

**EFFECTO DE LA ENERGIA CINETICA TURBULENTA
SOBRE LA DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA CLOROFILA *a*
EN UNA PEQUEÑA LAGUNA COSTERA**

**EFFECT OF TURBULENT KINETIC ENERGY ON
THE SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL *a*
IN A SMALL COASTAL LAGOON**

Eduardo Santamaría-del-Angel
Roberto Millán-Núñez
Ramón Cajal-Medrano

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

Recibido en septiembre de 1991; aceptado en enero de 1992

RESUMEN

Con el fin de observar el efecto de la energía cinética turbulenta (TKE) sobre la distribución espacial de la clorofila *a*, se analizaron cuatro variaciones espaciales (dos en flujo y dos en reflujo de marea) los días 15 y 16 de abril de 1989, en Puerto Don Juan. Se realizaron observaciones de deriva de boyas y altura de marea, y se tomaron muestras de agua superficial en 20 estaciones, para determinar la concentración de clorofila *a* en cada variación. Se deduce un patrón para las condiciones de reflujo, el cual muestra una relación directa entre la pendiente suave del fondo y las altas concentraciones de clorofila *a*. En las condiciones de flujo la relación es inversa. Dadas las observaciones, se sugiere que la mayor concentración de la clorofila *a* se debe a un simple proceso mecánico de acumulación en las zonas que por características morfológicas propias atenúan la TKE. Es decir, la velocidad de transporte del fitoplancton que entra a la laguna disminuye al llegar a las zonas de baja TKE, provocando un proceso de estancamiento de las partículas. Este patrón a largo plazo produce una concentración elevada en el interior de la laguna y, por tanto, una mayor concentración de clorofila *a* en las estaciones interiores. Cuando las condiciones de marea cambian a reflujo estos parches de alta concentración empiezan a ser transportados hacia el exterior de la laguna.

ABSTRACT

In order to observe the effect of turbulent kinetic energy (TKE) on the spatial distribution of chlorophyll *a*, four spatial variations were analysed (two during high and two during low tide) on 15 and 16 April, 1989 in Puerto Don Juan. Observations were made of buoy drifts and tidal height, and surface water samples were taken at 20 stations to determine chlorophyll *a* concentration in each variation. A pattern for ebb conditions is inferred, which shows a direct relationship between a smooth bottom slope and a high concentration of chlorophyll *a*. For flow conditions, the relationship is inverse. We suggest that the higher concentrations of chlorophyll *a* are due to a simple mechanical process of accumulation in areas with certain morphological characteristics that attenuate the TKE. That is, the speed of transport of the phytoplankton that

enters the lagoon decreases on reaching areas of low TKE, causing stagnation of the particles. This long-term pattern produces high concentrations in the inner part of the lagoon, resulting in higher concentrations of chlorophyll *a* at the innermost stations. When the tide begins to ebb, these patches of high concentration are transported to the outer part of the lagoon.

INTRODUCCION

El medio lagunar marino es un sistema complejo con gran interacción de sus componentes bióticos y abióticos. El estudio del fitoplancton lagunar y su variación con base en la energía cinética turbulenta (TKE) corresponde sólo a una pequeña porción de toda esta complejidad ecológica. Sin embargo, la energía cinética turbulenta es un factor que afecta la productividad orgánica primaria dado que, de alguna manera, contribuye a la organización vertical del ecosistema, del cual depende la verdadera ecología evolutiva del fitoplancton (Margalef, 1978).

Todos los cuerpos de agua, sin importar su tamaño, son medios turbulentos, cuya TKE varía según su dimensión: los cuerpos menores tienen mayor TKE (Harris, 1986).

La TKE ha sido definida matemáticamente por varios autores (Yamada, 1983; Sun y Hsu, 1988; Huang y Raman, 1989), pero dada la generalidad y complejidad de la ecuación en la microescala, es más práctico considerarla como un término meramente conceptual que agrupa a todos y a cada uno de los procesos advectivos que ocurren en la columna de agua. Estos procesos, en una laguna costera, son ocasionados principalmente por los ciclos de mareas (Brandini, 1985; Jonge, 1985; Legendre *et al.*, 1985; Mukai y Takimoto, 1985; Sournia *et al.*, 1987; Santamaría-del-Angel y Millán-Núñez, 1991, entre otros). Existen otras causas que originan procesos advectivos en un cuerpo costero, como pueden ser: el viento (UNESCO, 1984; Blanco, 1985; Sournia *et al.*, 1987), surgencias (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1981; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Farfán y Alvarez-Borrego, 1983; Campos y Mariño 1984), y otros factores locales (Mukai, 1987), como la geomorfología (UNESCO, 1982), inversiones térmicas (Campos y Mariño, 1984) o la presencia de afluentes de agua dulce (Jegadeesan y Ayyakkannu, 1986).

La importancia de cada uno de estos procesos en la TKE resultante varía de lugar a lugar, pero la mayoría de los autores están de acuerdo en que la corriente de marea es de los más importantes.

INTRODUCTION

Marine-lagoon environments are complex systems with great interaction of the biotic and abiotic components. The study of lagoon phytoplankton and its variation based on turbulent kinetic energy (TKE), would only correspond to a small part of this ecological complexity. However, turbulent kinetic energy affects primary organic production as it somehow contributes to the vertical organization of the ecosystem, on which the true evolutionary ecology of the phytoplankton depends (Margalef, 1978).

Bodies of water, of all sizes, are turbulent environments. However, TKE varies with body size and as a result small water masses have high TKE (Harris, 1986).

Turbulent kinetic energy has been defined mathematically by several authors (Yamada, 1983; Sun and Hsu, 1988; Huang and Raman, 1989). However, given the generality and complexity of the equation on the microscale, it is more practical to consider TKE as a merely conceptual term that groups all the advective processes that occur in the water column. In coastal lagoons, these processes are mainly caused by tidal cycles (Brandini, 1985; Jonge, 1985; Legendre *et al.*, 1985; Mukai and Takimoto, 1985; Sournia *et al.*, 1987; Santamaría-del-Angel and Millán-Núñez, 1991, among others). Advective processes in coastal bodies of water can also be caused by wind (UNESCO, 1984; Blanco, 1985; Sournia *et al.*, 1987); upwellings (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1981; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Farfán and Alvarez-Borrego, 1983; Campos and Mariño, 1984); other local factors (Mukai, 1987) such as the geomorphology (UNESCO, 1982), thermal inversions (Campos and Mariño, 1984) and freshwater inflow (Jegadeesan and Ayyakkannu, 1986).

The effect of each of these processes on the resulting TKE varies from place to place, but most authors agree that tidal current is one of the most important.

One of the main problems is to understand the biological response of the phytoplankton to variations on scales in which

Uno de los problemas principales es entender la respuesta biológica del fitoplancton a escalas de variación donde operen los distintos componentes de la TKE. Así, se puede decir que las fluctuaciones de ésta en el tiempo pueden originar mecanismos fisiológicos de adaptación, los cuales originan asociaciones competitivas y, en general, diversidad de la comunidad (Huston, 1979).

