

Ministerio de Obras Pùblicas
Dirección General de Aguas
Departamento de
Hidrología

Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Departamento de
Ciencias Ecológicas



OPERACION PARCIAL DE LA RED NACIONAL
MINIMA DE CONTROL DE LAGOS

"Estudio Limnol6gico de la Laguna de
Aculeo", Regi6n Metropolitana"

Santiago, Abril 1967

INDICE

CONTENIDO

PAG.

INDICE

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUCCION

- | | |
|------------------|---|
| 1.1 Alcances | 1 |
| 1.2 Antecedentes | 1 |
| 1.3 Objetivos | 3 |

2. CARACTERIZACION DEL AREA

- | | |
|--------------------------------|---|
| 2.1 Lugar de muestreo | 4 |
| 2.2 Características geológicas | 5 |
| 2.3 Clima | 7 |
| 2.4 El entorno de la laguna | 7 |

3. METODOLOGIA

- | | |
|--|----|
| 3.1 Características morfométricas
del vaso del cuerpo léntico | 8 |
| 3.2 Toma de muestras | 9 |
| 3.3 Parámetros físicos, químicos
y biológicos | 10 |

4. RESULTADOS	
4.1 Morfometría de la laguna	16
4.2 Parámetros físicos	17
4.3 Parámetros químicos	20
4.4 Parámetros biológicos	26
5. ANALISIS DE RESULTADOS	
5.1 Morfometría de la laguna	29
5.2 Parámetros físicos, químicos y biológicos	33
5.3 Efecto del uso de la tierra	38
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	44
8. RESUMEN	50

LISTA DE TABLAS (Pag. 51)

- Tabla 1. Morfometría Laguna de Aculeo (Cota de verano).
- Tabla 2. Tablas de curvas hipsográficas y volumétricas.
- Tabla 3. Alcalinidad total y de fenolftaleína.
- Tabla 4. Consumo béntico de oxígeno en la degradación de materia orgánica.
- Tabla 5. Estado trófico de la Laguna de Aculeo.

LISTA DE FIGURAS (Paq. 57)

- Figura 1. Posición de las estaciones de muestreo.
- Figura 2. Carta batimétrica de la Laguna de Aculeo.
- Figura 3. Curvas hipsográficas de área y volumen.
- Figura 4. Distribución mensual de temperatura.
- Figura 5. Distribución mensual de la transparencia del agua.
- Figura 6. Distribución mensual de los sólidos totales en suspensión.
- Figura 7. Distribución mensual de la conductividad.
- Figura 8. Distribución mensual del pH.
- Figura 9. Distribución mensual de materia orgánica en el sedimento.
- Figura 10. Distribución mensual del oxígeno disuelto.
- Figura 11. Distribución mensual de la alcalinidad.
- Figura 12. Distribución mensual del ortofosfato.
- Figura 13. Distribución mensual del nitrato.
- Figura 14. Distribución mensual del amonio.
- Figura 15. Distribución mensual de la sílice.

- Figura 16. Distribución mensual del nitrógeno total.
- Figura 17. Distribución mensual del fósforo total.
- Figura 18a,b y c. Distribución estacional de macroelementos.
- Figura 19. Distribución mensual de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- Figura 20. Distribución mensual de la clorofila a.
- Figura 21. Distribución mensual de la productividad primaria.
- Figura 22. Distribución mensual de transparencia del agua, luz y profundidad de zona fótica.
- Figura 23 a,b y c. Distribución diaria de temperatura y oxígeno en mediciones de 24 horas.
- Figura 24 a y b. Distribución de materia orgánica, fósforo total y nitrógeno total en el perfil de sedimentos.
- Figura 25a - 25f. Muestreos estacionales seriados de ortofosfato en toda la laguna.
- Figura 26a - 26f. Muestreos estacionales seriados de nitrato en toda la laguna.

Nómina de participantes en el Proyecto

Dirección General de Aguas

Ingeniero Raúl Merino B. Inspector-Fiscal

Universidad de Chile, Facultad de Ciencias

Dr. Camilo Quezada	Decano
Dr. Alberto Veloso M.	Director Depto de Ciencias Ecológicas
Dr. Hermann Mühlhauser S.	Coordinador del Proyecto
Profs. Vivian Montecino B. e Irma Vila P.	Encargadas de aspectos biológicos
Dr. Hermann Mühlhauser S.	Encargado de aspectos físicos y químicos
Prof. Berta Zamorano	Mediciones de macro- elementos
Sr. Hernán Thielemann V.	Asistente técnico, chofer
Sra. Lorena Soto	Técnico analista químico
Sr. Jaime Peters F.	Encargado de la batimetría
Srta. Rudelinda Bravo	Técnico analista biológico
Lic. Leonardo Lavanderos	Cálculo de índice trófico

1. Introducción

1.1 Alcances

En el marco operacional de la Red Nacional Mínima de Control de Lagos diseñada por la Dirección General de Aguas y cumpliendo con el objetivo de conocimiento preliminar de los cuerpos de agua lénticos (lagos y embalses) de dicha red, se ha establecido un convenio entre la Dirección General de Aguas y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile con la finalidad de que esta última entidad lleve a cabo un estudio de acuerdo a los objetivos que se indican en 1.3 en la Laguna de Aculeo durante 1986. En el presente informe se analizan los resultados obtenidos durante este estudio, recomendaciones acerca de la previsión de mediciones que sería recomendable realizar como una conclusión del estudio, así como la bibliografía consultada.

1.2 Antecedentes

La literatura disponible indica que ya en la primera mitad de este siglo existe un interés por el área de la Laguna de Aculeo, aunque no directamente relacionado con el cuerpo de agua misma (Valteer & Torres, 1933). Más tarde CIREN (CORFO) (1964) estudia en forma descriptiva los suelos del área de Aculeo. Un estudio realizado por Boisier (1966), describe cualitativa y cuantita-

tivamente las posibilidades y limitaciones de la laguna como satélite balneario de la ciudad de Santiago. Covacevich (1975), estudia las faunas fósiles neocomianas del área Melipilla-Aculeo. Sancha et al. (1977), realizan el primer estudio limnológico de la Laguna de Aculeo y la factibilidad de uso del agua en riego y recreación. Gonzalez y Rivano (1979) se refieren a un yacimiento de dumortierita en el cerro "Horcón de Piedra", perteneciente a la cuenca de la Laguna de Aculeo, en este trabajo se presentan datos preliminares sobre el marco geológico del área. Balbontín et al. (1982) en su estudio sobre la relación de la región Metropolitana con sus lagunas, embalses y tranques. Se trata acá de señalar la importancia y significación de los embalses tranques y lagunas en relación al desarrollo de la región Metropolitana. Se destacan aspectos de localización geográfica, función, valor del recurso almacenado, su carácter integrador urbano, su calidad como factor de equilibrio y recuperación del medio ambiente. Se plantea la necesidad de un uso regulado del recurso agua almacenado en estos cuerpos lénticos. Cabrera y Montecino (1982) se refieren a la eutrofia de la Laguna de Aculeo, por primera vez se describen rangos de productividad primaria y se intenta establecer una aproximación al reciclamiento de nitrógeno. Nasi y Thiele (1982) realizan un estudio paleogeográfico de la estratigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la costa al sur del Río Maipo y entre Melipilla y La-

guna de Aculeo. Vila et al. (1982), en una presentación a congreso se refieren a algunos aspectos del impacto de la eutroficación de la laguna sobre la estructura de las comunidades de peces y plancton. Vila et al. (1986) en un diagnóstico y evaluación del potencial biológico de lagos naturales y artificiales de Chile Central se refieren a aspectos tróficos de la Laguna de Aculeo en comparación a otros lagos y embalses de la zona central del país. Mählhauser et al. (1986), se refieren a los aportes naturales y antrópicos a la hipertrofia de la Laguna de Aculeo.

Mählhauser & Vila (1987) presentan a Laguna de Aculeo como un estudio de caso del impacto ecológico sobre un cuerpo de agua en relación al sistema montañoso que lo rodea.

1.3 Objetivos

En el marco conceptual del presente estudio se han definido los siguientes objetivos.

- Caracterizar morfométricamente el vaso de la Laguna de Aculeo.
- Caracterizar física y químicamente las aguas de la laguna.
- Caracterizar aspectos biológicos seleccionados del agua.

- Caracterizar aspectos químicos seleccionados del sedimento.
- Definir la operación de la red respecto de la misma laguna.
- Calcular el índice de productividad.
- Elaborar recomendaciones sobre mediciones que se deberían repetir como una conclusión del estudio.
- Elaborar recomendaciones para definir los aspectos de vigilancia periódica de la laguna.

2. Caracterización del área

2.1 Lugar de muestreo

La Laguna de Aculeo ($33^{\circ} 50' 30''$ S; $70^{\circ} 54' 24''$ W) se encuentra ubicada aproximadamente a 50 km al suroeste de Santiago en la comuna de Paine. El espejo de agua se sitúa a 360 m sobre el nivel del mar. Su cuenca hidrográfica es pequeña y relativamente uniforme. El cuerpo de agua es el receptor del escurrimiento de cordones montañosos que la rodean casi en un 90%. Entre las mayores cumbres sobresalen los cerros: Infiernillo (867 m), Las Caletas (917 m), Alto Los Quillalles (938 m), Alto Los Pescadores (888 m), Las Cabras (1138 m), El Durazno (987 m), El Maitén (1320 m), Alto de Pangue (1185 m), Las

Abejas (1273 m), El Frío (1190 m), El Litre (1004 m), Las Pelucas (932 m), El Cepillo (908 m). La laguna capta aguas que bajan a través de numerosas quebradas que drenan los cordones montañosos a su alrededor. El estero Santa Marta o Aculeo actúa en algunas épocas del año como afluente al aportar aguas desde el estero Pintué, especialmente en épocas de crecida por precipitación y/o deshielo. En otras épocas del año y cuando el llenado de la laguna supera el desnivel de cota, este estero actúa como efluente. De otro modo el intercambio de agua se minimiza. De la laguna se extrae además agua por bombeo, para riego en terrenos agrícolas adyacentes (Sancha et al. 1977). El volumen de agua extraído de esta manera resulta desconocido.

2.2 Características geológicas

De acuerdo a Nasi y Thiele (1982), la secuencia estratificada que se distribuye al este sureste de Melipilla ($33^{\circ} 40'$ a $34^{\circ} 00'$ S), hasta los cordones que circundan la laguna de Aculeo, muestra la existencia de dos ciclos principales de sedimentación marina, coronados por intervalos continentales, durante la evolución geológica del Jurásico y Cretácico. Cerca de la base de esta columna se reconoce por primera vez en la región, el Aaleniano superior, documentado por la presencia de amonoides de los géneros *Tmetoceras* y *Eudmetoceras*. La serie con el

piso aludido representa la extensión mas austral, comprobada, de la formación Cerro Calera, definida al norte de Limache. Encima de esta unidad se reconocen, sucesivamente: la formación Horqueta (asignada al lapso Post-Bajociano-Malm); la formación Lo Prado (asignada al rango Berriasiano-Hauteriviano); la formación Veta Negra (asignada al rango Barremiano-Albiano) y que también ha sido citada por Gonzalez y Rivano (1979) para el cerro Horcón de Piedra en el sector hacia la laguna de Aculeo; la formación Lo Valle (asignada a la parte inferior del Cretácico superior). En la columna estratigráfica se verifican de norte a sur, variaciones laterales de facies que atestiguan importantes cambios de ambientes de sedimentación. Las características principales que permitieron definir la formación Las Chilcas al norte de Santiago, desaparecen hacia el sur, donde las facies detríticas de esta engranarían, longitudinalmente, con las facies volcánicas de la Formación Lo Valle que, de esta forma, tiene un desarrollo mas potente en el área estudiada. La evolución Paleogeográfica está estrechamente ligada a la existencia de un arco volcánico continental, activo, al menos desde el Aaleniano superior, asociado a una cuenca de depositación marina, desarrollada fundamentalmente al este del arco. Esta organización Paleogeográfica se mantuvo prácticamente invariable desde el Jurásico Medio al Cretácico inferior. En el Cretácico superior se produjo un cambio marcado por la migración hacia el este del volcanismo y la desaparición de

la cuenca marina, originándose de esta forma una sobre imposición Paleogeográfica. De acuerdo a Sancha et al. (1977), el origen de la laguna de Aculeo se explica por el gran espesor de sedimentos aluviales depositados por el río Maipo en la parte NE de la región y que junto a material de conos de deyección, acumulados a la salida de las quebradas Ramadillas, Huiticalán y Abrantes, terminaron por represar el drenaje natural de la Rinconada de Aculeo.

2.3 Clima

El clima en la región es mediterráneo con una precipitación de 500 a 700 mm anuales (CIREN (CORFO), 1964), concentradas principalmente en invierno y con una estación seca prolongada.

2.4 El entorno de la laguna

Las zonas aledañas de la laguna principalmente al NW, W, SW, S y SE presentan un desarrollo apreciable de la agricultura, siendo el uso de la tierra intensivo. Por otra parte, el uso de la tierra alrededor de la laguna y el uso del cuerpo de agua mismo en recreación se ha ido incentivando con el tiempo. Aculeo constituye un centro turístico y recreacional de creciente atracción en la actualidad. Las actividades y construcciones recreaciona-

les se dan practicamente en todo el entorno de la laguna.

