



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA DEL  
"LAGO EL SOL" EN EL VOLCAN NEVADO DE TOLUCA,  
EDO. DE MEXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A:

*Rebeca González Villela*

México, D. F.

1984



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCION .....	4
ANTECEDENTES .....	8
DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO .....	10
MATERIAL Y METODO .....	14
RESULTADOS Y DISCUSION	
Variación global anual de la productividad .	17
Variación global en el perfil vertical .....	21
Variación global en el perfil horizontal ...	26
Variación temporal en las diferentes locali- dades .....	27
Variación temporal con respecto a la profun- didad .....	31
Caracterización limnológica .....	37
CONCLUSIONES .....	39
LITERATURA CITADA .....	45

## RESUMEN

El presente trabajo describe el comportamiento de la productividad primaria evaluada por medio de las técnicas de botellas claras y oscuras; asimilación de carbono radiactivo y concentración de pigmentos (clorofila a, b y c), a través de su comportamiento, anual a partir de mayo de 1983 a abril de 1984, y su relación con los parámetros meteorológicos regionales del Lago El Sol.

La tasa máxima de productividad neta ( $444.39 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ ), coincidente con el máximo de todas las clorofilas ( $2.432 \text{ mg/m}^3$  de clorofila a,  $2.740 \text{ mg/m}^3$  de clorofila b y  $5.042 \text{ mg/m}^3$  de clorofila c), se observó durante la época de lluvias (agosto). Los valores mas altos de asimilación a través de carbono radiactivo, correspondieron a julio ( $0.073 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ ) y octubre ( $0.071 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ ).

La productividad bruta solamente presentó valores positivos de  $44.74 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  para junio; de  $89.52 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  para septiembre; y de  $15.68 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  para octubre. En el resto de los meses se registraron valores de productividad negativos, posiblemente debido a una determinante actividad quimio-sintética.

En la respiración se obtuvieron valores negativos en general, a excepción del mes de septiembre con  $22.78 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ ,

coincidente con el máximo valor positivo en la fotosíntesis bruta.

La productividad neta promedio anual en el perfil vertical mostró los máximos en la superficie (entre los 2.5 y 5.0 m con los valores más altos de 300.11 mgC/m<sup>3</sup>/h y 476.61 mgC/m<sup>3</sup>/h) y en el fondo a los 14.0 m (con 607.98 mgC/m<sup>3</sup>/h), correspondiendo en el nivel superficial con un porcentaje de atenuación de la radiación entre el 60% y 35% de la luz incidente superficial.

La productividad bruta sólo presentó tres valores positivos en la parte superficial comprendida entre los 2.5 y 5.0 m (con 4.34, 179.72 y 232.90 mgC/m<sup>3</sup>/h), y en los niveles restantes, valores negativos.

La respiración se caracterizó por presentar valores negativos en todos los niveles, encontrando el máximo negativo en el fondo (con - 794.61 mgC/m<sup>3</sup>/h).

Dentro de la distribución promedio anual en el perfil horizontal la característica general de la productividad fue su heterogeneidad; sin embargo la producción a través de la productividad neta, asimilación de C<sup>14</sup> y concentración de pigmentos, señala que generalmente se encontraron los máxi-

mos valores en las zonas cercanas a las líneas de playa y los más bajos en las áreas centrales del lago.

La productividad bruta y respiración generalmente mostraron valores negativos en todas las localidades, debido posiblemente a la actividad quimiosintética bacteriana.

La productividad a través de la evolución de  $O_2$  en las botellas claras y oscuras, fue en promedio 8,180 veces mayor que la obtenida por el método de carbono radiactivo, lo cual manifiesta errores metodológicos y la estimación de aspectos metabólicos complejos no estudiados aquí.

Las bajas temperaturas y el efecto de vientos fuertes que generan una mezcla de la columna de agua, asociado a un patrón de distribución vertical de productividad primaria, un sólo periodo de máxima producción durante las lluvias (agosto), y una productividad primaria promedio anual baja durante el año ( $0.044 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ , evaluado por  $C^{14}$ ), señala al Lago El Sol como un cuerpo de agua oligotrófico, holomécico de circulación continua, además de alpino por localizarse a una altitud por arriba del límite boscoso; características que son semejantes a las registradas en algunos cuerpos de agua Europeos como el lago "La Caldera" en España.

## INTRODUCCION

Desde el punto de vista geográfico el término de lago alpino es aplicado como regla a los lagos que están arriba del límite boscoso y en muchos de los casos se definen como lagos cráter según aspectos geomorfológicos; en éstos la estación de desarrollo y crecimiento de productores primarios es pobre principalmente debido a las bajas temperaturas y regularmente son oligotróficos o poco productivos ( Thomasson, 1956; Brilinsky y Mann, 1973; Hutchinson, 1975).

En los lagos alpinos aunque los rayos solares tienen que atravesar una capa atmosférica menor y las pérdidas por absorción y dispersión son menores, las pérdidas de calor por la reflexión de la radiación de onda larga al espacio exterior son mayores, además de que éstas se dan durante el día y la noche (Thomasson, 1956).

Sauberer, citado por Wetzel (1973), señala que la situación topográfica de los lagos de altas montañas es muy importante para la captación de energía solar, sobre todo en aquellos donde los alrededores elevados (montañas), pueden excluir una cantidad considerable de radiación directa.

A pesar de que en los lagos alpinos el suministro de energía solar es menor, y las bajas temperaturas hacen descen

der el metabolismo del fitoplancton, es de mucho mayor importancia el aporte de nutrientes, ya que el área de drenaje usualmente está limitada, y la precipitación por lo tanto, llega a ser muy importante (Thomasson, op. cit.; Gorham, citado por Likens y Herbert-Bormann, 1974).

En los lagos alpinos tropicales los florecimientos del fitoplancton se dan entre los finales de la estación seca y las lluvias, pues éstas últimas causan cambios en el contenido químico del agua y con ello el abatimiento en la concentración de sales; sin embargo los nutrientes son arrastrados de los alrededores a los lagos incrementando su concentración (Thomasson, op. cit.; Wetzel, 1975).

La disponibilidad de energía, así como la de nutrientes, no son totalmente independientes uno del otro, ya que la energía solar, es un factor que induce la formación de vientos y con ello la circulación convectiva que se ve reflejada en el tipo de mezcla de los constituyentes del lago (Hutchinson, 1975; Margalef, 1975).

La circulación del agua de los lagos alpinos, generalmente no es estacional pudiendo ocurrir la mezcla en cualquier momento (Thomasson, op. cit.; Wetzel, op. cit.).



Brilinsky y Mann (1973), encontraron que el nivel de mezcla de un lago se encuentra relacionado positivamente con la productividad.

En los lagos de altas montañas las condiciones de periodicidad diaria del fitoplancton está dado, según Tilzer (1973), por: 1) la dominancia de una sola especie a través de todo el año, representando mas del 50% de la biomasa total del fitoplancton; 2) la alta transparencia del agua con cambios considerables en la suspensión de sales minerales durante el verano; 3) cambios extremos en la intensidad de la luz entre el verano y el invierno debido al incremento del albedo y a la absorbancia por la cubierta de nieve y hielo; 4) la ausencia de una termoclina y presencia débil de un gradiante de temperatura continuo durante el periodo frío frecuentemente evita la circulación de agua de la zona trofogénica; 5) y escasés extrema de nutrientes.

En México los estudios limnológicos se han enfocado generalmente al análisis fisicoquímico de los cuerpos de agua temporaleros, por lo que existe una escasés de información sobre los procesos productivos en éstos, y aún mas, en los cuerpos de agua alpinos, que en México el "Lago El Sol" es único y representa por su ubicación, un sistema importante

desde el punto de vista biológico ya que constituye una fuen  
te de conocimiento y punto de comparación para los otros sis  
temas permanentes y temporales de las regiones bajas del  
país.

Dado lo anterior, el presente estudio tiene como ob-  
jetivo el contribuir al conocimiento de la productividad pri  
maria, y su variación espacial ( distribución en el perfil  
vertical y horizontal) y temporal de un cuerpo de agua de al  
ta montaña como lo es el Lago El Sol del volcán Nevado de To  
luca, por medio del análisis de la evolución de oxígeno en  
las botellas claras y oscuras; la asimilación de carbono  
radiactivo y cuantificación de pigmentos clorofílicos (clo-  
rofila a, b y c); así como determinar la relación qualitati  
va entre la productividad primaria y los factores meteoroló-  
gicos regionales, como: temperatura, velocidad y dirección  
del viento, nubosidad y precipitación.

## ANTECEDENTES

Alcocer (1980), menciona que existen trabajos referentes al área del Nevado de Toluca desde hace varias décadas con especial énfasis en la geología del mismo.

Entre las investigaciones que éste autor cita como aportadoras de conocimiento sobre la formación de la estructura volcánica del Nevado de Toluca, del cual se cree tuvo una altura superior al del Popocatepetl y cuya explosión fue semejante a la del conocido Krakatoa (Bloomfield, citado por Alcocer, 1980) son las realizadas por Ordoñez (1902); Flores (1906); Waltz (1909, 1915); Yarza (1948); Mooser (1961, 1967, 1969); Bloomfield (1974, 1977).

También señala que en cuanto a estudios sobre los Lagos del volcán se cuenta, con algunos como el de Bloomfield (1979); Velazquez de León (1856); Dollfus y Nontserrat (1887); Guzmán (1972), con información de diversos temas, como temperatura, transparencia, profundidad, entre otros.

Villalpando (1968), se enfocó al conocimiento de las condiciones del ambiente geológico del cráter del Nevado de Toluca (Petrografía, Geomorfología, Topografía y aún clima), y su relación con los seres vivos.

Kusel-Feltzman (1973), realizó un estudio de las es-

pecies del fitoplancton presentes en el Lago El Sol, así como el análisis de la transparencia, conductividad y temperatura del agua.

## DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El Volcán Nevado de Toluca forma parte de la Sierra Volcánica Transversal (Sinónimos: Cordillera Neovolcánica, Eje Volcánico). Es una cadena montañosa que por su situación latitudinal y su orientación, es única en el continente y actúa como zona de transición. El volcán está situado al SO de la ciudad de Toluca a una latitud  $19^{\circ} 18' N$  y longitud  $99^{\circ} 44' W$ . Este es considerado como el cuarto en elevación en el país, con una altura de 4,620 m s.n.m. Geológicamente es límite entre Norte y Centro América (Villalpando, 1968; Fig. 1).

Al analizar los datos de los registros meteorológicos de la estación Nevado de Toluca y según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1966), el clima de la zona del volcán Nevado de Toluca resulta ser E(T)C H w i, los símbolos E(T)C definen un clima frío, con temperatura media anual entre  $-2^{\circ} C$  y  $5^{\circ} C$ , temperatura media del mes más frío mayor de  $0^{\circ} C$  y la del mes más caliente entre  $0^{\circ} C$  y  $6.5^{\circ} C$ ; la H significa que se trata de un lugar alto; la w que el lugar tiene un régimen de lluvias en verano, con un porcentaje de lluvia invernal comprendido entre el 5% y 10.2% de precipitación anual; la i significa que la oscilación térmica anual (diferencia en temperatura entre el mes más frío y el más cálido) es menor o igual a  $5^{\circ} C$ , o sea una

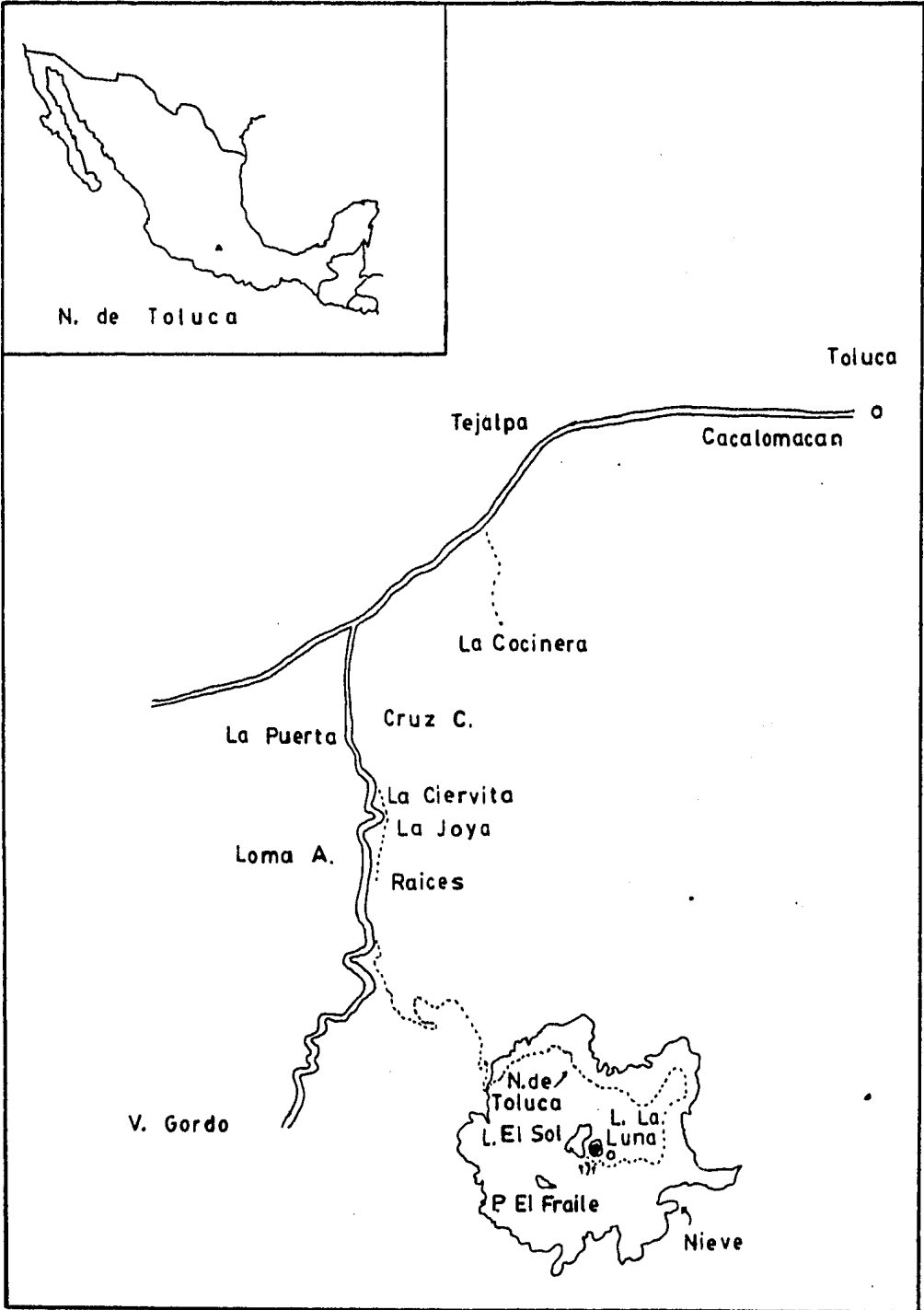


Fig. 1. Ubicación del Lago El Sol

zona isotermal, que coincide también con la descripción de Villalpando (1968), para ésta región.

Las fluctuaciones de la temperatura ambiente promedio mensual, presentaron los valores mas altos en abril y fueron disminuyendo con oscilaciones hasta alcanzar en febrero las mínimas (Tabla 1, Fig. 2a). Puede observarse que la temperatura del agua sigue un comportamiento similar a la temperatura máxima ambiental registrada en el área del volcán, relación que también fue encontrada y analizada por Fry, Watt y Steele, citados por McCombie (1959), en el Lago Meade en Nevada y en Manitoulin Island al sur de la Bahía.

La presencia de nieve en el volcán durante la estación fría y parte de la primavera (de noviembre a abril), fue importante no sólo porque provoca un aumento en la reflexión de la luz, sino también por la disminución de la temperatura como lo registran Forti (1970); Weller y Homgren (1980), para otros sistemas.

La nubosidad y la precipitación pluvial fueron mayores de mayo a septiembre con valores que van desde 75% hasta 50% de cobertura nubosa y de 3.37 mm hasta 7.15 mm en la precipitación; en el resto de los meses, ambas condiciones fueron escasas o nulas (Tabla 1, Fig. 2b).

Tabla 1.

