

ESTUDIO HIDROLOGICO DE LA LAGUNA CELESTUN, YUCATAN, MEXICO, DURANTE 1985

HYDROLOGICAL STUDY OF THE CELESTUN LAGOON, YUCATAN, MEXICO, DURING 1985

David S. Valdés

Juán Trejo

Elizabeth Real

Departamento de Recursos del Mar

Centro de Investigación y de Estudios

Avanzados del I.P.N.

Unidad Mérida, A.P. 73

Cordemx, C.P. 97310

Mérida, Yucatán, México

Valdés David, S., Trejo, J. y Real, E. Estudio hidrológico de la Laguna Celestún, Yucatán, México, durante 1985. *Hydrological Study of the Celestún Lagoon, Yucatán, Mexico, During 1985.* Ciencias Marinas 14(2): 45-68,1988.

RESUMEN

Se realizó el estudio hidrológico de la Laguna Celestún durante 1985, el cual mostró que este cuerpo de agua, comunicada permanentemente con el mar, tiene una gran influencia de manantiales de agua dulce, que además de bajar la salinidad, aportan silicatos, nitritos y nitratos, y aumentan la alcalinidad al elevar las concentraciones de bicarbonato y carbonato. El fósforo tuvo fluctuaciones, pero en términos generales se encontraron concentraciones altas y más aún en la parte interna de la laguna, el amonio también presentó un comportamiento similar es decir bajas concentraciones fuera de la laguna y concentraciones mayores dentro de ella.

ABSTRACT

The hidrology of Celestún Lagoon was studied during 1985, and it shows that this estuary, having permanent communication with the sea, has a great influence from fresh water spring which drop the salinity, bring silicates, nitrites, and nitrates, and increase the alkalinity due to the high bicarbonate and carbonate concentration of this water. The phosphorus had variations but in general was high and even more inside the Lagoon, the ammonium also showed a similar behavior: low concentrations outside and major concentrations inside the Lagoon.

INTRODUCCION

Gran parte de los procesos biológicos que ocurren en una laguna costera se ven afectados por las características fisicoquímicas del agua, y a su vez muchos parámetros químicos del agua, son el resultado de los procesos biológicos que suceden en ella. Por lo anterior, es que se llevó a cabo un estudio hidrológico de la Laguna Celestún, y así tener bases con que explicar su comportamiento como ecosistema.

INTRODUCTION

Most of the biological processes occurred in a coastal lagoon are affected by the physical and chemical characteristics of the water, and at the same time, several chemical parameters of the water are the result of the biological processes occurred in it. This is why an hydrological study of the Celestún Lagoon was carried out, obtaining some basis to explain its behavior as an ecosystem.

Las características geológicas de la zona donde se encuentra esta laguna influyen directamente en su comportamiento hidrológico, ya que el aporte de agua dulce es por manantiales y no por ríos como en la mayoría de las lagunas costeras. Esto hace que Celestún tenga un comportamiento muy singular debido a las diferencias fisicoquímicas entre el agua de un manantial y la de un río, por ejemplo para aguas subterráneas se tienen reportadas concentraciones de calcio, bicarbonato y silicatos entre tres y cuatro veces mayores que las de un río (Millero, 1975; Stumm y Leckie, 1967).

AREA DE ESTUDIO

La Laguna Celestún está localizada en la costa del Golfo de México de la Península de Yucatán, 85km al oeste de la ciudad de Mérida, a 20°45' de latitud norte y 90°25' de longitud Oeste (Fig. 1). Se encuentra en la zona denominada como: Plataforma de Yucatán, región "F", por Lankford (1977), la cual se caracteriza por tener una topografía Kárstica, ya que es una plataforma de carbonato extensa, con una costa baja, sin relieves, y con aporte de agua subterránea, debido a la composición calcárea del suelo (Carranza-Edwards *et al.*, 1975).

El clima de la costa y el interior, va desde el árido hasta el subhúmedo, con lluvias en verano, pero sin formación de arroyos. La plataforma continental es muy ancha, promediando 125km y muy somera, ya que la profundidad media es menor de 10m. El oleaje es de baja energía, excepto durante los huracanes de verano y los "nortes" de invierno. Asimismo, las mareas tienen un intervalo bajo (0.6m) siendo del tipo "mixto semidiurno" (Instituto de Geofísica, 1983).

Lankford (1977), en su clasificación morfogenética de lagunas Mexicanas, coloca a Celestún en el tipo III-A, es decir, laguna con barrera arenosa "Gilbert-de Beaumont", creada sobre la parte interna de la plataforma, por el oleaje y corrientes. La Laguna es bastante somera en su mayor extensión (alrededor de 0.5m), excepto por un canal que corre a todo lo largo, producto de la marea, y que permite

The geological characteristics of the zone where this Lagoon is located influence directly in its hydrological behavior, because the supply of fresh water comes from springs and not from rivers as in most of the coastal lagoons. This causes a particular behavior in Celestún, due to the physical and chemical differences between the spring water and the river water; for example, for ground waters, concentrations of calcium, bicarbonate and silicates are reported three and four times greater than the concentrations from a river (Millero, 1975; Stumm and Leckie, 1967).

STUDY AREA

Celestún Lagoon is located in the coast of the Gulf of Mexico in the Yucatán Peninsula, 85km west of Mérida City, 20° 45' north latitude and 90° 25' west longitude (Fig. 1). It is located in the zone called "Yucatán Platform", region "F", by Lankford (1977), which is characterized by a Karstic topography, because it is an extensive carbonate platform, with a low coast, without cliffs, and with an underground supply of water, due to the calcareous composition of the ground (Carranza-Edwards *et al.*, 1975).

The weather of the coast and the interior is from dry to subhumid, with rain in the summer but without the formation of streams. The continental platform is very wide, 125km mean value, and very shallow because the mean depth is less than 10m. The tide is of low energy, except during the hurricanes of the summer and the "nortes" of the winter. The tides are of low interval (0.6m), being of the "mixed semidiurnal" type (Geophysics Institute, 1983).

Lankford (1977), in his morphogenetic classification of Mexican lagoons, considers Celestún of the type III-A, that is, lagoon with sandy barrier "Gilbert-de Beaumont", created over the internal part of the platform by the tide and currents. The Lagoon is generally very shallow (around 0.5m), except for a channel which goes all the way long as a result of the tide and which allows navigation. The borders are surrounded by mangroves, and an extensive part of the bottom of the Lagoon is covered by vegetation. In this body of water is

la navegación. Los bordes están rodeados de manglar, y gran parte de los fondos de la laguna está cubierta por vegetación. En este cuerpo de agua se lleva a cabo una intensa actividad pesquera mediante chinchorros y diversas artes manuales, además de que sirve de refugio a diferentes aves acuáticas.

La Laguna Celestún es un típico sistema estuarino en el que el intercambio se lleva a cabo por una boca que siempre permanece abierta y el agua dulce proviene principalmente de manantiales que afloran en la Laguna durante todo el año, y en forma secundaria de la precipitación pluvial en épocas de lluvias. Por lo anterior este sistema presenta salinidades muy variables y debido a eso la flora y la fauna deben tener un alto nivel de adaptación a las cambiantes condiciones ambientales; y se han originado de fuentes marinas, dulceacuícolas y terrestres, (Day y Yañez-Arancibia, 1982).

MATERIAL Y METODOS

Para llevar a cabo el estudio hidrológico se estableció una red de 23 estaciones de muestreo, que abarcan desde la zona marina frente a la boca, hasta el interior de la Laguna (Fig. 1). Las mediciones y colectas de muestras se llevaron a cabo en los meses de marzo, abril, junio, julio, agosto y octubre de 1985, todas ellas superficiales. Se hicieron mediciones *in situ* de temperatura y salinidad con un termosalinómetro portátil de inducción marca Kahlsico, de pH con un medidor portátil de pH marca Corning Modelo 3-D. Para los demás parámetros, se tomaron muestras de agua con botella Van-Dorn.

El oxígeno disuelto, alcalinidad total, nitratos, nitritos, amonio y fósforo reactivo, se determinaron siguiendo la metodología descrita por Strickland y Parsons (1972), los silicatos mediante la técnica de Schwartz (1942), y el fósforo total con la de Inland Waters Directorate (1974). La titulación de oxígeno se hizo en el campo cuando mucho seis horas después de fijado y las muestras para nutrientes fueron conservadas añadiendo 1ml/l de cloroformo y puestas en la obscuridad a 4°C, su análisis se llevó a cabo en el transcurso de las siguientes 48 horas (Thayer, 1970).

an intense fishing activity with beach seines and other manual arts. It is also a refuge for different aquatic birds.

The Celestún Lagoon is a typical estuarine system in which the interchange takes place by a mouth which is always open, and the fresh water comes mainly from the springs all year round, and secondarily by the pluvial precipitation in the rainy season. Because of the mentioned reasons, this system presents very variable salinities. The flora and fauna must have a high level of adaptation to the environmental changing conditions, and these have been originated from marine, fresh water and earth sources (Day and Yañez-Arancibia, 1982).

MATERIAL AND METHODS

In order to carry out the hydrological study, a net of 23 sampling stations was established, which cover from the marine zone in front of the mouth up to the internal part of the Lagoon (Fig. 1). The measurements and sampling collection were carried out in the months of March, April, June, July, August and October, 1985, all of them from surface. Measurements *in situ* of temperature and salinity were taken with a Kahlsico portable induction thermosalinometer, for the pH, a 3-D model Corning portable meter was used. For the rest of the parameters, samples were taken with a Van-Dorn flask. The dissolved oxygen, total alkalinity, nitrates, nitrites, ammonium and reactive phosphorous were determined by Strickland and Parsons methodology (1972), the silicates by the Schwartz (1942) technique, and the total phosphorous by the Inland Waters Directorate (1974). The oxygen titulation took place in field about six hours after being fixed, and the samples for the nutrients were preserved adding 1ml/l chloroform and taken to darkness at 4°C, the analysis took place during the following 48 hours (Thayer, 1970).

RESULTS AND DISCUSSION

The surface temperature presented a high variable and without fluctuations almost all the year round. It varies according to the behavior of the tropical shallow water bodies.