3. Metodología

3.1 Características morfométricas del vaso del cuerpo léntico

3.1.1 Batimetría de la laguna

La batimetría se realizó en Enero de 1986 utilizando un ecosonda Simrad Modelo EY . Con este instrumento se realizaron 19 cortes batimétricos, que cubrieron todo el espejo de agua. Los ecogramas obtenidos por el ecosonda fueron transferidos a una carta proporcionada por la Dirección General de Aguas en escala aproximada 1:11.000. Posteriormente se trazaron las isóbatas cada metro de profundidad. Una vez obtenido el mapa batimétrico se procedió a realizar los calculos morfométricos de acuerdo a Hutchinson (1975). Se calcularon los siguientes parámetros morfométricos: longitud máxima, ancho máximo, ancho medio, volumen, área, área insular, profundidad máxima, profundidad media, profundidad relativa, longitud línea de costa, desarrollo línea de costa, desarrollo del volumen. Además se procedió a graficar las curvas hipsográficas y de volumen de la laguna de Aculeo: área

por estrato, área por estrato y acumulado, volumen por estrato, volumen por estrato y acumulado.

3.1.2 Posiciones de muestreo *

Conocida la morfometría de la laguna, se procedió a escoger las estaciones de muestreo mas convenientes para cumplir con los objetivos del estudio. Para esto se consideró a las estaciones definidas en estudios anteriores de la laguna por el Grupo de Limnología. De estas se eligieron tres estaciones de acuerdo a lo estipulado en el convenio de cooperación.

La estación A, (13) ubicada próxima a la desembocadura del estero Aculeo.

La estación B, (5) en el área central en el punto de máxima profundidad.

La estación C, (9) en un punto próximo a la desembocadura del estero Las Pataguas.

En las tres estaciones y dos profundidades se midieron parámetros físicos, químicos y biológicos "in situ" y/o se tomaron muestras para análisis en laboratorio.

3.2 Toma de muestras

Las muestras de agua se tomaron con botella muestreadora Van Dorn. Las muestras de sedimento mediante un muestreador sacatestigos tipo Kajak, modificado.

* Ver Fig. 1.

3.2.1 Tratamiento

Las muestras de agua para algunos análisis especialmente compuestos disueltos se filtraron in situ por filtro Millipore AP40. Las muestras para sólidos en suspensión y nutrientes totales se tomaron en frascos de polietileno de alta densidad refrigerados y analizados a la brevedad. Las muestras de sedimentos se analizaron en laboratorio.

3.3 Parámetros físicos, químicos y biológicos

3.3.1 Parámetros físicos

En cada estación y profundidad considerada se midieron los siguientes parámetros físicos:

3.3.1.1 Temperatura (°C)

Medida "in situ" mediante termómetro de mercurio con precisión 0,1°C adosado a botella muestreadora Van Dorn. Frecuencia mensual.

3.3.1.2 Transparencia del agua (m)

Medida "in situ" mediante disco Secchi. Frecuencia mensual.

3.3.1.3 Sólidos totales suspendidos (mg l^{-1})

Medidos en muestra de agua posteriormente filtrada por filtro de membrana Millipore HAWP 0,45 μ y calculada por gravimetría. Frecuencia mensual.

3.3.1.4 Conductancia específica (a 25°C , uS cm^{-1})

Medida "in situ" mediante conductivímetro YSI modelo 33. Frecuencia mensual.

3.3.1.5 pH

Medido "in situ" mediante ph-metro Corning modelo 5 calibrado con buffer pH 7 (Merck). Frecuencia mensual.

3.3.1.6 Materia orgánica en sedimentos (%)

Medida por calcinación en mufla a 450°C y gravimetría en muestras secas provenientes de los 3 primeros cms del perfil de sedimento.

3.3.2 Parámetros químicos

En cada estación y profundidad considerada se midieron los siguientes parámetros químicos.

3.3.2.1 Oxígeno disuelto (mg l^{-1})

Se midió el O.D. por el método de Winkler en muestras de agua, las cuales se fijaron inmediatamente después de tomadas. La titulación se realizó potenciométricamente de acuerdo a Talling (1973). Frecuencia mensual.

3.3.2.2 Alcalinidad (mg l^{-1})

Se midió la alcalinidad de fenolftaleína y alcalinidad total en muestras de agua inmediatamente después de tomadas. Se utilizó el método de Golterman et al. (1978). Frecuencia mensual.

3.3.2.3 Ortofosfato (ug l^{-1})

El P-PO_4 disuelto se midió en muestras de agua filtrada inmediatamente después de tomadas. Se utilizó el método de complejo molibdato según Zahradník (1981). Frecuencia mensual.

3.3.2.4 Nitrato (ug l^{-1})

El N-NO_3 disuelto se midió en muestras de agua filtrada inmediatamente después de tomadas. Se utilizó el método del citrato de acuerdo a Zahradník (1981). Frecuencia mensual.

3.3.2.5 Amonio (ug l^{-1})

El N-NH_3 disuelto se midió en muestras de agua filtrada inmediatamente después de tomadas. Se utilizó el método del indofenol azul según Zahradník (1981). Frecuencia mensual.

3.3.2.6 Sílice (ug l^{-1})

La sílice se midió en muestras de agua filtrada mediante el método de Golterman et al. (1978). Frecuencia mensual.

3.3.2.7 Nitrógeno total (ug l^{-1})

El nitrógeno total se midió en muestras de agua transportados al laboratorio. Los análisis se realizaron según Mühlhauser et al. (1986). Frecuencia mensual.

3.3.2.8 Fósforo total (ug l^{-1})

El fósforo total se midió en muestras de agua transportadas al laboratorio. Los análisis se realizaron según Mühlhauser et al. (1986). Frecuencia mensual.

3.3.2.9 Cloruros (mg)

Se midió en muestras de agua filtrada transportadas al laboratorio. Se utilizó un método potenciométrico, con electrodo específico para cloruros. Se utilizó un clorímetro Buchler modelo N2500. Frecuencia estacional.

3.3.2.10 CO_3 y HCO_3 (mg l^{-1})

Se calculó ambos compuestos a partir de los resultados de la medición de alcalinidad; extrapolando de tablas de componentes del sistema carbonato, de acuerdo a Rebsdorf (1972). Frecuencia mensual.

3.3.2.11 Sodio (mg l^{-1})

Se midió en muestras de agua filtrada transportadas al laboratorio. Se utilizó un espectrofotómetro de llama Eppendorf . Frecuencia estacional.

3.3.2.12 Potasio (mg l^{-1})

Se midió en muestras de agua filtrada transportadas al laboratorio. Se utilizó espectrofotómetro de llama Eppendorf. Frecuencia estacional.

3.3.2.13 Calcio (mg l^{-1})

Se midió en muestra de agua filtrada transportadas al laboratorio. Se utilizó espectrofotómetro de llama Eppendorf. Frecuencia estacional.

3.4 Indice trófico

El índice trófico de la Laguna de Aculeo se midió de acuerdo a Carlson (1977); Megard et al. (1980).

4. Resultados

4.1 Morfometría de la laguna (Figs. 2 y 3; Tablas 1 y 2)

La batimetría de la laguna indica que en verano (época en que se hicieron los perfiles batimétricos), la profundidad máxima alcanza a los 5 m. Este valor puede subir hasta 7 m en condiciones de llenado máximo de la laguna en invierno y en la primavera temprana. La carta batimétrica (Fig. 2) indica que la mayor profundidad se encuentra en el área norte y noreste de la laguna. Las profundidades menores se encuentran hacia el área sur de la laguna. La Tabla 1 muestra los resultados de los cálculos de los principales parámetros morfométricos de la laguna y que caracterizan el vaso de este cuerpo de agua. En la Tabla 2 se encuentran los resultados de curvas hipsométricas y volumétricas de la laguna. Se puede apreciar que el mayor porcentaje de área superficial se encuentra distribuido entre las cotas 0 m y 2 m; mientras el mínimo porcentaje de área esta dado por la cota de 5 m. La distribución del volumen es semejante, aunque el mayor por-

* pags. 59 y 60; 52 y 53.

centaje de volumen se extiende hasta los 3 m. La Fig. 3 muestra las curvas de área por estrato, área por estrato y acumulado, el volumen por estrato y el volumen por estrato y acumulado.

4.2 Parámetros físicos (Figs. 4-9)

4.2.1 Temperatura

La Fig. 4 muestra los resultados del análisis mensual de temperatura por estación y por profundidad. Los valores de temperatura en las tres estaciones fluctuaron entre un máximo de 28-29°C y un mínimo de 11-12°C. El cuerpo de agua soporta un proceso de enfriamiento y calentamiento cíclico desde el verano hacia el invierno y hacia un nuevo verano. Las diferencias de temperatura entre superficie y profundidad en la laguna no son muy marcadas a lo largo del año y en pocas oportunidades superan los cinco grados; sin embargo puede existir una diferencia estacional de hasta 16°C entre verano e invierno.

4.2.2 Transparencia del agua

La transparencia del agua expresada como profundidad de desaparición del disco Secchi a la visión de un observador, en metros, se encuentra en la Fig. 5. Esta transparencia se mantuvo en valores muy bajos, menores que 0,4m en el verano y hasta fines de otoño (Mayo); aumentando posteriormente hasta el comienzo de la primavera (Septiem-

bre) con una leve baja en Agosto. A partir de Octubre y hasta Enero la transparencia vuelve a bajar, aunque no tan drásticamente como en el verano anterior. La transparencia del agua se considera asociada a partículas en suspensión, especialmente biológicas (plancton). De tal modo que las fluctuaciones observadas serían consecuencia de la mayor o menor cantidad de plancton existente en la laguna.

4.2.3 Sólidos totales en suspensión

La Fig. 6 muestra los resultados de mediciones mensuales de sólidos totales en suspensión. En general estos sólidos están relacionados más bien con la componente biológica en el agua y presentaron fluctuaciones semejantes a las de variables biológicas como clorofila y productividad primaria. En general se observan dos máximas de concentración en verano y primavera. Los valores mínimos de sólidos en suspensión se observaron en invierno. Las diferencias de concentración entre superficie y profundidad fueron mínimas a través del tiempo con excepción de la estación 5 en el mes de Noviembre. El comportamiento de esta variable a través del tiempo siguió un patrón muy semejante en las tres estaciones analizadas. Se infiere que durante los meses de verano la cantidad de sólidos en suspensión pueda en determinados momentos verse influenciada por las actividades recreacionales, especialmente las áreas más someras de la laguna.

4.2.4 Conductividad

En la Fig. 7 se muestran los resultados de mediciones mensuales de conductividad específica a 25°C en tres estaciones de la laguna. Los valores de superficie y profundidad salvo pocas excepciones son semejantes. Los valores de conductividad son relativamente bajos no superando los 280 u S cm⁻¹, con un mínimo de alrededor de 180 u S cm⁻¹ (excepto Septiembre). La conductividad fluctúa sin embargo estacionalmente entre verano e invierno en rangos de alrededor de 80 u S cm⁻¹. En general la conductividad es máxima en verano, disminuyendo en invierno.

4.2.5 pH

Los resultados de mediciones de pH en la laguna se presentan en la Fig. 8. El pH en la laguna resulta alcalino a lo largo de todo el período muestreado. Los máximos valores se logran en primavera y verano, las mediciones en esta época dieron valores mayores que 9 en las tres estaciones. En invierno sin embargo los valores mínimos para la estación 5 siguen siendo ligeramente alcalinos con mínimos de alrededor de 7,2. En general los valores de pH en profundidad resultaron más bajos que en superficie; un efecto de procesos degradativos con formación de CO₂ que están ocurriendo en el fondo. En las estaciones 9 y 13 los valores de pH en invierno fueron comparativamente más alcalinos que en la estación 5. Las diferencias de pH entre superficie y profundidad fueron mínimas.

4.2.6 Materia orgánica en el sedimento

Los resultados de la materia orgánica en los tres primeros centímetros del perfil del sedimento y expresados como un promedio más menos la desviación standard, se muestran en la Fig. 9. Se puede observar que en las estaciones 5 y 9 los valores fluctuaron entre 15% y 33%, estando el promedio anual alrededor de 23%. En la estación 13 en cambio la concentración de materia orgánica fue mucho más baja fluctuando entre 1% y 20%.

4.3 Parámetros químicos (Figs. 10-18)

4.3.1 Oxígeno disuelto

La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos en la medición de oxígeno disuelto en superficie y profundidad en las tres estaciones de muestreo. Las mayores diferencias de concentración por profundidad se observan en la estación más profunda (5). Estas diferencias resultan menores en las estaciones más someras (9 y 13). En general las aguas más profundas resultaron más pobres en oxígeno que las superficiales, alcanzando en algunas circunstancias niveles anóxicos. Siendo el oxígeno el principal aceptor de electrones en el metabolismo aeróbico, las fluctuaciones en las aguas más profundas se deben entender como una dinámica de consumo del oxígeno disuelto, situación que se ve reflejada en las gráficas de D.B.O.₅ (Fig.19) .