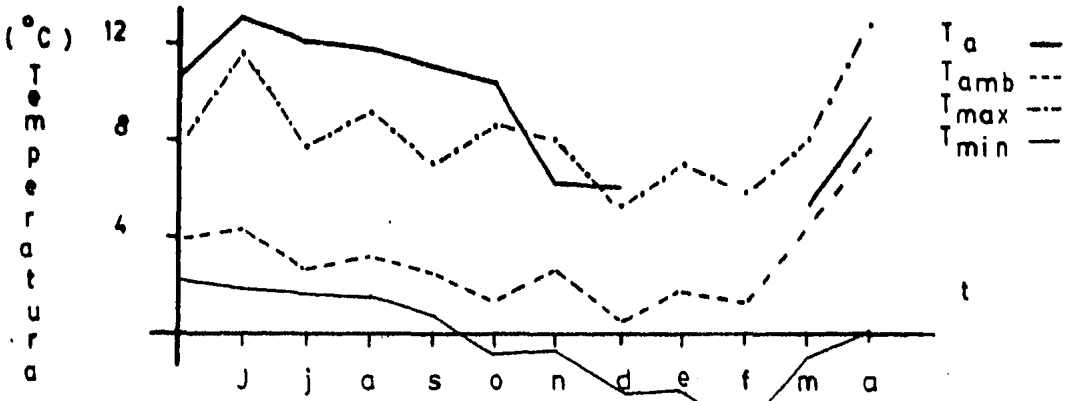
## PROMEDIOS DE LOS PARAMETROS CLIMATICOS REGISTRADOS

EN LA ESTACION METEOROLOGICA NEVADO DE TOLUCA.

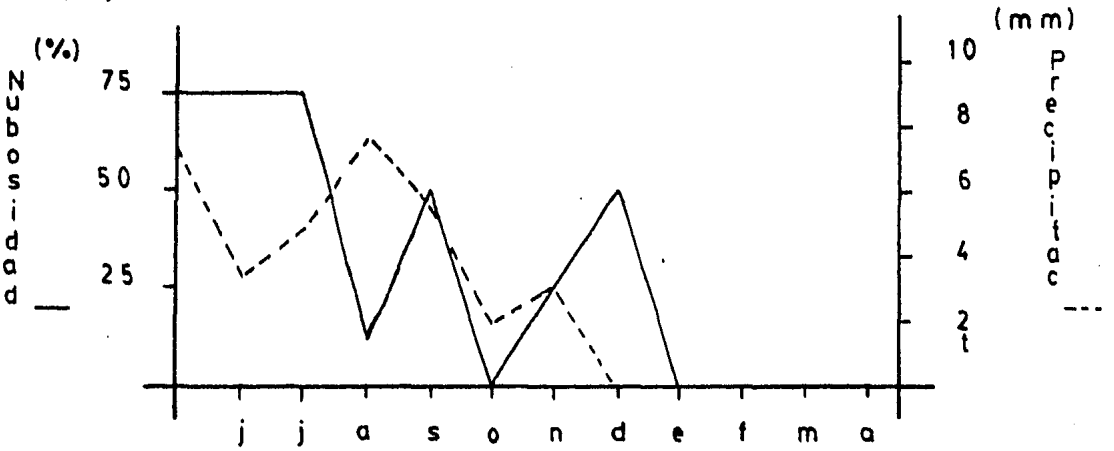
M e s	Vel. del Viento. (m/seg)	Direc. del Viento.	Cobertura Nubosa. ( % )	Precip. Pluvial. ( mm )	Temp. Prom. Mensual. ( °C )	Temp. Máxima. ( °C )	Temp. Mínima. ( °C )	Temp. del Agua. ( °C )	Observaciones.
mayo 82	10	NO	75	7.15	4.06	7.75	2.13	10.78	
junio 82	10	NE	75	3.37	4.25	11.58	1.83	13.08	
julio 82	15	SE	75	4.80	2.63	7.75	1.56	12.0	
agosto 82	15	NE	12.5	7.5	3.14	9.07	0.79	11.71	
sept. 82	10	NSE	50	5.61	2.50	7.0	0.63	11.04	
oct. 82	10	SO	0	1.88	1.38	8.56	- 0.69	10.46	
nov. 82	10	SO	25	0	2.56	8.0	- 0.81	6.32	
dic. 82	15	SO	50	1.57	0.50	5.29	- 2.36	6.0	
enero 83	15	SO	0	0	1.71	7.0	- 2.29	-	
febrero 83	15	SO	0	0	1.25	5.81	- 3.81	-	
marzo 83	15	SO	0	0	4.38	8.0	- 0.88	5.28	
abril 83	15	SO	0	0	7.59	12.87	0	9.0	



a )



b )



c )

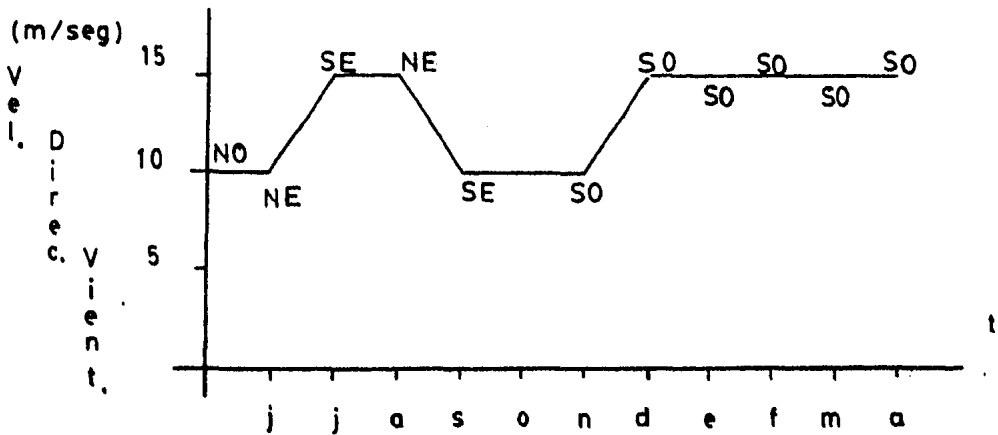


Fig. 2. Comportamiento anual de la Temperatura ambiente y del agua (2a); de la nubosidad y precipitación (2b); y de la velocidad y dirección del viento (2c).

Los registros de la velocidad del viento correspondientes al día de muestreo, presentan en los meses de julio, agosto, marzo y abril los máximos de 15 m/seg y los mínimos de 10 m/seg en los meses restantes. La dirección del viento fue SO y NE la mayor parte del año (Tabla 1, Fig. 2c).

El volcán tiene aspecto de cono truncado y por su origen es un volcán estratificado formado por capas de lavas andesíticas y material detrítico.

El Lago El Sol, se encuentra en la parte oeste de la elevación central de la chimenea, conocida como domo u ombligo y presenta las siguientes características morfométricas, que se encuentran resumidas en la figura 3.

Reid y Wood (1976), señalan dos posibles orígenes de los lagos de altas montañas, como son: 1) por el aporte de agua proveniente de las lluvias y de la fusión del hielo de las regiones cercanas al cráter, como es el caso del lago Cráter en Oregon, y; 2) por el repetido abance y retroceso de las glaciaciones del pleistoceno hace 400,000 ó 10,000 años atrás, que contribuyeron a la formación de cuerpos de agua alpinos. Una cantidad considerable de lagos en América del Norte y Europa se formaron en regiones que una vez fueron cubiertas por los glaciares del Pleistoceno; y tal vez



Area	233,819 m <sup>2</sup>
Volúmen	1,589,721 m <sup>3</sup>
Longitud Máxima	795.1 m SSE-NNE
Ancho Máximo	482.4 m
Ancho Medio	298.5 m
Perímetro o Margen Lagunar	3.68
Profundidad Media: Profundidad Máxima	0.37
Profundidad Media	6.05
Profundidad Relativa	2.73 %



Fig. 3. Características Morfométricas del Lago El Sol.

el Lago El Sol pudiera haber tenido su origen por alguna de éstas dos causas.

Para éste estudio se situaron estaciones de observación y muestreo equidistantes, cubriendo toda su área como los distintos niveles de la columna de agua, haciendo un total de siete puntos con uno a tres niveles (Fig. 4).

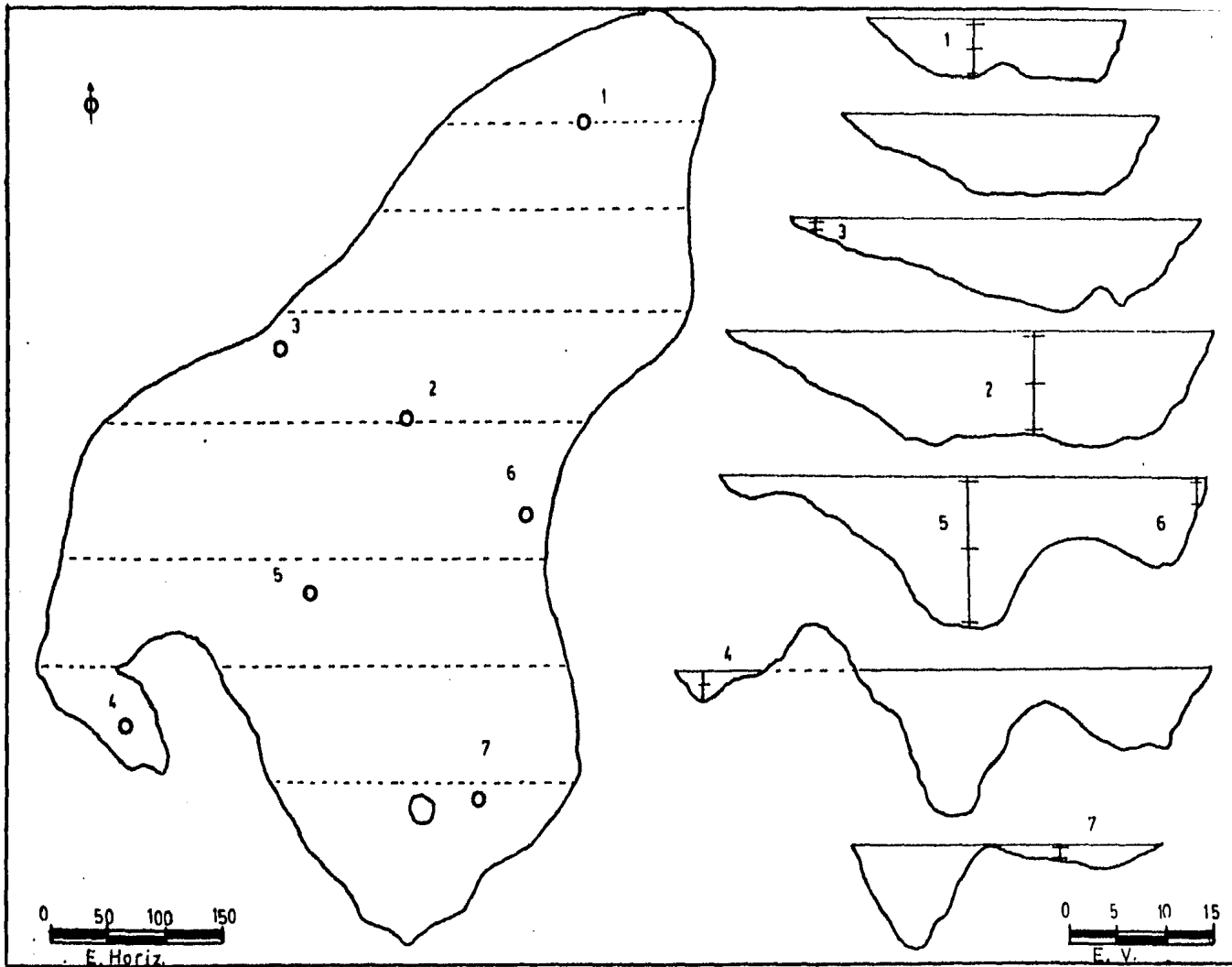


Fig. 4. Batimetría y localización de Estaciones

## MATERIAL Y METODO

Los parámetros ambientales como la temperatura ambiente, la dirección y velocidad del viento, porcentaje de cobertura nubosa y precipitación, fueron obtenidos de los informes meteorológicos mensuales de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos (S.A.R.H.) en la estación Nevado de Toluca.

El análisis de dicha información se encuentra referida como variaciones promedio mensual y se presentan resumidos en Tablas y figuras.

Para la determinación del porcentaje de atenuación de la luz en la columna de agua en el Lago El Sol, se utilizó la información obtenida de: Solar radiation penetrating the ocean; a review of requirements, data and methods of measurement, with particular reference to photosynthetic productivity, y según la fórmula dada por Strickland J. D. H. (1958).

Las determinaciones de productividad primaria en el Lago El Sol, fueron realizadas durante un periodo comprendido entre mayo de 1982 y abril de 1983, con evaluaciones mensuales.

Las muestras de agua fueron obtenidas a través de una botella Van Dorn de tres litros de capacidad, y al mismo tiempo se les determinó su temperatura a través de un termómetro

convencional, con aproximaciones de  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

La cuantificación de productividad primaria (productividad neta, productividad bruta y respiración), fue efectuada in situ, por medio de la técnica de incubación de botellas claras y oscuras según Strickland y Parsons (1968), con las modificaciones en los cálculos de Wetzel y Likens (1979), para los cuerpos de agua continentales, y referida en  $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{h}$ .

El contenido de oxígeno en las botellas incubadas fue determinado según el método Winkler, modificación de la azida (Standard Methods, American Public Health Association 1976).

La asimilación de carbono radiactivo se realizó, empleando la técnica de incubación de botella clara y oscura con  $\text{Na HC}^{14}\text{O}_3$ , establecida por Stemann Nielsen (1968), modificada por Wetzel y Likens (1979), para cuerpos de agua dulce, en donde la cantidad de carbono radiactivo asimilado está dada en  $\text{mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ .

Las botellas claras y oscuras fueron incubadas; suspendidas a través de boyas y anclas por tres horas en promedio y generalmente de entre la 11:00 y las 14:00 horas del día.

Posteriormente en el laboratorio, las muestras fueron procesadas y se les determinó el número de cuentas por segun

do en un contador de centelleo líquido, modelo Beckman LS 7,000 Microprocessor Controlled del Laboratorio de Otoneurobioquímica del Centro de Fisiología Celular de la U.N.A.M., dicho conteo se realizó en viales con una solución de Tritón - X - 100 (polietoxietanol fenoxioctil), etilenglicol, hexano, xileno, y P.P.O. (2,5 - difeniloxazol).

La concentración de pigmentos (clorofila a, b y c), fue estimada por el método tricromático de Strickland y Parsons (1968), en donde la concentración de clorofilas está dada en  $\mu\text{g}/\text{l}$  o  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

El análisis de la productividad primaria por medio de los tres métodos (excepto el conteo de la radiación  $\beta$  del  $\text{C}^{14}$ ) fue efectuada en el Laboratorio de Química y Productividad Acuática del Instituto de Biología de la U.N.A.M.

La información de los parámetros bióticos se encuentra comprendida en las Tablas 2 - 6 y figuras 5 - 18, en las cuales se analiza su comportamiento anual (tiempo) y sus variaciones mensuales en el perfil vertical y horizontal (espacio), tratando de establecer su relación con los parámetros climáticos regionales.



## RESULTADOS Y DISCUSION

### VARIACION GLOBAL ANUAL DE LA PRODUCTIVIDAD

Al analizar la productividad primaria del lago durante el ciclo anual, por medio de la evolución de oxígeno se puede apreciar que la productividad neta presentó dos máximos, uno en el mes de agosto con  $444.39 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  y otro en abril del siguiente año con  $399.48 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ . Los meses que registraron las tasas mínimas fueron: junio con  $62.50 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  y septiembre con  $122.20 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  (Tabla 2, Fig. 5a).

La productividad bruta presentó valores negativos en cinco de los nueve meses muestreados, que van desde  $-557.66 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en el mes de mayo, hasta  $-9.06 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en julio. En los meses restantes (junio, septiembre, octubre y abril) los valores positivos fueron desde  $101.76 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en abril, hasta  $15.68 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en octubre; sólo el máximo de productividad bruta de abril coincidió con el máximo de productividad neta; sin embargo el máximo de productividad neta de agosto no correspondió con la productividad bruta.

La respiración presentó en casi todos los meses valores negativos que fueron desde  $-1204.29 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en agosto, hasta  $-174.20 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  en octubre, excepto en septiembre cuya tasa respiratoria fue de  $22.78 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ .