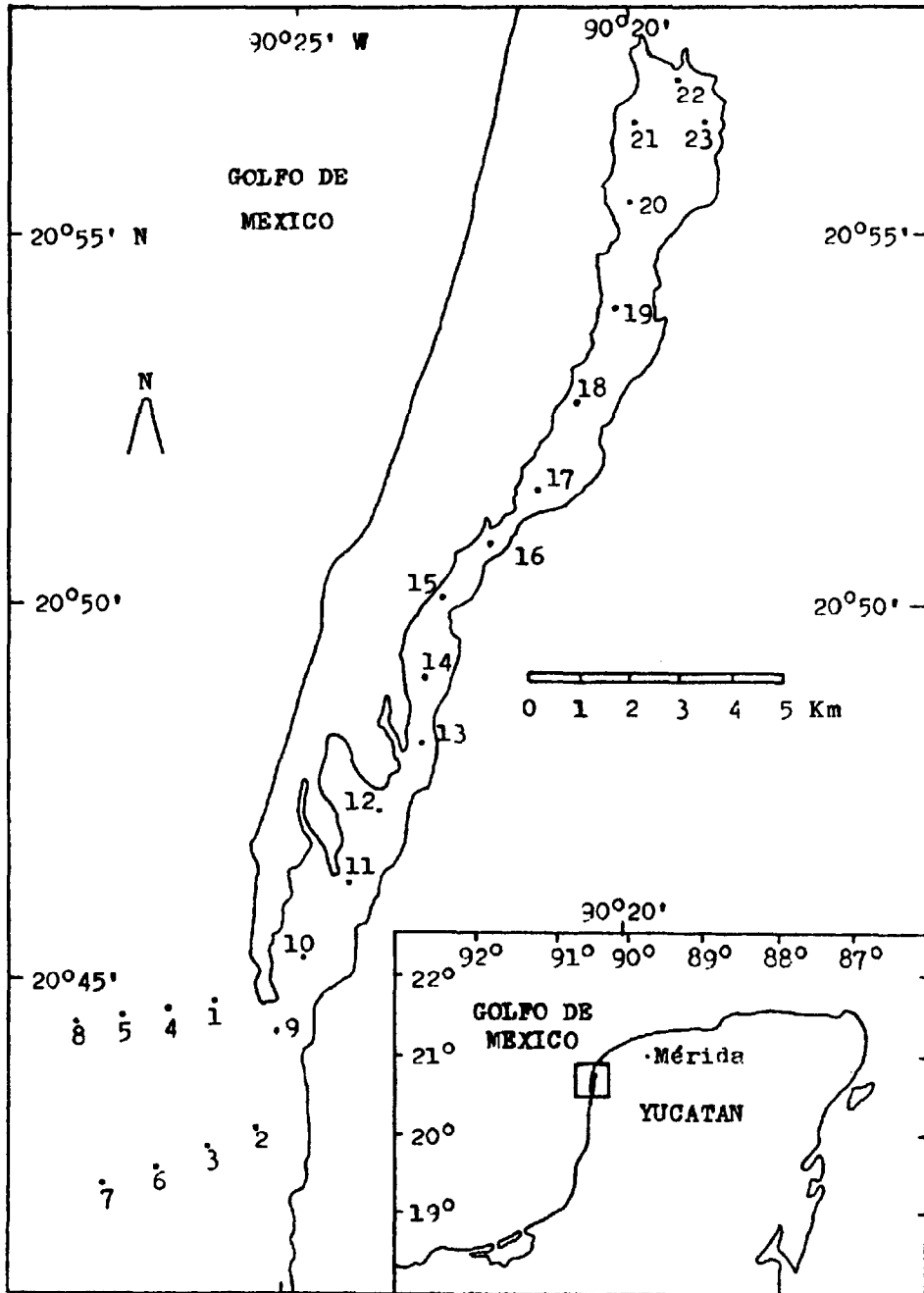


Figura 1. Laguna Celestún. Ubicación de estaciones de muestreo.
Figure 1. Celestún Lagoon. Location of sampling stations.

RESULTADOS Y DISCUSION

La temperatura superficial es una variable elevada y sin fluctuaciones durante casi todo el año, lo cual va de acuerdo al comportamiento de los cuerpos de aguas someras tropicales. Los valores mínimos corresponden a marzo (25°C), y los máximos en julio y agosto (31°C). El hecho de que este factor tenga un alto valor en todos los muestreos, incide directamente en la riqueza de organismos que se encuentren en la Laguna ya que la diversidad es mayor en las aguas cálidas que en las frías por lo que se tienen una gran variedad de especies que pueden colonizar el sistema (Day, 1967). La Figura 2 muestra la distribución de la temperatura superficial a lo largo de las estaciones muestreadas en el mes de junio, la tendencia en los demás meses es similar: al ir internándose en la laguna se va incrementando esta variable ya que la profundidad es menor y la radiación solar provoca un mayor calentamiento.

El comportamiento de la salinidad superficial se muestra en la Figura 3 para el mes de junio, y en la Figura 4 donde se presentan las isoclinas de esta variable a lo largo de la Laguna y en los diferentes meses. Debido a la poca profundidad existente, (0.5m), y el oleaje provocado por el viento, no se encontró estratificación alguna de aguas con diferente salinidad. En la época de estiaje (marzo-junio), se detectaron valores altos de salinidad superficial en la parte más cercana al mar de la laguna, que van desde 20 partes por mil (‰), en la estación 16, hasta 37‰ en los bajos frente a la boca de Celestún, (Fig. 3) esto debido a la poca o nula precipitación pluvial, y a la alta tasa de evaporación que se dan en esa época.

A partir del mes de julio, las lluvias provocaron una disminución de la salinidad, aunque en las estaciones de la 9 a la 15 siempre se observa un ambiente mixohalino (Fig. 3, salinidad de 10‰ a 30‰), lo cual indica que la marea juega un papel muy importante, y conserva la dinámica del estuario en lo que respecta a la salinidad, es decir se mantiene un amplio intervalo de valores en esta variable, lo cual es más importante que el valor promedio (Emery y Stevenson, 1957).

The minimum values correspond to March (25°C), and the maximum in July and August (31°C). The reason for this (high value in all the samples) is because of the richness of organisms found in the Lagoon. The diversity is higher in warm water rather than in cold water for which a great variety of species can colonize the system (Day, 1967). Figure 2 shows the distribution of the surface temperature along the sampled stations during the month of June. The tendency in the other months is similar: going into the interior of the Lagoon, this variable increases because the depth is less and the sun radiation causes greater heat.

The behavior of the surface salinity is shown in Figure 3 for the month of June, and in Figure 4, the isolines of this variable along the Lagoon in the different months are shown. Due to the shallow waters, (0.5m), and the tide caused by the wind, stratification of water was found with different salinity. In the low water season (March-June), high surface salinity values were detected near the sea in the Lagoon, being 20‰ in station 16, to 37‰ in the bottom part in front of the mouth of Celestún (Fig. 3). This is due to the scarce or non-existent pluvial precipitation, and to the high rate of evaporation occurred in this season.

From July onwards, rains caused a decrease in salinity, although from stations 9 to 15 a mixohaline environment was always observed (Fig. 3, salinity of 10‰ to 30‰), which indicates that the tide is very important, and preserves the dynamics of the estuary with respect to salinity, this means that it maintains a wide interval of values in this variable, which is more important than the mean value (Emery and Stevenson, 1957).

In the internal part of Celestún, from stations 18 to 23, the fresh water is supplied by springs, thus, lower salinities prevail all year round, as it can be observed in Figure 3. In April a salinity of 0‰ was detected at station 19, and in October the region of 5‰, runs from station 21 to 15. This supply of fresh water is very important because when mixing with sea water it produces a physical and chemical variability, which in the coastal

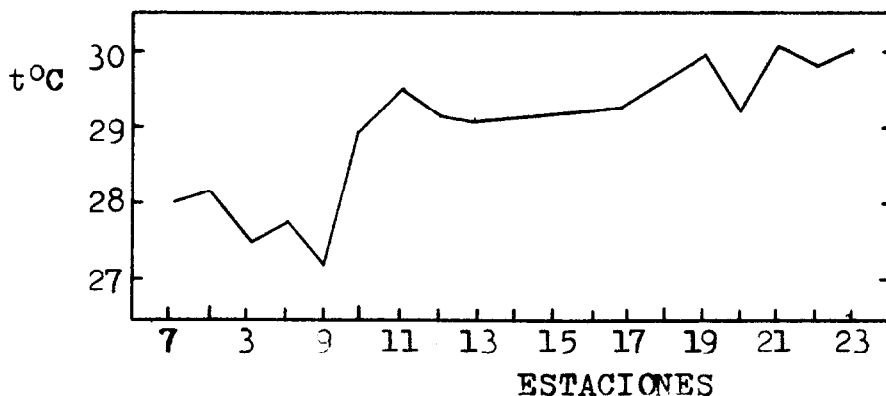


Figura 2. Distribución de temperatura en la Laguna Celestún para el mes de junio de 1985.
Figure 2. Distribution of temperature in Celestún Lagoon for the month of June, 1985.

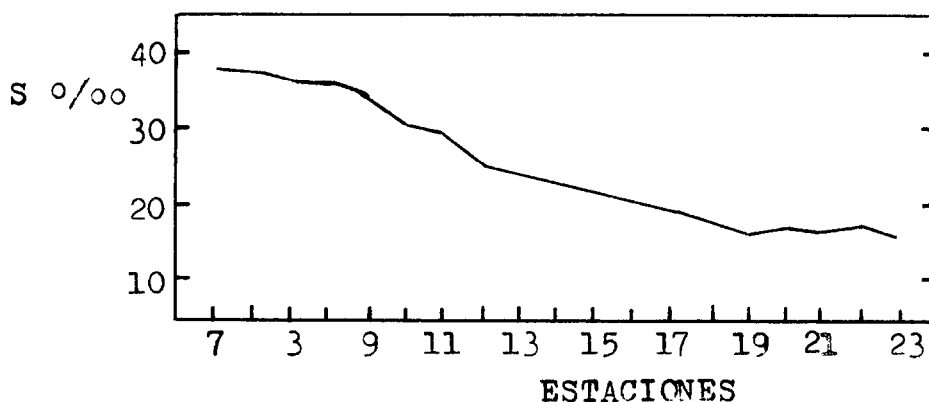


Figura 3. Distribución de salinidad en la Laguna Celestún para el mes de junio de 1985.
Figure 3. Distribution of salinity in Celestún Lagoon for the month of June, 1985.

En la parte interna de Celestún de la estación 18 a la 23, es donde se manifiesta la entrada de agua dulce via manantiales, y hace que durante todo el año prevalezcan salinidades más bajas que en el resto de la Laguna como puede observarse en la Figura 3. En el mes de abril se detectó una salinidad de 0‰ en la estación No.19, y en octubre la región de 5‰, va desde la estación 21 hasta la 15. Este aporte de agua dulce, es muy importante, ya que provoca, al mezclarse con el agua de mar, una variabilidad fisicoquímica, que en las lagunas costeras puede ser considerada como una forma de tensión que necesitan los organismos estuarinos (Day y Yañez-Arancibia, 1982).

Lagoon could be considered as a way of tension necessary for the estuarine organisms (Day and Yañez-Arancibia, 1982).