4.3.2 Alcalinidad

En la Tabla 3 y Fig. 11 se muestran los resultados del análisis de alcalinidad.

La alcalinidad total fluctuó entre 1.24 mval y 2.42 mval y la alcalinidad por fenoftaleína entre 0 y 0.5 mval.

Los valores más bajos se registraron en invierno (Junio) hasta el verano 86-87 y los más altos en el verano-otoño 1986 o Febrero a Mayo.

4.3.3 Ortofosfato

La Fig. 12 muestra los resultados del análisis de ortofosfato en el agua de la Laguna de Aculeo. Las concentraciones entre superficie y profundidad en las diversas estaciones muestreadas no difieren mayormente entre sí. La variación estacional indica que los niveles de ortofosfato se mantienen altos a lo largo de todo el año, con excepción de la primavera donde se produce una concentración más baja probablemente coincidente con un mayor consumo fitoplanctónico; sin embargo, este consumo es incapaz de terminar con todo el ortofosfato disuelto disponible en la laguna.

4.3.4 Nitrato

Los resultados obtenidos para la medición de nitrato se pueden observar en la Fig. 13. Como un nutriente de alto consumo por parte del fitoplancton las fluctuaciones observadas se ajustan regularmente a las fluctuaciones del primero. Los valores mínimos se observaron a fines de la primavera y el verano, mientras las máximas concentraciones se dieron en invierno y comienzos de la primavera. En general no existen grandes diferencias de concentración por profundidad. La estación 13 mostró menores valores que las otras dos estaciones. En todo caso la concentración de nitrato en las diversas estaciones no se agotó en ningún momento a lo largo del estudio.

4.3.5 Amonio

El amonio cuyos resultados se muestran en la Fig.14 mostró una distribución poco uniforme con varias máximas y mínimas a lo largo del estudio. En las estaciones 9 y 13 los valores mínimos se dieron en verano y con máximas concentraciones a fines del verano y en invierno. En la estación 5 el comportamiento en profundidad fue semejante a las demás estaciones. En superficie en cambio las concentraciones en Enero 1986 fueron mucho mayores que las medidas en Enero 1987. La máxima invernal de amonio también se da en esta estación. Salvo algunas excepciones no se detectaron grandes diferencias entre concentraciones de amonio en superficie y en profundidad.

4.3.6 Sílice

Los resultados de la medición de la sílice se encuentran en la Fig. 15. Los valores de concentración a lo largo del año son relativamente bajos, alcanzándose un máximo de aproximadamente 800 ug l^{-1} en Enero 1987 otras dos máximas se detectaron en el período invernal. El resto del período de estudio las concentraciones de sílice se mantuvieron por debajo de los 150 ug l^{-1} . El comportamiento de la sílice en las tres estaciones muestreadas fue uniforme sin mostrar grandes variaciones entre sí. Tampoco se observaron grandes diferencias entre las concentraciones medidas en superficie y las medidas en profundidad.

4.3.7 Nitrógeno total

La Fig. 16 muestra los resultados obtenidos para la medición de nitrógeno total Kjeldahl en las tres estaciones muestreadas. Los máximos valores se detectaron entre Enero y Abril 1986, estos altos valores no se repitieron en Enero 1987. Los valores mínimos se dieron en primavera. Salvo algunas excepciones, las diferencias de concentración entre superficie y profundidad son mínimas.

4.3.8 Fósforo total

Los resultados de la medición de fósforo total se encuentran en la Fig. 17. Estos muestran también una diferencia de concentración entre el período Enero-Abril 1986 y Enero 1987 aunque no tan marcada como en el caso del nitrógeno total. Las diferencias de concentración entre superficie y profundidad fueron muy poco marcadas. Los valores máximos se dieron en verano y los mínimos en primavera, lo cual resulta coincidente con el comportamiento del nitrógeno total. En general y al igual que para el nitrógeno existió una disminución desde el verano hasta la primavera, produciéndose un aumento hacia el verano siguiente.

4.3.9 Macroelementos Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}

Los resultados obtenidos de la medición estacional de macroelementos se encuentra en las Figs. 18 a, b y c. La Fig. 18a muestra resultados para la estación 5. El bicarbonato domina en todas las épocas del año como principal anión. El grupo de los cationes es dominado por sodio, calcio y magnesio. Carbonato, Cloruros y Potasio se encuentran en cantidades menores. Sulfato presenta niveles bajos en todas las estaciones del año. La Fig. 18b indica los resultados de medición de macroelementos para la estación 9. El anión dominante sigue siendo el bicarbonato. El grupo de los cationes es dominado por el sodio, calcio y magnesio. En verano y primavera sodio domina ligeramente. En otoño domina el calcio y en invierno el magnesio, esta distribución es válida también para la estación 5. En la Fig. 18c se encuentran los resultados de mediciones de macroelementos en la estación 13. El bicarbonato fue el anión dominante en todas las estaciones del año. Sodio, calcio y magnesio los cationes mas abundantes. En verano, invierno y primavera sodio fue mas abundante. En otoño dominó el calcio. Cloruro es al igual que en las otras dos estaciones el segundo ión mas importante. Sulfato se presentó en niveles bajos al igual que el resto de la laguna.

4.4 Parámetros biológicos (Figs. 19-22)

4.4.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O₅)

Los resultados de la medición de demanda bioquímica de oxígeno se muestran en la Fig. 19. Para la estación 5 se observaron diferencias significativas entre las medidas de superficie y las de fondo. En general se dan tres máximas una de otoño en Abril, una de finales de invierno en Agosto (con los valores máximos) y una de primavera en Noviembre. Las mínimas se dieron: para superficie en Marzo, Junio y Septiembre. Para profundidad en Febrero, Junio y Octubre. Una distribución semejante se observa para las estaciones 9 y 13. Sin embargo en estas estaciones las diferencias de D.B.O₅ entre superficie y profundidad son menores que en la estación 5. En las estaciones 9 y 13 se observó comparativamente una disminución de D.B.O₅ entre Enero 1986 y Enero 1987, tanto en superficie como en profundidad. Esta disminución no fue tan notoria en la estación 5.

4.4.2 Clorofila a

En la Fig. 20 se observa que la concentración de clorofila a con la excepción del valor de superficie en Enero fue superior a los 50 mg m^{-3} en la columna de agua entre Enero y Mayo y alcanzó su valor máximo (159.8 mg m^{-3}) en Marzo. La disminución invernal que contempla un valor mínimo de 8.0 mg m^{-3} (Octubre, Estación 13) se observa en las 3 estaciones muestreadas. En Enero 1987 los valores tienden a aumentar $> 50 \text{ mg m}^{-3}$ en la estación 9 (A) y 5 (B).

4.4.3 Productividad primaria

Los valores puntuales de fijación de carbono obtenidos a profundidades discretas fueron sumados para la zona eufótica ponderados por la profundidad. Estos resultados se muestran en la Fig. 21.

Los valores discretos oscilaron entre 16.5 y $1155.8 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y los valores integrados entre 32.0 y $518.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

La productividad primaria fue máxima en verano (Febrero-Marzo) disminuye a $< 100 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ entre Mayo y Agosto y se incrementa nuevamente en primavera (Septiembre-Octubre-Noviembre).

Las variaciones temporales de disco Secchi, luz ($\bar{E} \text{ m}^{-1}$) y profundidad de zona fótica se muestran en la Fig. 22.

4.4.4 Índice trófico

Los resultados del cálculo de índice trófico de Carlson o TSI se muestran en la Tabla 5. Los cálculos se basaron en la estación 5, por ser esta posición (la de mayor profundidad) mas característica de la calidad del agua en la laguna. Las estaciones 9 y 13 son mas influenciadas por el área litoral. Durante el lapso de tiempo que duró el estudio, se pueden detectar dos períodos claramente diferenciables: el primer período va de Enero 1986 a Mayo 1986. Durante este período el valor de TSI alcanza valores bastante elevados fluctuando entre 70 y 90, es decir valores francamente de sistemas muy eutrificados. En un segundo período que va de Mayo 1986 a Enero 1987 se observa una disminución de TSI al rango 60-70, aún en un rango eutrífico. Esto indicaría que la laguna tiene fluctuaciones, las que probablemente se extienden a períodos de mas de un año.

5. Análisis de resultados

5.1 Morfometría de la laguna

Es sabido que la hipertrofia a la que tiende actualmente la Laguna de Aculeo es causada principalmente por el aporte en exceso de minerales nutrientes; sin embargo es el sistema como un todo el que determina los resultados eventuales de este proceso (Barica y Mur, 1980). En esta laguna la morfometría de su cuenca hidrográfica cumple un rol importante en el proceso eutrófico (Möhlhauser et al. 1986; Möhlhauser y Vila, 1987). Es así como el vaso de la laguna constituye comparativamente hablando como el fondo de un embudo recibiendo el agua que escurre por sus paredes. Si consideramos la gran cantidad de arroyos intermitentes de quebrada alrededor de la laguna, los cuales son alimentados por aguas lluvia, unido a los cursos perennes de agua se explica el escurrimiento desde los cerros ribereños hacia la laguna. Por otro lado, parte de estos cursos de agua atraviesan los terrenos agrícolas alrededor de la laguna, lo cual puede contribuir al transporte de nutrientes hacia el vaso del cuerpo léntico (Duncan & Rzoska, 1980). Otro aspecto que incide en forma negativa para la calidad del agua en la laguna la constituye un bajo nivel de circulación del agua. En otras palabras, un tiempo de residencia largo para la masa de agua contenida en el vaso. Esto tiene también una causa morfométrica. Considerando al Estero Aculeo o Sta. Marta como principal curso de

agua que accede a la laguna y siendo este receptor del estero Pintué; se observa que el flujo de agua en ambos esteros no es constante a través del año, de tal modo que tanto la afluencia como la efluencia de agua hacia y desde la laguna es gobernada por hechos eventuales. Estos eventos, de índole metereológica son las lluvias de invierno y los deshielos de primavera en cuencas conexas. De este modo y considerando que los esteros nombrados se encuentran a lo menos en la misma cota de altura, sino ligeramente más altos que la laguna, entonces la afluencia de agua se produce mientras el estero Pintué presente un caudal y flujo de agua considerable, el resto de la afluencia se daría para el caso de invierno por los arroyos intermitentes y perennes (Las Cabras, Las Pataguas) alrededor de la laguna. En época de deshielo sin embargo este aporte sería ínfimo por falta de lluvias en el área. Una vez que los eventos terminan (lluvias y deshielo), el caudal del Estero Pintué que pertenece al sistema del río Angostura disminuye paulatinamente hasta niveles mínimos, de tal modo que el estero Sta. Marta comienza a actuar como efluente de la laguna la cual al final de los eventos se encuentra en su cota máxima de llenado, este intercambio de agua desde la laguna se produce mientras el nivel del volumen, esté por sobre la cota del estero Sta. Marta. A medida que se alcanza esta cota, la efluencia disminuye hasta hacerse mínima. Puesto que los caudales de los esteros Pintué y Sta. Marta en su acceso a la laguna, son desco-

nocidos, no es posible estimar el volumen de agua que verdaderamente se intercambia, o si la entrada de agua nueva al mezclarse con la masa de agua residente influencia la calidad del agua solo en la entrada o, en todo el cuerpo léntico. Sin embargo de los resultados obtenidos para varios de los parámetros medidos se observa que las estaciones 5 y 9 son mucho mas parecidas entre sí que con la estación 13 en el área de la boca del estero Sta. Marta. Esto nos permite inferir una mezcla incompleta del agua residente con el agua nueva. Esta inferencia puede sustentarse además por el efecto de otra variable meteorológica, en este caso el viento, sobre el espejo de agua. Es un hecho que las condiciones del régimen de vientos generalmente NW, ven favorecido su accionar sobre la laguna por las condiciones morfométricas en el área W de la cuenca donde una serie de quebradas encajonan y dirigen el viento hacia la laguna de tal modo que se produce un transporte en superficie de dirección NW a SE a lo largo del espejo de agua produciendo condiciones de mezcla de la columna de agua, expresadas como oxigenación del agua hasta el fondo y pérdida de la estratificación térmica en la columna de agua. Condiciones que se revierten en las horas de calma; en las cuales se produce un gradiente en las concentraciones de oxígeno disuelto y en la temperatura del agua (véase las Figs. 23a, 23b y 23c). Si consideramos la dirección predominante del viento las condiciones eólicas podrían también ejercer alguna influencia en el grado de mezcla

del agua residente con el agua nueva que esté afluyendo por el estero Sta. Marta. Por otra parte el bajo intercambio o circulación del agua favorece el reciclamiento interno de nutrientes. En este proceso los sedimentos del vaso contenedor cumplen un rol muy importante al actuar como una trampa de nutrientes, (Lerman, 1979; Muhlhauser, 1982). Este rol resulta primordial en lagos someros como la Laguna de Aculeo ($\bar{z} = 3,5$ m) donde el efecto del viento provoca una resuspensión periódica de los sedimentos, acelerando la velocidad de intercambio de nutrientes con el agua, la cual normalmente se hace por difusión a través de la interfase sedimento-agua y de un gradiente de concentración. Los aportes de agua subterránea, aunque no tenemos mediciones al respecto y que la napa puede ser relativamente superficial (CIREN (Corfo), 1964), podemos inferirlos como de escasa importancia basados en el hecho de que en verano cuando el aporte de agua superficial se minimiza, se extrae agua de la laguna para riego, y la evaporación se hace máxima; el volumen de agua medido en el limnómetro disminuye rápidamente (60 cm entre Noviembre 19 de 1986 y Enero 21 de 1987), lo cual implica un volumen considerable de pérdida que los aportes potenciales por napas subterráneas no logran compensar.