Tabla 2. Promedios Mensuales de los Parámetros Bióticos del Lago El Sol

M e s	Fotosint. Neta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Fotosint. Bruta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Respirac. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Asimilación de C <sup>14</sup> (mgC <sup>14</sup> /m <sup>3</sup> /h)	Clorof. a (mg/m <sup>3</sup> )	Clorof. b (mg/m <sup>3</sup> )	Clorof. c (mg/m <sup>3</sup> )
mayo 82	106.04	- 557.66	- 726.52	0.017			
junio 82	62.50	44.74	- 659.85		0.840	0.803	2.590
Julio 82	158.74	- 9.06	- 201.36	0.073	0.569	0.688	1.489
agost. 82	444.39	- 340.65	- 1204.29		2.432	2.740	5.042
sept. 82	122.20	89.52	22.78		0.849	0.900	1.355
oct. 82	165.8	15.68	- 174.20	0.071	1.339	0.976	1.935
nov. 82	184.04	- 378.37	- 600.95		0.971	0.563	1.547
marzo .83	245.12	- 288.90	- 606.98	0.012	1.927	0.955	2.318
abril 83	399.48	101.76	- 333.69	0.032	1.204	0.852	2.081

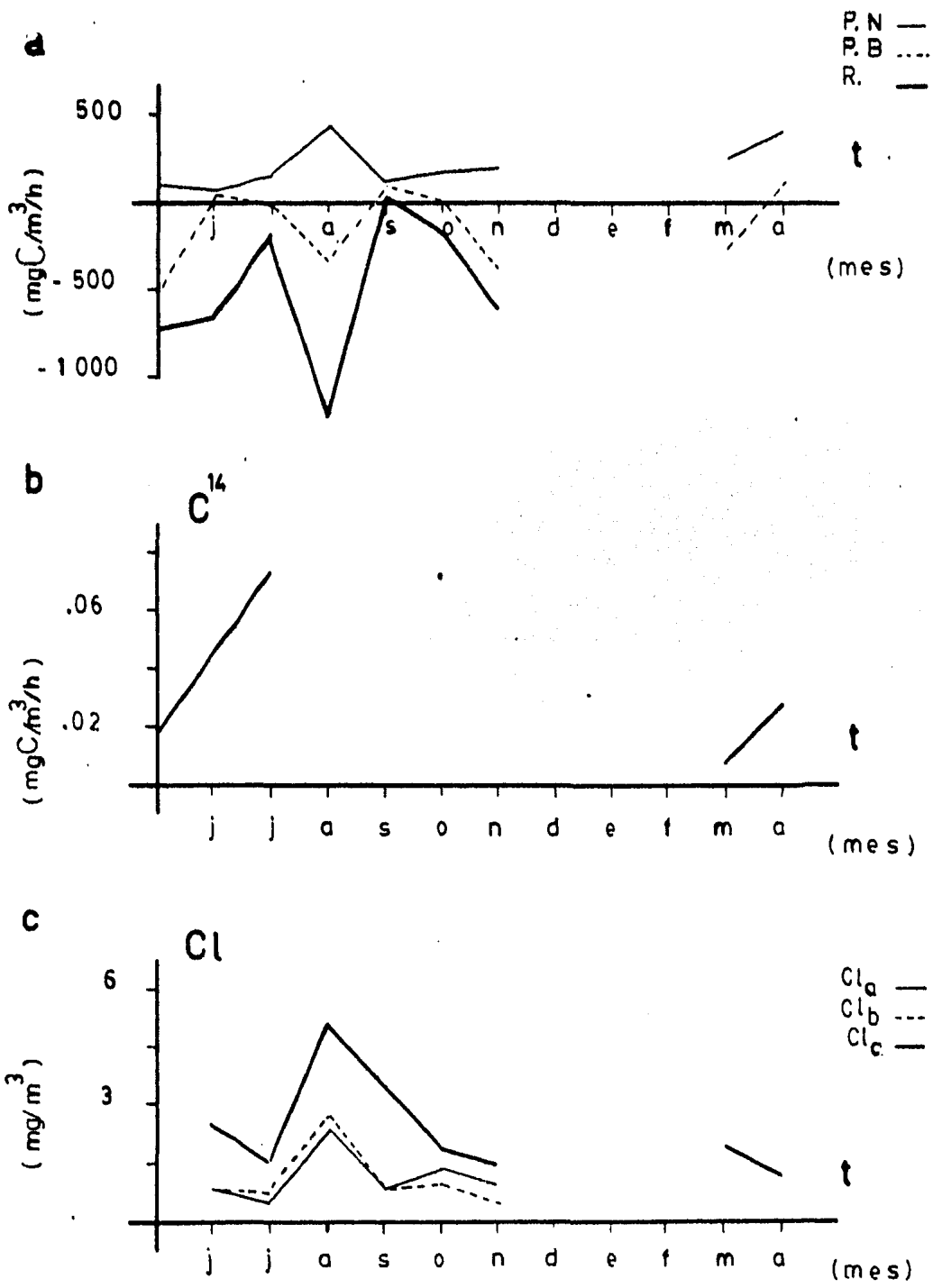


Fig. 5. Comportamiento anual de la productividad neta, bruta y respiración (5a); asimilación de  $\text{C}^{14}$  (5b); y pigmentos clorofílicos (5c).

Dugdale, Wallace, Winberg y Ohle, citados por Vollenweider (1974), efectuaron registros significativos anómalos y ocasionales de mayores contenidos de oxígeno en las botellas oscuras después de la incubación, y no encontraron una explicación conclusiva a este tipo de anomalías, las cuales se presentan escasamente, según las evidencias disponibles. La fotooxidación a altas intensidades de luz es considerada por McAllister (1961), como una posibilidad.

Vollenweider (1974), también menciona que la fotosíntesis bacteriana no involucra la fotólisis del agua, pero considera muy probable que el proceso pueda aparecer en cualquier parte en los cuerpos de agua oxigenados.

La productividad primaria promedio mensual a través de la técnica de carbono radiactivo, señaló un ligero aumento en el mes de abril (de  $0.032 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ ); en julio y octubre se obtuvieron las mas altas tasas de asimilación con  $0.073 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$  y  $0.071 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ , respectivamente (Tabla 2, Fig. 5b). Es importante hacer notar que el valor de productividad neta (evolución de oxígeno), obtenido en el mes de abril es mucho mas alto (14,340 veces) en comparación con el observado en la asimilación de carbono radiactivo para éste mes.

El comportamiento promedio anual de la concentración de clorofila a, b y c, mostró un máximo en el mes de agosto con 2.432 mg/m<sup>3</sup>, 2.740 mg/m<sup>3</sup> y 5.042 mg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Sin embargo para la clorofila a y c, los mínimos se obtuvieron en julio con 0.569 mg/m<sup>3</sup>; y 1.489 mg/m<sup>3</sup> y en el mes de noviembre el mínimo de clorofila b fue 0.563 mg/m<sup>3</sup>. Cabe hacer señalar que la máxima cantidad de pigmentos correspondió con el máximo valor de productividad (Tabla 2, Fig. 5c).

Dado lo anterior puede apreciarse que la productividad primaria a través de los tres métodos, presenta una variación anual con sus máximas tasas de productividad neta y concentración de pigmentos clorofílicos en agosto y muy posiblemente de asimilación de C<sup>14</sup> (ya que éste no fue determinado), correspondiendo a la época de lluvias, así como también a las mayores velocidades del viento, que provocó la mezcla continua de las aguas, logrando regularmente la distribución homogénea de los factores fisicoquímicos. Estos aspectos pueden relacionarse con el mayor aporte (escurrimientos) y mezcla de nutrientes, que en los lagos de alta montaña son considerados por Thomasson (1956); Brilinsky y Mann (1973); Tilzer (1973); y Findenegg (1974), como los factores adecuados para la productividad. La disminución en la cobertura nubosa del 75% a un 12.5% en ésta época, contribuyó así mismo al aumento de la radiación solar y por lo tanto a una aparente explosión fitoplanctónica

de verano.

En el contenido de la clorofila a y b se dan fluctuaciones en el tiempo, predominando la primera en la época de lluvias y la segunda en el periodo de estiaje. La alternancia en las mayores concentraciones de dichas clorofilas se debe según Jorgensen y Stemann Nielsen (1974); Talling (1974); Goldman y Carpenter (1974), a una sucesión de especies, provocada principalmente por los cambios bruscos de temperatura, variación que no les permite a algunos organismos adaptarse a las nuevas condiciones; situación coincidente con el patrón de variación de la temperatura aquí registrado.

Es importante hacer notar la mayor concentración de la clorofila c en todos los meses de estudio. Al respecto el predominio de dicha clorofila demuestra, según Tilzer (1973), una permanencia y mayor concentración de ciertos grupos de organismos, específicamente ciertos flagelados (Kuselfeltzman, 1973; Banderas, comunicación personal), que poseen mayores concentraciones de clorofila c en su sistema fotosintético (Margalef, 1980); además su capacidad de locomoción les permite responder mas favorablemente a las variaciones del medio ambiente alpino.

Tilzer (1973), señala que éstos fitoplanctontes migran a los niveles donde la cantidad de luz sea óptima y que es una adaptación de los organismos que habitan los lagos de alta monta

na; Berman y Pollinger (1974), también mencionan que la movilidad del fitoplancton es una cualidad de los organismos que los capacita para optimizar su distribución en la columna de agua a diferentes tiempos con respecto a los factores medioambientales como: luz, temperatura y disponibilidad de nutrientes, comportamiento que les permite mantenerse en altas densidades aunque prevalezcan niveles bajos de nutrientes en el epilimnion.

#### VARIACION GLOBAL EN EL PERFIL VERTICAL

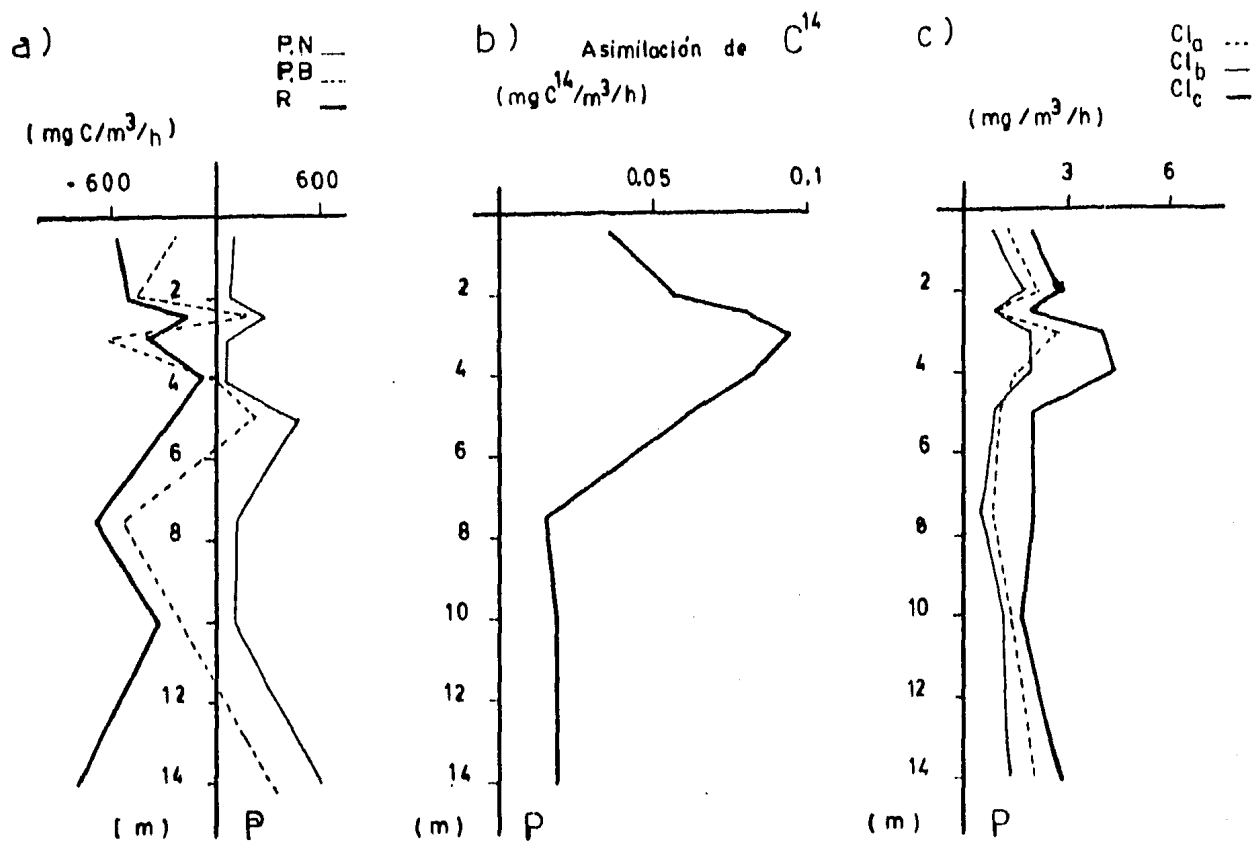
La variación promedio anual de la productividad neta respecto a la profundidad, muestra que se efectuó con mayor eficiencia tanto en el nivel de los 2.5 m a 5.0 m (con 300.11 mgC/m<sup>3</sup>/h y 476.61 mgC/m<sup>3</sup>/h, respectivamente); como en el fondo a los 14.0 m (con 607.98 mgC/m<sup>3</sup>/h, Tabla 3, Fig. 6a).

La productividad bruta en el perfil vertical siguió el mismo comportamiento que la productividad neta, a pesar de que se registraron valores negativos, obteniéndose las máximas tasas positivas a los 2.5 m con 179.72 mgC/m<sup>3</sup>/h, a los 5.0 m con 232.90 mgC/m<sup>3</sup>/h, y en el fondo con 339.41 mgC/m<sup>3</sup>/h (Tabla 3, Fig. 6a).

Tabla 2. Promedio Anual de los Parámetros Bióticos Analizados con respecto a la profundidad.

Profund. (m)	Fotosint. Neta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Fotosint. Bruta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Respirac. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Asimilac. de C <sup>14</sup> (mgC/m <sup>3</sup> /h)	Clorof.a (mg/m <sup>3</sup> )	Clorof.b (mg/m <sup>3</sup> )	Clorof.c (mg/m <sup>3</sup> )	Coefic. Fot./Cl a.
0.5	114.56	- 231.02	- 565.41	0.036	1.393	0.800	1.910	0.026
2.0	84.21	- 453.35	- 512.97	0.057	2.104	1.802	2.877	0.027
2.5	300.11	179.72	- 170.16	0.081	0.837	0.934	1.951	0.090
3.0	75.87	- 621.33	- 393.29	0.094	2.735	2.072	3.967	0.034
4.0	64.34	4.34	- 78.65	0.082	1.641	1.969	4.415	0.050
5.0	476.61	232.90	- 285.14	0.061	1.068	0.831	2.048	0.057
7.5	139.47	- 535.53	- 706.55	0.015	0.880	0.572	2.085	0.017
10.0	129.34	- 209.33	- 337.76	0.018	1.460	1.258	1.654	0.012
14.0	607.98	339.41	- 794.61	0.018	2.064	1.377	2.838	0.009





•Fig. 6. Comportamiento promedio anual con respecto a la profundidad de la productividad neta, bruta y respiración (6a); asimilación de  $\text{C}^{14}$  (6b); y pigmentos clorofílicos (6c).

La respiración mostró en todos los niveles valores negativos, que generalmente fueron máximos en los puntos donde la productividad bruta también fue negativa, excepto en el fondo, donde la tasa respiratoria fue aún mas negativa; hecho que no ha sido explicado todavía y que es atribuido por McAllister (1961), a la fotooxidación, o a la probable fotólisis del agua por la fotosíntesis bacterial según Vollenweider (1974), y que en este caso se registraron en mayores cantidades en el fondo del lago en la zona de remineralización, como lo ha observado también Ferrari (1976), en otros cuerpos de agua.

Los valores bajos tanto en las tasas de productividad neta, productividad bruta y respiración (valores negativos) en los dos primeros metros superficiales del lago pueden ser debidos a la inhibición y saturación de la fotosíntesis que según Thomasson (1956); Fee (1973); y Vollenweider (1974), es provocada por los rayos ultravioleta, que generalmente llegan en mayor intensidad a los lagos alpinos, dado el menor grosor de la capa atmosférica a esas altitudes ya que las pérdidas por absorción y dispersión son menores, sobre todo en los periodos de mayor insolación.