La mayoría de los trabajos sobre el fitoplancton lagunar suponen una estabilidad física a lo largo del año, y consecuentemente la interpretación de los resultados a corto plazo suele ser muy complicada y en algunos casos errónea, debido a la alta variabilidad temporal del medio.

Sournia *et al.* (1987) mencionan que las variaciones locales pueden ser explicadas por algunas hipótesis modernas en relación con la prevalencia de las fuerzas hidrodinámicas sobre las biológicas. Garcón *et al.* (1986) consideran que si los elementos del fitoplancton se comportan como partículas flotantes, neutras y pasivas, su distribución se puede explicar sólo con bases hidrodinámicas. Sin embargo, la consideración anterior es aplicable en escalas de tiempo menores a las tasas biológicas de cambio (v.g. reproducción).

En general, la mayoría de los estudios en los cuales se ha determinado que las condiciones físicas en la capa superficial son las que mayormente determinan los cambios de la estructura fitoplanctónica, han sido realizados en el medio oceánico (Margalef, 1978), donde la intensidad de la TKE se ve afectada por la distancia a la costa (UNESCO, 1984). Otros investigadores han trabajado en lagos, donde se eliminan algunos de los componentes de la TKE marina (v.g. Crawford *et al.*, 1979). Paloheimo y Fulthorpe (1987) confirman que en un lago la variación de la estructura fisicoquímica resultó más importante que los procesos biológicos en la determinación de la estructura del fitoplancton, y comentan además que la TKE no les permitió observar ningún patrón biológico.

Algunos autores han detectado procesos de concentración mecánica en lagunas costeras (Riaux y Douvillé, 1980; Blanco, 1985; Garcón *et al.*, 1986) y en lagos (Webster, 1990). Sin embargo, aún no está muy claro cuál de los componentes de la TKE contribuye mayormente a ésta.

En este trabajo se describe el efecto de la TKE en la distribución espacial de la

different components of the TKE are important. Thus, temporal TKE fluctuations can cause physiological mechanisms of adaptation, producing competitive associations and, in general, diversity of the community in general (Huston, 1979).

Most studies on lagoon phytoplankton assume physical stability throughout the year. Consequently, the short-term interpretation of the results is usually complicated and in some cases incorrect due to the high temporal variability of the environment.

Sournia *et al.* (1987) mention that local variations can be explained by some modern hypotheses on the prevalence of hydrodynamic forces over biological forces. Garcón *et al.* (1986) consider that if the phytoplankton behave as floating, neutral and passive particles, their distribution can only be explained based on hydrodynamics. However, the above is applicable in time scales smaller than the biological rates of change (e.g. reproduction).

In general, most of the studies which have determined that the physical conditions in the surface layer are those which mainly determine the changes in the phytoplankton structure, have been conducted in the marine environment (Margalef, 1978), where the intensity of the TKE is affected by the distance to the coast (UNESCO, 1984). Research has also been carried out in lakes where some of the marine TKE components are eliminated (e.g. Crawford *et al.*, 1979). Paloheimo and Fulthorpe (1987) report that, in a lake, the variation of the physico-chemical structure was more important than the biological processes in the determination of the phytoplankton structure and that TKE hindered the observation of any biological pattern.

Some authors have detected processes of mechanical concentration in coastal lagoons (Riaux and Douvillé, 1980; Blanco, 1985; Garcón *et al.*, 1986) and in lakes (Webster, 1990). However, it is not yet clear which TKE component was the one that most greatly contributed to this.

The effect of TKE on the spatial distribution of chlorophyll *a* in a small coastal lagoon is described in this study, where the principal component of the TKE is the ebb and flow of the tide. The tide is considered the principal component of the TKE in this particular coastal lagoon because it has no freshwater inflow and it is protected from the winds by the surrounding topography.

clorofila *a* en una pequeña laguna costera, donde el principal componente de la TKE es el flujo y reflujo de la marea. En esta laguna costera en particular, se considera a la marea como principal componente de la TKE dado que no cuenta con afluentes de agua dulce y está protegida de los vientos por la topografía circundante.

MATERIALES Y METODOS

Puerto Don Juan se localiza en la porción suroriental de Bahía de los Angeles (Fig. 1), entre las coordenadas 28°57'2" y 28°57'10" N y 113°27'20" y 113°26'20" O.

Su área es aproximadamente 1.7 km², su longitud 2.3 km y su profundidad alcanza 12 m en la boca (Fig. 2). La mayor parte de la laguna cuenta con una pendiente abrupta, a excepción de las áreas con arena en su margen costero, en las cuales la pendiente se suaviza considerablemente.

La variación del nivel del mar fue registrada mediante un mareógrafo de burbuja, instalado entre El Cantazo y Punta Cascabel, del 13 al 17 de abril de 1989, para conocer con exactitud los tiempos de flujo y reflujo de la marea. Los días 12, 13 y 14 de abril, se realizó un estudio de velocidad y dirección de las corrientes en flujo de marea, colocando y dejando derivar ocho crucetas con caras de 25 x 25 cm a lo largo de la boca y anotando su dirección y posición cada diez minutos.

Se realizaron cuatro variaciones espaciales, en veinte estaciones distribuidas en toda la laguna en transectos perpendiculares a los márgenes de costa (Fig. 1): dos de ellas el 15 de abril de 1989, a las 10:00 horas (en flujo) y a las 14:10 (en reflujo); las otras dos el 16 de abril de 1989, a las 9:35 (en flujo) y a las 16:10 (en reflujo) (Fig. 3). Cabe aclarar que las variaciones 1 y 2 fueron realizadas dos horas antes y después, respectivamente, del punto de marea más alto, mientras que las variaciones 3 y 4 fueron realizadas cuatro horas antes y después del máximo de marea. Las cuatro variaciones fueron realizadas en mareas vivas.

El recorrido y tiempo de muestreo para todas las estaciones no excedió 25 minutos. Para la determinación de los pigmentos fotosintéticos, se tomó una muestra de agua superficial en botellas Nalgene de un litro de

MATERIAL AND METHODS

Puerto Don Juan is located in the southeastern part of Bahía de los Angeles, between 28°57'2"-28°57'10" N and 113°27'20"-113°26'20" W (Fig. 1).

It is approximately 1.7 km² in area, 2.3 km long and 12 m deep at the mouth (Fig. 2). Most of the lagoon has a steep slope, except for the sandy areas along the shoreline where the slope is considerably smoother.

The variation of the sea level was measured with a bubble mareograph installed between El Cantazo and Punta Cascabel, from 13 to 17 April, 1989, in order to accurately determine the times of ebb and flow of the tide. On 12, 13 and 14 April, the speed and direction of the currents at high tide were studied. Eight 25 x 25 cm drogues were placed and allowed to drift along the mouth, and their direction and position were recorded every 10 minutes.