5.2 Parámetros físicos, químicos y biológicos

Podemos considerar a la Laguna de Aculeo como a un sistema conformado en base a compartimentos, o sea el agua, el vaso que la contiene, el compartimento biológico y el entorno de la laguna. Sin embargo no se trata de compartimentos estancos; sino que existe una serie de interacciones entre ellos. Esta situación obliga a analizar los resultados obtenidos para los diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos como un conjunto. Es un hecho que las características que presenta la Laguna de Aculeo la hacen tender a que en determinadas épocas del año se le pueda clasificar como hipertrófico (Mur, 1980). Hipertrófia es un enriquecimiento de nutrientes hasta niveles extremadamente altos lo que provoca un fuerte incremento de la biomasa microalgal y una disminución del número de especies que habitan el lago. La característica mas sorprendente de un lago hipertrófico es la existencia de algunas o una especie dominante. Para la Laguna de Aculeo se trata de una cianobacteria (alga verde-azul), Microcystis sp. Hemos visto que la calidad del agua de la laguna se ve influenciada por las características morfológicas de la cuenca así como el régimen de vientos. Este último parámetro puede resultar muy importante en cuanto a fluctuaciones de temperatura y de la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Es así como un período de calma prolongado en la laguna puede conducir al agotamiento del oxígeno disuelto en el agua, lo cual en casos extremos podría

resultar en mortalidades masivas de peces (Vila, 1982; Vila et al. 1983). Este agotamiento se ve favorecido por altas tasas de degradación de materia orgánica (Mühlhauser et al. 1987), la cual se encuentra muy concentrada en el perfil de sedimentos (véase Tabla 4 y Figs. 24a y 24b). Si consideramos que parte de la materia orgánica sedimentada es degradada por los microorganismos presentes a través de una vía oxidativa, utilizando oxígeno como aceptor final de electrones, entonces se liberará como producto final de oxidación CO_2 en cantidades importantes. Este CO_2 en parte se disuelve en el agua acidificando el pH y en parte se pierde hacia el compartimento atmosférico. Esta acidificación del pH en el agua suprayacente se observa mejor en las mediciones efectuadas en la estación 5 en profundidad. Sin embargo el pH en la columna de agua resulta alcalino la mayor parte del tiempo. El pH en los ecosistemas acuáticos está generalmente regulado por un sistema tampón llamado del carbonato ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2$). En un lago hipertrófico o con tendencia a la hipertrofia como es el caso de Aculeo el pH alcalino es la regla (Margalef, 1984). Esto se explica como sigue: De acuerdo al pH existente en el lago, este es regulado por CO_2 en lagos ácidos (pH menor que 4.0); HCO_3^- en condiciones neutras a ligeramente alcalinas (pH 7-9) y CO_3^{2-} en condiciones fuertemente alcalinas pH 12 o más. En Aculeo el conjunto de macroelementos es ampliamente dominado por el bicarbonato y no por el CO_2 a pesar de que se pue-

de inferir una alta tasa de producción en los sedimentos. Sin embargo la gran biomasa algal presente en la laguna consumirá todo este CO_2 disuelto en el agua durante su proceso fotosintético, provocando incluso un déficit de CO_2 a nivel superficial, lo cual obliga a la entrada de CO_2 desde el compartimento atmosférico hasta restablecer el equilibrio. Este déficit de CO_2 provoca el viraje de pH y del sistema carbonato hacia valores alcalinos y predominancia de HCO_3^- (Golterman, 1975). En términos comparativos con otros lagos someros (Löffler, 1979; Löffler y Newrkla, 1985; Barica y Mur 1980) la conductividad de la Laguna de Aculeo es moderada y relativamente estable a través del tiempo. Esta conductividad se explica principalmente por los macrocomponentes presentes. Los valores de concentración de macrocomponentes encontrados fueron ligeramente superiores a los descritos para esta laguna por Sancha et al. (1977).

Las altas concentraciones de compuestos nutrientes observados en la Laguna de Aculeo (Fig. 25a-25f; 26a-26f) son típicas de lagos eutróficos e hipertróficos (Wetzel, 1983). Pero no debe descartarse el hecho de que el fósforo es un nutriente limitante (Margalef, 1984) del crecimiento algal en la laguna en determinadas épocas del año. Estas son difíciles de detectar con un muestreo mensual. Sin embargo este déficit debiera producirse a fines del invierno y en primavera cuando la biomasa fitoplanctónica se incrementa y el consumo de fósforo aumenta notablemente. Por

otra parte el nitrato también podría ser limitante en algunas épocas del año, principalmente en primavera. Sin embargo la presencia de cantidades apreciables de amonio durante todo el período muestreado nos permitirían inferir que el nitrógeno no es limitante en la medida que pueda serlo el fósforo. Por otra parte es sabido de que los sedimentos pueden actuar como una trampa de fósforo en condiciones óxicas y de potenciales redox altos (Uhlmann, 1975), limitando de este modo la disponibilidad de este elemento para el fitoplancton en la columna de agua. Las bajas concentraciones de sílice encontradas son consecuentes con poblaciones de microalgas diatomeas mas bien reducidas las cuales desarrollan una cubierta silicea de protección.

La comunidad fitoplanctónica de Laguna de Aculeo se encuentra dominada por Microcystys sp. la mayor parte del año, existiendo una variedad de otras especies en concentraciones menores. Sin embargo la composición por especies ha variado si comparamos estudios realizados en la última década (Sancha et al. 1977; Mählhauser y Vila, 1986). Los valores de concentración de clorofila "a" en la laguna resultan comparables con los descritos para otros lagos eutróficos e hipertróficos (Dokulil, 1979; Barica y Mur 1980; Margalef, 1984). De acuerdo a Margalef (1984) en sistemas eutróficos la producción primaria aumenta, pero solo hasta un límite definido por la absorción de la luz por la propia clorofila, lo cual significa

que en la Laguna de Aculeo el aumento de clorofila (población microalgal) no necesariamente llevará aparejado un aumento de productividad primaria en la misma escala en toda la columna de agua. Por otro lado la concentración de algas (clorofila a) determina en gran medida el coeficiente de extinción de la luz en el agua y por lo tanto la dimensión de la zona fótica (Wetzel, 1983). Sin embargo en Aculeo el promedio anual de la zona fótica no es mayor que 1,5 m. Por lo tanto los organismos fotosintetizadores no estarían limitados por luz, ya que para los elevados valores que se registraron en la laguna incluyendo invierno debe existir una condición de mezcla o circulación de la columna de agua en la que el viento adquiere una importancia primaria. Comparando con otros lagos someros; Steinhuder Meer y Dümmersee (Reinhardt, 1980); Wintergreen Frederidsborg (Wetzel, 1983), se reportan valores similares a Aculeo de productividad primaria. Respecto del índice trófico de Carlson (TSI) se puede deducir que la laguna presenta una dinámica bastante notable a través del año y puesto que los valores de los parámetros medidos en Enero 1986 y Enero 1987 son diferentes en un grado mayor al esperado; podemos inferir que pueden existir ciclos que se prolongan por más de un año calendario y que en el lapso de tiempo que duro este estudio no se alcanzaron a observar.

De acuerdo a Carlson (1977) la prioridad en la clasificación del índice trófico esta dada primariamente

por los parámetros biológicos, en este caso la clorofila. Este índice se mantiene a través del año, de tal modo que la variabilidad que distingue dos períodos viene mas bien producida por el disco Secchi y el fósforo total. De este modo si damos mayor peso a la clorofila como índice la laguna de Aculeo se encontraría en el extremo superior de la escala de TSI siendo por lo tanto un lago con un alto grado de eutroficación o hipertrófico. Sin embargo si consideramos la variación observada en los TSI de fósforo total y disco Secchi, la laguna alcanzaría condiciones hipertróficas solamente de Enero a Mayo de 1986 y permanecería eutrófica en el resto del período analizado. Finalmente se debe aclarar que un índice de estado trófico no es lo mismo que un índice de calidad de agua (Carlson, 1977), ya que el término calidad implica un juicio subjetivo que no se corresponde con el concepto objetivo de estado trófico.

5.3 Efecto del uso de la tierra

El uso de la tierra en el entorno de la Laguna de Aculeo es un factor muy importante en el diagnóstico de la calidad del cuerpo de agua, puesto que este recibe directamente la influencia de la actividad antrópica a su alrededor (Mühlhauser y Vila, 1987). Es un hecho conocido que el rápido incremento en el uso de la tierra alrededor de los lagos y el flujo considerable de materia-

les disueltos y particulados desde estas tierras resulta en el deterioro de los cuerpos de agua en que estos materiales se acumulan (Duncan y Rzoska, 1980). Por otra parte mientras en el pasado se ha magnificado la importancia de los desechos vertidos por alcantarillas y efluentes industriales hoy en día se ha visto que las actividades agrícolas especialmente incremento de la fertilización y el turismo pueden contribuir significativamente al deterioro de la calidad de ríos, lagos y embalses. La laguna de Aculeo no escapa a esta acción, el uso de fertilizantes en los cultivos alrededor de la laguna unido a la pobre circulación y largo tiempo de residencia de la masa de agua contribuyen a una acumulación de materias fertilizantes, principalmente fosforados y nitrogenados en la laguna. Por otra parte el uso del cuerpo de agua en actividades de recreación contribuye en alguna medida al reciclamiento interno de nutrientes. Mediciones hechas en los Esteros Pintué y Sta. Marta en época de afluencia, indican valores de nutrientes menores que en el agua de la laguna.

Por otra parte mediciones de nutrientes y macrocomponentes en aguas de riego que vienen devuelta a la laguna luego de pasar por los cultivos presentan valores de concentración mayores que el agua de la laguna.

6. Conclusiones y recomendaciones

- La laguna de Aculeo corresponde a un sistema eutrófico con tendencia a la hipertrofia y con un TSI alto.
- Este nivel trófico tiene causas naturales como: la morfometría de la cuenca la evaporación y el régimen de residencia del agua en la laguna y causas centradas principalmente en el uso de la tierra (actividades agrícolas y de recreación alrededor y en el cuerpo de agua).
- Los resultados obtenidos en un período de 13 meses permiten inferir que la dinámica de la laguna se extiende en ciclos mayores que un año. Los procesos en el interior de la laguna están regulados por dos eventos, la dilución por precipitaciones invernales y aquella provocada por el incremento del flujo de agua de los esteros producto de los deshielos de primavera.
- La alta concentración de nutrientes tanto nitrogenados como fosforados en el interior de la laguna a lo largo del año, indica que la probabilidad de existencia de un elemento limitante al crecimiento algal es reducida, aunque por el sistema de muestreo (una vez al mes) no se puede descartar una limitación en tiempos mas cortos (muestreos diarios o semanales).
- El tiempo de residencia largo del agua favorece el reciclamiento interno y la acumulación de materia orgánica y nutrientes en la laguna.

- El viento ejerce una acción primordial en este reciclamiento al provocar la mezcla de la columna de agua y favorecer el intercambio agua-sedimento de nutrientes.
- La concentración de clorofila a fue homogénea en el perfil vertical y en los 3 sectores del lago. Sin embargo, los muestreos extensivos pueden mostrar una notable heterogeneidad causada fundamentalmente por acumulación de biomasa hacia el NE causada por la acción del viento SW.

La alta productividad primaria es el resultado de una zona fótica proporcionalmente desarrollada comparada con la profundidad media de la laguna y la mezcla de la columna de agua. Las fluctuaciones anuales deberán ser explicadas por la composición o actividad específica del fitoplancton ya que las variaciones de abundancia de la especie dominante Microcystis no permiten explicar los máximos que se producen en verano y primavera.

A continuación se entrega una serie de recomendaciones, las cuales creemos son necesarias de considerar en un marco de conservación y manejo de este sistema léntico.

Se recomienda:

- Realizar el balance hídrico de la laguna, lo cual permitiría el cálculo del presupuesto de nutrientes (entradas y salidas) del sistema.
- Siendo el viento un parámetro importante en el desarrollo de procesos en el interior de la laguna, se recomienda la instalación de un anemografo en el área de este cuerpo léntico.
- Instalar un segundo limnómetro en la orilla norte en la zona de máxima profundidad de la laguna.
- Repetir en forma estacional y a lo menos por dos años los muestreos de variables como nutrientes fosforados y nitrogenados, clorofila y disco Secchi, pero con un rango menor que mensual, de tal modo de registrar cambios de corto plazo que permitan inferir acerca de: ciclos de eventos temporales en la laguna; procesos como época mas probable de florecimiento de microalgas; efecto del recambio de agua y efecto de lluvias y deshielos.
- Estudiar cuantitativamente la influencia del uso de la tierra sobre la laguna especialmente en lo que se refiere al transporte (runoff) de nutrientes desde las áreas agrícolas alrededor del cuerpo de agua.

