el transecto de la zona IV, disminuyó en forma general de la costa hacia mar abierto. La concentración de feofitina *a* varió generalmente de manera inversa a la clorofila *a*, debido a que es el producto de la degradación de la clorofila *a* y resultado de la alimentación zooplanctónica (Raymont, 1980).

Del experimento de la estación E-112 en la zona I, se infiere un transporte vertical del fitoplancton en la columna de agua, ya que los organismos recolectados a irradiancias del 22% de E₀ pudieron ser transportados recientemente a esa zona provenientes de la zona del 60% de la irradiancia superficial. Esto se deduce debido a la máxima productividad registrada al 60%, y es similar a lo informado en relación con el Estuario de St Lawrence por Therriault *et al.* (1990). Al respecto, Falkowski (1983), y Cullen y Lewis (1988) señalan que el historial de luz del fitoplancton y la fotoadaptación cinética pueden ser usados para proveer información acerca del ambiente físico y, en particular, acerca de los procesos en la capa de mezcla. Los números de asimilación (P^B_m) de las muestras de 22 y 60% fueron iguales con un valor de $11.4 \text{ mg C mg Cl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$. Estos valores son similares a los determinados por Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988), para la misma área, en el invierno de 1981.

El aumento de la producción primaria integrada en la columna de agua en el Canal de Ballenas se explica con base en el incremento tanto de la biomasa fitoplanctónica como de la profundidad de la zona eufótica. Por otro lado, la gran diferencia en los valores de productividad primaria de las estaciones cercanas E-63 y E-66 pudo deberse a que en la estación E-66 el fitoplancton muestreado estaba recién transportado a la superficie y al ser incubado con una mayor irradiancia se presentó una reducción en la productividad, debida a la fotoinhibición (Harris y Lott, 1973; Platt *et al.*, 1980). Los movimientos ascendentes de agua son comunes en esta zona (Roden y Emilson, 1959), y durante este crucero las isolíneas de las variables hidrológicas así lo corroboraron (Cajal-Medrano *et al.*, 1992).

From the P-E experiment at station E-112, a vertical transport of phytoplankton in the water column is inferred, since the organisms collected at 22% of E₀ may have recently been transported to that zone from the layer of 60% of E₀. This is supported by the fact that maximum productivity was found at 60% of E₀, which is similar to that reported by Therriault *et al.* (1990) for the St. Lawrence Estuary. Falkowski (1983) and Cullen and Lewis (1988) reported that the light history of phytoplankton and the kinetic photoadaptation can be used to obtain information on the physical environment and, in particular, on the processes occurring in the mixed layer. The assimilation numbers (P^B_m) of the samples collected at 22 and 60% were the same, with a value of $11.4 \text{ mg C mg Cl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$. These values are similar to those reported by Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro (1988) for the same area in 1981.

The increase in primary productivity in the water column at Ballenas Channel can be explained by the increase in phytoplankton biomass and the increase in depth of the euphotic zone. On the other hand, the big difference in the primary productivity values for two stations close to each other (E-63 and E-66), could be that at station E-66 the phytoplankton was recently transported to the surface and when it was incubated at higher irradiances, photoinhibition was produced (Harris and Lott, 1973; Platt *et al.*, 1980). Vertical movements of water are common in this area (Roden and Emilson, 1959) and, during this cruise, the isolines of the hydrological variables confirmed this pattern (Cajal-Medrano *et al.*, 1992).

The surface primary productivity values were three to four times higher in the northern part of the study area than in the southern part, whereas the integrated productivity in the water column was only one to two times higher. This is due to the increase in the euphotic zone at the southern end, and differs to that found by other authors. Alvarez-Borrego and Lara-Lara (1991) reported that the primary productivity integrated in the water column was similar in the north and south.

The hydrological conditions of the seawater (temperature, salinity) and chlorophyll *a* concentration at station E-11 during this cruise were similar to those reported by

Los valores de productividad primaria en superficie fueron de tres a cuatro veces mayores en el norte que en el sur del área de estudio, mientras que la productividad integrada en la columna de agua fue de una a dos veces mayor. Esto se debe al incremento de la zona eufótica en la parte sur, y contrasta con la información de algunos autores de que la productividad primaria integrada es similar en el norte y el sur (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Las condiciones hidrológicas (temperatura, salinidad) y la concentración de clorofila *a* para el crucero en la estación E-11 y para la misma estación pero muestreada en 1983 (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987) fueron similares, y aunque la concentración de fosfatos en este estudio fue mayor, en ninguno de ambos casos fue limitante para el crecimiento del fitoplancton. El valor de la productividad primaria en superficie fue similar en ambos muestreos; sin embargo, varió con la profundidad, sus valores presentaron un máximo subsuperficial de $25 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ a 25 m y hubo fotoinhibición en superficie. Esto nos indica que aunque las condiciones del agua sean similares, la variabilidad de la productividad primaria es controlada además por otros factores. Esta diferencia pudo deberse a mayor irradiancia en el estudio de Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987) en superficie, ya que en nuestro muestreo no se presentó fotoinhibición.