Four spatial variations were analysed at 20 stations distributed throughout the lagoon in transects perpendicular to the shoreline (Fig. 1): two on 15 April, 1989 at 10:00 hours (high tide) and 14:10 (low tide), and two on 16 April, 1989 at 9:35 (high tide) and 16:10 (low tide) (Fig. 3). Variations 1 and 2 were carried out two hours before and after, respectively, the point of highest tide, whereas variations 3 and 4 were carried out four hours before and after, respectively, the tide maximum, all four during spring tides.

The stations were covered and sampled in a time not exceeding 25 minutes. To determine photosynthetic pigments, samples of surface water were taken with one-litre Nalgene bottles, adding 1 ml of a saturated solution of magnesium carbonate (Richard and Thompson, 1952). Each sample was then filtered through 0.45 μ m-mesh and 47 mm-diameter nitrocellulose filters. They were stored in a cool and dark place until their spectrophotometric analysis to determine the concentration of pigments, following Millán-Núñez and Alvarez-Borrogo (1978).

The location of the stations (Fig. 1) and the bathymetry of the area (Fig. 2) were used to calculate the slope at each station ($\tan \alpha =$ station depth over minimum distance of the station to the coast), in order to obtain a variable that covaries directly with the magnitude of the TKE. To associate this descriptor

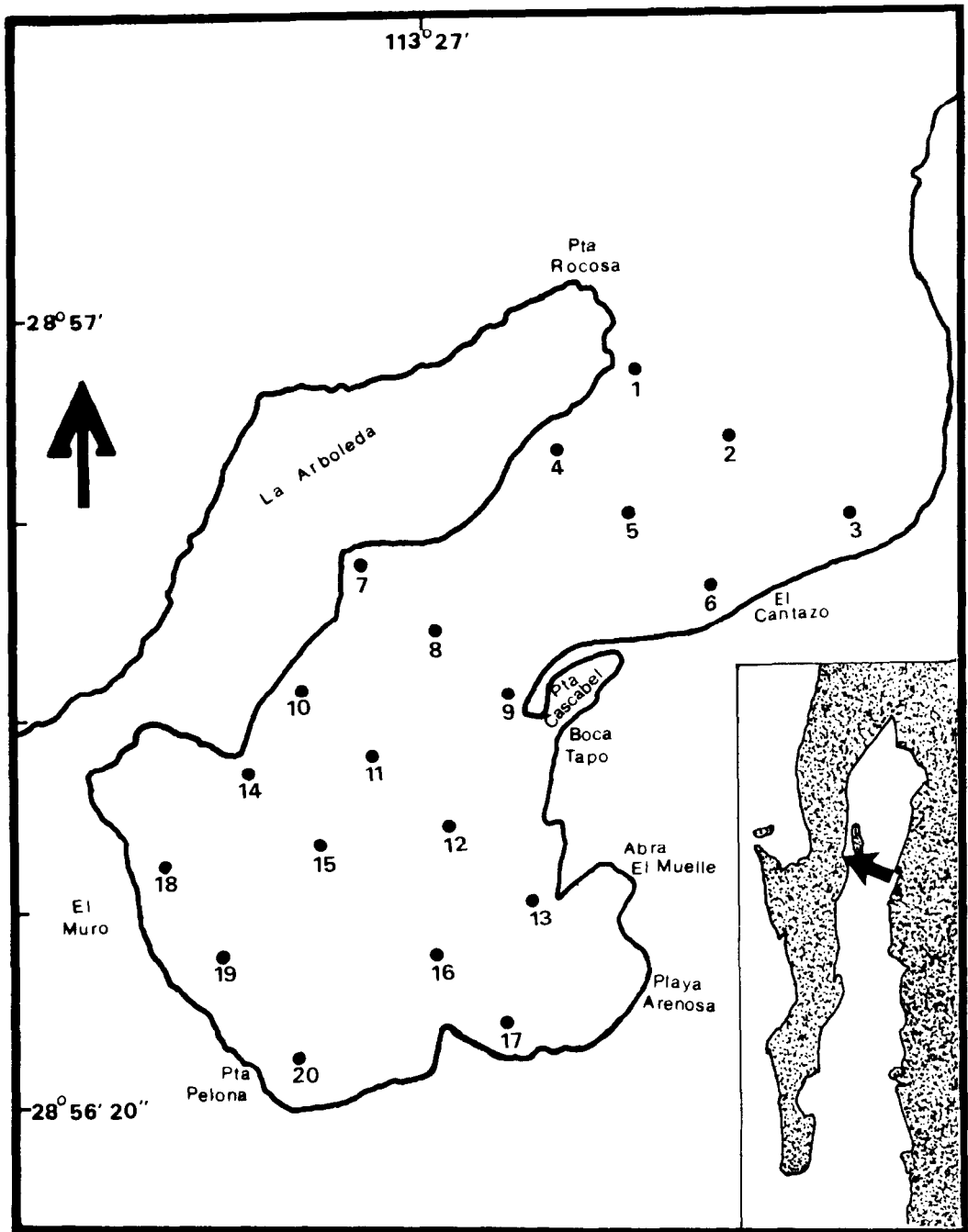


Figura 1. Localización del área de estudio y estaciones de muestreo.
Figure 1. Location of the study area and sampling stations.