- No se vislumbra una solución simple y a corto plazo para el control del incremento de algas que se produce en el verano-época en que la laguna es mayormente utilizada como lugar de recreación, lo cual debiera ser materia de estudio.
- Oficiar a la Municipalidad de Paine en torno a la necesidad de establecer un programa de estudios de la laguna que permitan el diseño de una línea basal para un plan de conservación y manejo.

7. Referencias bibliográficas

- American Public Health Association. 1980. Standard Methods for the examination of water and waste water.
- Balbontín, R. Labra, P. y Valdes, J. 1982. Lagunas, embalses y tranques en relación a la Región Metropolitana. Seminario, Santiago, Universidad de Chile F.A.U. Depto de Urbanismo 145 pp ilustraciones y planos.
- Barica, J. y Mur, L.R. 1980. Hypertrophic Ecosystems Developments in Hydrobiology. Dr. W. Junk Publishers, The Hague.
- Boisier, I. 1966. La Laguna de Aculeo como satélite balneario de la ciudad de Santiago, Seminario F.A.U., Universidad de Chile. 21 láminas y 6 cuadros.
- Cabrera, S. y Montecino, V. 1982. Eutrophy in lake Aculeo, Chile. Plant and Soil. 67 : 377-387.
- Cabrera, S. 1984. Estimación de la concentración de clorofila a y feopigmentos (revisión). En: Embalses, Fotosíntesis y Productividad primaria. Ed. N. Bahamonde y S. Cabrera. Alfa-Beta Impresores : 189-200.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr. 22 : 361-369.

- CIREN (Corfo). 1964. Mosaico. Suelos: Descripciones. Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID. 391 pp.
Serie: Aculeo AV 565/w IIIr.
- Covacevich, V. 1975. Faunas fósiles neocomianas del área Melipilla-Aculeo. Cordillera de la costa, Provincia de Santiago. Inst. Invest. Geol. (inédito) 21 pp. Santiago.
- Dokulil, M. 1979. Seasonal pattern of phytoplankton. En: Löffler, H. Ed. Neusiedlersee the Limnology of a shallow lake in Central Europe. Dr. W. Junk, The Hague 37 : 543 pp.
- Duncan, N. y Rzoska, J. 1980. Land use impacts on lake and reservoir ecosystems. Facultas-Verlag, Wien. 294 pp.
- Golterman, H.L. 1975. Physiological Limnology. Elsevier Sc. Co. Amsterdam 489 pp.
- Golterman, H.L., R.S. Clymo y M.A.M. Ohnstad. 1978. Methods for Physical & Chemical Analysis of Freshwaters (Blackwell, Oxford) 2.ed.
- Gonzalez, I. y S. Rívano. 1979. Yacimiento de Dumortierita en la zona de Aculeo, Región Metropolitana.
En: Actas II Congreso de Geología Chileno Tomo II p: C295-C306.

- Hutchinson, G.E. 1975. A Treatise on Limnology. Volume I. Geography, Physics and Chemistry. Part 1. John Wiley & Sons. New York 540 pp.
- Jeffrey, W.W. y Humphrey, G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants algae and natural phytoplankton. Biochemie u. Physiologie d. Pflanzen. 167 : 191-194.
- Lerman, A. 1979. Geochemical Processes, Water and Sediment Environments. John Wiley & Sons, New York. 481 pp.
- Marqalef, R. 1984. Limnología. Edit. Omega, Barcelona. 1010 pp.
- Marker, A. Nusch, E.A., Rai, H. & Riemann, B. 1980. The measurement of photosynthetic pigments in freshwater and standardization of methods: Conclusions and recommendations. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 14 : 91-106 Stuttgart.
- Megard, R.O. Settles, J.C., Boyer, H.A. Combs, Jr. W.S. 1980. Light Secchi disks, and trophic states. Limnol. Oceanog. 25 (2) : 373-377.
- Montecino, V. 1981. Estimación de la productividad primaria en el embalse Rapel y su metodología. Not. Mens. Mus. Nac. Hist. Nat. Chile 293 : 3-11.
- Mühlhauser, H. 1982. Charakterisierung des Porenwassers und der Sedimente mit besondere Berücksichtigung der Chemisch-bakteriologischen Merkmale des Neusiedlersees. Ph.D. Dissertation, Univ. Wien. Formal und Naturwissenschaftlichen Fakultät. 153 pp.

- Möhlhauser, H. Vila, I. y Peñaloza, R. 1986. Aportes naturales y antrópicos a la hipertrofia de la Laguna de Aculeo. 2. Encuentro Científico del medio ambiente. CIPMA. Talca, 4-8 Agosto. Tomo I. p. 222-232.
- Möhlhauser, H. Soto, L. y Zahradník, P. 1986. Improvement of the Kjeldahl Method for Total Nitrogen Including Acid-Hydrolyzable Phosphorus Determinations in Freshwater Ecosystems. Intern. J. Environ. Anal. Chem. 28 (3) : 1-12.
- Möhlhauser, H. y Vila, I. 1987. Estudio de caso. Eutrofización, impacto en un ecosistema acuático montañoso. Arch. de Biol. y Med. Exp. 20 (en prensa).
- Mur, L.R. 1980. Concluding Remarks. En: J. Barica y L.R. Mur, Edts. Hypertrophic Ecosystems. Dr. W. Junk, The Hague.
- Nasi, C. y R. Thiele. 1982. Estratigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la Costa, al sur del río Maipo, entre Melipilla y Laguna de Aculeo (Chile Central). Rev. Geol. de Chile 16 : 81-99. 5 figuras.
- Rebsdorf, A. 1972. The Carbon Dioxide System in Freshwater. A set of Tables for easy computation of total carbon dioxide and other components of the carbon dioxide system. Freshwater Biological Laboratory 3400 Hillerød Denmark.

- Reinhardt, E. 1980. Primary productivity measurements and carbon metabolism in Steinhuder Meer and lake Dümmer, in *Developments in Hydrobiology: Shallow lakes* (Ed. M. Dokulil, H. Metz & Jewson) 3 : 11-18.
- Sancha, A.M., Castillo, G. y Thiers, R. 1977. Estudio limnológico de la Laguna de Aculeo. Factibilidad de uso del agua en riego y recreación. Publicación I-44. Pac. de Cs. Fis. y Mat. Depto. Obras Cíviles. 25 pp. Santiago.
- Stemann-Nielsen, E. 1952. The use of radio-active carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer* 18 : 117-140.
- Talling, J.F. 1973. The application of some electrochemical methods to the measurement of photosynthesis and respiration in freshwaters. *Freshwat. Biol.* 3 : 335-362.
- Uhlman, D. 1975. *Hydrobiologie*. Gustav Fischer Verlag, Jena 345 pp.
- Valteer, C. y O. Torres. 1933. Informe sobre el mineral de Aculeo. En: *Boletín minas y petróleo* 23 : 177-182.
- Vila, I., Saul, C. y Mühlhauser, H. 1982. Eutrophication of a lake in Central Chile and its impact on the structure of fish and planktonic communities. XXI Reunion Societas Internationalis Limnologiae 21-28.8.1982 Lyon Francia.

- Vila, I., Montecino, V. Mühlhauser, H. y Cabrera, S. 1986. Diagnóstico y evaluación del potencial biológico de lagos naturales y artificiales de Chile Central. *Amb. y Des.* 2 (1) : 127-137.
- Vollenweider, R.A. 1974. IBP Handbook N°12. Primary Production in Aquatic Environments. Blackwell. Oxford.
- Wetzel, R. 1983. Limnology (2nd Ed.) Saunders Co. USA. 767 pp.
- Zahradnik, P. 1981. Methods for chemical analysis of in Land waters. Limnologisches Institut Osterreichische Akademie der Wissenschaften, Austria.

8. Resumen

La Laguna de Aculeo ubicada en la región Metropolitana, 60 km al SW de la ciudad de Santiago, presenta un estado de eutroficación. En este ecosistema acuático se observan estacionalmente florecimientos o aumentos desmesurados de microalgas, fluctuaciones extremas en la calidad de agua y agotamiento ocasional del oxígeno disuelto en el agua, lo cual ha resultado en mortalidades masivas de peces. Durante 1986 se ha realizado un estudio de este ecosistema en el marco de un convenio entre la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias y la Dirección General de Aguas con la finalidad de diagnosticar el estado actual de la laguna, determinando y evaluando los factores que concurren a hacer de este cuerpo de agua un lago eutrófico. Los resultados preliminares de la investigación que se inició en Enero de 1986 ,sumado a resultados de muestreos realizados con anterioridad a esta fecha, sugieren la participación tanto de características naturales como de actividades humanas en la conformación de la situación actual de la laguna.

T A B L A S

Tabla 1. Morfometría Laguna de Aculeo (cota de verano)

Longitud máxima	(l)	5,78 km
Ancho máximo	(b)	2,96 km
Ancho medio	(\bar{b})	2,15 km
Volumen	(V)	$41,79 \times 10^6 \text{ m}^3$
Area	(A_0)	$12,443 \text{ km}^2$
Area insular	(A_1)	$0,048 \text{ km}^2$
Profundidad máxima	(Z_m)	5,0 m
Profundidad media	(\bar{z})	3,35 m
Profundidad relativa	(Z_r)	0,12
Longitud línea de costa (L)		20,666 km
Desarrollo línea de costa (DL)		1,46
Desarrollo del volumen (D_v)		2,01

Tabla 2. Tablas de curvas hipsográficas y volumétricas de la Laguna de Aculeo (Enero, 1986).

Area (m^2)

Cota	Area (km^2)	Acumulado (km^2)	% Area	% Acumulado
0	12,443	12,443	25,37	25,37
1	11,612	24,055	23,68	49,05
2	10,126	34,180	20,65	69,70
3	8,014	42,194	16,34	86,04
4	5,340	47,534	10,90	96,94
5	1,502	49,036	3,06	100,00

Volumen (m^3)

Cotas	Volumen ($10^6 m^3$)	Acumulado ($10^6 m^3$)	% Volumen	% Acumulado
0-1	12,025	12,025	28,77	28,77
1-2	10,860	22,885	25,99	54,76
2-3	9,049	31,934	21,65	76,41
3-4	6,632	38,566	15,87	92,28
4-5	3,224	41,79	7,71	99,99

Tabla 3. Alcalinidad total y de fenoftaleína (mval) en la estación 5 (0 y 2 m) y estación 9 y 13 (0 m).

Estación Prof. (m)	5		9		13			
	0.0-0.5		2.0		0			
	Alcalinidad fenoftaleína total		Alcalinidad fenoftaleína total		Alcalinidad fenoftaleína total			
Enero	0.4	1.24	0.3	1.26	-	-	-	--
Febrero	0.14	2.20	0.18	2.3	-	-	-	-
Marzo	0.38	2.42	0.28	2.34	-	-	-	-
Abril	0.50	2.36	0.44	2.40	-	-	-	-
Mayo	0.14	2.36	0.24	2.28	0.12	2.28	0.24	2.34
Junio	0.0	1.90	0.0	1.88	0.0	1.80	0.0	1.88
Julio	0.12	1.68	0.12	1.72	0.12	1.68	0.18	1.84
Agosto	0.20	1.84	0.0	1.80	0.20	1.80	0.24	1.88
Septiembre	0.10	1.81	0.0	1.82	-	-	-	-
Octubre	0.12	1.88	0.12	1.96	-	-	-	-
Noviembre	0.18	2.04	0.16	1.98	0.32	2.04	0.36	2.0
Diciembre	0.32	1.98	0.32	2.00	0.32	2.08	0.40	2.16
Enero	0.36	2.12	0.30	2.14	0.40	2.16	-	-

Tabla 4. Consumo béntico de oxígeno en la degradación de materia orgánica sedimentada en Laguna de Aculeo. 1986. (*)

Epoca	Temperatura in situ °C	Consumo neto de O ₂ g m ⁻²	Fecha de la medición
otoño	17	1,12	23.04.86
invierno	13,5	0,69	17.07.86
primavera	17	2,67	16.10.86
verano	25,5	4,79	23.12.86

(*) Las muestras de sedimento para las mediciones de consumo de O₂ se tomaron en el área mas profunda de la laguna donde la acumulación de materia orgánica resulta mayor.

Tabla 5. Resultados del cálculo de estado trófico (TSI) de la Laguna de Aculeo según Carlson (1977)

Período	Rango meses	Variable considerada/unidad	Promedio	TSI*
I	Enero-Mayo 1986	Disco Secchi (m)	0,21	80-90
		Clorofila <u>a</u> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	101,26	70-80
		Fósforo total ($\mu\text{g l}^{-1}$)	130,96	70-80
II	Mayo-Enero 1987	Disco Secchi (m)	0,66	60-70
		Clorofila <u>a</u> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	44,4	60-70
		Fósforo total ($\mu\text{g l}^{-1}$)	59,43	60-70

* Trophic State Index.