The pH values fluctuated between 7.6 and 9.0 during all the sampling period, very near to the ones reported for other coastal lagoons of Mexico (Mee, 1979; Contreras, 1983). This could mean that this variable is being subdued by the CO₂-Carbonates system (Broecker, 1974), that is why it is almost impossible to find acid values or very basic. Figure 5 shows the variations of the surface pH along Celestún in the month of October. It is possible to observe that the measured values were near 8 from the external part of the

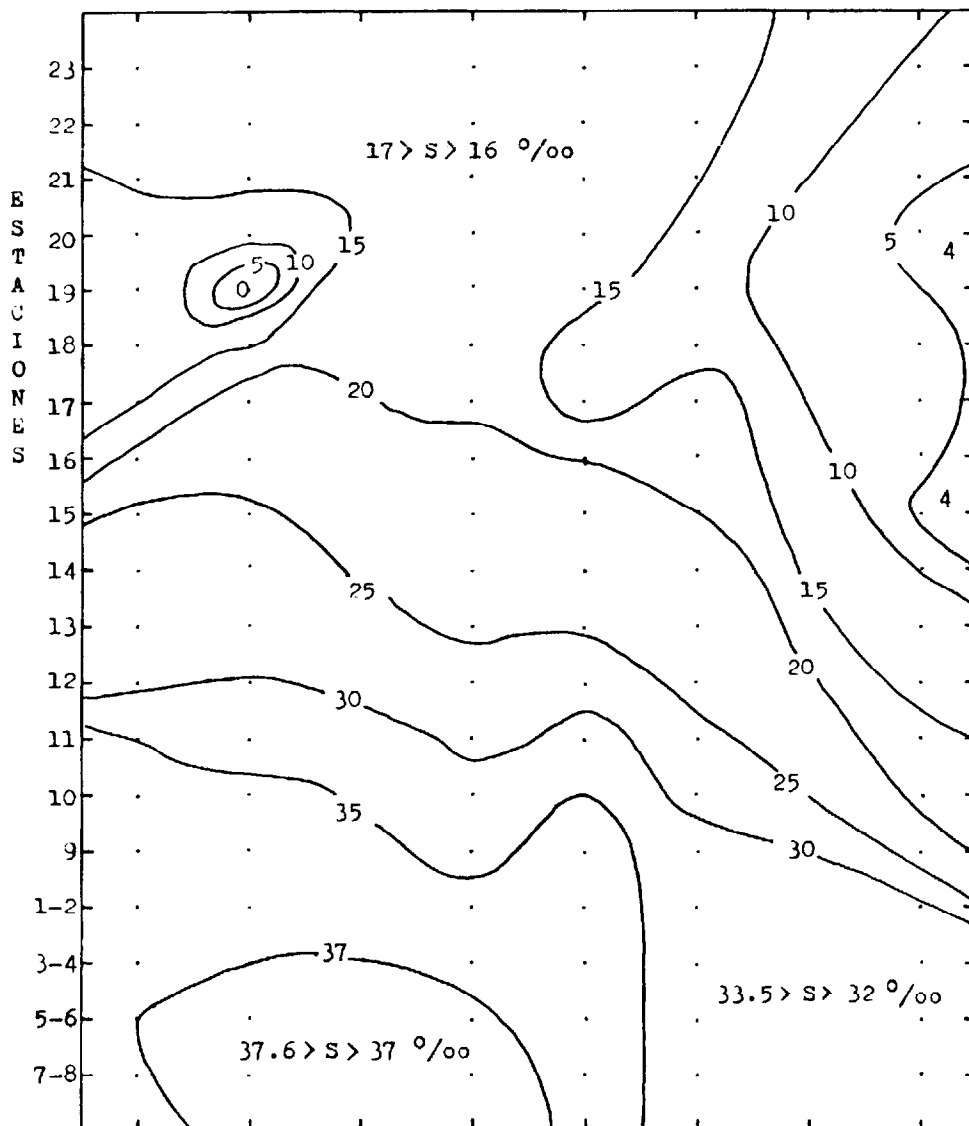


Figura 4. Distribución de la salinidad superficial en la Laguna Celestún durante 1985.
Figure 4. Distribution of the surface salinity in Celestún Lagoon during 1985.

Los valores de pH fluctuaron durante todo el muestreo entre 7.6 y 9.0, muy cercanos a los que se han reportado para otras lagunas costeras de México (Mee, 1979; Contreras, 1983). Esto permite pensar que esta variable está siendo amortiguada por el sistema CO₂-carbonatos (Broecker, 1974), por lo que es casi imposible encontrar valores ácidos, o muy básicos. La Figura 5 muestra las varia-

Lagoon up to station 15, and in the most internal part (stations 17-21), higher values were detected, about 8.5, (note: it was not possible to sample stations 22 and 23). The general behavior of the pH during the other months was similar, that is, values of 8 ± 0.5 in the most external part of the Lagoon, and greater values in the internal zone ($8.5 < \text{pH} < 9$).

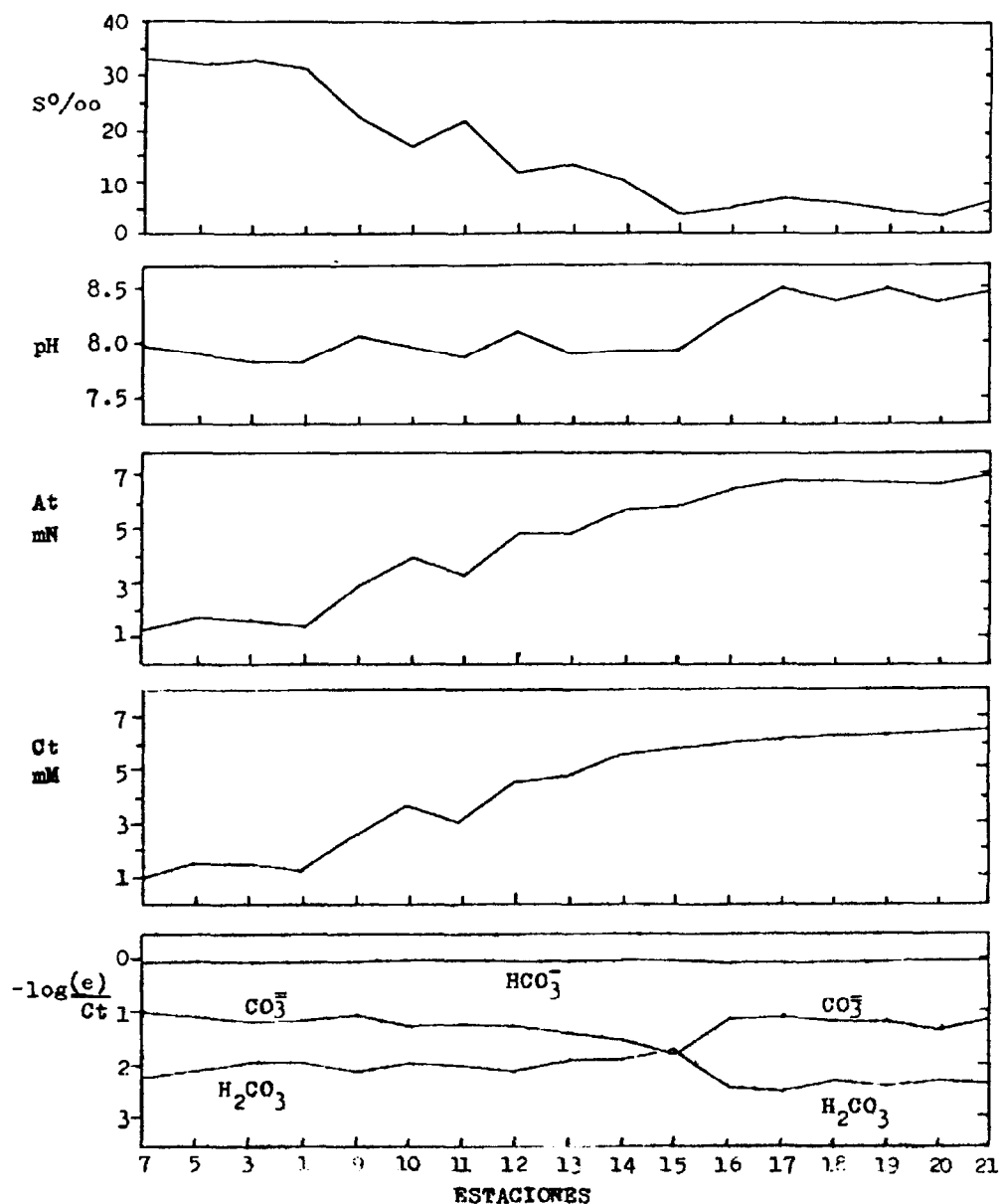


Figura 5. Distribución de las especies del sistema CO_2 -Carbonatos en el mes de octubre de 1985.
Figure 5. Distribution of the species of the CO_2 -carbonates system in October, 1985.

ciones del pH superficial a lo largo de Celestún en el mes de octubre. Se puede observar que los valores medidos desde la parte externa de la laguna hasta la estación 15 estuvieron cercanos a un valor de 8, y en la parte más

The total surface alkalinity had a wide interval of values, from 1.14 meq/l (October, station 8), to 7.11 meq/l (July, station 14), different from the ocean water, in which this variable has very constant values and near 2.4

interna (estaciones 17-21), se detectaron valores más altos alrededor de 8.5, (nota: no se pudo muestrear las estaciones 22 y 23). El comportamiento general del pH en los otros meses fue similar, es decir valores de 8 ± 0.5 en la parte más externa de la Laguna, y valores mayores en la zona interna ($8.5 < \text{pH} < 9$).

La alcalinidad total superficial tuvo un amplio intervalo de valores que fue desde 1.14 meq/l (octubre estación 8), hasta 7.11 meq/l (julio estación 14), a diferencia de las aguas oceánicas en las cuales esta variable tiene valores muy constantes y cercanos a 2.4 meq/l (Skirrow, 1975). Con la alcalinidad total, el pH, la salinidad y la temperatura, fueron calculadas las concentraciones de ácido carbónico, iones bicarbonato y carbonato y también el carbono total, usando las ecuaciones recomendadas por Skirrow (1975) con las constantes de equilibrio estimadas según Millero (1979). Estas variables del sistema del bióxido de carbono correspondientes al mes de octubre están graficadas en la figura 5, se presenta este mes ya que es uno de los más representativos del estudio, se puede observar el aumento de alcalinidad total y carbono total al disminuir la salinidad (el coeficiente de correlación en ambos casos es de -0.98).

Este comportamiento tan fuera de lo común en Celestún está determinado principalmente por dos procesos físicos que son: el afloramiento de manantiales, y la precipitación pluvial. El primero de ellos aporta a la Laguna agua rica en bicarbonatos y carbonatos por el hecho de provenir de un subsuelo calcáreo lo cual hace que sea una agua con elevada alcalinidad y carbono totales (Butler, 1982; Stumm y Leckie, 1967), manifestándose en los altos valores medidos en las estaciones 14 a 21 en el mes de octubre ($> 5 \text{ meq/l}$), donde es más marcada la influencia de los manantiales (se puede observar en la figura 5 que coinciden con los valores bajos de salinidad). Por otro lado está el proceso de precipitación pluvial el cual hace bajar la alcalinidad y carbono totales por simple dilución además de que provoca la entrada a la laguna de los ácidos (sustancias húmicas y taninos) producto de la descomposición de la materia orgánica de los manglares y

meq/l (Skirrow, 1975). With the total alkalinity, the pH, the salinity and the temperature, the concentrations of carbonic acid, bicarbonate ions and carbonate as well as the carbon total were calculated by the Skirrow (1975) equations with the estimated equilibrium constants according to Millero (1979). This variables of the system of the carbon dioxide corresponding to the month of October are plotted in Figure 5. This month is shown because it is one of the most representative of the study. The increase of total alkalinity, and carbon totals can be observed when decreasing the salinity (the coefficient of correlation for both cases is of -0.98).