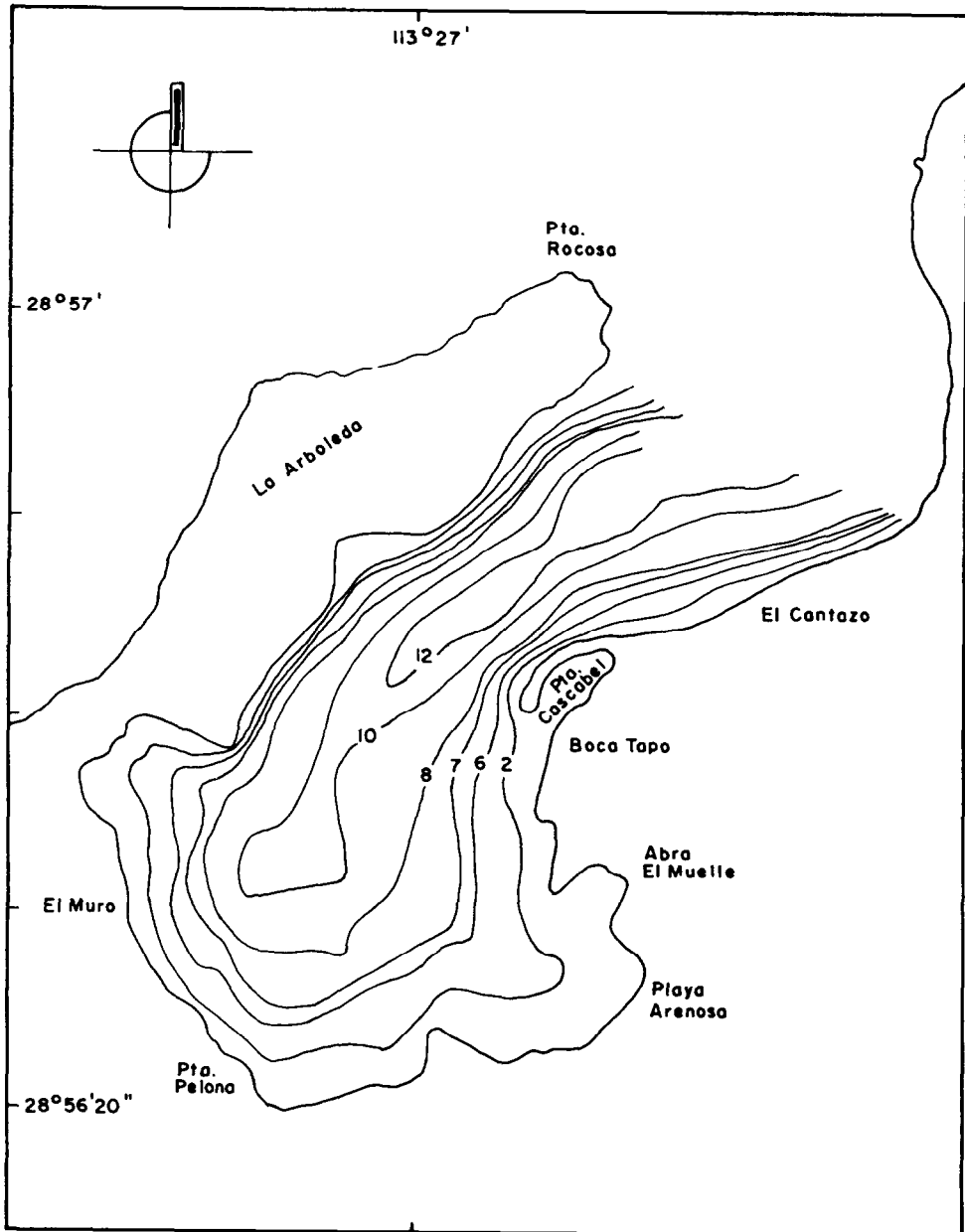


Figura 2. Batimetría de la zona de estudio (metros).
Figure 2. Bathymetry of the study area (metres).

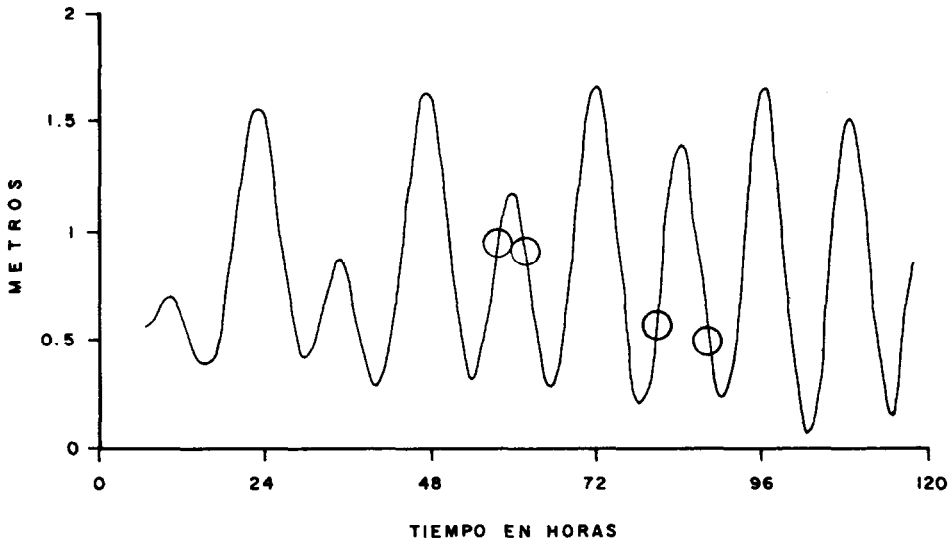


Figura 3. Altura del nivel del mar durante el muestreo. Los momentos de muestreo se indican con círculos.

Figure 3. Height of the sea level during the study. The circles indicate the moment of sampling.

capacidad, y se agregó 1 ml de una solución saturada de carbonato de magnesio (Richards y Thompson, 1952). Posteriormente, se procedió a filtrar cada una de las muestras en filtros de nitrocelulosa de $0.45 \mu\text{m}$ de luz de poro y 47 mm de diámetro, conservándolas en un lugar fresco y oscuro hasta su análisis espectrofotométrico para determinar la concentración pigmentaria, siguiendo la metodología que sugieren Millán-Núñez y Alvarez-Borrego (1978).

A partir de la localización de las estaciones (Fig. 1) y de la batimetría de la zona (Fig. 2), se calculó la pendiente de cada estación ($\tan \alpha =$ la profundidad de la estación entre la distancia mínima de la estación a la costa), con la idea de obtener una variable que covarie directamente con la magnitud de la TKE. Para asociar a este descriptor con la concentración de clorofila *a*, se procedió a realizar un análisis de asociación matemática (análisis de componente principal, ACP, en su representación numérica).

El primer paso en este proceso de análisis fue aplicar el ACP con base en una matriz de correlación para todas las variables (concentración de clorofila *a* para las cuatro

with the concentration of chlorophyll *a*, a mathematical association analysis was performed (principal component analysis (PCA) in its numerical representation).

The first step in this analysis was to apply the PCA based on a correlation matrix for all the variables (chlorophyll *a* concentration for the four spatial variations, depth, minimum distance to the coast and slope at each station) expressed in terms of *Z*. The variable *Z* is a nondimensional parameter used to generate a correlation matrix (*Z* equals the datum minus the average over the standard deviation).

The second step was to apply a PCA based on a binary codification matrix of the *Z* transformations for the chlorophyll *a* concentrations and for the untransformed slope. For the codification of chlorophyll *a* concentration, $Z < -1.0$ was considered a low value, *Z* between -1.0 and 1.0, mean value and $Z > 1.0$, a high value. For the slopes, the gross values were codified considering < 0.3 a smooth slope, between 0.3 and 0.4 moderate and > 0.4 steep.

A PCA was applied to spatial variations 1 and 3, which represent flow conditions and the codified slope. Another similar analysis

variaciones espaciales, la profundidad, la distancia mínima a la costa y la pendiente de cada estación) transformadas en Z (variable adimensional recomendada para construir la matriz de correlación, y que se calcula como el dato menos el promedio y esta diferencia entre la desviación estándar).

El segundo paso del análisis, fue aplicar un ACP basado en una matriz binaria de codificación de las transformaciones Z para las concentraciones de clorofila a y para la pendiente sin transformar. En dicha codificación, para la concentración de clorofila a , se consideraron valores bajos aquellos con $Z < -1.0$, valores medios con Z entre -1.0 y 1.0 , y valores altos con $Z > 1.0$. Para las pendientes, se codificaron los valores en bruto y se estimó pendiente suave < 0.3 , moderada entre 0.3 y 0.4 , y abrupta > 0.4 .