De este trabajo se desprende que durante el otoño en el Canal de Ballenas se presenta una mezcla suficientemente fuerte para transportar al fitoplancton de la superficie hasta una profundidad de 22% de E_0 y viceversa. Debido a la mezcla vertical, en las estaciones próximas al sur de las islas existe una alta variabilidad en las tasas de producción primaria. Por otra parte, la producción integrada en la columna de agua en el área de estudio indica una mayor producción en la parte norte que en la parte sur, a pesar de tener una zona eufótica mayor esta última.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto Potencial Productivo de las Lagunas Costeras de Baja California, que fue patrocinado por la Secretaría de Educación Pública (SEP), con el registro 0-87-01-446. Se agradece al CONACYT la autorización para usar el tiempo del

Valdez-Holguín and Lara-Lara (1987) for the same station in 1983. Although the concentration of phosphate was higher in this study, it did not limit phytoplankton growth in either case. Furthermore, the primary productivity values at the surface were similar in both cases. However, differences were observed with depth, since their values showed a maximum of $25 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ below the surface at 25 m and photoinhibition at the surface. This indicates that although water conditions are similar, the variability of primary productivity is also controlled by other factors. The observed differences could be due to higher irradiances at the surface in the study of Valdez-Holguín and Lara-Lara (1987), since our results did not show photoinhibition.

It is deduced from this study that, during autumn, strong mixing occurs in Ballenas Channel which transports phytoplankton from the surface to the depth of 22% of E_0 and vice versa. Because of the vertical mixing, high variability in the photosynthetic rates is observed at the stations just south of the island region. On the other hand, integrated production in the water column indicates a relatively higher production in the northern part of the study area than in the southern part, even though the euphotic layer is greater in the latter.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is part of the project "Potencial productivo de las lagunas costeras de Baja California", supported by the Secretaría de Educación Pública through grant 0-87-01-446. We thank CONACYT for the ship time on *El Puma*, and R. Eppley and E. Renger for their help in counting the carbon fourteen samples.

English translation by the author.

barco *El Puma*, y a R. Eppley y E. Renger, su apoyo en el conteo de las muestras de carbono catorce.

REFERENCIAS

Allen, W.E. (1938). The Templeton Crocker expedition to the Gulf of California in 1935; the phytoplankton. *American Microscopic Society Transaction*, 8: 37-47.

- Alvarez-Borrego, S. and Gaxiola-Castro, G. (1988). Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. **Continental Shelf Research**, 8: 37-47.
- Alvarez-Borrego, S. and Lara-Lara, J.R. (1991). The physical environmental and primary productivity of the Gulf of California. In: J.P. Dauphin and B. Simoneit (eds.). **The Gulf and the Peninsular Province of the Californias**. Amer. Assoc. of Petrol. Geol., Memoir 47.
- Cajal-Medrano, R., González-Tamayo, M., Millán Núñez, R. y Santamaría del Angel, E. (1992). Hidrología de la región central del Golfo de California (otoño de 1987). **IV Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés**, UABC, 1992, Ensenada, Baja California, México.
- Cullen, J.J. and Lewis, M.R. (1988). The kinetics of algal photoadaptation in the context of vertical mixing. **J. Plankton Res.**, 10: 1039-1063.
- Falkowski, P.G. (1983). Light shade adaptation and vertical mixing of marine phytoplankton. A comparative study. **J. Mar. Res.**, 41: 215-237.
- Harris, G.P. and Lott, P. (1973). Light intensity and photosynthetic rates in phytoplankton. **J. Fish. Res. Bd. Canada**, 30: 1771-1778.
- Lara-Lara, J.R. and Valdez-Holguín, J.E. (1988). Size fraction biomass and primary productivity in the Gulf of California during spring 1984. **Ciencias Marinas**, 14(1): 1-14.
- Millán-Núñez, R. y Alvarez-Borrego, S. (1978). Ecuaciones espectrofotométricas tricromáticas para la determinación de clorofilas *a*, *b* y *c* y sus feofitinas. **Ciencias Marinas**, 5(1): 47-55.
- Paden, C.A., Abbot, M.R. and Winant, C.D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. 1. Sea surface temperature variability. **J. Geoph. Res.**, 96, No. c10: 18337-18359.
- Platt, T., Gallegos, C.L. and Harrison, W.G. (1980). Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of coastal marine phytoplankton. **J. Mar. Res.**, 38: 687-701.
- Platt, T. and Sathyendranath, S. (1988). Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. **Science**, 241: 1613-1620.
- Raymont, E.G.J. (1980). **Plankton and productivity in the oceans**, 2nd ed. Vol. 1, Phytoplankton. Pergamon Press, 489 pp.
- Roden, G.I. and Emilson, I. (1979). Physical oceanography of the Gulf of California. Paper presented at the Gulf of California symposium, Universidad Nacional Autónoma de México, Mazatlán, Sin., México. Unpublished.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigation in the Gulf of California. **J. Mar. Res.**, 18: 10-35.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972). A practical handbook of seawater analysis. **Bull. Fish. Res. Bd. Canada**, 167 2nd ed., 311 pp.
- Terriault, J.C., Booth, D., Legendre, L. and Demers, S. (1990). Phytoplankton photoadaptation to vertical excursion as estimated by an in vivo fluorescence ratio. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, 60: 97-111.
- Valdez-Holguín, J.E. y Lara-Lara, J.R. (1987). Productividad primaria en el Golfo de California: Efectos del evento El Niño 1982-1983. **Ciencias Marinas**, 13(2): 34-50.
- Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. **Mar. Biol.**, 3: 201-207.