This unusual behavior in Celestún is mainly determined by two physical processes: springs and the rainfall. The first one supplies the lagoon with water rich in bicarbonates and carbonates because they come from a calcareous subsoil, which gives water high alkalinity and carbon totals (Butler, 1982; Stumm and Leckie, 1967), shown in the high values measured at stations 14 to 21 in the month of October ($> 5 \text{ meq/l}$), where the influence of the springs is more apparent (in Figure 5, the coincidence with the low salinity values is shown). On the other hand, there is the pluvial precipitation process, which makes the alkalinity and carbon totals decrease by dilution, in addition, it supplies the acids to the Lagoon (humic substances and tanines), product of the decomposition of the organic matter of the mangroves and marshes (Saar and Weber, 1982). These acids are neutralized by the bicarbonate and carbonate ions, decreasing the alkalinity and carbon totals, and in addition, by their colloidal behavior they are coagulated by the calcium and magnesium ions present in the Lagoon water (Stumm and Morgan, 1981), this explains the minimums of alkalinity and carbon totals observed at stations 1 to 7 of October (Fig. 5).

Analyzing the relation between the different components of the CO_2 , it was observed that the bicarbonate ion is dominant, the carbonate is in a second place and the carbonic acid in the last place. The relation of each of these species with respect to the carbon totals is observed in Figure 5 in the sample of October, and in Figure 6 the mean

pantanos (Saar y Weber, 1982), estos ácidos son neutralizados por los iones bicarbonato y carbonato disminuyendo así la alcalinidad y carbono totales y además por su comportamiento de coloides son coagulados por los iones calcio y magnesio presentes en el agua de la Laguna (Stumm y Morgan, 1981), esto explica los mínimos de alcalinidad y carbono totales que se observan en las estaciones 1 a la 7 del mes de octubre (Fig. 5).

Al analizar la relación que guardan los diferentes componentes del sistema del CO_2 , se observó que es el ion bicarbonato el dominante quedando el carbonato en segundo lugar y el ácido carbónico en último. En la Figura 5 se observa la relación de cada una de estas especies con respecto al carbono total en el muestreo del mes de octubre y en la Figura 6 está representada la composición promedio durante todo el estudio y además las muestras que tuvieron las máximas proporciones de ion carbonato e ion bicarbonato. En soluciones acuosas el balance entre los varios componentes del equilibrio del bióxido de carbono es controlado por el pH, y en el intervalo de pH de 7 a 9 el ion bicarbonato es el que se encuentra en mayor proporción (Riley y Chester, 1971), como ya se dijo en Celestún los valores de pH fluctuaron entre 7.6 y 9.0 durante el estudio, por lo que es lógico que en la totalidad de las muestras el ion bicarbonato fuera el más abundante del sistema del CO_2 . El valor promedio de la relación concentración de bicarbonato/carbono total fue de 0.838 con una desviación estandar de 0.104, esta relación se encontró que fue mínima en la estación 10 del mes de agosto (pH=8.95) con un valor de 0.521, y el máximo correspondió a la estación 15 del mes de octubre (pH=7.9) con 0.967.

Las mediciones llevadas a cabo para la cuantificación del oxígeno disuelto indicaron que siempre estuvo presente, aunque con un amplio intervalo de valores. En la Fig. 7 se pueden observar las concentraciones superficiales durante el mes de junio. Con los datos de temperatura y salinidad fueron estimadas las solubilidades del oxígeno en el agua (usando la ecuación dada por Weiss, 1970), y con éstas se calculó el porcentaje de saturación, para así visualizar donde hubiera sobresatu-

composition during all the study and the samples with the maximum proportions of carbonate and bicarbonate ions are shown. The balance between the various components of equilibrium of the of carbon dioxide in an aqueous solution is controlled by the pH, and in the interval between 7 to 9 of pH, the bicarbonate ion is found in a higher proportion (Riley and Chester, 1971). In Celestún the values of pH fluctuated between 7.6 and 9.0 during the study, that is why the bicarbonate ion was the most abundant in the CO_2 system. The mean value of the bicarbonate concentration / carbon totals relation was 0.838 with a standard deviation of 0.104, this relation was minimum at station 10 during August (pH = 8.95) with a value of 0.521, and the maximum corresponded to station 15 in October (pH = 7.9) with 0.967.

The measurements taken for the quantification of dissolved oxygen indicated that this was always present, although with a wide interval of values. In Fig. 7 the surface concentrations can be observed during June. With the data of temperature and salinity, the solubility of oxygen in water was estimated by the Weiss (1970) equation, as well as the percentage of saturation to observe where oversaturation or insaturation of this gas was present. Figure 8 shows the distribution of the saturation of oxygen along Celestún Lagoon during the sampling months; the values fluctuated from less than 20% up to more than 170%. The interior zone of the Lagoon (stations 15-23) is the one which presents more variations, which are explained by the presence of springs with water with a low content of oxygen (in the sample of April at station 19 a salinity of 0 ‰ and the lower value of oxygen in all the study, 14.8% of saturation, were found), in addition, in all this zone, the substrate is covered in its mayor part by graze and algae, which produce a great quantity of oxygen during daytime, and consume it together with the organisms associated to these communities during nighttime (Riley and Chester, 1971).

The external part of Celestún (stations 9 to 14), presents values below 100% from March to July, and oversaturation values from August to October. The possible explanation

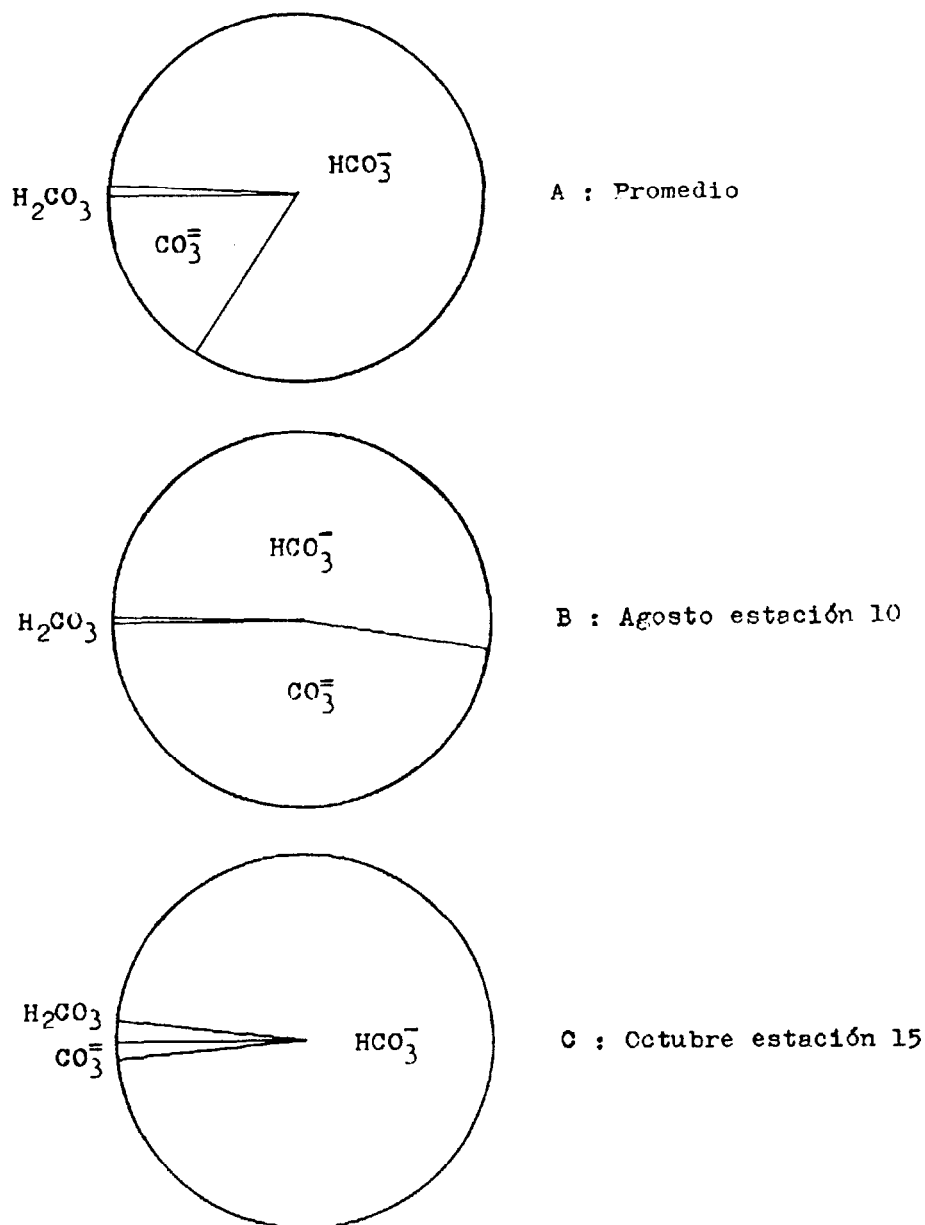


Figura 6. La fracción molar, (especie)/carbonototal, de los componentes del sistema CO_2 -carbonatos; C: muestra con máximos del ácido carbónico y bicarbonato.
Figure 6. The molar fraction, (species)/carbon total, of the components of the CO_2 -carbonates system; C: sample with carbonic acid and bicarbonate maximums.

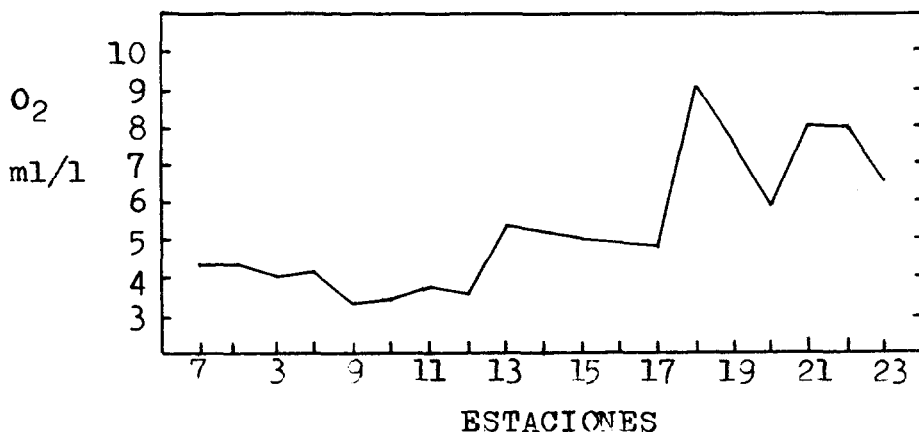


Figura 7. Distribución de oxígeno disuelto superficial para el mes de junio de 1985.
Figure 7. Distribution of surface dissolved oxygen for the month of June, 1985.

ración, o insaturación de este gas. La Figura 8 muestra la distribución de la saturación de oxígeno a lo largo de la Laguna Celestún durante los meses muestreados, los valores fluctúan desde menos de 20% hasta más de 170%. La zona interior de la Laguna (estaciones 15-23), es la que presenta más variaciones, lo cual se explica por la presencia de los manantiales de los cuales aflora agua con bajo contenido de oxígeno (en el muestreo de abril en la estación 19 se encontró una salinidad de 0 ‰ y el valor más bajo de oxígeno de todo el estudio: 14.8% de saturación), además de que en toda esta zona, el substrato está cubierto en su mayor parte por pastos y algas, los cuales producen gran cantidad de oxígeno durante el día, y lo consumen junto con los organismos asociados a estas comunidades durante la noche (Riley y Chester, 1971).