FIGURAS

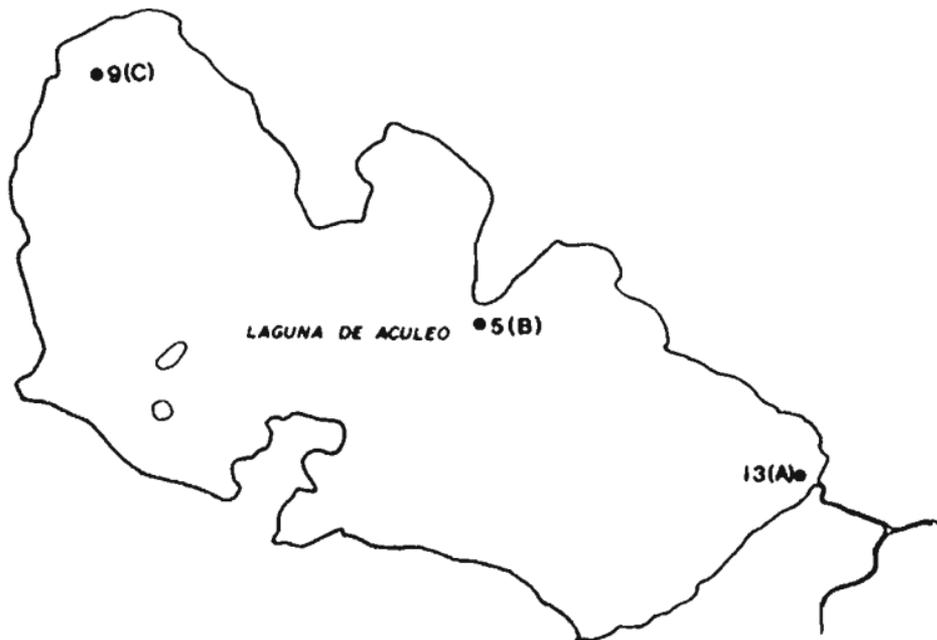


Fig. 1. Estaciones de muestreo en la Laguna de Aculeo.
(véase acápite 3.1.2 para mayor detalle).

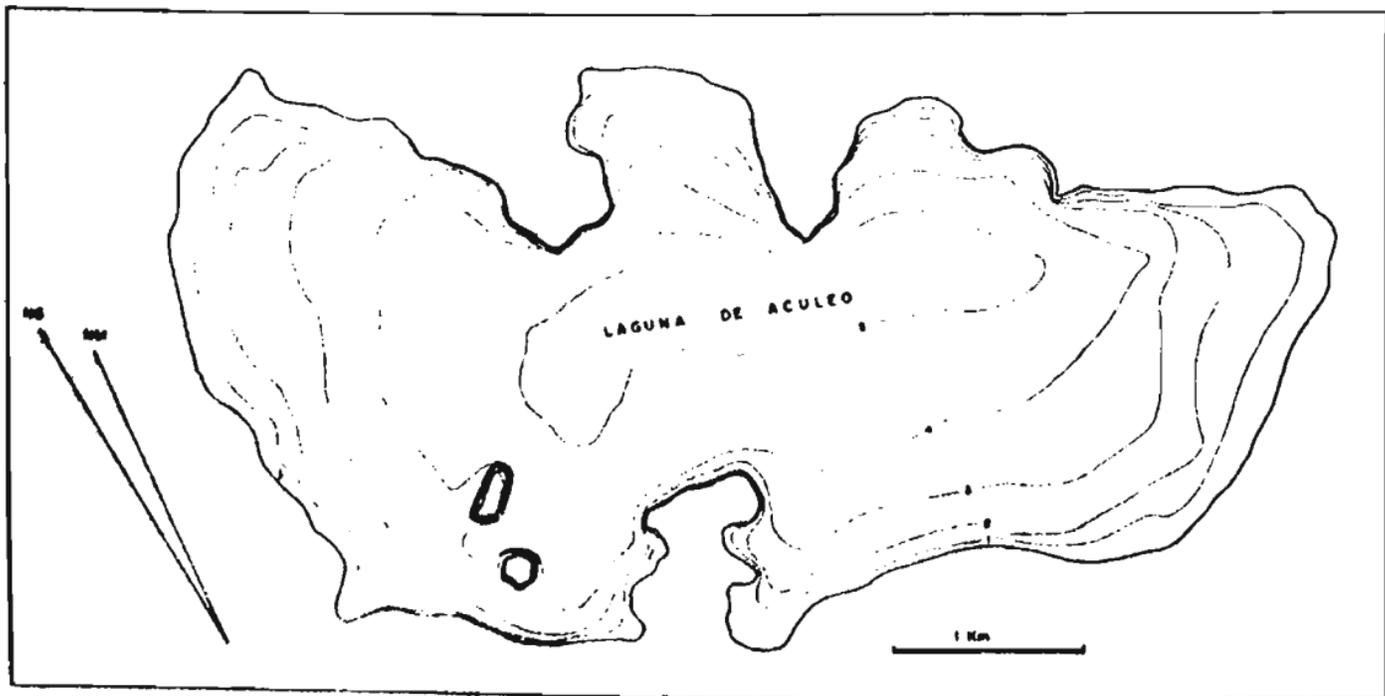


Fig. 2. Mapa batimétrico de la Laguna de Aculeo. Isopletas cada metro de profundidad.

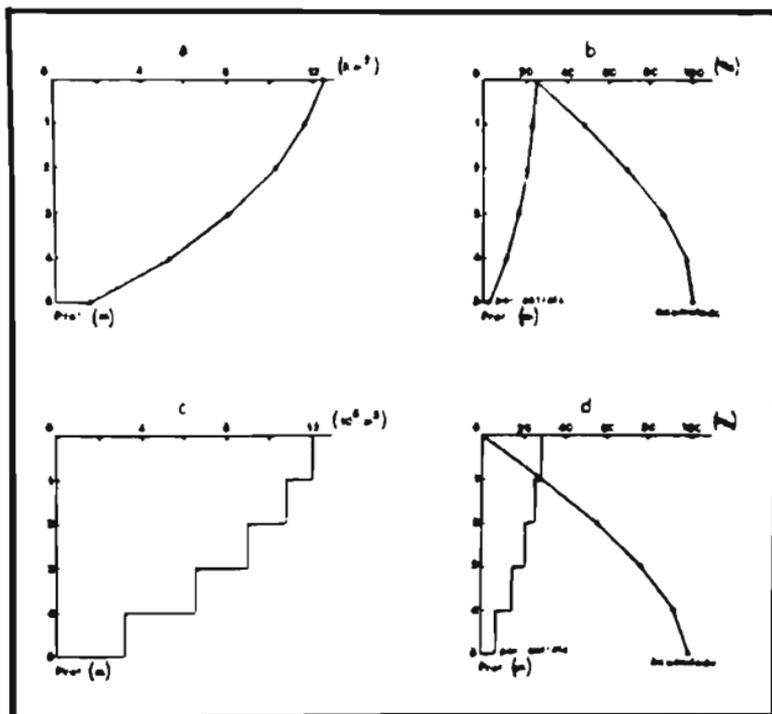


Fig. 3. Curvas hipsográficas y de volumen de la Laguna de Aculeo.

a : área por estrato (km^2)

b : área por estrato y acumulado (%)

c : volumen por estrato (10^6m^3)

d : volumen por estrato y acumulado (%)

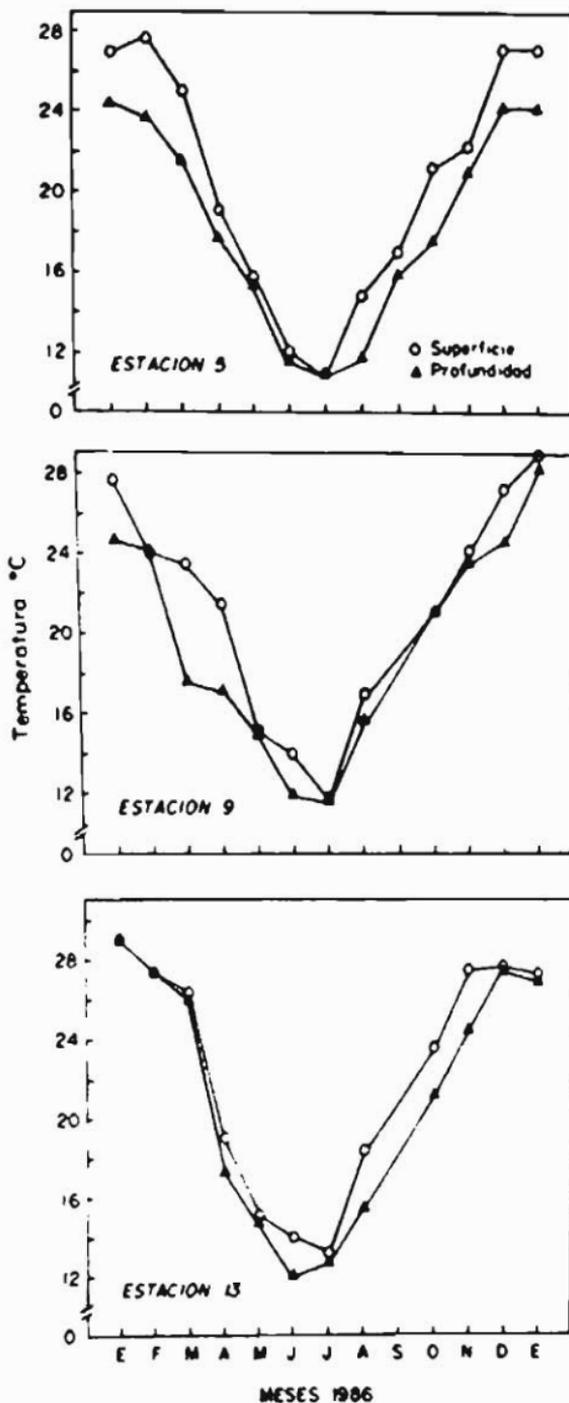


Fig. 4. Distribución de la temperatura en superficie y profundidad de la Laguna de Aculeo durante 1986.

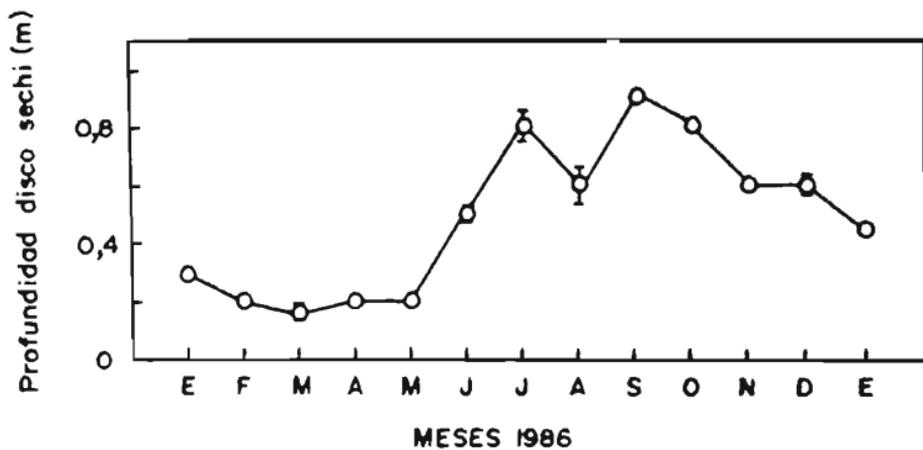


Fig. 5. Distribución de la profundidad de disco Secchi en la Laguna de Aculeo durante 1986.