Yentsch y Rither, citados por Beyers (1974), encontraron que la fotosíntesis se abate a la mitad de la mañana, cuando se tiene el máximo de radiación. En éste estudio el periodo de

incubación coincidió con la mayor insolación, lo cual pudie-  
ra justificar las tasas bajas de productores primarios foto-  
sintéticos, mas no de bacterias quimiosintéticas.

Las máximas tasas superficiales de productividad neta  
y aún de bruta se encontraron en aquellas profundidades (2.5  
y 5.0 m), donde el porcentaje de radiación del total que in-  
cidió sobre la superficie del agua estuvo entre 60% y 35%,  
que corresponde con lo citado por Fee (1973); Vollenweider  
(1974); Yentsch (1974); Andersen y Sand-Jensen (1980), en  
cuanto a que los organismos son mas eficientes fotosintética-  
mente a bajas intensidades de luz.

Las altas tasas de productividad del fondo (14.0 m)  
son debidas a la actividad de las algas bentónicas (princi-  
palmente a las algas epipélicas), que se encuentran adapta-  
das a las bajas condiciones de iluminación (Abbayes, et al.,  
1978), y que de hecho se observaron grandes densidades en el  
presente estudio. La intensidad luminosa a los 14.0 m (la  
parte mas profunda del lago), no fue un factor limitante pa-  
ra el desarrollo de la ficoflora bentónica, porque los rayos  
solares alcanzan a penetrar hasta el fondo en un 5% aproxima-  
damente de la radiación total que incide sobre la superficie  
del lago. Barko, Murphy y Wetzel (1974), mencionan que las  
macrofitas bentónicas son las que contribuyen con el 61% a

la productividad primaria total del cuerpo de agua; las algas epipélicas con el 26% y el fitoplancton sólo con el 13% de la productividad total.

El porcentaje de atenuación de la radiación en el perfil vertical se muestra en la figura 7; y se observa que la transparencia del agua del Lago El Sol, coincide con la teórica calculada según Reid y Wood (1976), para aguas anormalmente claras; en base a ésto el 1% de la radiación total incidente sobre la superficie del agua se alcanzaría a los 22.75 m, si esa fuera la profundidad del lago; por lo que puede considerarse la existencia de la zona fótica que va de la superficie al fondo y por lo mismo la posibilidad de aparición y permanencia de organismos autótrofos en el bentos, como lo registran los análisis de la comunidad del bentos efectuados por Banderas, comunicación personal, aunque la calidad de la radiación que llega al fondo, esté modificada por la absorción de la luz por el material suspendido en el agua de los lagos (Morel y Smith, 1974).

La distribución promedio anual de la asimilación de carbono radiactivo con respecto a la profundidad, muestra que la asimilación se efectuó con mayor intensidad durante todo el año en el nivel comprendido entre los 2.5 y 5.0 m, específicamente a los 3.0 m con  $0.094 \text{ mgC}^{14} / \text{m}^3 / \text{h}$ . Es pertinente

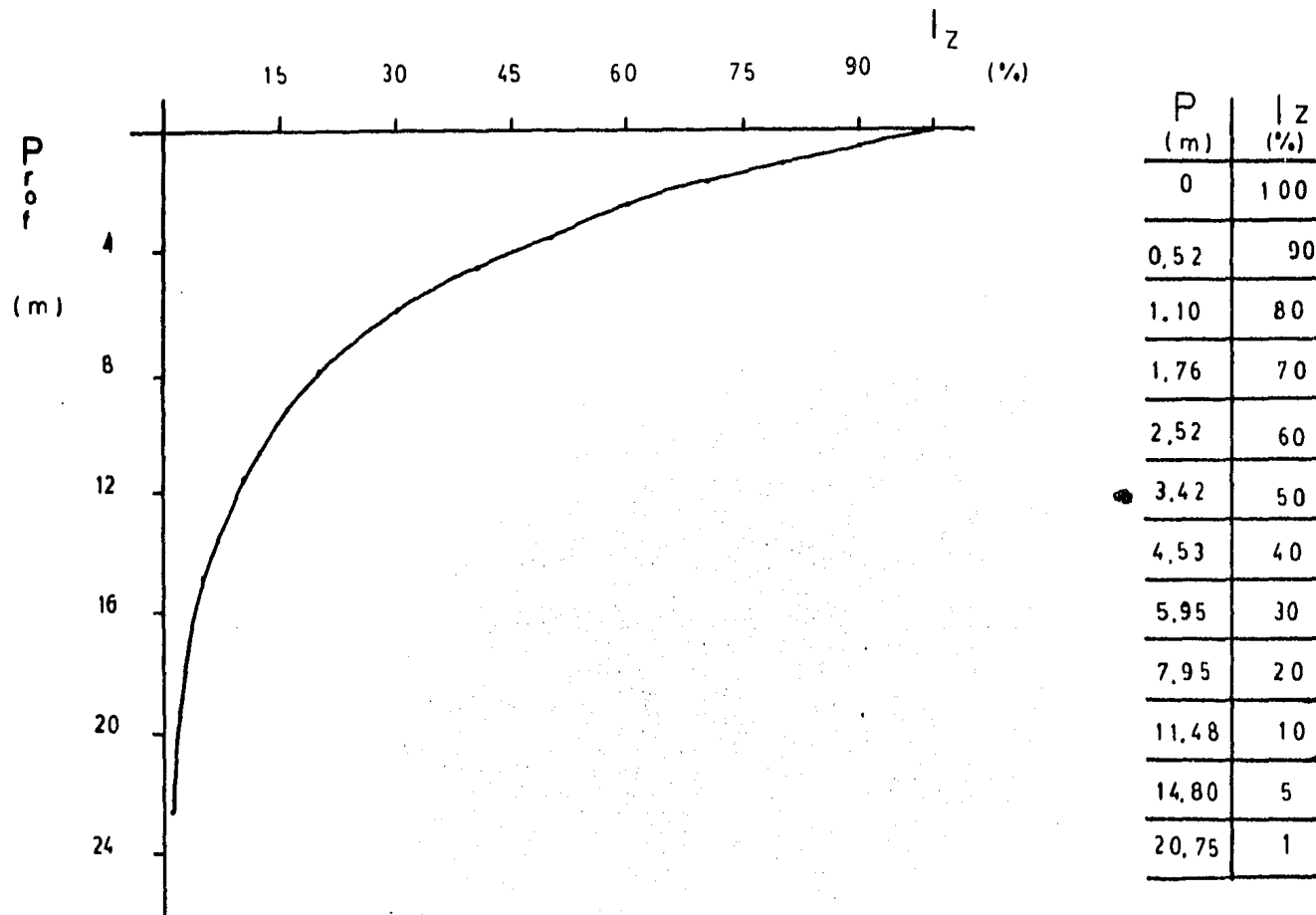


Fig. 7. Por ciento de atenuación de la radiación total incidente respecto a la profundidad.

mencionar nuevamente que a ésta profundidad la cantidad de radiación solar ha sido atenuada aproximadamente en un 60% (Tabla 3, Fig. 6b).

En el nivel del fondo del lago (de los 7.0 m a los 14.0 m), la tasa de asimilación de carbono radiactivo disminuyó en aproximadamente cinco veces lo registrado a los 3.0 m y permaneció constante ( $0.017 \text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$  en promedio); cabe recordar que en éste nivel se registraron las mayores tasas de productividad neta, productividad bruta y posiblemente quimiosíntesis que Sorokin (1974); Ferrari (1976); Vollenweider (1974); y Barko, Murphy y Wetzel (1977), adjudican a las bacterias y algas del bentos.

El comportamiento anual de la concentración de pigmentos, clorofilas a, b y c, en el perfil de la columna de agua, mostró un comportamiento similar al de las tasas de asimilación de carbono radiactivo, encontrando las mayores concentraciones de pigmentos entre los 2.0 y 5.0 m, siendo notorio el contenido de clorofila c a los 4.0 m con  $4.415 \text{ mg}/\text{m}^3$ ; por el contrario en el fondo (14.0 m) se observó, una disminución de aproximadamente la mitad de todas las clorofilas (Tabla 3, Fig. 6c).

La obtención de las mayores tasas de productividad pri

maria en el nivel superficial de los 2.0 a los 5.0 m y ocasionalmente en el fondo, mostraron la influencia definitiva del factor luz sobre los organismos fitoplanctónicos, que tienen capacidad de locomoción y que presentaron un comportamiento fototáctico, a pesar de la fuerte acción del viento en la mezcla de los constituyentes del agua, comportamiento que también es mencionado por Brilinsky y Mann (1973); Iverson, Curl y Saugen (1974).

Dada esta migración, Berman y Pollinger (1974), consideran que la cuantificación de la producción por medio de la incubación en botellas claras y oscuras a una cierta profundidad puede conducir a la subestimación de las tasas de producción.

#### VARIACION GLOBAL EN EL PERFIL HORIZONTAL

El comportamiento promedio anual de los parámetros biológicos en las diferentes localidades estudiadas presenta algunas variaciones en su distribución, pudiéndose observar en la región O y N del lago las mayores tasas de productividad neta, con 590.10 mgC/m<sup>3</sup>/h y 220.63 mgC/m<sup>3</sup>/h (localidades 4 y 3 respectivamente, Tabla 4, Fig. 8a). El resto de las localidades presentaron tasas bajas, siendo de 110.0 mgC/m<sup>3</sup>/h en promedio.

Tabla 4. Promedio Anual de los Parámetros Bióticos Analizados por

Localidades

M e s	L O C A L I D A D E S						
	1	2	3	4	5	6	7
Fotosint. Neta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	281.50	120.47	220.63	590.16	222.30	105.62	104.14
Fotosint. Bruta. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	25.44	67.11	- 573.11	- 597.25	69.58	81.16	- 223.65
Respirac. (mgC/m <sup>3</sup> /h)	- 254.50	- 297.08	- 1564.73	- 1228.99	- 454.07	- 34.12	- 435.65
Asimilac. de <sup>14</sup> C (mgC/ <sup>14</sup> Cm <sup>3</sup> /h)	0.048	0.032	0.053	0.027	0.018	0.058	0.033
Clorof. a (mg/m <sup>3</sup> )	0.933	1.107	1.598	1.408	1.300	1.288	1.534
Clorof. b (mg/m <sup>3</sup> )	0.889	0.879	1.403	0.763	0.922	1.378	1.440
Clorof. c (mg/m <sup>3</sup> )	1.840	1.778	2.608	2.987	2.231	2.914	2.750
Coefficiente Fot.C <sup>14</sup> /Clorof.	0.051	0.007	0.033	0.019	0.014	0.045	0.021



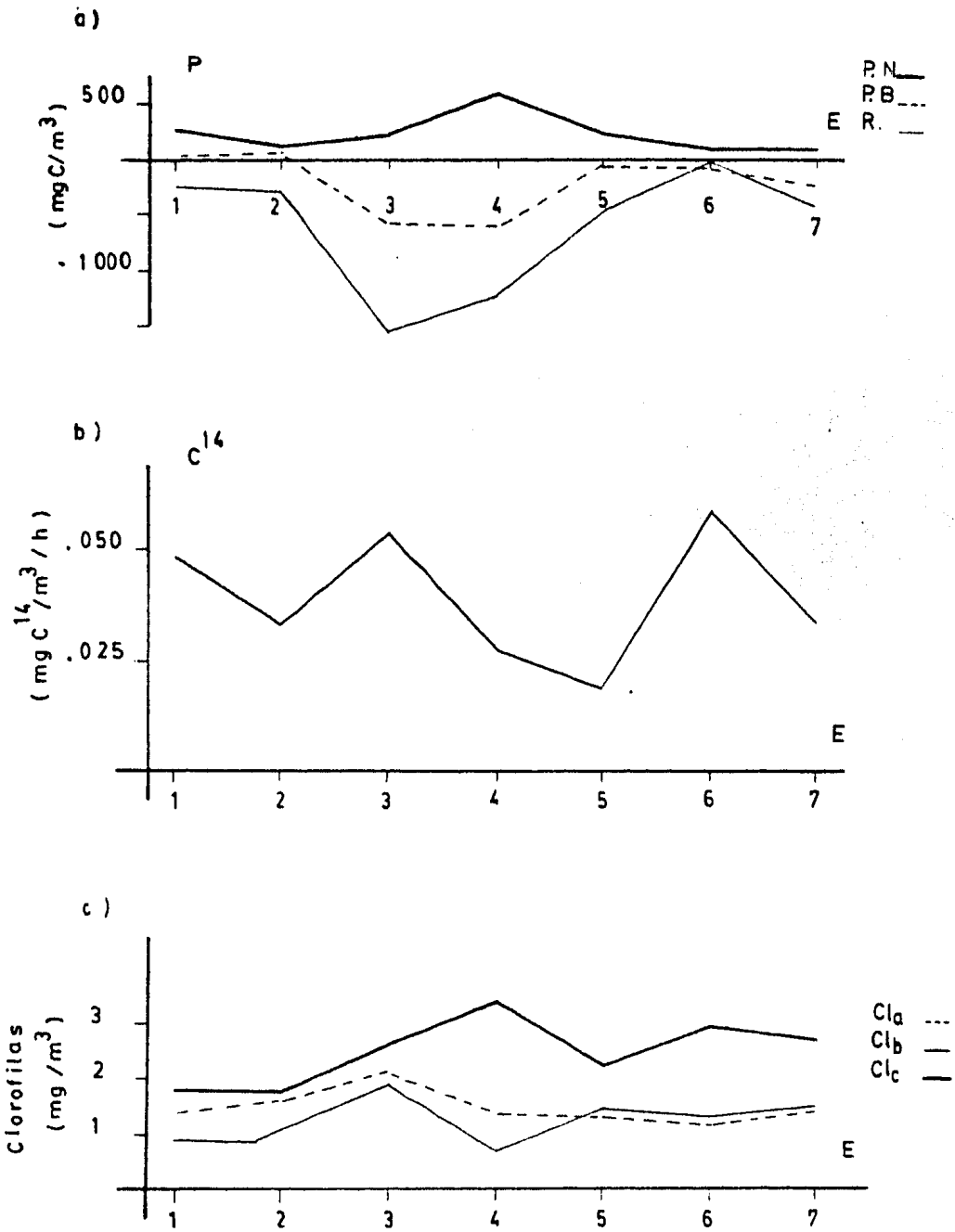


Fig. 8. Comportamiento promedio anual en las dif. localidades de la productividad neta, bruta y respiración (8a); asimilación de C<sup>14</sup> (8b); y pigmentos clorofílicos (8c).

La variación de los promedios anuales en la asimilación de carbono radiactivo presenta una distribución espacial con sus máximos ubicados en el N, NE y SE del lago que coinciden aparentemente con el contenido de clorofila c, mas nó con las tasas de productividad neta, productividad bruta y respiración (Tabla 4, Fig. 8b).

En cuanto a la clorofila a, mostró valores muy similares en todas las localidades, por lo que se considera una distribución homogénea en el perfil horizontal.

La clorofila b presentó ligeras variaciones en su distribución, siendo la mayor abundancia al N y SE del lago (Tabla 4, Fig. 8c).

La clorofila c señaló también variaciones en su distribución, sólo que la mayor abundancia se observó en la región SO y S del lago.

#### VARIACION TEMPORAL EN LAS DIFERENTES LOCALIDADES

La heterogeneidad anual de las tasas de productividad neta, productividad bruta, respiración, asimilación de carbono

no radiactivo y concentración de pigmentos clorofílicos en las diferentes localidades, está mas claramente representada por la distribución horizontal mensual (Figs. 9 - 11). En la mayor parte de las localidades y durante todos los meses se presentaron valores negativos heterogeneos en la productividad bruta y respiración (Figs. 10 y 11).

Tanto para la productividad neta como para la concentración de pigmentos, mostraron sus máximos generales en el mes de agosto y principalmente en las estaciones 1, 3, 4, 6 y 7; debe hacerse incapié en que éstas últimas localidades se encuentran cercanas a las líneas de playa, y probablemente devido a ésto, las escurrentías enriquecieron la zona periférica del lago, propiciando el desarrollo del fitoplancton. Las localidades de la parte central del lago, fueron las que mostraron menores tasas de productividad neta y concentración de pigmentos, situación semejante a la encontrada por Talling y Wetzel (1975).