La parte externa de Celestún (estaciones 9 a 14), presentan valores menores del 100% desde marzo hasta julio, y valores de sobresaturación de agosto a octubre, aquí la posible explicación, es que en la época de estiaje la producción primaria está limitada por el bajo aporte de nutrimentos, y la poca penetración de la luz debido a la alta turbidez por la floculación que se da al haber mezcla de aguas con diferentes salinidades (Sholkovitz, 1976), mientras que en la época de lluvias (agosto-octubre), éstas acarrean nutrimentos de la

is that in the low water stage, the primary production is limited by the low supply of nutrients and the low penetration of light due to the high turbidness by the flocculation given when the water mixes with different salinities (Sholkovitz, 1976), while in the rainy season (August-October), these transport nutrients from the atmosphere and the Continent (Soderlund, 1976), which causes an increase in the primary production (Mee, 1979) together with the low turbidness, because the mixture of water takes place mostly outside the Lagoon.

The obtained results show that the silicium was not a limitant in Celestún. Figure 9 shows the spatial-temporal distribution of this nutrient in the Lagoon, except for the stations outside it from March to July, there were always high concentrations greater than the reported for estuaries and lagoons (in Tuxpam-Tampamachoco, Contreras, 1983, found values higher than 62 μM), bays (Alvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976, report up to 38 μM in San Quintín Bay) and surface water from tropical sea (Menzel and Ryther, 1960 measured 1.8 μM at the Sargazzo Sea).

Moreover, a high gradient exists in the concentration of this nutrient, as observed in Figure 10, which corresponds to June, presenting the highest values in the internal part

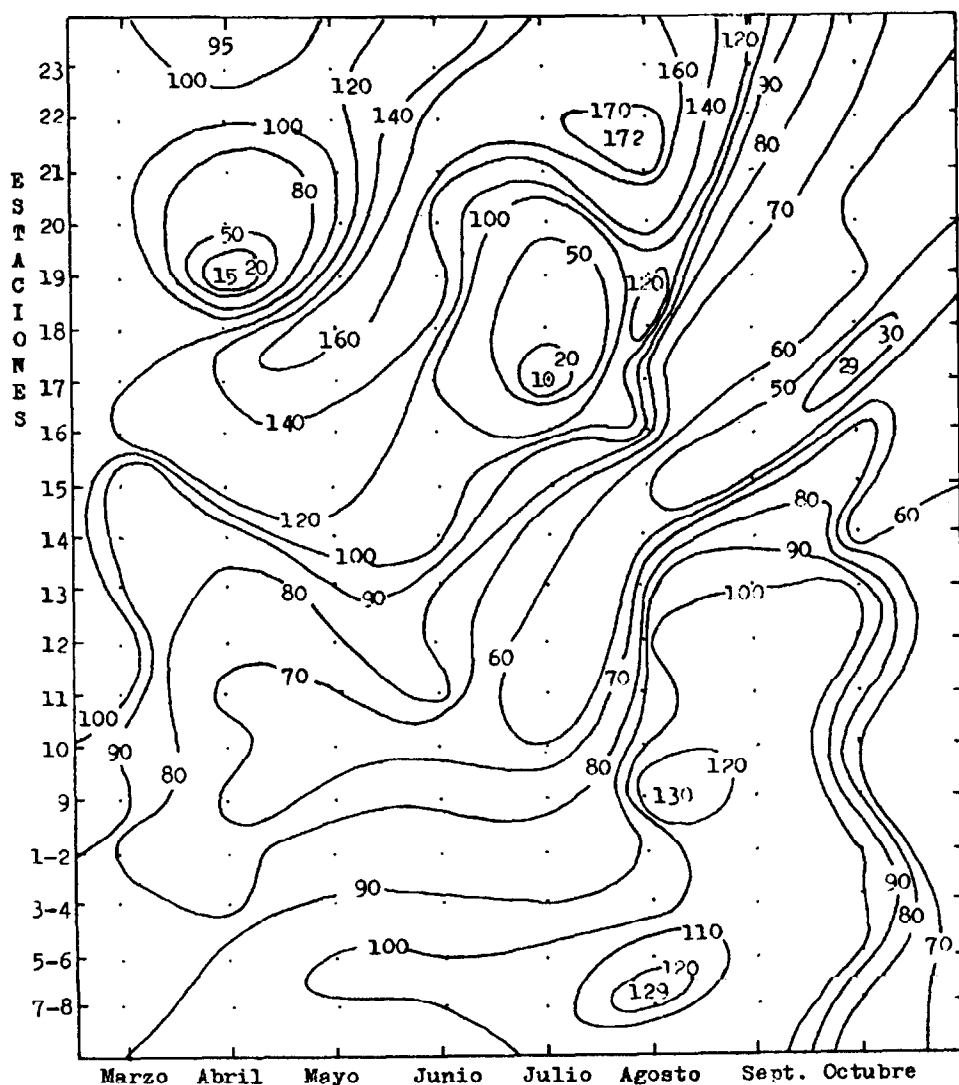


Figura 8. Distribución de saturación de oxígeno (%) superficial en la Laguna Celestún durante 1985.

Figure 8. Distribution of surface oxygen saturation (%) in Celestún Lagoon during 1985.

atmósfera y el Continente (Soderlund, 1976), lo cual provocó un aumento de la producción primaria, (Mee, 1979), aunado con la menor turbidez ya que la mezcla de aguas se da en su mayor parte fuera de la Laguna.

Los resultados obtenidos indican que el silicio en ningún momento llegó a ser limitante en Celestún y como puede observarse en la

of the Lagoon that reach higher values than 500 μM in March and April, and the lower values in the mouth and in the external part (at stations 1 to 9, similar concentrations were detected, around 2 μM). For the rest of the months the behavior was similar, as shown in Figure 9. The inverse relation between the salinity and the concentration of the silicates is very notorious (the coefficient of correlation

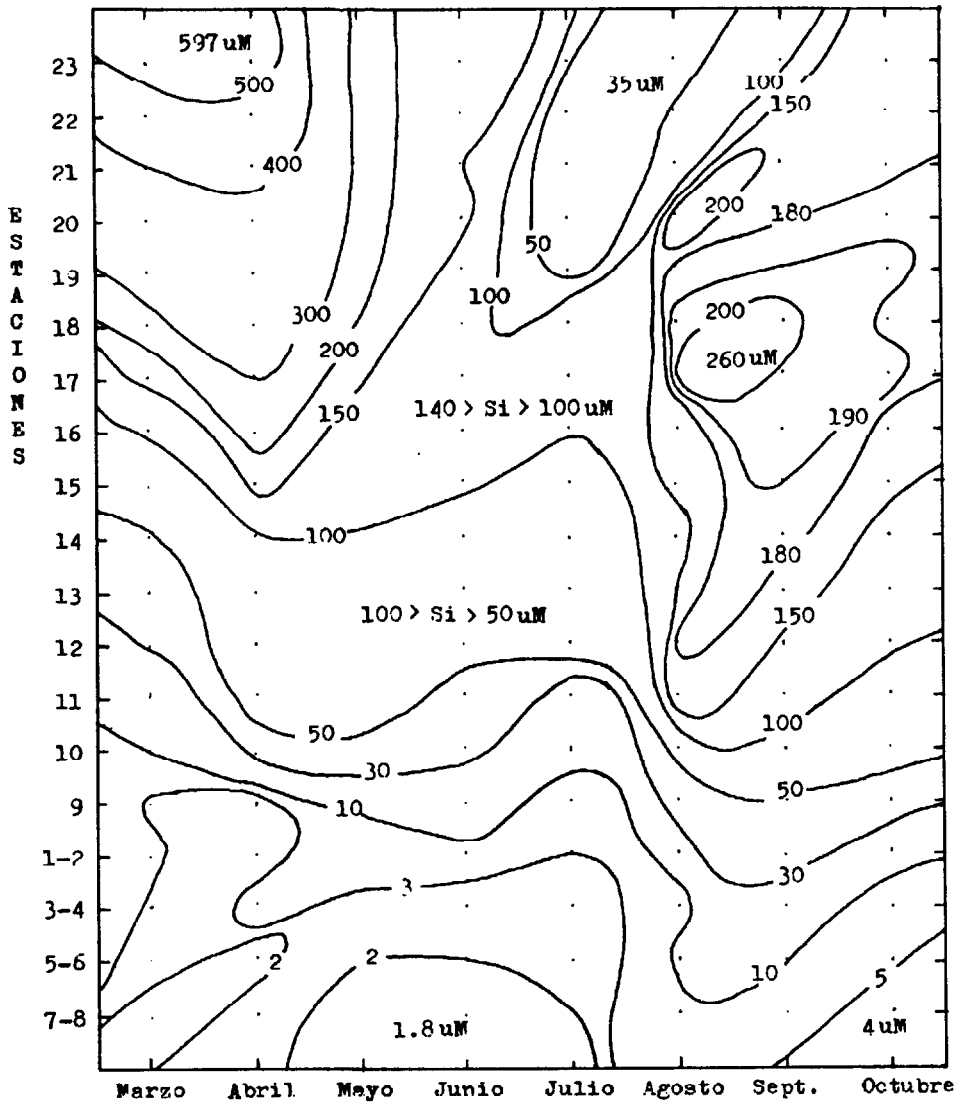


Figura 9. Distribución de silicatos (μM) en la Laguna Celestún durante 1985.
Figure 9. Distribution of silicates (μM) in Celestún Lagoon during 1985.

figura 9 que muestra la distribución espacial-temporal de este nutriente en la laguna. A excepción de las estaciones fuera de ella de marzo a julio, siempre hubo concentraciones altas mucho mayores a las reportadas para estuarios y lagunas (en Tuxpam-Tamapamachoco Contreras, 1983 encontró valores máximos de $62 \mu\text{M}$), bahías (Alvarez-Borrego y

between these two variables in March is -0.988), which means that there is an important supply of silicium dissolved in the ground water which spring in Celestún, dissolved or removed by the sea water. This behavior is very similar to the one observed in the outlets of rivers (Liss and Spencer, 1970; Spencer, 1975).