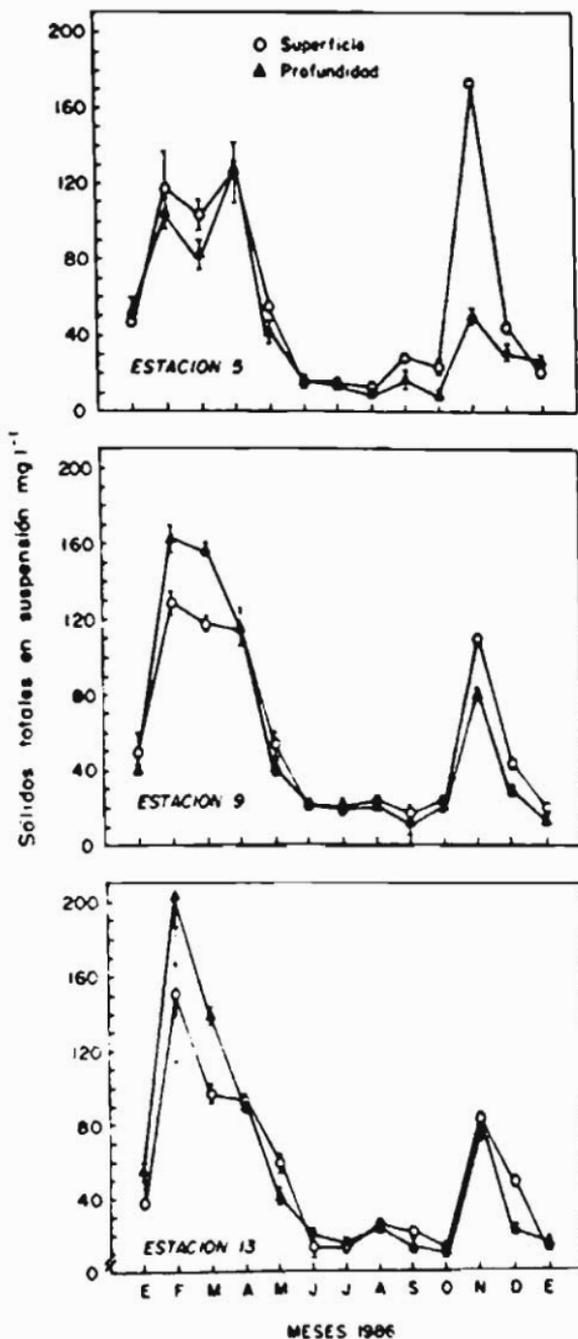


Fig. 6. Distribución de sólidos totales suspendidos en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

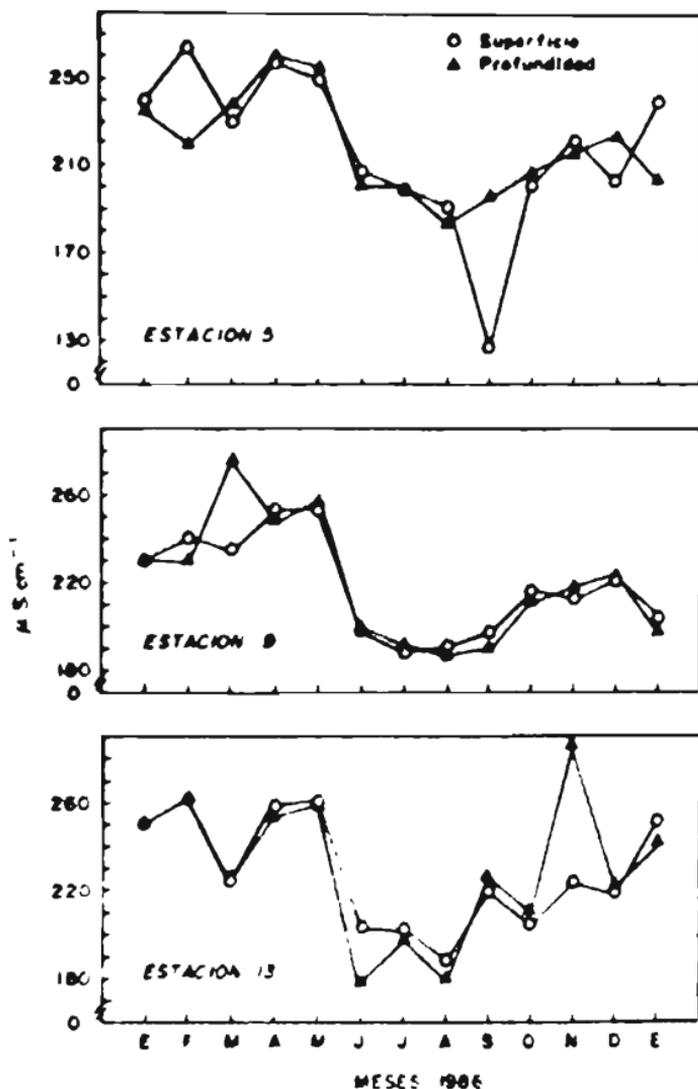


Fig. 7. Distribución de la conductividad en superficie y profundidad de la Laguna de Aculeo durante 1986.

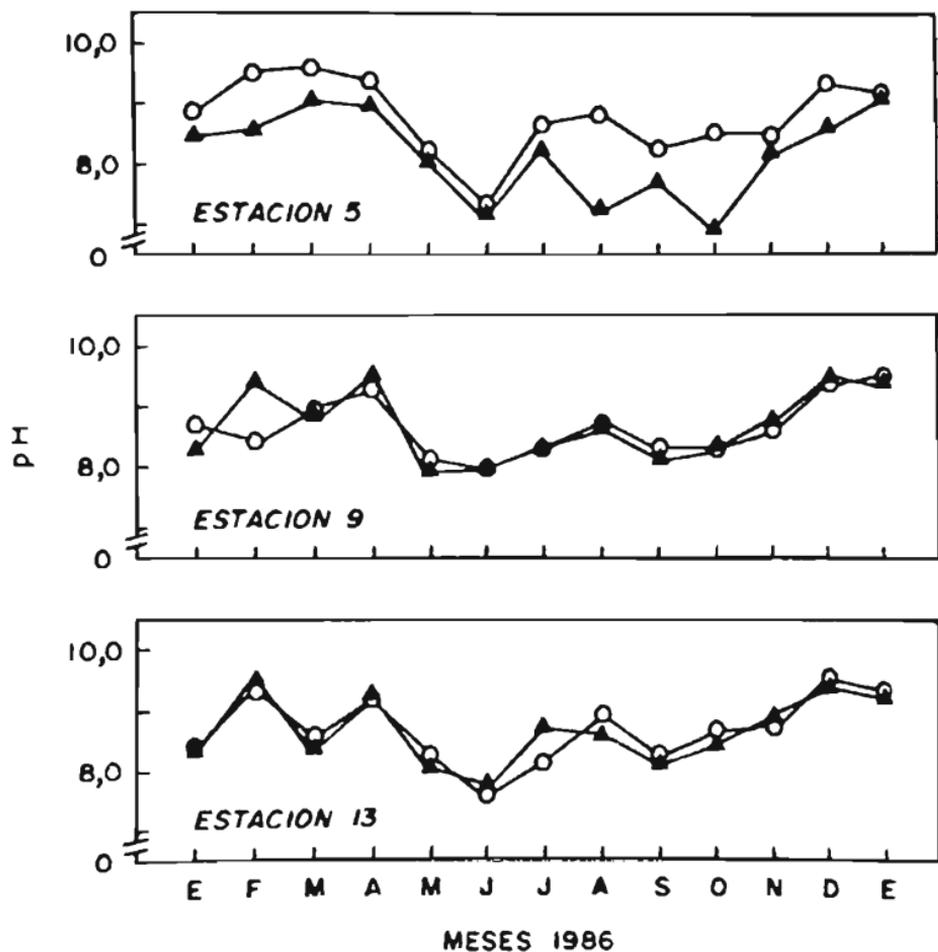


Fig. 8. Distribución del pH en superficie y profundidad de la Laguna de Aculeo durante 1986.

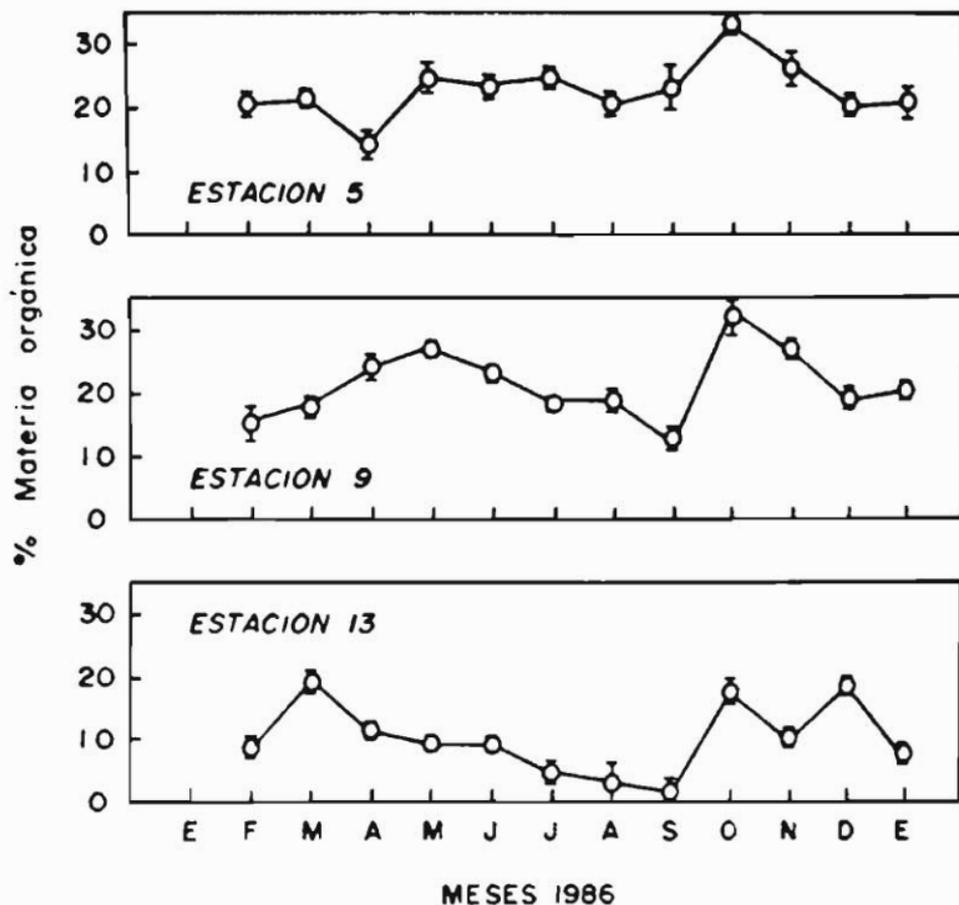


Fig. 9. Distribución de materia orgánica en sedimentos de la Laguna de Aculeo. Promedio de los tres primeros cms durante 1986.

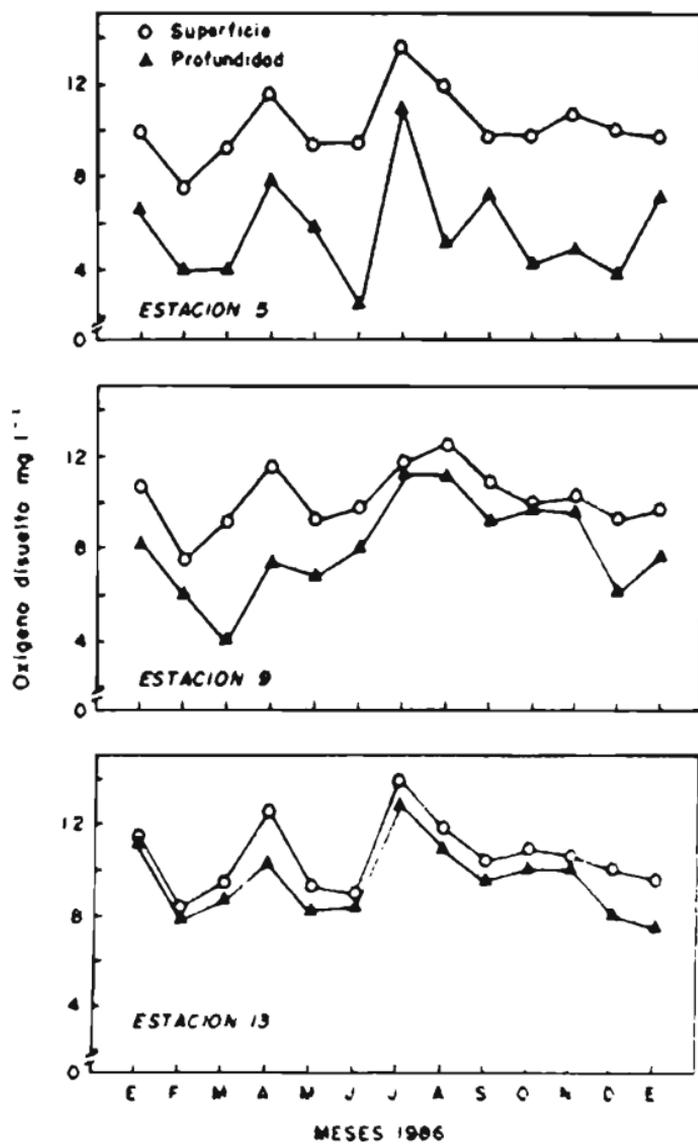


Fig. 10. Distribución de oxígeno disuelto en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