Las semejanzas en los máximos valores durante el mes de agosto en los dos métodos, con los máximos registrados en la productividad para cuerpos de agua de alta montaña por otros autores, es explicada por las lluvias de verano. Por el contrario la asimilación de carbono radiactivo mostró sus máximos generales en los meses de julio y octubre, presentan

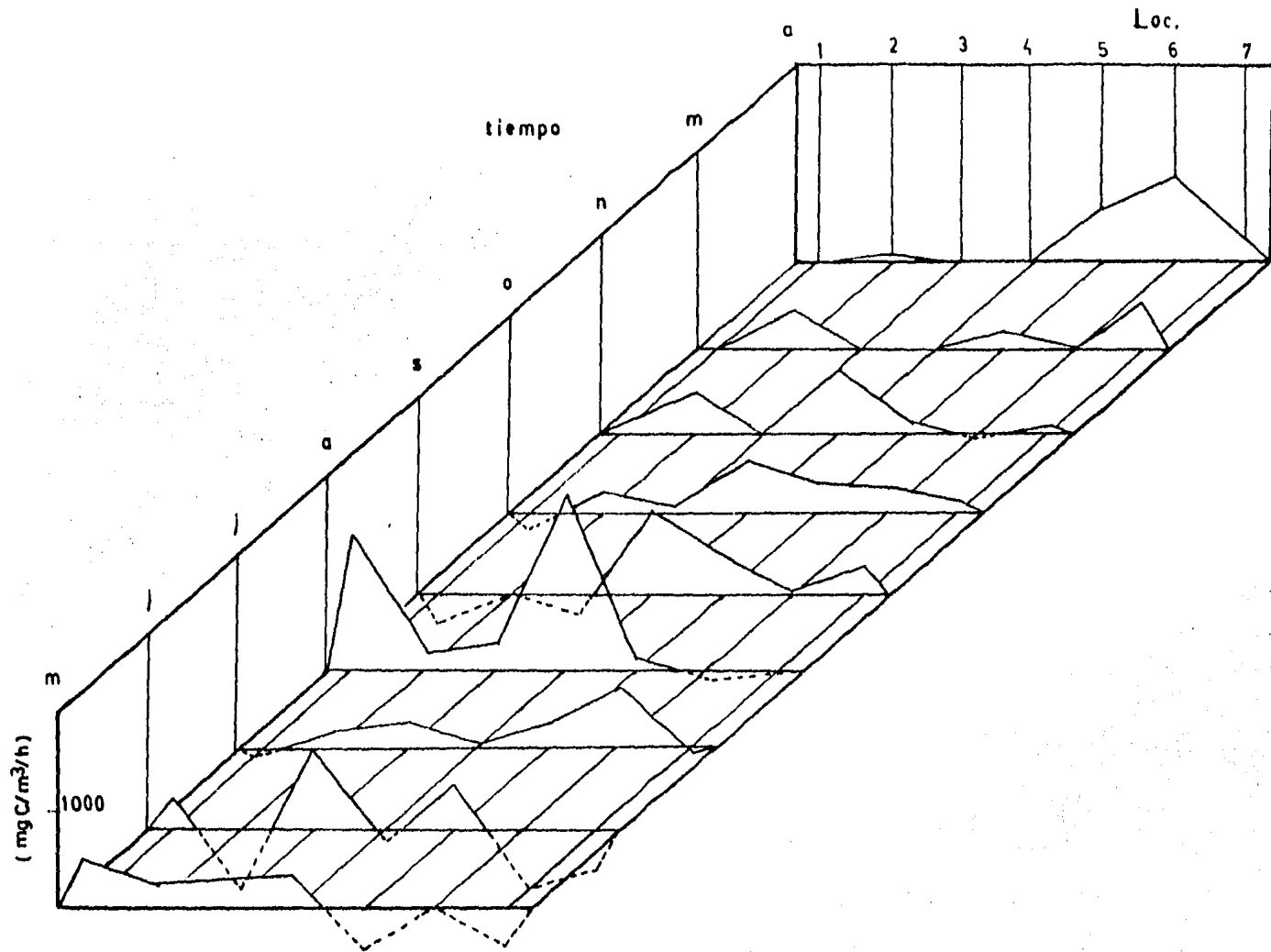


Fig. 9. Análisis mensual de la productividad neta en cada localidad estudiada.

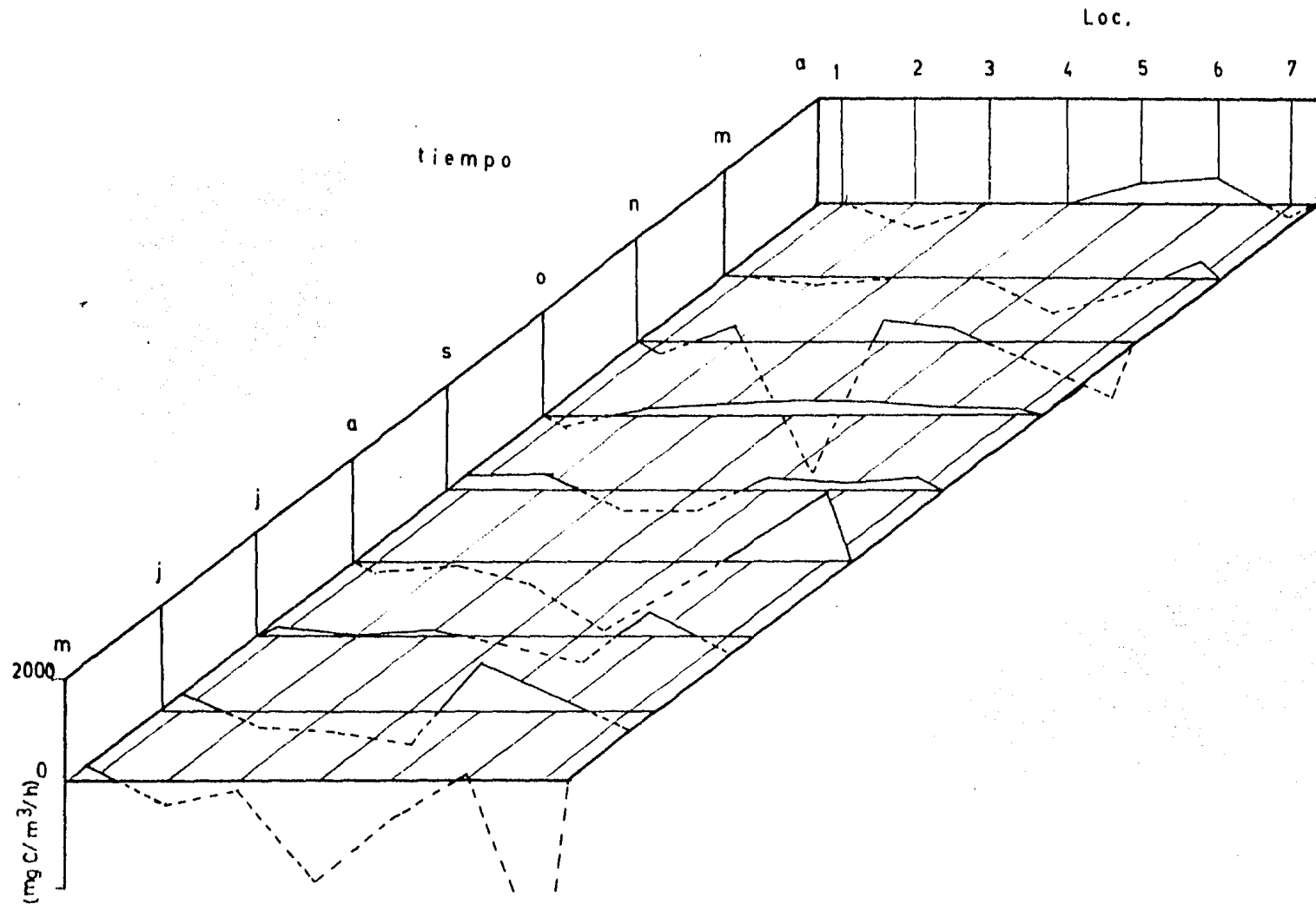


Fig. 10. Análisis mensual de la productividad bruta en cada localidad estudiada.

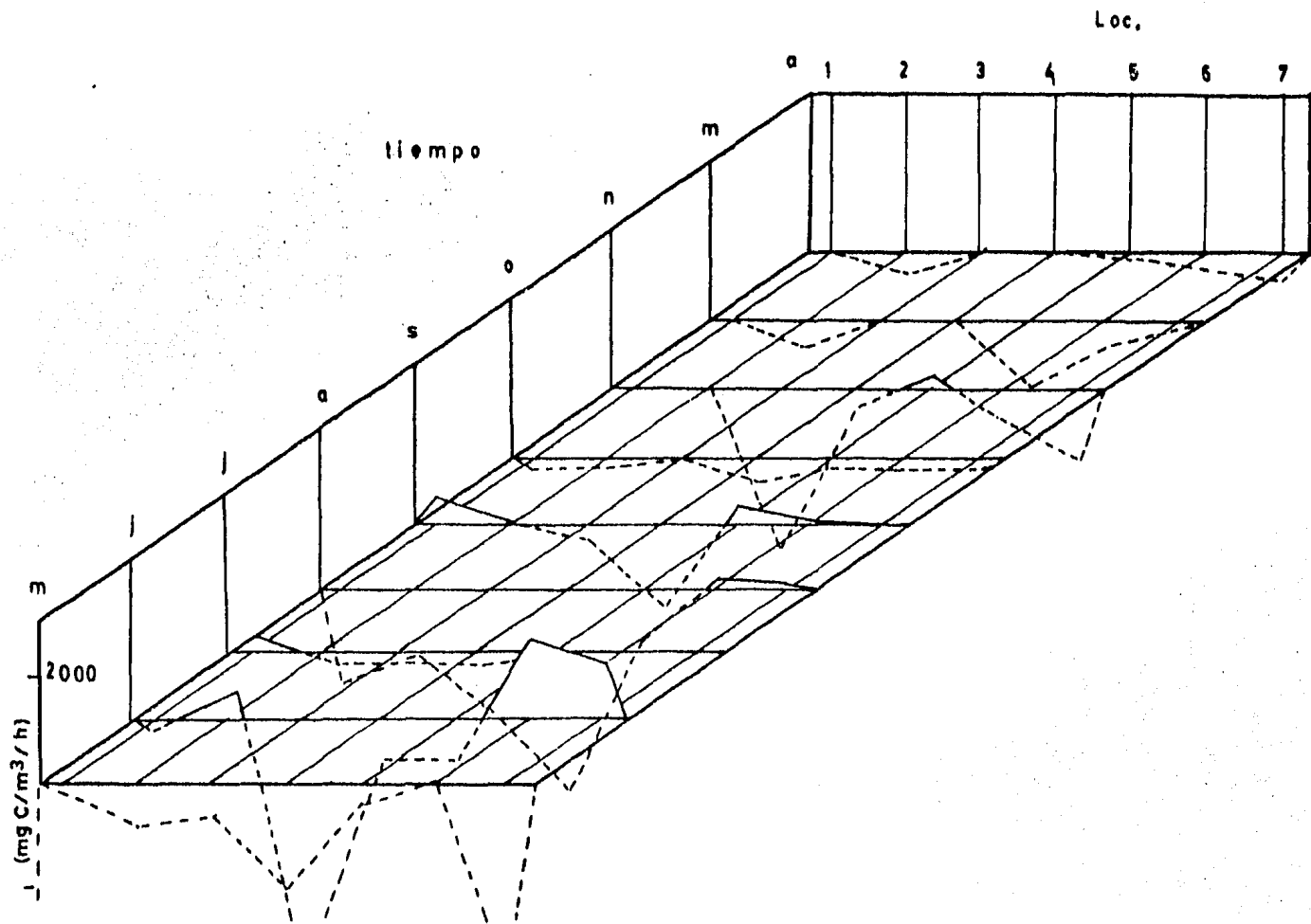


Fig. 11. Análisis mensual de la respiración en cada localidad estudiada.

do los valores mas significativos en las estaciones 6 y 7, que se encuentran también cercanas a la linea de playa y coinciden generalmente con los máximos obtenidos para la mayoría de los meses en la concentración de pigmentos y  $C^{14}$ ; el resto de las localidades para los otros meses mostró escasa correspondencia excepto en el mes de abril, donde también la productividad neta concide con el comportamiento de la asimilación de  $C^{14}$  y concentración de pigmentos (Figs. 9, 12 y 13).

También puede observarse que las tasas de asimilación de  $C^{14}$  no fueron proporcionales a la cantidad de clorofilas, como en los meses de julio, octubre y marzo; comportamiento que puede relacionarse con las condiciones de radiación a las que estuvieron sujetos los organismos fitoplanctónicos en las diferentes localidades en el momento del estudio, ya que la ubicación y batimetría del lago, pudieron modificar los patrones de migración del fitoplancton y la incidencia de los rayos solares; aún así se observó mayor relación en el comportamiento de la asimilación de  $C^{14}$  y la concentración de pigmentos en el perfil horizontal en los diferentes meses del año (Figs. 12 y 13).

La concentración de clorofila c, siempre fue mayor que la clorofila a y b en casi todas las localidades y meses de

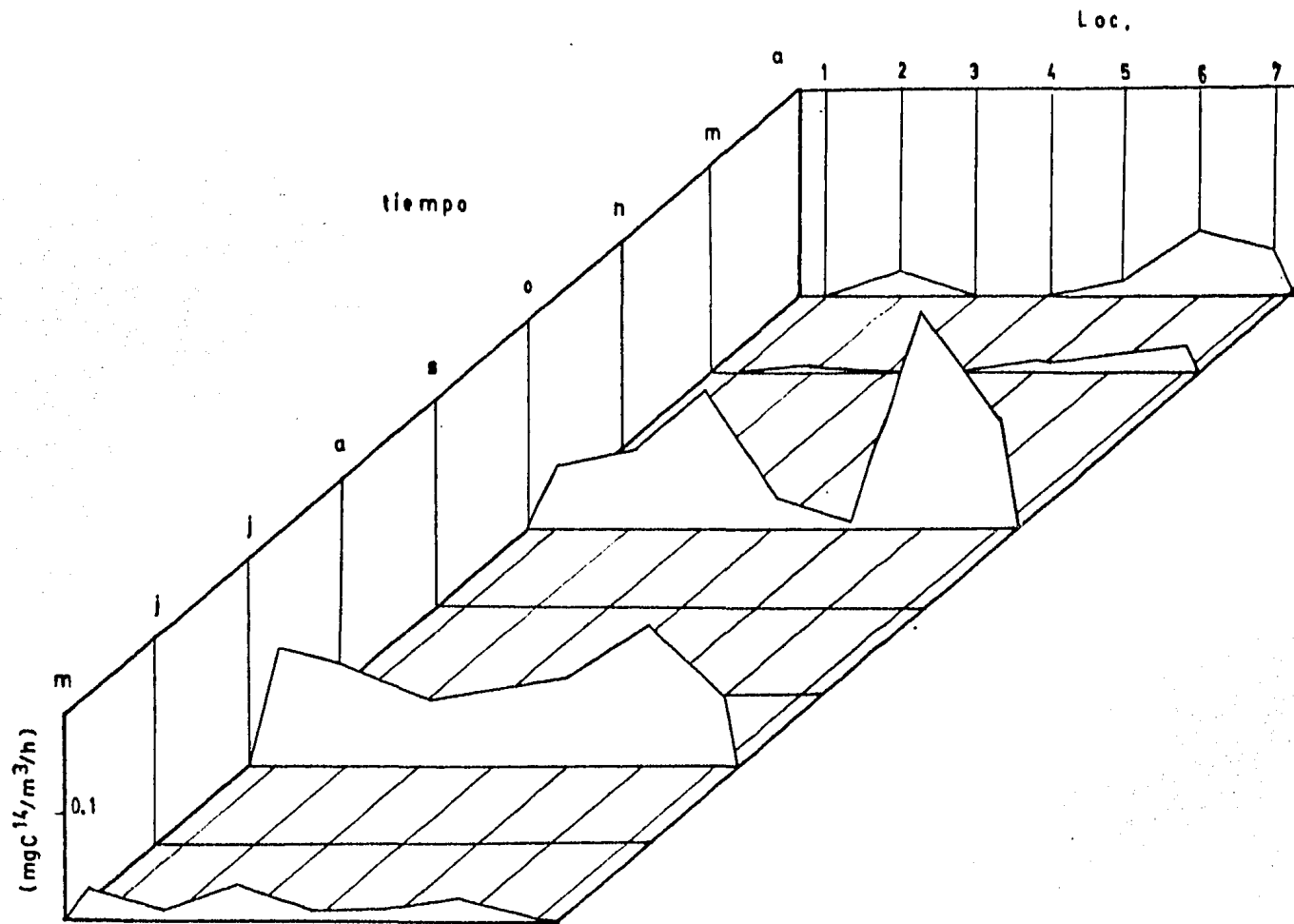


Fig. 12. Análisis mensual de la asimilación de  $C^{14}$  en cada localidad.