Chee Barragán, 1976 reportan hasta $38 \mu\text{M}$ en Bahía San Quintín, aguas superficiales de mares tropicales (Menzel y Ryther, 1960 midieron $1.8 \mu\text{M}$ en el Mar Sargazo). Existe además un alto gradiente en la concentración de este nutriente como puede observarse en la figura 10 que corresponde al mes de junio, encontrándose los valores más altos en la parte interna de la Laguna que llegaron a ser mayores de $500 \mu\text{M}$ en la parte externa (en las estaciones 1 a la 9 se detectaron concentraciones alrededor de $2 \mu\text{M}$), en los demás meses el comportamiento fue semejante como se puede observar en la figura 9. La relación inversa existente entre la salinidad y la concentración de los silicatos es bastante notoria (el coeficiente de correlación entre estas dos variables en el mes de marzo es de -0.988), lo cual significa que existe un importante aporte de silicio disuelto en el agua subterránea que aflora en Celestún, el cual es diluido o removido por el agua de mar, comportamiento muy similar al observado en desembocaduras de ríos (Liss y Spencer, 1970; Spencer, 1975).

En lo que respecta al fósforo son varios los autores que reportan a las lagunas costeras como sistemas exportadores de este elemento hacia la zona marina adyacente (Contreras, 1983; Valiela, 1978; Eastman, 1980); Nixon (1981) menciona que la gran entrada de materia orgánica hacia los sedimentos de una laguna proveniente de pantanos, manglares, pastos, algas y plancton, crea un medio ambiente reductor y de bajo pH en el que el fósforo atrapado es solubilizado en las aguas intersticiales anóxicas y puesto en las capas superiores por difusión y por los pastos; aún cuando no se hicieron mediciones de flujos en este estudio es probable que Celestún tenga un comportamiento semejante, es decir de exportador de fósforos ya que como puede observarse en las Figuras 11 y 12 las concentraciones encontradas fueron en general altas y más aún en el interior de la Laguna (se muestra el mes de junio en la Figura 11 como representativo del estudio); la excepción fue el mes de marzo en el que la concentración de fósforo orgánico e inorgánico se encontró totalmente abatida. Las concentraciones reportadas para otras lagunas son: $0.3-0.5 \mu\text{M}$ en Laguna Mitla, Guerrero (Mee, 1979); máximo

With respect to the phosphorous, several authors report that coastal lagoons are export systems of this element toward the adjacent marine zone (Contreras, 1983; Valiela, 1978; Eastman, 1980). Nixon (1981) mentions that the high entrance of organic matter toward the sediments of a lagoon coming from marshes, mangroves, graze, algae and planckton creates a reductor environment and a low pH in which the trapped phosphorous is dissolved in the interstitial anoxic water and taken to the surface layers by diffusion and by the graze; although no measures of fluxes were taken in this study, it is possible that Celestún Lagoon presents a similar behavior; it exports phosphorous. As observed in Figures 11 and 12, the concentrations shown were in general high and even higher in the internal part of the Lagoon (in Figure 11 the month of June is shown as representative of the study); the exception was in March, in which the concentration of organic and inorganic phosphorous was found totally dejected. The concentration reported for other lagoons are: $0.3-0.5 \mu\text{M}$ in Mitla Lagoon, Guerrero (Mee, 1979); a maximum of $4 \mu\text{M}$ in San Quintín Bay, BC (Alvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976); from $0.14 \mu\text{M}$ to $7.75 \mu\text{M}$ in Tuxpam-Tampamachoco, Ver. (Contreras, 1983); $0.2-0.6 \mu\text{M}$ in Delaware, USA (Eastman, 1980). In Celestún the mean value of total phosphorous dissolved on surface observed during the study was $4.8 \mu\text{M}$, and in June, a maximum monthly mean value was obtained ($10 \mu\text{M}$) which means that possibly this element is not limitant in the Lagoon.

Referring to the amonium, which is the form of nitrogen taken preferably either during light time or in the darkness by bacteria, phytoplankton, marine graze and epibenthic algae (Nixon, 1981), concentrations from $0 \mu\text{M}$ (Agust, from 1 to 8) up to $28 \mu\text{M}$ (October, station 10) were found in the surface of Celestún. The general behavior observed was: at the stations outside the Lagoon (1 to 8) low concentrations between 0 and $3 \mu\text{M}$ (mean value of $1.1 \pm 1.1 \mu\text{M}$), and inside the Lagoon (stations 9 to 23) mean values during the study were from $7.4 \pm 4.6 \mu\text{M}$. In Figure 13 the distribution of amonium in June is shown, which is representative of the rest of the

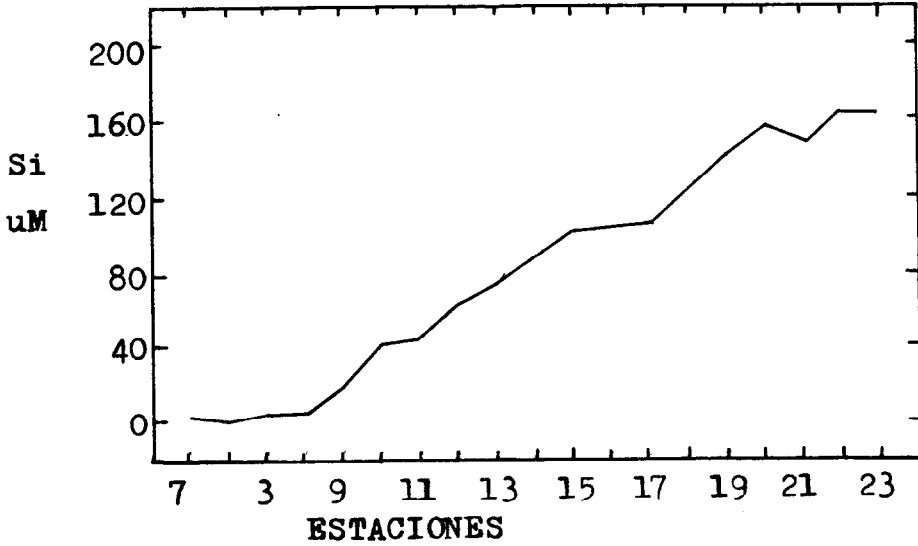


Figura 10. Distribución de silicatos superficiales para el mes de junio de 1985.
Figure 10. Distribution of surface silicates for the month of June, 1985.

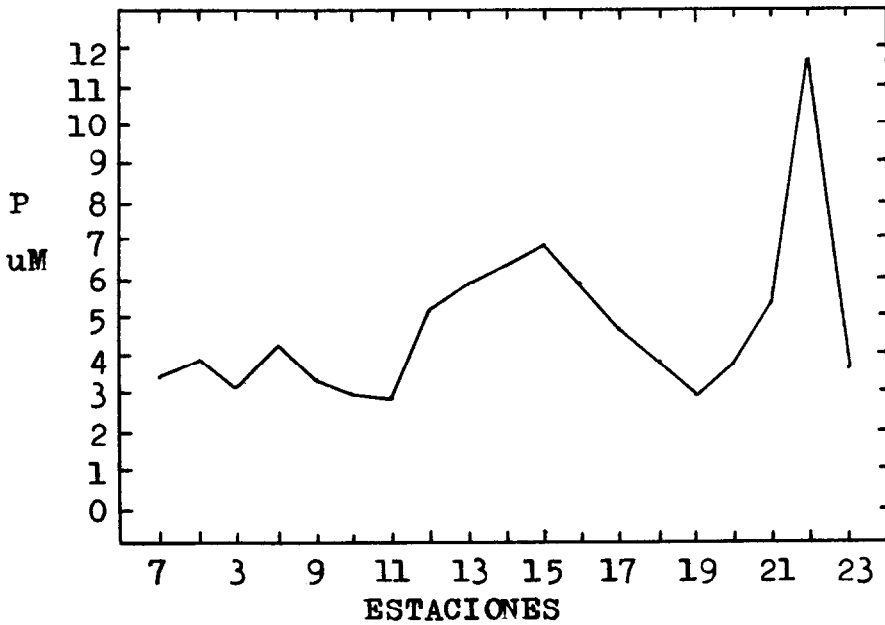


Figura 11. Distribución de fósforo reactivo en la Laguna Celestún para el mes de Junio de 1985.
Figure 11. Distribution of reactive phosphorous in Celestún Lagoon for the month of June, 1985.

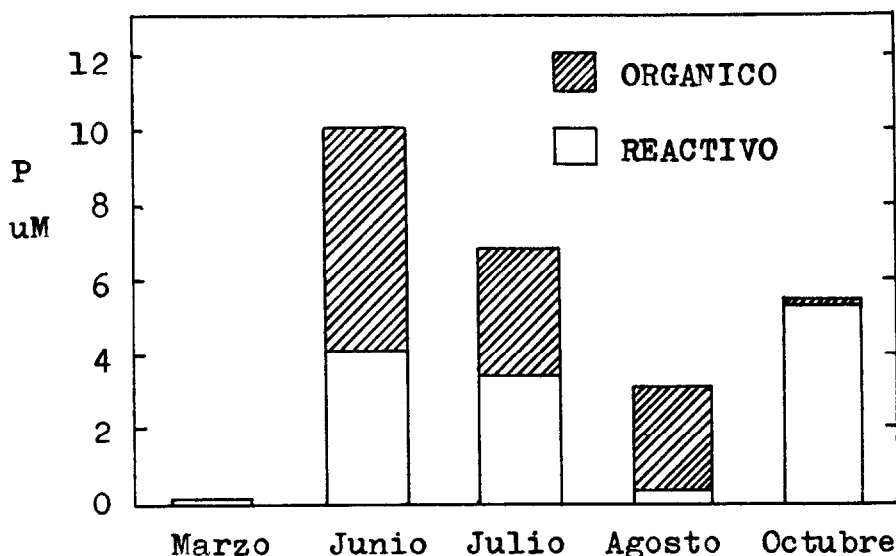


Figura 12. Promedios mensuales de fósforo disuelto superficial (orgánico y reactivo), en la Laguna Celestún durante 1985.

Figure 12. Mean values of surface dissolved phosphorous (organic and reactive), in Celestún Lagoon during 1985.

de $4\mu\text{M}$ en Bahía de San Quintín, BC. (Alvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976); de $0.14\mu\text{M}$ a $7.75\mu\text{M}$ en Tuxpam-Tampamachoco, Ver. (Contreras, 1983); $0.2-0.6\mu\text{M}$ en Delaware, EUA, (Eastman, 1980). En Celestún el valor promedio de fósforo total disuelto superficial observado durante el estudio fue de $4.8\mu\text{M}$, y en el mes de junio se tuvo el promedio mensual máximo ($10\mu\text{M}$) por lo que es probable que este elemento no sea limitante en la Laguna.