Considerando estos datos, se aplicó un ACP únicamente para las variaciones espaciales 1 y 3, que representan las condiciones de flujo unidas a la pendiente codificada. Otro análisis similar se realizó para las condiciones de refluo (variaciones 2 y 4 más la pendiente). Finalmente, el mismo análisis fue aplicado para cada una de las variaciones espaciales y la pendiente codificada.

En todos los ACP, el criterio de significancia para cada componente fue el valor propio (*eigen* valor), es decir, si el valor era > 1.0 el componente era considerado significativo, si era < 1.0 no era significativo.

RESULTADOS Y DISCUSION

La pendiente de la estación se utilizó como una variable que covaría directamente con la magnitud de la TKE, porque en la zona costera el tamaño de grano del sedimento depende directamente de la TKE. Así, en zonas de depósito donde hay grano muy fino, la TKE es baja, mientras que en aquellas con grano más grueso, es alta. Aunado a esto, el depósito de los sedimentos finos va haciendo más plano el piso de la cuenca. A lo largo del tiempo, la TKE va modificando el fondo según sea su magnitud, y forma canales que no permiten el depósito en zonas donde es alta y planicies de sedimentos más finos en zonas donde es baja (Huang y Raman, 1989).

Es probable que la pendiente de la estación no sea el mejor descriptor de la magnitud de la TKE, pero sí proporciona una mejor idea de la variación de ésta en el espacio.

was performed for ebb conditions (variations 2 and 4 plus the slope). Finally, the same analysis was applied to each spatial variation and codified slope.

In all the PCAs, the significance criterion for each component was the eigenvalue. That is, if > 1.0 the component was considered significant, whereas if < 1.0 it was not significant.

RESULTS AND DISCUSSION

The slope at the station was used as a variable that covaries directly with the magnitude of the TKE, because in coastal areas the sediment grain-size depends directly on the TKE of the area. Thus, in deposition areas with very fine sand there is low TKE and in areas with coarser grains there is higher TKE. In addition, the deposition of fine sediments makes the bottom of the basin smoother. The bottom is modified depending on the magnitude of the TKE. In areas of high TKE channels are formed that hinder deposition, while smooth surfaces with finer sediments are formed in areas of low TKE (Huang and Raman, 1989).

The station slope may not be the best descriptor of the magnitude of the TKE. However, it does give a better idea of the spatial variation of TKE.

This concept, based on bathymetry, was strongly supported by the data of current speed and direction at high tide (Fig. 4), which show that the patterns of each set of drogues follow the bathymetry of the area. Between Punta Cascabel and La Arboleda, a narrow channel is formed where speed is maximum, in addition to a funnel effect in the path of the drogues. Beyond this channel, the slope is smoother and the drogues drifted with less speed towards the deposition areas. At high tide, the drogues drifted from the mouth to the head in an average time of 1.5 hours. Thus, if the phytoplankton is considered a particle in the body of water, it would take it a similar time to pass through the lagoon. Therefore, on sampling the 20 stations in less than 25 minutes, a quasi-instantaneous image of the spatial distribution of chlorophyll a is obtained.

Figure 5a (corresponding to spatial variation 1 at the end of high tide) shows that, in general, higher concentrations of chlorophyll a occur in the inner part of the

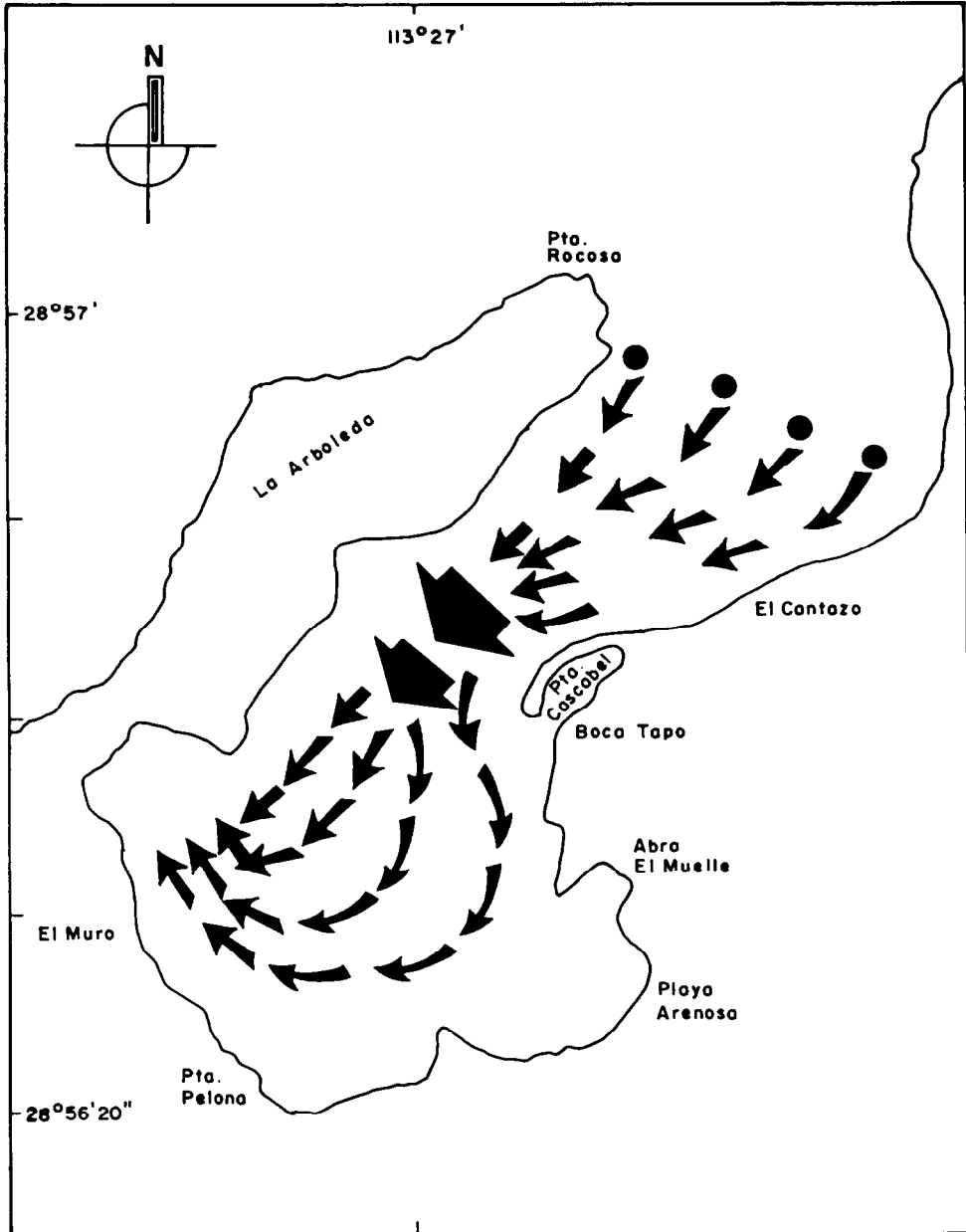


Figura 4. Dirección y velocidad de las corrientes superficiales en el área de estudio.
Figure 4. Direction and speed of the surface currents in the study area.