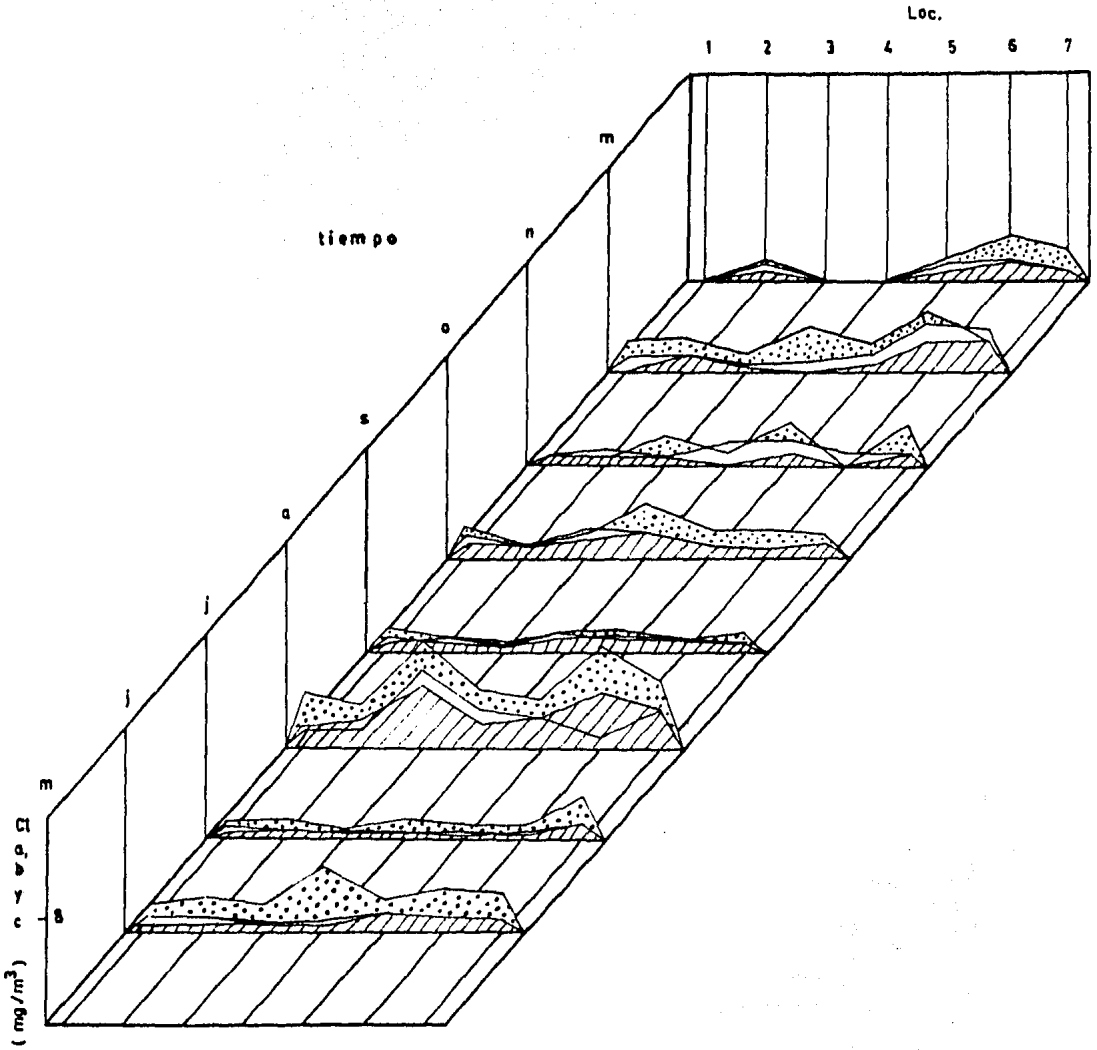


Fig. 13. Análisis mensual de la Clorofila a , b y c en cada localidad.

estudio. Estos dos últimos pigmentos siguieron generalmente el mismo patrón de distribución de la clorofila c, pero regularmente en menor cantidad. -En agosto se observó la mayor concentración de pigmentos en todas las localidades (Fig. 13). La mayor concentración de pigmentos en ciertas áreas del lago coinciden en muchos de los meses con la dirección en que sopló el viento, como en el mes de junio, donde el acumlamiento se dió en la región N y el viento se dirigió al NE; en agosto la mayor cantidad de clorofilas se tuvo en el NE y SE y la dirección del viento fue NE; en abril y mayo el viento sopló hacia el SO y los pigmentos se acumularon en la región S.

El comportamiento de la asimilación de  $C^{14}$  y concentración de pigmentos puede asociarse a varios factores como batimetría, dirección del viento e insolación en la región, entre otros. Aspectos que pueden ser justificados según como lo mencionan varios autores, al respecto Berman y Pollinger (1974), atribuyen la distribución irregular del fitoplancton durante el periodo de crecimiento en el perfil vertical y horizontal, a las corrientes inducidas por el viento y a los patrones de migración diurna de los organismos con capacidad de desplazamiento; factores que parecen haber influido también en la distribución heterogénea de las tasas de asimilación de carbono radiactivo y concentración de pigmentos en

el Lago El Sol.

Kleppel, Ingram y Samuels (1980), mencionan también que en los lagos pequeños existen microambientes horizontales y - verticales donde la productividad en cada uno de éstos es determinada por diferentes factores. Platt, Dickie y Trites (1970), opinan que la frecuente distribución del fitoplanc-ton en manchones dispersos es un reflejo de la complejidad del medio ambiente físico.

#### VARIACION TEMPORAL EN EL PERFIL VERTICAL

Con el objeto de hacer un estudio global del comportamiento temporal de la productividad con respecto a la profundidad (promedio de todos los niveles de las diferentes localidades), se realizó un análisis de perfiles verticales y su variación mensual. Así se confirma, como ya se había analizado las mayores productividades y variaciones en los parámetros bióticos en los meses de mayo, junio, agosto y abril, en el nivel superficial de los 0.5 a los 5.0 m y en el fondo; octubre a diferencia de los otros meses, mostró un marcado incremento en la tasa de productividad neta en la parte media.

Los meses que presentaron las menores variaciones en las ta-

tasas de productividad neta en el perfil vertical fueron: julio, septiembre, octubre, noviembre y marzo (Fig. 14). Igualmente la distribución de la productividad bruta, mostró las mayores variaciones en la parte superficial, en el fondo y ocasionalmente en la parte media como aquello registrado en julio y marzo (Fig. 15). Algunos meses que presentaron las menores variaciones en la productividad neta y productividad bruta en el perfil vertical, también presentaron las menores variaciones en la respiración como fueron: septiembre, octubre y noviembre (Fig. 16).

Los perfiles de las curvas de productividad neta y productividad bruta en los diferentes meses, presentaron ligeras similitudes en el comportamiento; y las curvas mensuales de productividad bruta y respiración no coinciden en su comportamiento con las curvas de carbono radiactivo y concentración de pigmentos.

La variación mensual en la distribución de las tasas de asimilación de carbono radiactivo en la profundidad, mostró las mayores irregularidades, así como los valores más altos en las tasas de asimilación en los meses de julio y octubre, que no coinciden con las tasas de productividad neta, productividad bruta y concentración de pigmentos; en marzo, abril y mayo se encontraron los valores más bajos y homogéneos en las tasas de asimilación. Es importante señalar que a pesar de estas variaciones existe una tendencia al in-

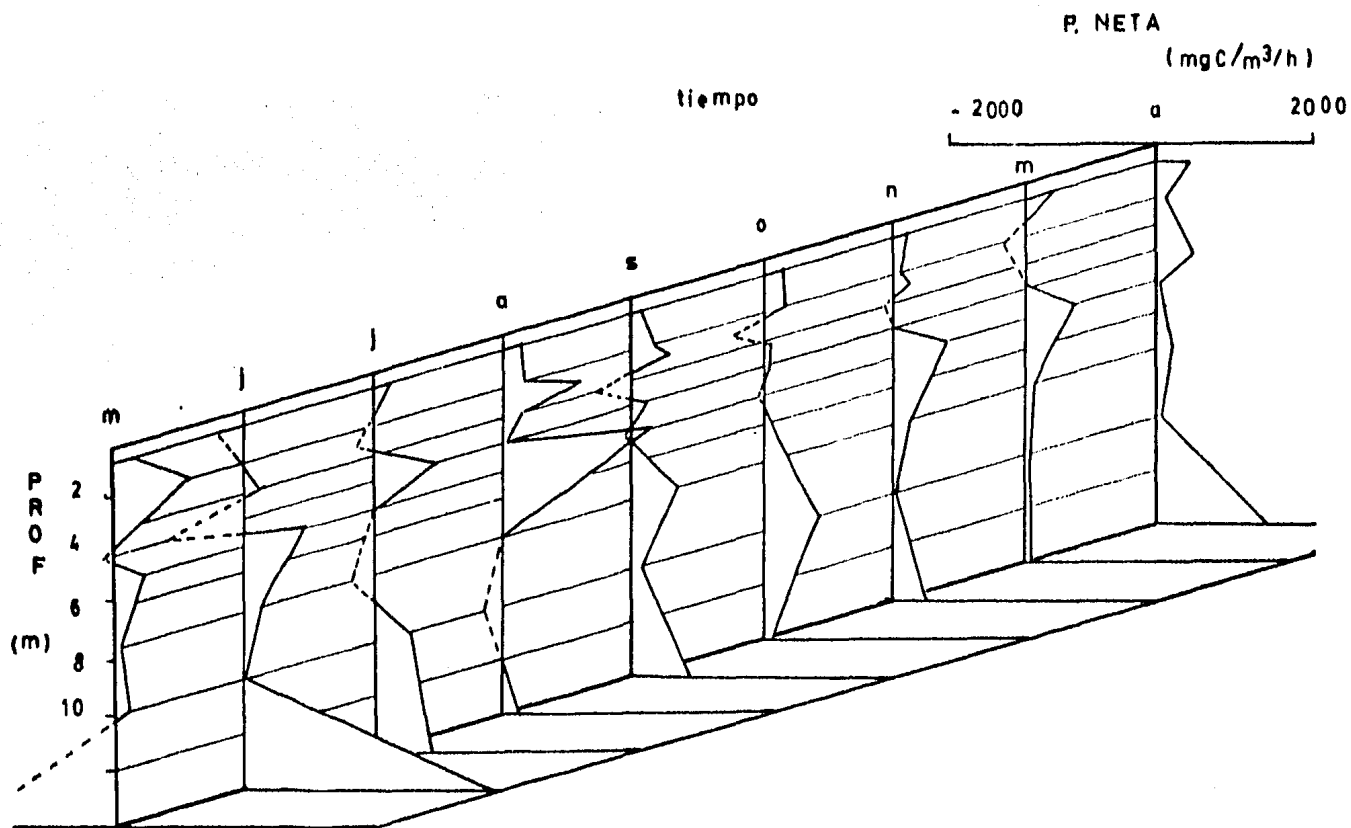


Fig. 14. Análisis mensual de la productividad neta con respecto a la profundidad.

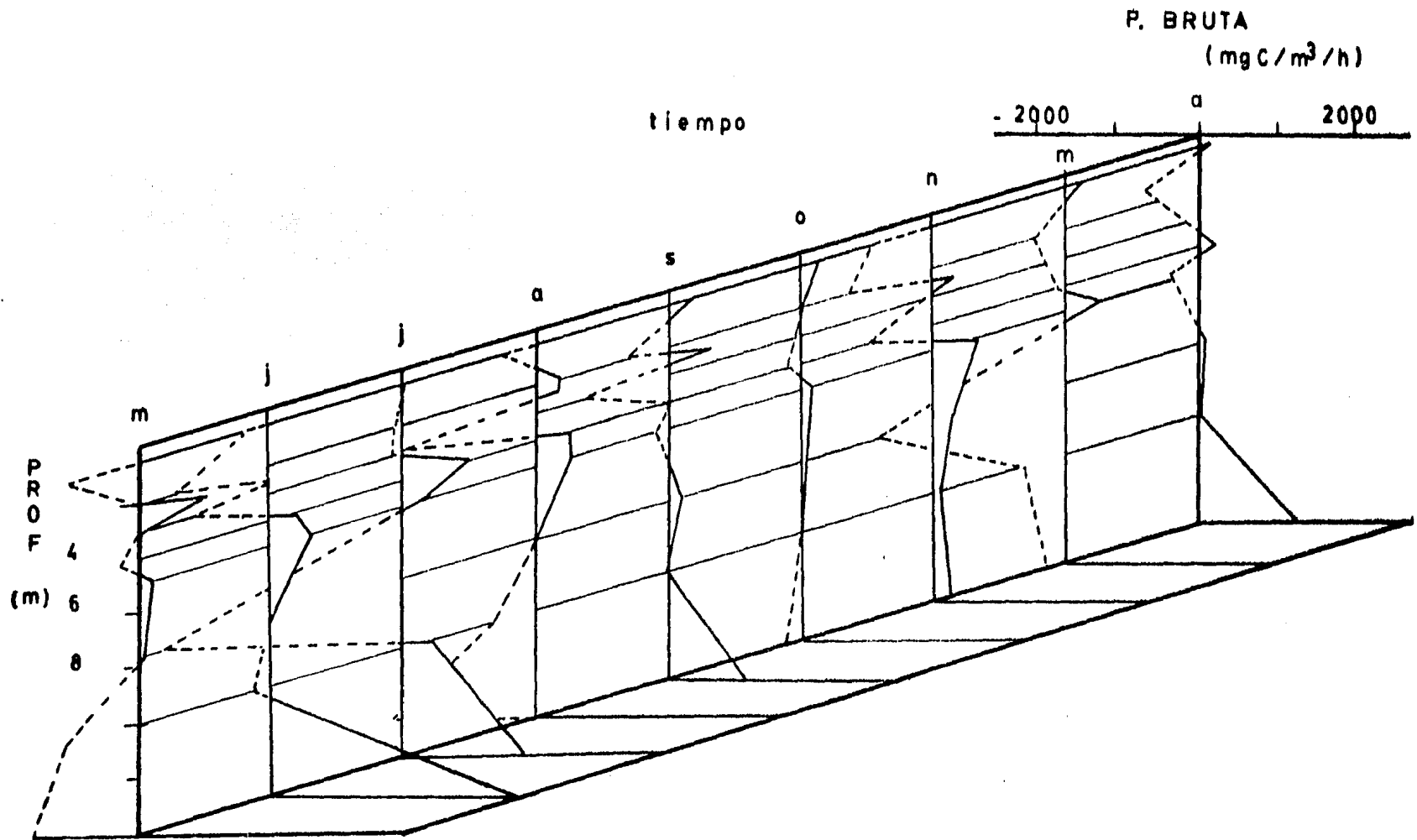


Fig. 15 Análisis mensual de la productividad bruta con respecto a la profundidad.