En lo referente al amonio que es la forma de nitrógeno preferentemente tomada tanto en la luz como en la obscuridad por bacterias, fitoplancton, pastos marinos y algas epibénticas (Nixon, 1981), en la Laguna Celestún se encontraron concentraciones superficiales desde $0\mu\text{M}$ (mes de agosto estaciones 1 a la 8) hasta $28\mu\text{M}$ (mes de octubre estación 10). El comportamiento general que se observó fue: en las estaciones fuera de la Laguna (1 a la 8) concentraciones bajas entre 0 y $3\mu\text{M}$ (promedio de $1.1 \pm 1.1\mu\text{M}$), y ya dentro de la Laguna (estaciones 9 a la 23) valores mayores cuyo promedio durante todo el estudio fue de $7.4 \pm$

months. It is possible that this behavior is due to the fact that the amonium originates in the interior of the Lagoon as it has been found in other similar bodies of water (Valiela *et al.*, 1978; Contreras, 1983), in which the sediments are an important fact (the amonium is the main form of nitrogen interchanged through the interphase water-sediment, Nixon, 1981).

The behavior of the nitrites and nitrates is due to the entrance of fresh water through springs. The ground water which spring in Celestún Lagoon is an important source of these forms of inorganic nitrogen, as it has been found in the Great Sippewissett marsh (Valiela *et al.*, 1978). This is evident in Figure 14, which shows the concentrations of $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ in June, representative of the behavior during the other months: the maximums of these nutrients are found at the stations with minimum salinity. In Figure 15 the spatial-temporal distribution of $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ can be observed during the sampled months and the inverse relation of these nutrients with the salinity can easily be seen. It can also

4.6 μ M. En la Figura 13 se presenta la distribución del amonio en el mes de junio, el cual es representativo de los demás. Es probable que este comportamiento sea debido a que el amonio se origine en el interior de la Laguna tal como se ha encontrado en otros cuerpos de agua semejantes (Valiela *et al.*, 1978; Contreras, 1983), en los cuales los sedimentos juegan un papel importante (el amonio es la principal forma de nitrógeno intercambiada a través de la interfase agua-sedimento, Nixon, 1981).

El comportamiento de los nitritos y nitratos está dado por la entrada de agua dulce vía manantiales, el agua subterránea que aflora en la Laguna Celestún es una importante fuente de estas formas de nitrógeno inorgánico tal como se ha encontrado en el pantano Great Sippewissett (Valiela *et al.*, 1978), esto se hace evidente en la Figura 14 que muestra las concentraciones de NO₂⁻ + NO₃⁻ en el mes de junio el cual es representativo del comportamiento en los otros meses; los máximos de estos nutrientes se encuentran en las estaciones con salinidad mínima. En la Figura 15 se puede ver la distribución espacial-temporal de NO₂⁻ + NO₃⁻ durante los meses muestreados y en ella también es clara la relación inversa de estos nutrientes con la salinidad, además de que se observa que el máximo correspondió a la estación 21 del mes de octubre con una concentración de 26.7 μ M y el mínimo fue en marzo en las estaciones 7 y 8 con un valor de 0.1 μ M. Se hace notorio en la Figura 15 la existencia de zonas de alta concentración y zonas de baja concentración en un mismo mes o aún en la misma estación para diferentes meses, en el pantano de Great Sippewissett que también tiene entrada de agua subterránea (Valiela *et al.* (1978) y Kaplan *et al.* (1979) encontraron que en los sedimentos se lleva a cabo un proceso de denitrificación mediante bacterias muy importante, como una respuesta a la gran entrada de nitratos a través de los manantiales, si este proceso también tiene lugar en los sedimentos de Celestún es probable que sería uno de los causantes de las bajas concentraciones que se observan en algunas zonas de la Figura 15, pero para poder concluir eso es necesario realizar más estudios. Las concentraciones de

be observed that the maximum corresponded to station 21 in October, with a concentration of 26.7 μ M and the minimum was in March at stations 7 and 8 with a value of 0.1 μ M. It is notorious in Figure 15 the existence of zones with high concentration and zones with low concentration in the same month or even at the same station for different months at the Great Sippewissett marsh, which also presents an entrance of ground water. Valiela *et al.* (1978) and Kaplan *et al.* (1979) found that in the sediments a process of denitrification by very important bacteria takes place, as a response to the great entrance of nitrates through the springs. If this process also takes place in the Celestún sediments, it could be a cause of the low concentrations observed in some zones of Figure 15, but it is necessary to carry out further studies. The concentrations of nitrites and nitrates found in Celestún are lower than the ones measured at Tuxpam-Tampamachoco, Ver., where Contreras (1983) reports up to 40 μ M, and also lower than the ones reported by Mee for Chautengo, Guerrero (up to 100 μ M). It is important to mention that this two lagoons differ from Celestún because they receive direct supply from rivers.

CONCLUSIONS

Celestún Lagoon presented estuarine characteristics all year round because its mouth stays always open, allowing the interchange of sea water, and also a permanent supply of fresh water occurs through springs. Due too this fact, Celestún showed important fluctuations of salinity, spatial as well as temporal. No vertical stratification was found because it is very shallow and very dynamic. The temperature interval observed was from 25°C to 31°C, which is normal for tropical shallow bodies of water. The pH was neutral or slightly alkaline, and the total alkalinity was high due to the bicarbonates and carbonates introduced to the Lagoon by the springs characteristic of the Karstic topography. The dissolved oxygen showed a wide interval of values with saturations from less than 20% to more than 170%; the minimum concentrations were detected in the springs, which indicates that the water that springs is low in oxygen.

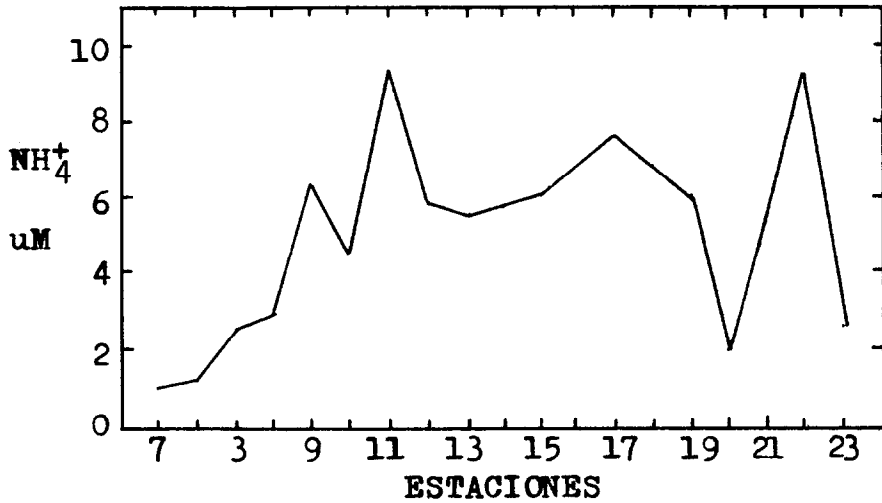


Figura 13. Distribución de amonio superficial en la Laguna Celestún para el mes de junio de 1985.
Figure 13. Distribution of surface amonium in Celestún Lagoon for the month of June, 1985.

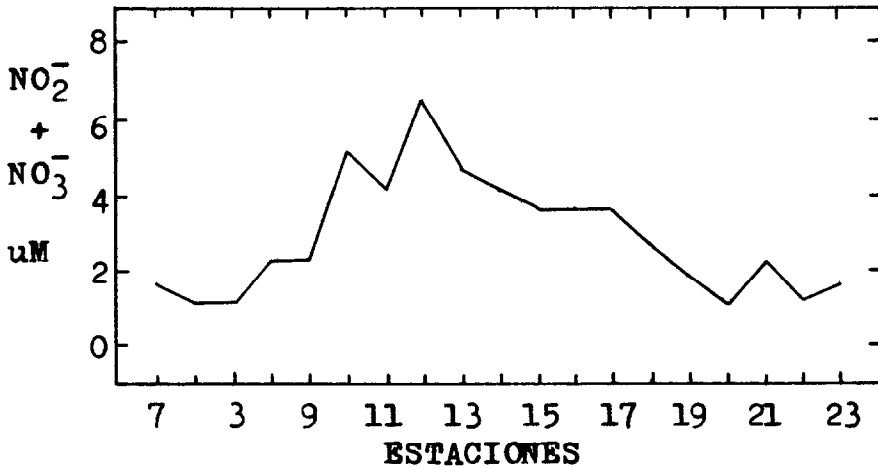


Figura 14. Distribución de nitritos + nitratos superficiales en la Laguna Celestún para el mes de junio de 1985.
Figure 14. Distribution of surface nitrites and nitrates in Celestún Lagoon for the month of June, 1985.

nitritos + nitratos encontrados en Celestún son menores a los medidos en Tuxpam-Tampamachoco, Ver. en donde Contreras (1983) reporta hasta 40 uM, y también menores a los que Mee reporta para Chautengo, Guerrero

The concentration of silicates was inversely proportional to the salinity because these come from the springs and removed and/or dissolved by the sea water, besides the utilization by the organisms of the Lagoon.