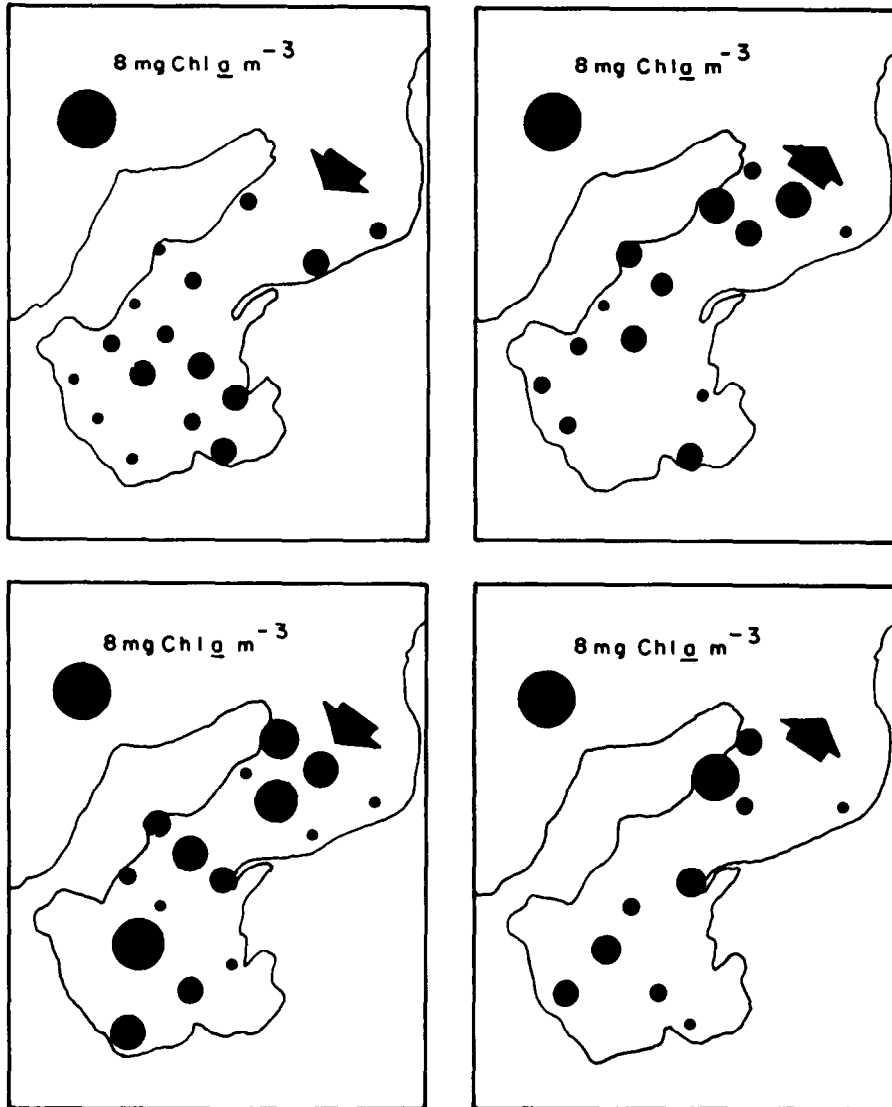


Figura 5. Distribución espacial de la concentración de clorofila *a* durante las variaciones: a y b 10:00 y 14:00 horas del 15 de abril, respectivamente; c y d 9:35 y 10:10 horas del 16 de abril, respectivamente.

Figure 5. Spatial distribution of chlorophyll *a* concentrations during the variations: a and b 10:00 and 14:00 hours on 15 April, respectively; c and d 09:35 and 10:10 hours on 16 April, respectively.

Esta concepción basada en la batimetría, fue apoyada fuertemente con los datos de dirección y velocidad de las corrientes en flujo (Fig. 4), donde se observa que los patrones de cada juego de crucetas se apegan a la batimetría de la zona. Entre Punta Cascabel y La Arboleda, se forma un canal estrecho en el cual la velocidad es máxima, y se combina con un efecto de embudo en la trayectoria de las crucetas. Una vez pasado este canal, la pendiente es más suave, por lo que las crucetas derivaron con una velocidad menor hacia las zonas de depósito. La deriva en flujo de las crucetas, desde la boca hasta la cabeza, fue en promedio de 1.5 horas. Esta consideración es de suma importancia; si conceptualizamos al fitoplancton como una partícula más en la masa de agua, a éste le llevaría un tiempo similar hacer el recorrido de lo largo de la laguna. Por ello, al muestrear las veinte estaciones en menos de 25 minutos, se puede considerar que se capta una imagen casi instantánea de la distribución espacial de la clorofila *a*.

Bajo este concepto, la Figura 5a, que representa un estado de marea al finalizar el flujo (variación espacial 1), muestra que, en general, las concentraciones mayores de clorofila *a* tienden hacia el interior de la laguna. En condiciones de inicio de reflujó (Fig. 5b), se observan los valores máximos en la boca, lo que hace suponer la exportación de altas concentraciones en condiciones de reflujó. Al inicio del flujo (Fig. 5c), se observan elevadas concentraciones en toda la laguna, principalmente en el canal, debido a la clorofila *a* importada y a la resuspensión del fitoplancton dentro de la laguna durante el reflujó previo. Al finalizar el reflujó (Fig. 5d), se observa una menor concentración de clorofila *a* en el interior de la laguna, con un incremento hacia la boca lo que implica exportación de altas concentraciones.

Buscando una asociación entre las concentraciones de clorofila *a* y la TKE, se realizó una serie de ACP. El primer objetivo, era identificar cuál de las variables morfológicas covaría con la concentración de clorofila *a*, por lo menos en alguna de las variaciones (Tabla 1), y se encontró (en el componente 3) que la pendiente se asocia en forma inversa a la concentración de clorofila *a* en la variación 2. Lo anterior indica que cuando hay pendientes suaves se encuentran altas concentraciones de clorofila *a*.

lagoon. At the beginning of low tide (Fig. 5b), maximum values occur at the mouth, suggesting that high concentrations are exported in ebb conditions. At the beginning of high tide (Fig. 5c), higher concentrations are observed throughout the lagoon, mainly in the channel, due to imported chlorophyll *a* and to resuspension of the phytoplankton within the lagoon during the previous low tide. At the end of low tide (Fig. 5d), lower concentrations of chlorophyll *a* occur in the inner part of the lagoon and increase towards the mouth, indicating that high concentrations are exported.