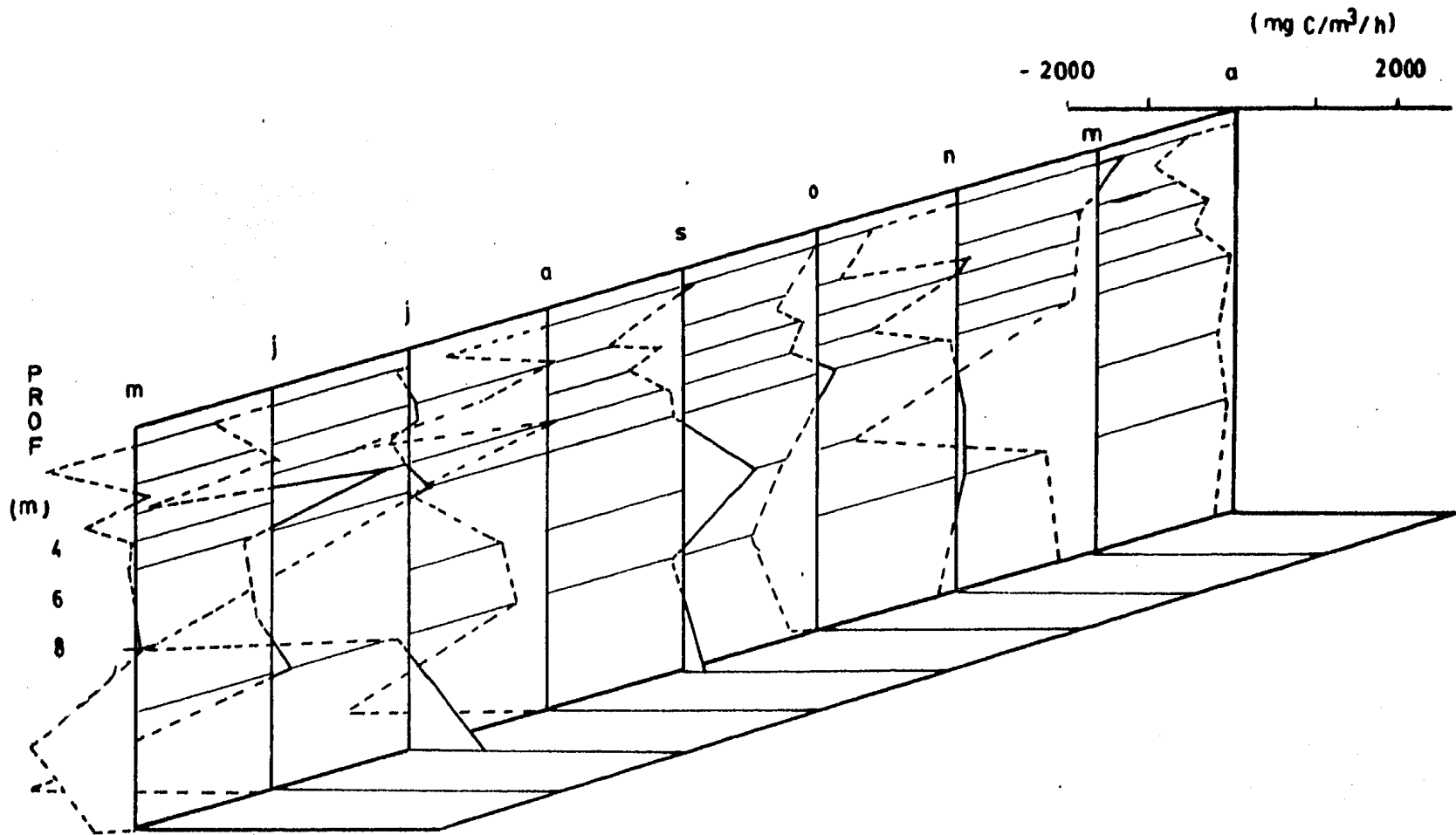


Fig. 16 Análisis mensual de la respiración con respecto a la profundidad.

cremento de las tasas en la región superficial, entre los 2.0 y 5.0 m (Fig. 17).

La disminución general en el perfil vertical de las tasas de productividad, respiración, asimilación de carbono radiactivo y concentración de pigmentos durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y marzo; coincidente con los ascensos y descensos de la temperatura del agua del lago, pueden asociarse al cambio en la actividad metabólica de los individuos fitoplanctónicos y con ésto, todos sus proceso vitales y en muchos de los casos la muerte; aspectos que son también tratados por Thomasson (1956); Goldman y Carpenter (1974); Talling (1974); Kleppel, Ingram y Samuels (1980).

La distribución heterogénea de las tasas negativas de productividad bruta y respiración en el perfil vertical confirman la existencia de fenómenos quimiosintéticos y respiratorios en toda la columna de agua durante todo el año, y que anteriormente se han explicado.

En virtud de que quedan implícitos fenómenos de quimiosíntesis y respiración en la evaluación de la productividad neta (evolución de oxígeno), es posible considerar aspectos metabólicos dentro de éste tipo de determinación y en éste sentido dicha productividad neta ofrece un estado real del comportamiento heterogéneo en todo el cuerpo de agua durante



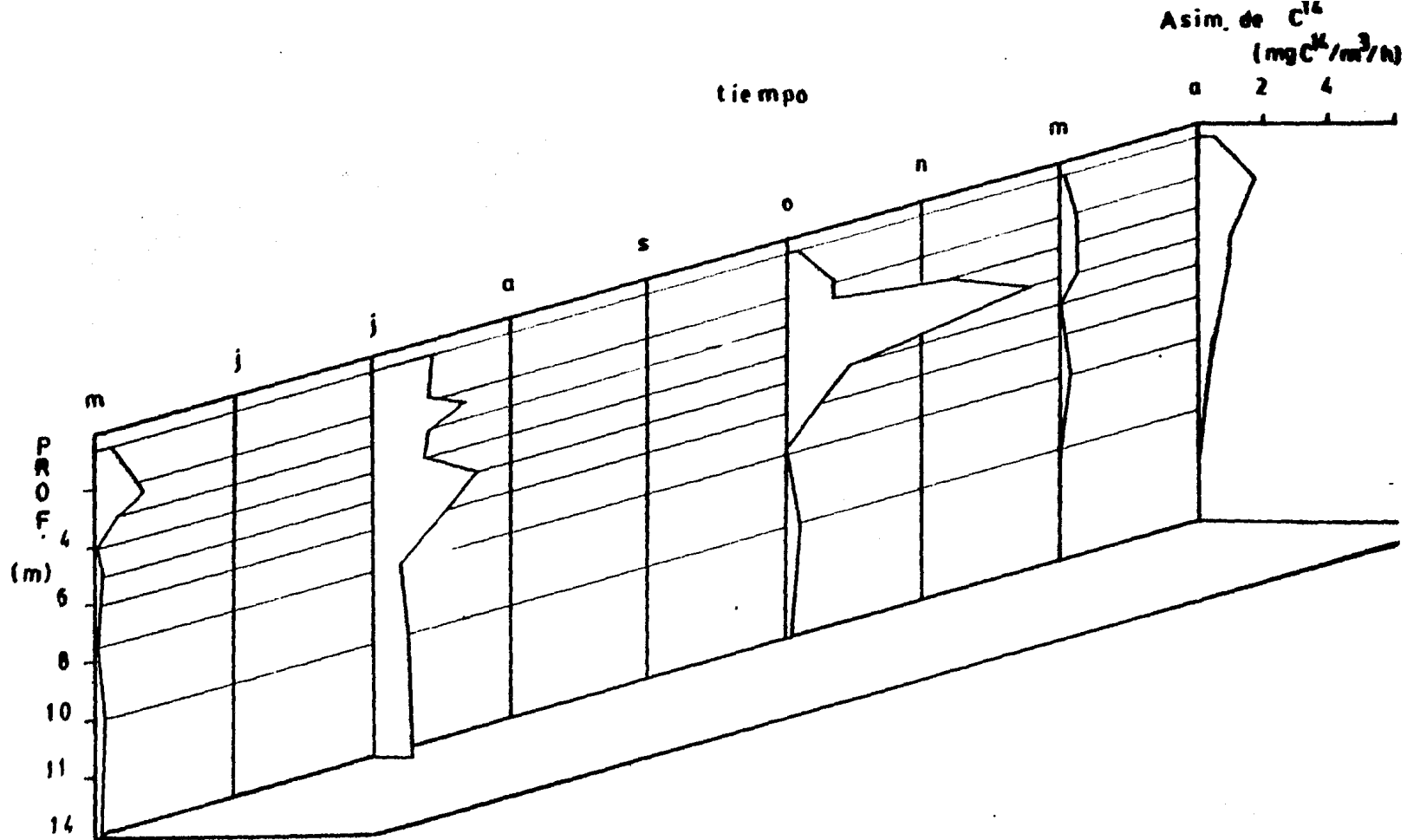


Fig. 17 Análisis mensual de la asimilación de  $C^{14}$  con respecto a la profundidad.

todo el año, como lo muestra la figura 15; sin embargo, la productividad evaluada a través de la asimilación de  $C^{14}$ , señala como un profundidad activa de productividad primaria el nivel entre los 0.5 y 5.0 m, situación semejante a lo que acontece en el contenido de pigmentos, a pesar de que existen algunos registros de mayor contenido de clorofila en el fondo.

La distribución mas o menos homogénea de la clorofila a y b en todo el año, indican la mezcla vertical completa de la masa de agua y así mismo de aquellos organismos fitoplanctónicos que no pueden migrar. Al respecto, Brook y Torke (1977), encontraron en el Lago Michigan (U.S.A.) tal homogeneidad, y la explican como producto de la mezcla vertical total del cuerpo de agua.

Por otra parte la distribución de la clorofila c, mostró ser generalmente la mas abundante, pero principalmente en los niveles superficiales (0.5 y 5.0) y en el fondo en casi todos los meses (Fig. 18).

La mayor asimilación de  $C^{14}$  y mas alto contenido de clorofila c, posiblemente fueron debidos a la acumulación de organismos fitoflagelados con capacidad de locomoción como ya se discutió, que pudieron desplazarse a los niveles donde

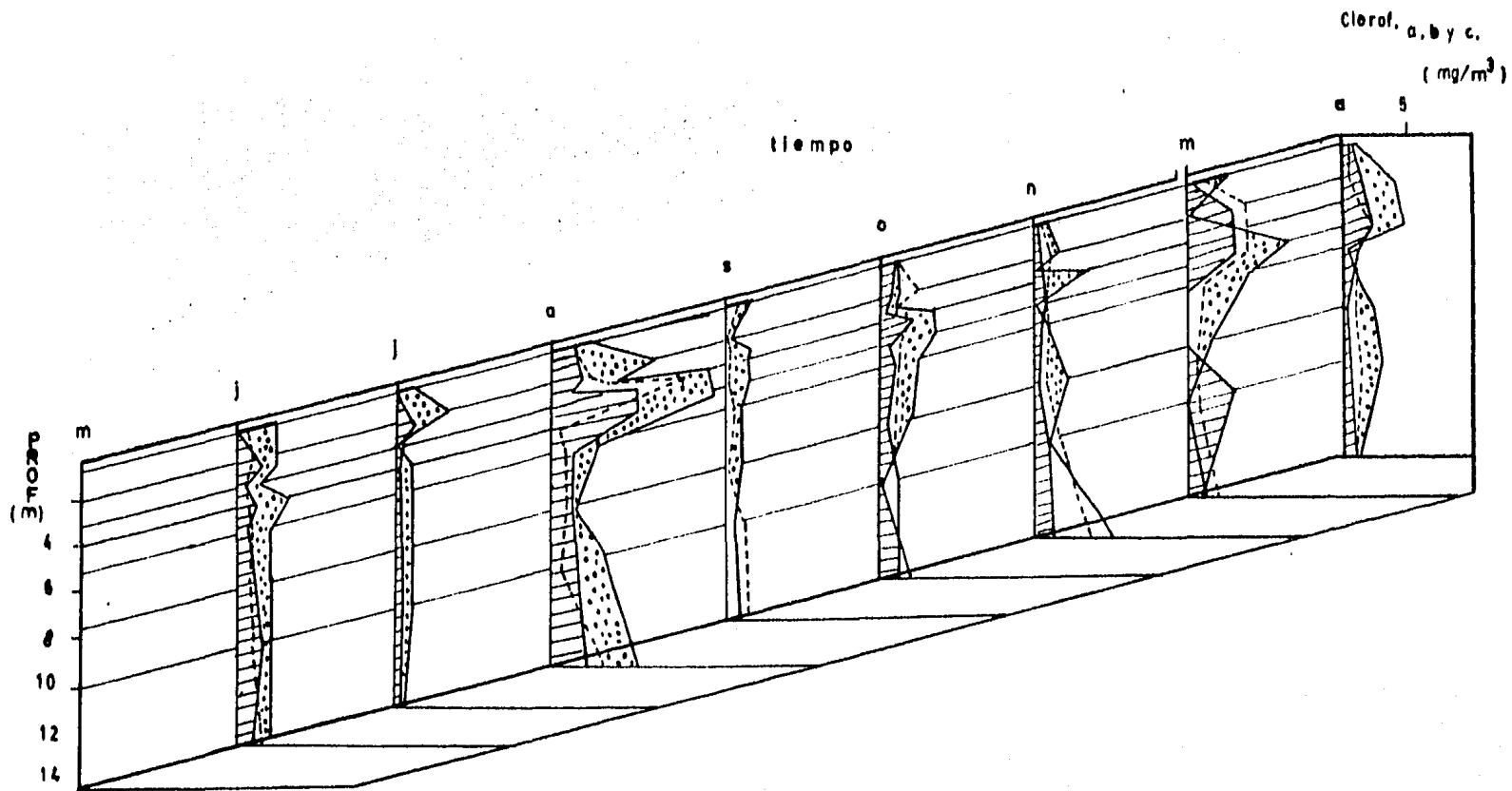


Fig. 18. Análisis mensual de la Clorofila a , b y c con respecto a la profundidad.

la cantidad de luz era aún mas adecuada para la eficiente fotosíntesis, comportamiento que también ha sido analizado por Tilzer (1973) y Raund (1981).

Aún cuando las tasas de asimilación de carbono radiactivo y contenido de pigmentos coinciden, se observaron magnitudes diferentes que pueden ser explicadas por las condiciones fisiológicas (edad y posiblemente tallas de los organismos fitoplanctónicos) en el momento de la estimación de la productividad; aspecto que Elster (1974) y Margalef (1980), recomiendan tomar en cuenta cuando se analizan los fenómenos productivos; y a las condiciones climáticas bajo las cuales ha permanecido el fitoplancton como la calidad de la radiación a la que estuvieron expuestos (Elster, 1974; Yentsch, 1974).

Para tratar de establecer un balance del estado metabólico promedio aproximado de el Lago El Sol, se eligió la época mas productiva del año, (julio). Tomando en consideración la productividad a través del  $C^{14}$  asimilado, multiplicado por la diferencia promedio anual de todas las estaciones y niveles (8, 180) de lo registrado en la evolución de oxígeno, se obtuvo una producción de  $597.72 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ , que comparada con la respiración de  $947.32 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  para ese mis mismo mes, se encuentra un déficit de  $349.70 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  que la

fotosíntesis no puede aportar, mostrando al sistema acuático en estudio como un cuerpo de agua oligotrófico con posibles actividades de macroproductores primarios, no considerados en la presente contribución.

Es necesario hacer notar, que las magnitudes entre las medidas de productividad por medio del método de oxígeno y por el de  $C^{14}$  variaron considerablemente, desde - 1564.73 mgC/m<sup>3</sup>/h hasta 607.98 mgC/m<sup>3</sup>/h por el primer método y de 0.082 a 0.008 mgC<sup>14</sup>/m<sup>3</sup>/h por el segundo. Los resultados obtenidos por el método de  $O_2$  son bastante mayores, tal diferencia concuerda con los registros obtenidos por Ryther, Arthur, Rigler, Banerr, Hirota y Margalef, citados por Calvario (1982), mas no en la misma magnitud.

En el Lago El Sol los valores de  $C^{14}$  fueron consistentemente menores, en un factor promedio de 8,180, debido posiblemente a una diversidad de factores entre los cuales ya se han citado la quimiosíntesis, fotólisis, fotooxidación y pérdidas a través de la respiración y productos de excreción de carbono radiactivo del fitoplancton entre otros, como es también señalado por Calvario (1982).

Después de analizar la productividad por medio de los métodos de evolución de oxígeno en botellas claras y oscuras

y asimilación de carbono radiactivo, puede observarse que el método de  $C^{14}$  fue el de mayor sensibilidad, en el que pudieron observarse los procesos productivos más claramente y según Vollenweider (1974), éste es el único método que puede ser utilizado satisfactoriamente en las aguas oligotróficas.

### CARACTERIZACION LIMNOLOGICA

Con el objeto de caracterizar al lago se realizó un análisis de diferentes índices como son: El cociente fotosíntesis ( $C^{14}$ )/clorofila a, ( $mgC^{14} m^{-3} h^{-1} / mg m^{-3}$ ), calculado en todo el perfil vertical y horizontal en el Lago El Sol, varió desde 0 hasta 0.294 y el 96% de los valores estuvieron dentro de una variación de 0.02 a 0.2, que es considerado por Martínez (1979), como propio de los lagos oligotróficos (Tablas 5 y 6); por tal motivo el cuerpo de agua en estudio puede considerarse como tal; también se registró un valor máximo de asimilación de  $C^{14}$  en el perfil vertical (con  $0.094 mgC^{14}/m^3/h$ ), aspecto que según la tabla citada por Ernest (1979), es propia de los cuerpos de agua oligotróficos; además los resultados en la concentración de clorofila a, obtenidos durante el periodo de estudio en todos los niveles y localidades del lago se encontraron casi siempre entre

0.3 y 3.0 mg/m<sup>3</sup>, aspecto que es considerado por Wetzel (1975), como característico de los lagos oligotróficos.