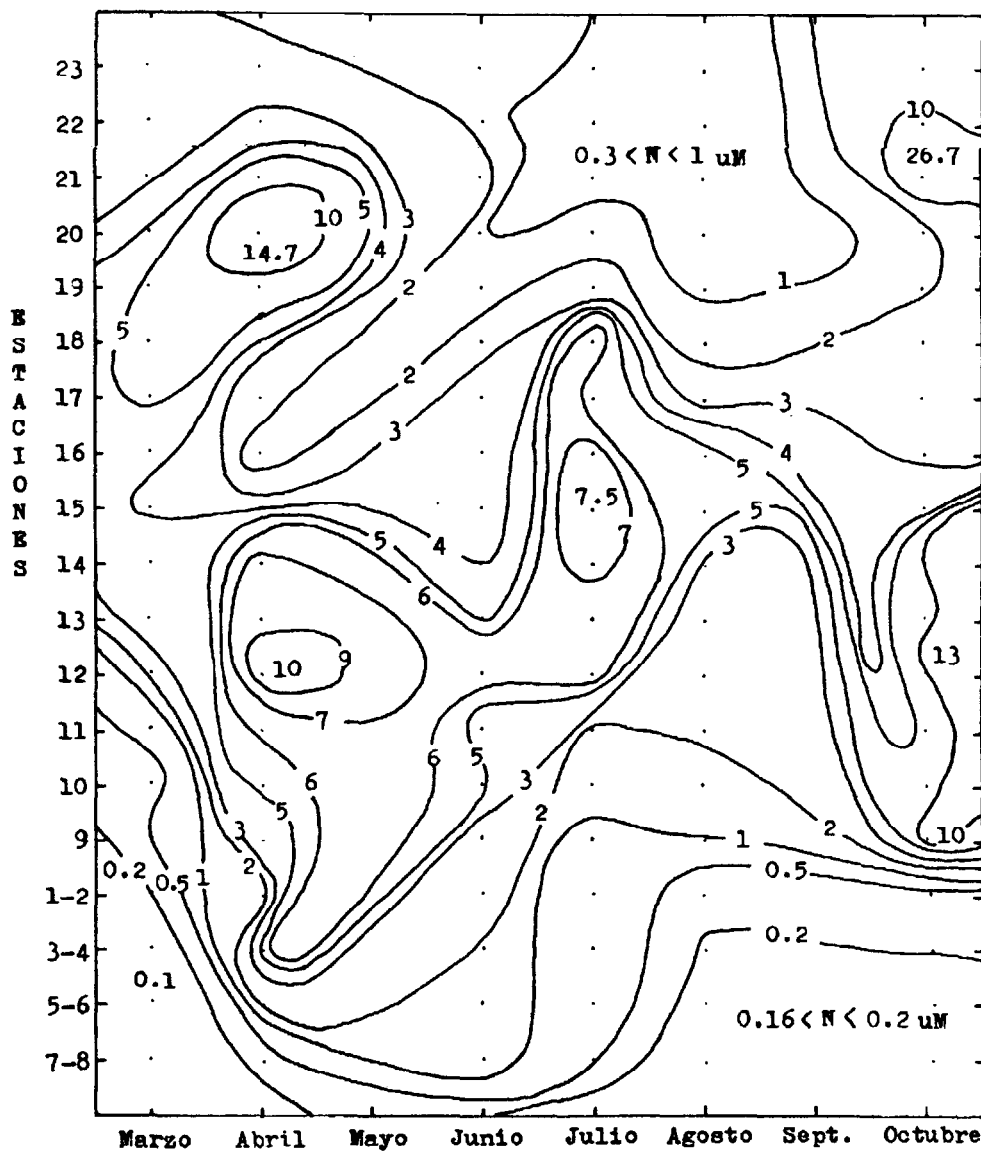


Figura 15. Distribución de nitritos + nitratos superficiales en la Laguna Celestún durante 1985.
 Figure 15. Distribution of surface nitrites and nitrates in Celestún Lagoon during 1985.

(hasta $100\mu\text{M}$), cabe aclarar que estas dos lagunas diferencian de la de Celestún por el hecho de que tienen aportes directos de ríos.

CONCLUSIONES

La Laguna Celestún presentó características estuarinas durante todo el año, debido a que su boca permanece siempre abierta,

The phosphorous showed fluctuations, but in general high concentrations were found and even greater in the internal part of the Lagoón.

Analyzing the distribution of the amonium, low concentrations were observed at the external stations and greater concentrations at

permitiendo el intercambio con el agua de mar y además existe un aporte permanente de agua dulce a través de manantiales que afloran en la Laguna. Debido a esto Celestún mostró fluctuaciones importantes de salinidad tanto espacial como temporalmente. No se encontró estratificación vertical debido a que es muy somera y muy dinámica. El intervalo de temperaturas observadas fue de 25°C a 31°C que cae dentro de lo normal para cuerpos de agua someros tropicales. El pH fue de neutro a ligeramente alcalino, y la alcalinidad total fue en términos generales alta debido a los bicarbonatos y carbonatos introducidos a la Laguna por los manantiales característicos de la topografía Kárstica. El oxígeno disuelto presentó un amplio intervalo de valores con saturaciones desde menos de 20% a más de 170%; las concentraciones mínimas se detectaron en los afloramientos lo cual indica que el agua que surge es pobre en oxígeno.

La concentración de silicatos fue inversamente proporcional a la salinidad ya que estos provienen de los manantiales y son removidos y/o diluidos por el agua de mar, además de su utilización por los organismos de la Laguna. El fósforo mostró fluctuaciones pero en términos generales se encontraron concentraciones altas y más aún en la parte interna de la Laguna.

Al analizar la distribución del amonio se observaron concentraciones bajas en las estaciones externas y concentraciones mayores en las estaciones dentro de la Laguna lo cual es indicio de que este nutriente se podría estar originado en el interior de ella, en cambio los NO₂- y NO₃- al igual que los silicatos mostraron tener su origen en el agua de los manantiales. Por todo lo anterior es obvio que estos afloramientos en el interior de la Laguna juegan un papel muy importante como fuente de agua dulce, bicarbonatos, carbonatos, silicatos, nitritos y nitratos además de que la salida constante de agua mantiene abierta la boca de Celestún, que de otro modo sería cerrada por los procesos marinos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado gracias al financiamiento del CONACyT (Proyecto PCECCNA-021479) y de COSNET (Proyecto

the internal stations of the Lagoon, which indicates that this nutrients possibly originate in the interior of the Lagoon, however NO₂- and NO₃- as well as the silicates showed its origin in the water from the springs. Because of the reasons above mentioned it is obvious that these springs in the interior of the Lagoon are important as a source of fresh water, bicarbonates, carbonates, silicates, nitrites and nitrates; in addition, the constant exit of water maintains the mouth of Celestun open, which otherwise would be closed due to the marine processes.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out thanks to the financial support from CONACyT (Project PCECCNA-021479) and COSNET (Project 285/85). Thanks to Margarita Ornelas, María Eugenia Vega, Julio Sánchez, Esperanza Pérez, Julio Vizcarra, Jorge Herrera and Angel Trejo for their participation in the samplings.

Guadalupe González translated this paper into English.

285/85). Se agradece la participación en los muestreos de Margarita Ornelas, María Eugenia Vega, Julio Sánchez, Esperanza Pérez, Julio Vizcarra, Jorge Herrera y Angel Trejo.

LITERATURA CITADA

Alvarez-Borrego, S. y Chee-Barragán, A. (1976) Distribución superficial de fosfatos y silicatos en Bahía de San Quintín, BC, Ciencias Marinas 3(1): 51-61.

Broecker, W.S. (1974) Chemical Oceanography, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., USA, 214pp.

Butler, J.N. (1982) Carbón Dioxide Equilibria and Their Applications. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 259pp.

Carranza-Edwards, A., Gutiérrez-Estrada, M. y Rodríguez-Torres, R. (1975) Unidades morfo-tectónicas continentales de las costas mexicanas. An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, 2(1): 81-88.

- Contreras, E.F. (1983) Variaciones en la hidrología y concentraciones de nutrientes del área estuarino-laguna de Tuxpam Tampamachoco, Veracruz, México. *Biótica*, 8(2): 201-213.
- Day, J.H. (1967) The Biology of Knysna Estuary, South Africa. In: Lauff, G.H. (Ed.) *Estuaries*. Am. Ass. Adv. Sci. Publ. 83:397-407.
- Day, J.W. and Yañez-Arancibia, A. (1982) Coastal Lagoons and Estuaries, Ecosystem Approach. *Ciencia Interamericana (Mar. Sci.* 22(1-2):11-26.
- Eastman, K.W. (1980) The Mixing Behavior of Iron, Manganese, Phosphorus, and Humic Acid in a Salt Marsh Creek. M.S. Thesis, College of Marine Studies, Univ. of Delaware.
- Emery, K.O. and Stevenson, R.E. (1957) Estuaries and Lagoons. I. Physical and Chemical Characteristics. In: Hedgepeth, J.W. (Ed.) *Treatise on Marine Ecology and Paleocology*. Geol. Soc. America. Mem. 67.1: 673-693.
- Inland Waters Directorate (1974) *Analytical Methods Manual*. Ottawa, Canada, 215pp.
- Instituto de Geofísica (1983) *Tablas de predicción de mareas 1984*. UNAM, México, 191pp.
- Kaplan, W., Valiela, I. and Teal, J.M. (1979) Denitrification in a Salt Marsh Ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* 24(4): 726-734.
- Lankford, R.R. (1977) Coastal Lagoons of Mexico: Their Origin and Classification. In: Wiley, M.L. (Ed.) *Estuarine Processes*. Aca. Press, Inc. N.Y., 2:182-215.
- Liss, P.S. and Spencer, C.P. (1970) *Geochim. Cosmochim. Acta* 34: 1073.
- Mee, L.D. (1979) Coastal Lagoons. In: Riley, J.P. and G. Skirrow (Eds.) *Chemical Oceanography*, Academic Press, London, 42:441-490.
- Menzel, D.W. and Ryther, J.H. (1960) *Deep-Sea Res.* 6:351.
- Millero, F.J. (1975) The Physical Chemistry of Estuaries. A.C.S. Symposium Series, Number 18, *Marine Chemistry in the Coastal Environment*, 25-55.
- Millero, F.J. (1979) The Thermodynamics of the Carbonate System in Seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43: 1651-1661.
- Nixon, S.W. (1981) Between Coastal Marshes and Coastal Waters -A Review of Twenty Years of Speculation and Research on the Role of Salt Marshes in Estuarine Productivity and Water Chemistry. In: Hamilton, P., and K.B. McDonald, (Eds.), *Estuarine and Wetland Processes with Emphasis on Modeling*. Henum. press NY, Marine Sciences Series. 437-525.
- Riley, J.P. and Chester, R. (1971) *Introduction to Marine Chemistry*. Academic Press, London. 465pp.
- Saar, R.A. and Weber, J.H. (1982) Fulvic Acid: Modifier of Metal-ion Chemistry. *Environ. Sci. Technol.*, 16(9): 510A-517A.
- Schwartz, M.C. (1942) Photometric Determination of Silica in the Presence of Phosphates. *Ind. En. Chem. Anal. Ed.*, 14(11): 893-895.
- Sholkovitz, E.R. (1976) Flocculation of Dissolved Organic and Inorganic Matter During the Mixing of River Water and Seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 40: 831-845.
- Skirrow, G. (1975) The Dissolved Gases-Carbon Dioxide. In: Riley, J.P. and G. Skirrow (Eds.) *Chemical Oceanography*. Academic Press, London, N.Y., 2: 181.
- Soderlund, R. and Svensson, B.H. (1976) The Global Nitrogen Cycle. In: Svensson, B.H. and R. Soderlund (Eds.) *Nitrogen, Phosphorus and Sulphur-Global Cycles*. SCOPE Report 7. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 22:23-73.
- Spencer, C.P. (1975) The Micronutrient Element. In: Riley, J.P. and G. Skirrow (Eds.) *Chemical Oceanography*. Academic Press. London, New York. 2:245-300.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972) *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Bulletin 167, Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, 310pp.

Stumm, W. and Leckie, J.O. (1967) Chemistry of Ground Waters: Models for Their Composition. *Environmental Science and Technology*, 1(4): 297-306.

Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981) *Aquatic Chemistry*. Second Edition. John Wiley & Sons, USA, 780pp.

Thayer, G.W. (1970) Comparison of Two Storage Methods for the Analysis of Nitrogen and Phosphorus Fractions in Estuarine Water. *Chesapeake Science* 11(3): 155-158.

Valiela, I., Teal, J.M., Volkman, S., Shafer, D. and Carpenter, E.J. (1978) Nutrient and Particulate Fluxes in a Salt Marsh Ecosystem: Tidal Exchanges and Inputs by Precipitation and Groundwater. *Limnol. Oceanogr.* 23(4):798-812.

Weiss, R.F. (1970) The Solubility of Nitrogen, Oxygen, and Argon in Water and Seawater. *Deep-Sea Research*, 17:721-735.