In order to find a relationship between chlorophyll *a* concentration and TKE, a PCA series was performed. The first step was to identify which of the morphological variables would covary with the concentration of chlorophyll *a*, at least in one of the variations (Table 1). In component 3, the slope was found to be inversely related to the concentration of chlorophyll *a* in variation 2. This indicates that when there are smooth slopes, high concentrations of chlorophyll *a* occur.

A PCA was also performed considering only the slope and the chlorophyll *a* concentration. For flow conditions (Table 2, component 4), the high values in variation 3 were directly related to the steep slope and the mean values were inversely related to this slope. For ebb conditions (Table 3, component 5), the high values in spatial variations 2 and 4 were directly related to the smooth slope and inversely related to the steep slope.

Similar patterns to those found in ebb and flow conditions were obtained when each variation was dealt with separately (data are not presented).

To summarize, the patterns obtained for flow-ebb transition conditions (Figs. 5b,d; Table 3) show that there is a direct relationship between a smooth slope and a high concentration of chlorophyll *a*. In ebb-flow transition conditions (Figs. 5a,c; Table 2), the relationship is inverse, that is high values occur when the slopes are steep.

Considering these results, a hypothesis on the distribution of chlorophyll *a* concentration based on TKE is proposed. Higher concentrations of phytoplankton biomass in areas with certain morphological characteristics that attenuate the TKE are due to a simple mechanical process of accumulation. The phytoplankton enters the lagoon, like any

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables transformadas en Z, con base en los descriptores estadísticos individuales vs. los componentes significativos calculados del análisis de componente principal (ACP) en su versión numérica.

Table 1. Pearson coefficients of correlation between the Z transformed variables based on the individual statistical descriptors vs. the significant components calculated from the principal component analysis (PCA) in its numerical representation.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Profundidad	0.620	0.122	-0.227	0.321
D. mínima	0.550	0.459	0.118	0.012
Variación 1	-0.193	0.638	-0.317	0.011
Variación 2	0.167	-0.277	0.599	0.376
Pendiente	0.092	-0.440	-0.655	0.418
Variación 3	0.475	-0.188	-0.001	-0.499
Variación 4	0.118	-0.249	-0.215	-0.575

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables codificadas vs. los componentes significativos calculados del análisis de componente principal (ACP) en su versión numérica, para un estado de marea en flujo (variaciones 1, 3 y la pendiente).

Table 2. Pearson coefficients of correlation between the codified variables vs. the significant components calculated from the principal component analysis (PCA) in its numerical representation, for high tide (variations 1 and 3 and the slope).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Variación 1 bajo	0.408	-0.236	0.329	-0.263
Variación 1 alto	-0.434	-0.331	-0.088	-0.002
Variación 3 bajo	-0.518	0.188	-0.042	-0.182
Variación 1 medio	-0.033	-0.570	-0.274	0.288
Pendiente suave	0.113	-0.314	-0.514	0.402
Pendiente moderada	-0.329	-0.133	0.567	0.085
Pendiente abrupta	0.225	0.465	-0.056	-0.506
Variación 3 medio	0.400	0.082	0.315	0.495
Variación 3 alto	0.209	-0.367	-0.346	-0.381

A partir de estos resultados, se decidió realizar el análisis (ACP) considerando únicamente la pendiente y la concentración de clorofila *a*. Para condiciones de flujo (Tabla 2, componente 4), los valores altos en la variación 3 se asocian directamente con la

particle in the body of water, with greater speed in areas with high TKE. On reaching low TKE areas, the speed decreases notably causing stagnation of the particles, that minimally lasts the flow-ebb transition period. This pattern produces high concentrations in

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables codificadas vs. los componentes significativos calculados del análisis de componente principal (ACP) en su versión numérica, para un estado de marea en reflujo (variaciones 2, 4 y la pendiente).**Table 3.** Pearson coefficients of correlation between the codified variables vs. the significant components calculated from the principal component analysis (PCA) in its numerical representation, for low tide (variations 2 and 4 and the slope).

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variación 2 medio	-0.545	0.099	-0.072	-0.357	-0.158
Pendiente moderada	-0.038	-0.629	0.246	0.228	0.034
Variación 4 bajo	0.144	-0.294	-0.645	-0.069	-0.221
Variación 4 medio	-0.438	0.037	0.494	0.186	-0.082
Variación 2 bajo	0.351	0.170	-0.011	0.645	-0.166
Variación 2 alto	0.259	-0.373	0.114	-0.408	0.447
Variación 4 alto	0.361	0.362	0.265	-0.143	0.413
Pendiente suave	-0.263	-0.357	-0.404	0.151	0.482
Pendiente abrupta	0.314	0.283	0.165	-0.395	-0.537

pendiente abrupta, y los valores medios de dicha variación se relacionan inversamente con la misma pendiente. Para las condiciones de reflujo (Tabla 3, componente 5), se observa que valores altos de las variaciones espaciales 2 y 4 se relacionan directamente con la pendiente suave e inversamente con la pendiente abrupta.

Al tratar cada variación por separado, se obtuvieron patrones similares a los encontrados en las condiciones de flujo y reflujo (no se presentan los datos).

En síntesis, los patrones obtenidos de las condiciones de transición flujo-reflujo (Figs. 5b y d; Tabla 3) muestran que existe una relación directa entre la pendiente menor y las altas concentraciones de clorofila *a*; mientras que en las condiciones de transición reflujo-flujo (Figs. 5a y c; Tabla 2) la relación es inversa, es decir, los valores altos se encuentran en pendientes mayores.

Todo lo anterior lleva a proponer una hipótesis sobre la distribución de la concentración de clorofila *a* con base en la TKE. La mayor concentración de la biomasa fitoplanctónica en las zonas que, por característi-

the inner part of the lagoon, resulting in higher concentrations of chlorophyll *a* at the innermost stations.

This hypothesis is supported by considering that the phytoplankton is distributed in patches and that the size of these patches depends directly on the magnitude of the hydrodynamical processes (Harris, 1980), and that coastal lagoons have innumerable small patches. For this area, Santamaría-del-Angel (1989) proposes that these small patches, detected in the water samples, do not respond independently to hydrodynamical forces but rather they respond as a whole.

There are numerous models that relate TKE to phytoplankton (Harris, 1986). However, these models are not sufficiently structured in order to give an integral idea of the relationship. In other words, they only clarify certain points that can give a general idea of the interaction.

It is important to note that for studies on the spatial distribution of lagoon phytoplankton, the sampling periods must be within the same tidal condition and the stations should be covered in the least time possible.

cas morfológicas propias, atenuan la TKE se debe a un simple proceso mecánico de acumulación. De tal manera que el fitoplancton entra a la laguna, como cualquier partícula en la masa de agua, con una velocidad mayor en las áreas donde la TKE es alta. Al llegar a las zonas de baja TKE, su velocidad disminuye notablemente provocando un proceso de estancamiento de la partícula, que mínimamente debe durar el tiempo de transición flujo-reflujo. Se produce así una concentración elevada en el interior de la laguna, que da como resultado mayor concentración de clorofila *a* en las estaciones interiores.