Tabla 5. Promedios Mensuales del Coeficiente Fotosíntesis ( $C^{14}$ )/  
clorofila a, en la diferentes localidades.

M e s	Coeficiente Fotosíntesis ( $C^{14}$ )/clorofila a ( $mg C^{14} m^{-3} h^{-1} / mg m^{-3}$ )						
	L o c a l i d a d e s						
	1	2	3	4	5	6	7
julio	0.238	0.103	0.134	0.146	0.173	0.184	0.039
oct.	0.034	0.074	0.056	0,0 14	0.003	0.164	0.055
marzo		0.003			0.005	0.003	0.003
abril		0.019			0.011	0.029	0.050



Tabla 6. Promedios Mensuales del Coeficiente Fotosíntesis ( $C^{14}$ )/

clorofila a, con respecto a la profundidad.

Profund. (m)	Coeficiente Fotosíntesis ( $C^{14}$ )/clorofila a ( $mg C^{14}/m^3/h$ )/( $mg m^3$ )			
	julio	octubre	marzo	abril
0.5	0.143	0.046	0.005	0.022
2.0	0.015	0.023	0.004	0.127
2.5	0.294	0.051		
3.0	0.076	0.075		
4.0	0.068	0.220	0.024	0.017
5.0	0.193	0.054	0.001	0.029
7.5	0.078	0	0.019	0.021
10.0	0.060	0.014	0.002	0.008
14.0	0.135	0.004	0	0.004

## CONCLUSIONES

- El Lago El Sol se encuentra ubicado por arriba del límite boscoso en un clima frío, con temperatura media anual entre  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ; con una temperatura en el mes más frío entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $6.5^{\circ}\text{C}$ ; correspondiente a un lugar alto; con un régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal comprendido entre el 5% y 10.2% de la precipitación anual; con una oscilación térmica menor o igual a  $5^{\circ}\text{C}$ , aspectos por los cuales puede considerarse como un lago alpino.
- Dentro del comportamiento global de la productividad primaria neta (evolución de oxígeno), se señala un máximo al año en el mes de agosto (en la época de lluvias, de  $444.39\text{ mgC}/\text{m}^3/\text{h}$  y  $2.432\text{ mg}/\text{m}^3$  de clorofila a), característica propia de los lagos de alta montaña. Y el máximo valor calculado por la asimilación de  $\text{C}^{14}$  correspondió al mes de julio ( con  $0.073\text{ mgC}^{14}/\text{m}^3/\text{h}$ ).
- La evaluación de la productividad, según la técnica de botellas claras y oscuras, presentó mayores concentraciones de oxígeno en las oscuras, fenómeno que no ha sido explicado aún en su totalidad, y sólo en parte debido a la fotooxidación y fotólisis del agua por la actividad bacteriana.

- La precipitación y la velocidad del viento se asociaron al único incremento de la productividad del lago en la época de lluvias.
  
- La alternancia de la concentración de la clorofila a y b durante el año, refleja una sucesión de especies provocada por los cambios de temperatura.
  
- La mayor abundancia de la clorofila c en todo el perfil vertical y horizontal, fue debido a la predominancia de grupos fitoplanctónicos con capacidad de locomoción, que son capaces de optimizar su distribución en el perfil a diferentes tiempos con respecto a los factores medioambientales.
  
- En el primer medio metro de agua superficial se observó una inhibición en la fotosíntesis, provocada por la mayor intensidad de la radiación en los periodos de mayor insolación.
  
- Entre los 2.5 y 5.0 m de profundidad, se registraron las máximas tasas de productividad neta, asimilación de  $C^{14}$  y concentración de pigmentos; que correspondió con un porcentaje de radiación de 60% y 35% del total de rayos

solares incidentes en la superficie del agua.

- Las curvas típicas de productividad primaria en el perfil vertical, fueron debidas a los organismos flagelados capaces de migrar, que optimizan la asimilación de  $C^{14}$  y productividad neta al buscar los niveles de iluminación óptima en la columna de agua.
- Los productores primarios del fondo registraron productividades netas altas (evolución de oxígeno), hasta de 20.75 veces, con respecto a la superficie (a los 2.5 m con  $151.52 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$  y en el fondo  $3143.9 \text{ mgC/m}^3/\text{h}$ ), debidos a la abundancia de ficoflora del bentos.
- Tanto la transparencia del agua como los fenómenos de atenuación, absorción y dispersión, siguieron un patrón teórico en su comportamiento, parecido al de aguas anormalmente claras, aspecto que permitió la existencia de una zona fótica completa en el lago y el establecimiento de organismos fotosintéticos en el fondo.
- Los factores batimétricos y climáticos (la velocidad y dirección del viento e insolación), influyeron en la distribución horizontal de la productividad del lago, ya que se encontraron generalmente en la periferia del lago las mayores tasas de productividad y las mas bajas en

la parte central.

- Dada la profundidad del Lago El Sol, los vientos fuertes y cambios de temperatura, se observó una mezcla continua de la masa en todo el perfil, fenómeno que influyó la distribución homogénea de la clorofila a y b (que generalmente poseen aquellos organismos que no son capaces de migrar), durante la mayor parte del año.
- El decremento y menor variación de las tasas de productividad neta, productividad bruta, respiración, asimilación de  $C^{14}$  y concentración de pigmentos en el perfil vertical y horizontal en la época fría en el Lago El Sol, fue asociado al descenso de la temperatura.
- La no coincidencia en la variación de las tasas de asimilación de  $C^{14}$  y concentración de pigmentos en el perfil vertical fueron debidas, entre otras cosas, a las condiciones de iluminación bajo las cuales estuvieron sujetos los organismos y al estado fisiológico del fitoplancton (edad, tamaño, etc.), en el momento del estudio.
- Tomando en consideración el valor de  $C^{14}$  obtenido en el mes de julio, que corresponde a uno de los máximos en

la productividad de evolución de oxígeno (597.72 mgC/m<sup>3</sup>/h) multiplicado por el factor de corrección), no satisface los requerimientos de la respiración en la columna de agua (con 947.72 mgC/m<sup>3</sup>/h) por lo que existe un déficit (de 349.70 mgC/m<sup>3</sup>/h).

- Se observó escasa o nula semejanza entre la productividad medida por el método de C<sup>14</sup> y evolución de oxígeno, debido a la amplia variación de éste último, con una diferencia de 8,180 veces que lo obtenido por el C<sup>14</sup>; por lo mismo puede considerarse al método de C<sup>14</sup> como el más preciso en la determinación de los procesos en el lago.
  
- La baja productividad durante todo el año, con un valor máximo de asimilación de C<sup>14</sup> en el perfil vertical de 0.094 mgC<sup>14</sup>/m<sup>3</sup>/h en promedio, un cociente de fotosíntesis (C<sup>14</sup>)/Clorofila a, dentro de una variación de 0.02 a 2.0 en más del 50% de todos los registrados, y además valores de clorofila a, entre 0.3 y 3.0 mg/m<sup>3</sup> en todos los niveles y localidades, coloca a el Lago El Sol dentro de los cuerpos de agua oligotróficos.
  
- El Lago El Sol puede ser considerado como un cuerpo de agua alpino, oligotrófico, por los siguientes aspectos:  
1) presenta un sólo periodo de florecimiento fitoplanctó-

nico durante el año en la época de lluvias; 2) mostró valores bajos de productividad en el perfil vertical y horizontal durante todo el año; 3) el tipo de curvas de productividad en el perfil vertical son característiticas de los cuerpos de agua de alta montaña; 4) la transparencia del lago fue alta durante el periodo de estudio; 5) y la ubicación del algo se encuentra por arriba del límite boscoso; además de presentar una mezcla continua de sus aguas en todo el perfil vertical, y por consiguiente ser un cuerpo de agua holomóctico de circulación continua.

## LITERATURA CITADA.

- Alcocer, D. J. 1980. Aportaciones limnológicas al estudio del Lago del Sol y Lago de la Luna, Nevado Toluca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Univ. Autónoma Metropolitana-Ixtapalapa. (inédita). 15 p.
- Abbeyes de H. M., Chadeffaud., J. Feeldmann., Y. Ferré., H., Gausсен., P. P. Grassé., y A. R. Prevot., 1978. Précis de botanique. Végétaux inférieurs. 2a. Edic. Masson. Paris. Tomo I : 722 p.
- Barko, J. W., P. G. Muyphe., R. C. Wetzel., 1977. An investigation of primary production and ecosystem metabolism in a Lake Michigan dune pond. Arch. Hydrobiol. 81 (2) : 155 - 187.
- Berman, T., y V. Pollinger., 1974. Annual and seasonal variations of phytoplankton, chlorophyll, and photosynthesis in Lake Kineret. Limnol. and Oceanogr. 19 (1) : 31 - 54.
- Beyers, R. J., 1974. The pattern of photosynthesis and respiration in laboratory microecosystems. In: Goldman C. R. (Editor). Primary productivity in



aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A.  
3a. Edic : 61 - 76.

Brooks, A. S. y B. G. Torke., 1977. Vertical and seasonal  
distriburion of chlorophyll a in Lake Michigan.  
J. Fish. Res. B. Can. 34 : 2280 - 2287.

Brilinsky, M. y K. H. Mann., 1973. An analysis of factors  
governing productivity in lakes and reservoirs.  
Limnol. and Oceanogr. 18 (1) : 1 - 14.

Dingan, S. L., R. G. Barry., G. Weler., C. Benson., E. F.  
LeDrew., y C. W. Goodwin., 1980. Climate, snow  
cover, microclimate and hidrology. In: Brown J.,  
Miller, P. C., Tieszen, L. L. and Bunnell, F. L.  
(Editors). An arctic ecosistem. U.S./Int. Biol.  
Program. Synthesis series; Dowden, Hutchinson y  
Ross I.N.C., U.S.A. Cap. 2 : 30 - 65.

Elster , H. J., 1974. Absolute and relative assimilation  
rates in relation to phytoplankton populations.  
In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity  
in aquatic environments. Univ. of Calif. Press.  
U.S.A. 3a. Edic : 77 - 104.

Ernest, D. y D. Reinhardt., 1980. Primary productivity

measurements and carbon metabolism in Steinhuder Meer and Lake Dümmer. In: Dokulil, M., H. Metz., y K. Jewson. (Editors). Shallow lakes contributions to their limnology. Proceedings of a symposium, held at Illmitz (Austria), September 23 - 30, 1979. Dr. W. Junk by publishers. London. 212 p.

Fee, E. J., 1973. A numerical model for determining integral primary production and its application to Lake Michigan. J. Fish. B. Can. 30 : 1447 - 1468.

Ferrari, I., 1976. Winter Limnology of a mountain lake: Lago Santo Parmense (Northern Appennines, Italy). Hidrobiol. 51 (3) : 245 - 257.

Findenegg, L., 1974. Factors controlling primary productivity especially with regard to water replenishment, stratification and mixing. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 105 - 120.

Forti, G., 1970. Light energy utilization in photosynthesis. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 17 - 36.

- García, E., 1970. Los climas del estado de Veracruz (según el sistema de clasificación de Köppen modificado por la autora), An. Inst. Biol. Univ. Nal. Auton. México. 41 Ser. Botánica. (1) : 3 - 42.
- Goldman, J. C. y E. J. Carpenter., 1974. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. Limnol. and Oceanogr. 19 (5) : 756 - 766.
- Hutchinson, G. E., 1975. A treatise on limnology. U. I. Wiley, New York, 1015 p.
- Iverson, P., H. C. Curl., y J. C. Saugen., 1974. Simulation model for wind driven phytoplankton dynamics in Auke Bay, Alaska. Marine Biol. 28 (6) : 169 - 177.
- Jorgensen, E. G., y F. Stemann-Nielsen., 1974. Adaptation in plankton algae. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary Productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 37 - 46.
- Kusel-Feltzman, E., 1973. Beitrage zur Kenntnis der algenflora der hochgebirge zentralamerikas und der noroelichen anden (contribución al conocimiento de la flora algal de las altas montañas de Centro América y de

los Andes del Norte). Hochgebirgsforschung.

Kleppel, G. S., R. Ingram., y W. R. Samuels., 1980.  
Factors controlling phytoplankton primary  
productivity in Byram Lake, mt. Kisco, N.Y.,  
summer 1977. Hidrobiol.70 : 95 - 101.

Likens, G. E. y F. Herbert-Bormann., 1974. Linkages between  
terrestrial and aquatic ecosystems. Bioscience.  
24 ( 8 ) : 447 - 456.

Margalef, R., 1980. Ecologia. Ed. Omega. Barcelona.

Martinez, R., 1980. Seasonal variation of phytoplankton  
biomass and photosynthesis in the high mountain  
Lake la Caldera (Sierra Nevada, Spain). In:  
Dokulil, M., H. Metz., y K. Jewson. (Editors).  
Shallow lakes contributions to their limnology.  
Proceedings of a symposium, held at Illmitz  
(Austria), september 23 - 30. 1979. Dr. W. Junk  
by Publishers. London.

McCombie, A. M., 1959. Some relations between air temperatures  
and the surface water temperature of lake. Limol.  
and Oceanogr. 4 : 252 - 258.

- Morel, A. y R. Smith., 1974. Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis. Limnol. and Oceanogr. 19 (4) : 591 - 600.
- Platt, T., L. M. Dickie., R. W. Trites., 1970. Spatial heterogeneity of phyoplankton in a near-shore environment. J. Fish. Res. B. Can. 27 (8): 1453 - 1473.
- Raund, F. E., 1981. The ecology of algae. Cabridge Univ. Press. Great Britain. 653 p.
- Reid, G. K. y R. D. Wood., 1976. Ecology of inland waters and estuaries. 12a. Edic. D. Van Nostrand Company New York.
- Soeder, E. G., 1974. Some aspects of phytoplankton growth and activity. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 47 - 59.
- Sorokin, J. I., 1974. On the trophic role of chemosynthesis and bacterial biosynthesis in water bodies. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in

aquatic environments. Univ. of Calif. Press.  
U.S.A. 3a. Edic: 187 - 205.

Stemann Nielsen, R., 1968. Uptake of radioactive carbon.  
In: Strickland, J. K. H. y T. R. Parsons,  
(Editors). A practical handbook of seawater  
analysis. Fis. Res. Board. Can. Ottawa. 172 p.

Stepanek, M., 1974. Numerical aspects of nanoplankton  
production in reservoirs. In: Goldman, C. R.  
(Editor). Primary productivity in aquatic  
environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A.  
3a. Edic: 291 - 308.

Strickland, J. D. H., 1958. Solar radiation penetrating the  
ocean; a review of requirements, data y methods  
of measurement, with particular reference to  
photosynthetic productivity. J. Fish. Res. B.  
Can. 15 (3) : 453 - 493.

Strickland, J. D. H. y T. R. Parsons., 1968. A practical  
handbook of seawater analysis. Fish Res. B. Can.  
Ottawa. 172 p.

Talling, J. F., 1974. Comparative problems of phytoplankton  
production and photosynthetic productivity in a

a tropical and a temperate lake. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 399 - 424.

Tilzer, M. N., 1973. Diurnal periodicity in the phytoplankton assemblage of a high mountain lake. Limnol. and Oceanogr. 18 ( 1 ) : 15 - 30.

Thomasson, K., 1956. Reflections on arctic and alpine lakes. Oikos. 7 ( 1 ) : 117 - 143.

Villalpando, B. O. K. 1968. Algunos aspectos ecológicos del Volcán Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura Fac. de Ciencias. Univ. Nal. Auton. de México. 36 p.

Vollenweider, R. A., 1974. Calculation model of photosynthesis depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 425 - 475.

Vollenweider, R. A., F. Talling., y F. Westlake., 1974. A

manual on methods for measuring primary production in aquatic environments. International Biol. Programe. London. 225 p.

Weler, G. y B. Holmgren., 1975. The microclimate of the arctic tundra. Journal of Applied Meteorology. 13 : 845-862.

Wetzel, R. G., 1975. Limnology. Saunders College Publishing. Phyladelphia. 743 p.

Wetzel, R. G. y G. E. Likens., 1979. Limnological analysis. W. B. Saunders Company. Philadelphia. 353 p.

Yentsch, C. S., 1974. The relationship between chlorophyll and photosynthetic carbon production with reference of choroplastic pigments. In: Goldman, C. R. (Editor). Primary productivity in aquatic environments. Univ. of Calif. Press. U.S.A. 3a. Edic: 323 - 348.