Esta hipótesis se apoya en la consideración de que el fitoplancton se distribuye en parches y que el tamaño de éstos depende directamente de la magnitud de los procesos hidrodinámicos (Harris, 1980), y puede pensarse que las lagunas costeras cuentan con infinidad de pequeños parches. Para esta zona, Santamaría-del-Angel (1989) propone que estos pequeños parches, detectados en las muestras discretas de agua, no responden de manera independiente a la fuerza hidrodinámica, sino como conjunto integral.

Existen gran cantidad de modelos que relacionan la TKE con el fitoplancton (Harris, 1986), pero éstos por sí solos no están lo suficientemente estructurados como para dar una idea integral de la relación. En otras palabras, solamente aclaran ciertos puntos que dan una idea muy general de la interacción.

Es importante remarcar que para realizar estudios de distribución espacial del fitoplancton lagunar, los tiempos de muestreo deben estar dentro de la misma condición de marea y el recorrido de todas las estaciones debe realizarse en el menor tiempo posible.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó dentro del proyecto "Potencial productivo de las lagunas costeras de Baja California", de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California, con el patrocinio otorgado por la Secretaría de Educación Pública bajo el registro 088-05-38.

LITERATURA CITADA

Blanco, J. (1985) Algunas características del fitoplancton de Lorbé (Ría de Ares y

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is part of the project "Potencial productivo de las lagunas costeras de Baja California" of the Facultad de Ciencias Marinas of the Universidad Autónoma de Baja California, funded in part by the Secretaría de Educación Pública (grant No. 088-05-38).

English translation by Christine Harris.

-
- Betanzos) en primavera. Bol. Inst. Esp. Oceanog., 2: 17-26.
- Brandini, F.B. (1985) Ecological studies in the bay of Paranaguá. I. Horizontal distribution and seasonal dynamics of the phytoplankton. Bol. Ins. Oceanog., S. Paulo, 33: 139-147.
- Campos, M.J. y Mariño, J. (1984). El ciclo anual del fitoplancton en la Ría de Arosa (1978-1979). Bol. Inst. Esp. Oceanog., 1: 20-30.
- Crawford, R.M., Dorey, A.E., Little, C. and Barnes, R.S.K. (1979). Ecology of Swanpool Falmouth. V. Phytoplankton and nutrients. Estuarine and Coastal Marine Science, 9: 135-160.
- Farfán, B.C. and Alvarez-Borrego, S. (1983). Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 17: 599-612.
- Garcón, V.C., Stolzenbach, K.D. and Anderson, D.M. (1986). Tidal flushing of an estuarine embayment subject to recurrent dinoflagellate blooms. Estuaries, 9: 179-187.
- Harris, G.P. (1980). Temporal and spatial scales in phytoplankton ecology. Mechanisms, methods, models, and management. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 37: 877-900.
- Harris, G.P. (1986). Phytoplankton Ecology, Structure, Function and Fluctuation. Chapman and Hall, N.Y., 384 pp.
- Huang, C.Y. and Raman, S. (1989). Application of the E- ϵ closure model to simulations of mesoscale topographic effects. Boundary-Layer Meteorol., 49: 169-195.
- Huston, M. (1979). A general hypothesis of species diversity. Am. Nat., 113: 81-101.

- Jegadeesan, P. and Ayyakkannu, K. (1986). Phytoplankton studies in Vettar backwaters (Coleroon estuarine complex) of the coasts of Southeast India. *Ciencias Marinas*, 12(1): 33-49.
- Jonge, V.N. (1985). The occurrence of "epipsammic" diatom populations: a result of interaction between physical sorting of sediment and certain properties of diatom species. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21: 607-622.
- Lara-Lara, R., Alvarez-Borrego, S. and Small, L.F. (1980). Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11: 613-637.
- Legendre, L., Demers, S., Therriault, J.C. and Boudreau, C.A. (1985). Tidal variations in photosynthesis of estuarine phytoplankton isolated in tank. *Mar. Biol.*, 83: 301-309.
- Margalef, R. (1978). Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, 1: 493-509.
- Millán-Núñez, E., Ortiz-Cortez, F.J. y Alvarez-Borrego, S. (1981). Variabilidad temporal y espacial de nutrientes y fitoplancton en una laguna costera, a fines del verano. *Ciencias Marinas*, 7(1): 103-128.
- Millán-Núñez, R., Alvarez-Borrego, S. and Nelson, D.M. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 15: 317-335.
- Mukai, T. (1987). Effects of micro-scale *in situ* environmental gradients concerning water qualities on the structure of the phytoplankton community in a coastal embayment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25: 447-458.
- Mukai, T. and Takimoto, K. (1985). Effects of environmental gradients concerning water qualities on the structure of the phytoplankton community in coastal sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 20: 169-181.
- Paloheimo, J.E. and Fulthorpe, R.R. (1987). Factors influencing plankton community structure and production in freshwater lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44: 650-657.
- Paloheimo, J.E. and Fulthorpe, R.R. (1987). Factors influencing plankton community structure and production in freshwater lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44: 650-657.
- Riaux, C. and Douvillé, J.L. (1980). Short-term variation in phytoplankton biomass in a tidal estuary in North Brittany. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 10: 85-95.
- Richards, F.A. and Thompson, T.G. (1952). The estimation and characterization of plankton populations by pigment analyses. II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *J. Mar. Res.*, 11: 156-172.
- Santamaría-del-Angel E. (1989). Análisis estadístico del efecto de las variaciones ambientales sobre la estructura fitoplanctónica en una laguna costera al oeste del Golfo de California en el verano de 1986. Cuarta Reunión Nacional de la Sociedad Mexicana de Planctología, La Paz, B.C.S., 27-29 de abril.
- Santamaría-del-Angel, E. y Millán-Núñez, R. (1991). Variación de la estructura fitoplanctónica en Puerto Don Juan, Bahía de los Angeles, Baja California, México. Verano de 1986. *Ciencias Marinas*, 17(2): 1-24.
- Sournia, A., Birrien, J.L., Douvillé, J.L., Klein, B. and Viollier, M. (1987). A daily study of diatom spring blooms at Roscoff (France) in 1985. I. The spring bloom within the annual cycle. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25: 355-367.
- Sun, W.Y. and Hsu, W.R. (1988). Numerical study of cold air outbreak over the ocean. *J. Atmos. Sci.*, 45: 1205-1227.
- UNESCO(1982). Simposio internacional sobre las lagunas costeras. Burdeos, Francia, 8-14 de septiembre de 1981. UNESCO Technical Papers in Marine Science, Paris, No. 43, 16 pp.
- UNESCO (1984). Eutrophication in coastal marine areas and lagoons; a case study of "Lac de Tunis". UNESCO Reports in Marine Science, Paris, No. 29, 54 pp.
- Webster, I.T. (1990). Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 35: 989-1001.

Yamada, T. (1983). Simulation of nocturnal drainage flows by q2l turbulence closure model. *J. Atmos. Sci.*, 40: 91-106.