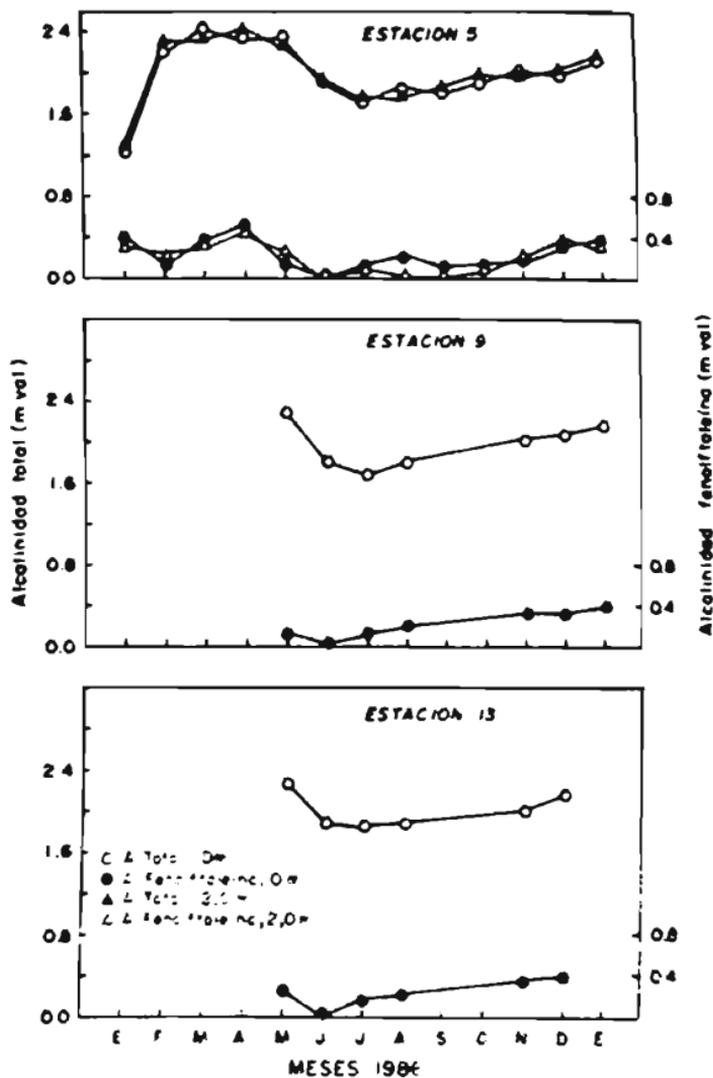


Fig. 11. Distribución de la alcalinidad en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

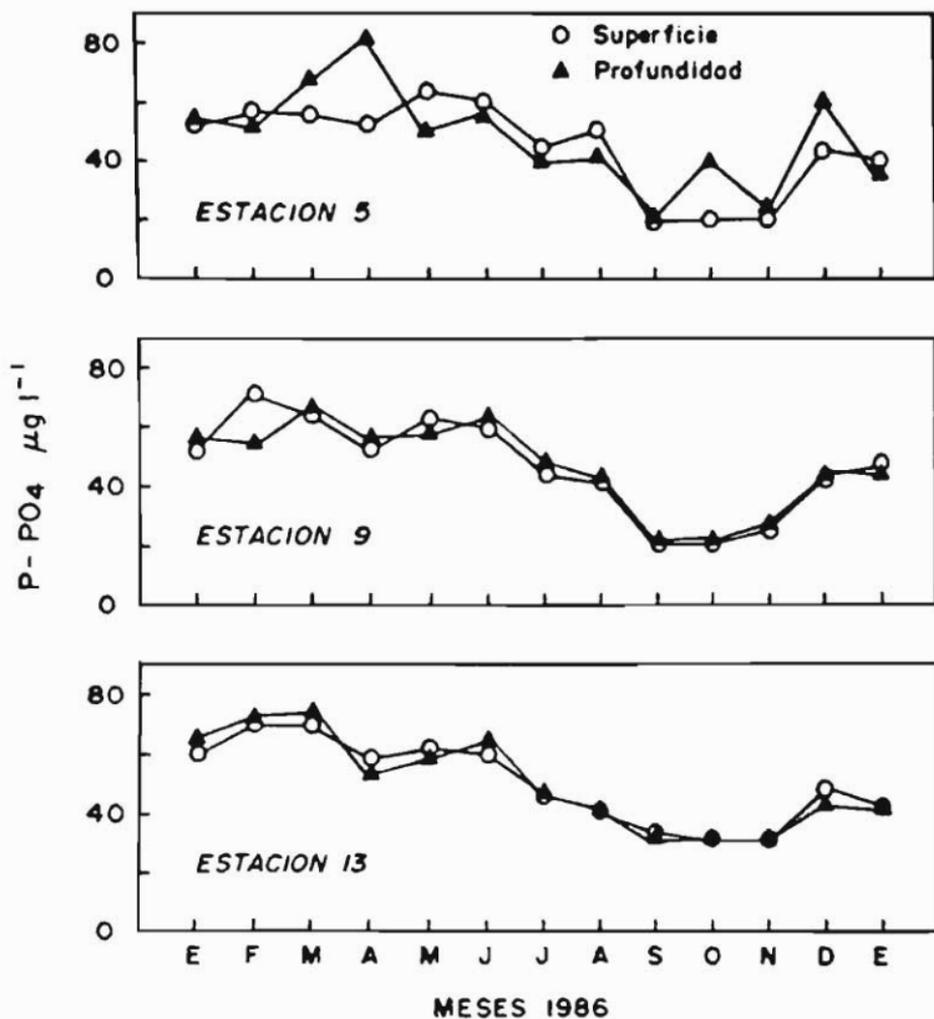


Fig. 12. Distribución de ortofosfato en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

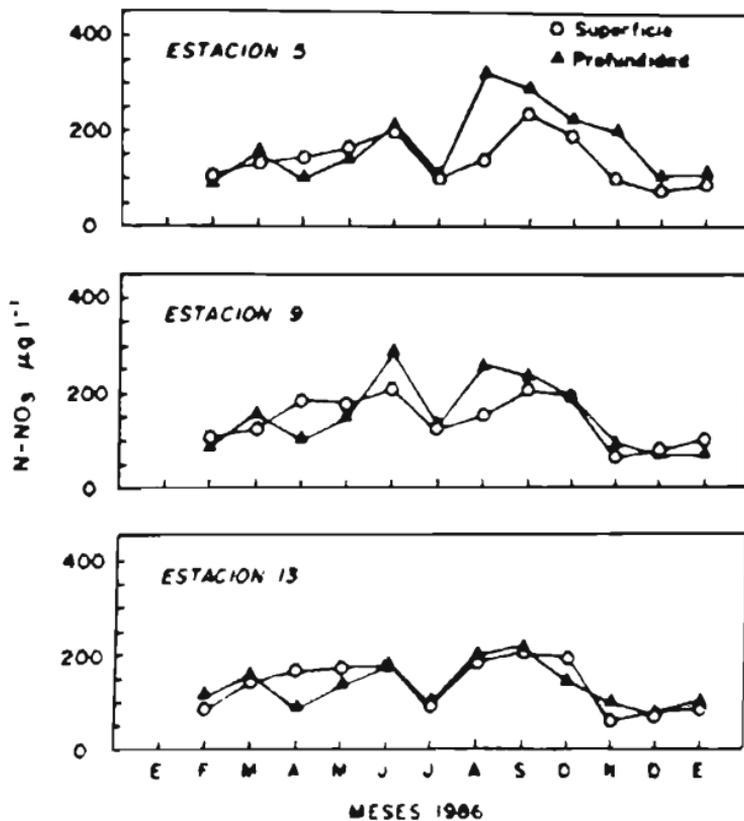


Fig. 13 Distribución de nitrato en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

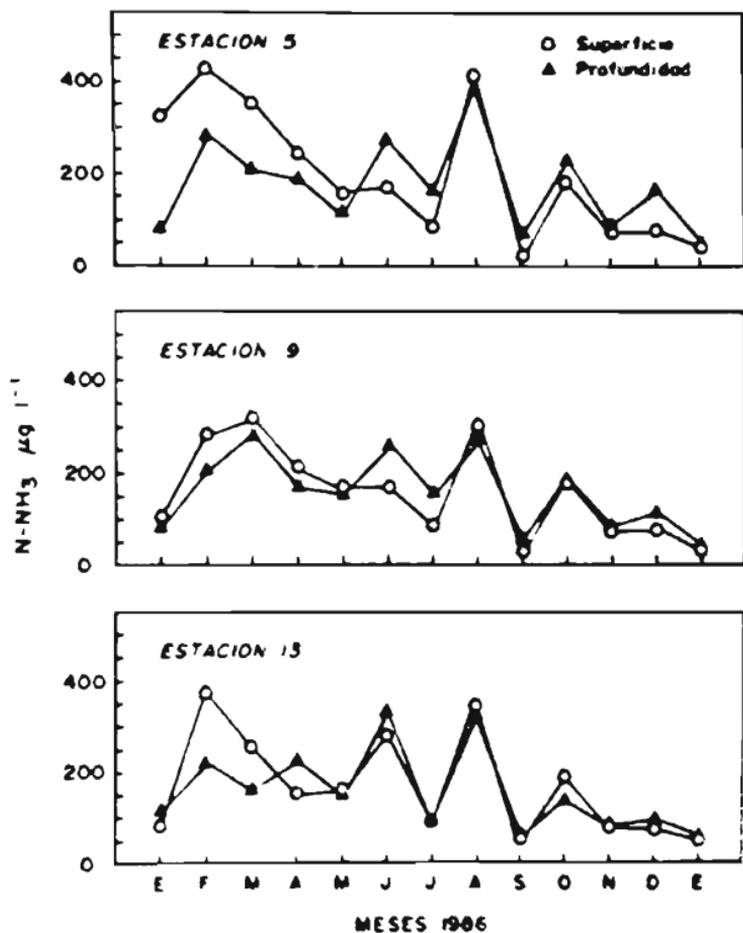


Fig. 14. Distribución de amonio en superficie y profundidad en la Lacuna de Aculeo durante 1986.

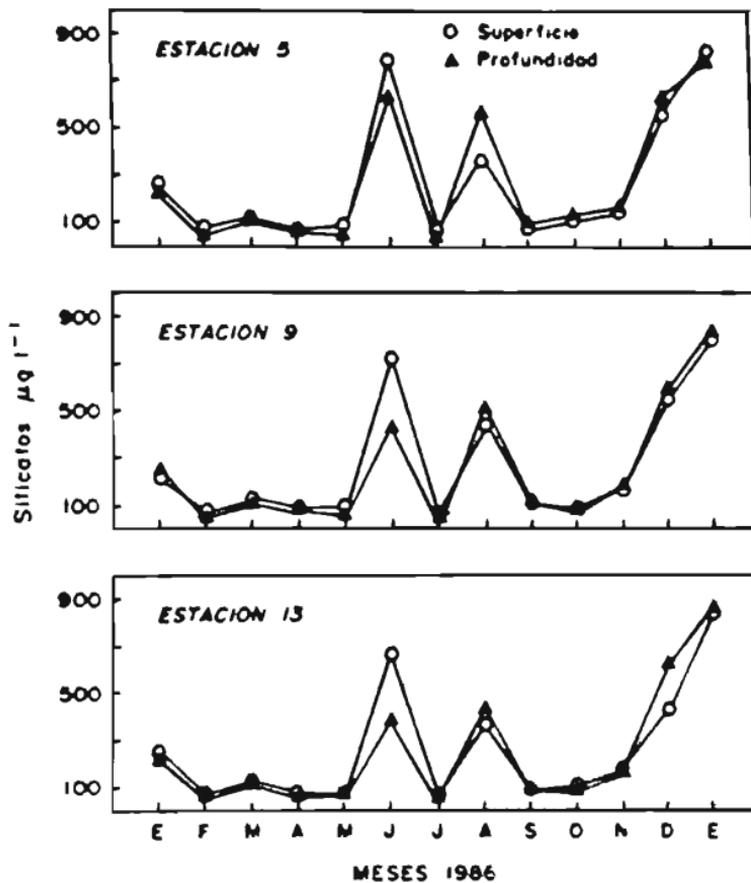


Fig. 15 Distribución de silicatos en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

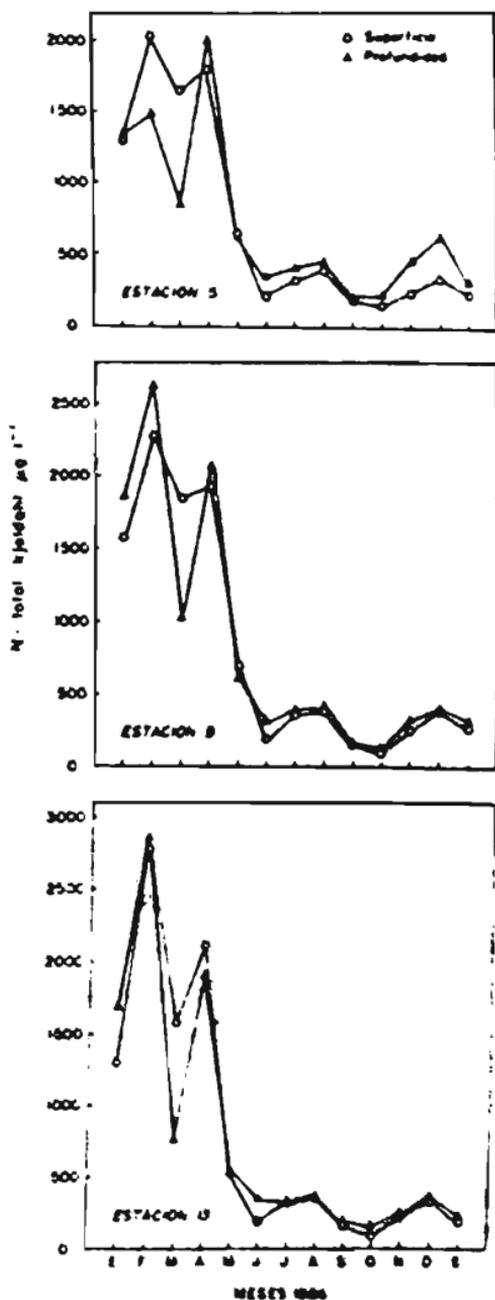


Fig. 16. Distribución de nitrógeno total en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

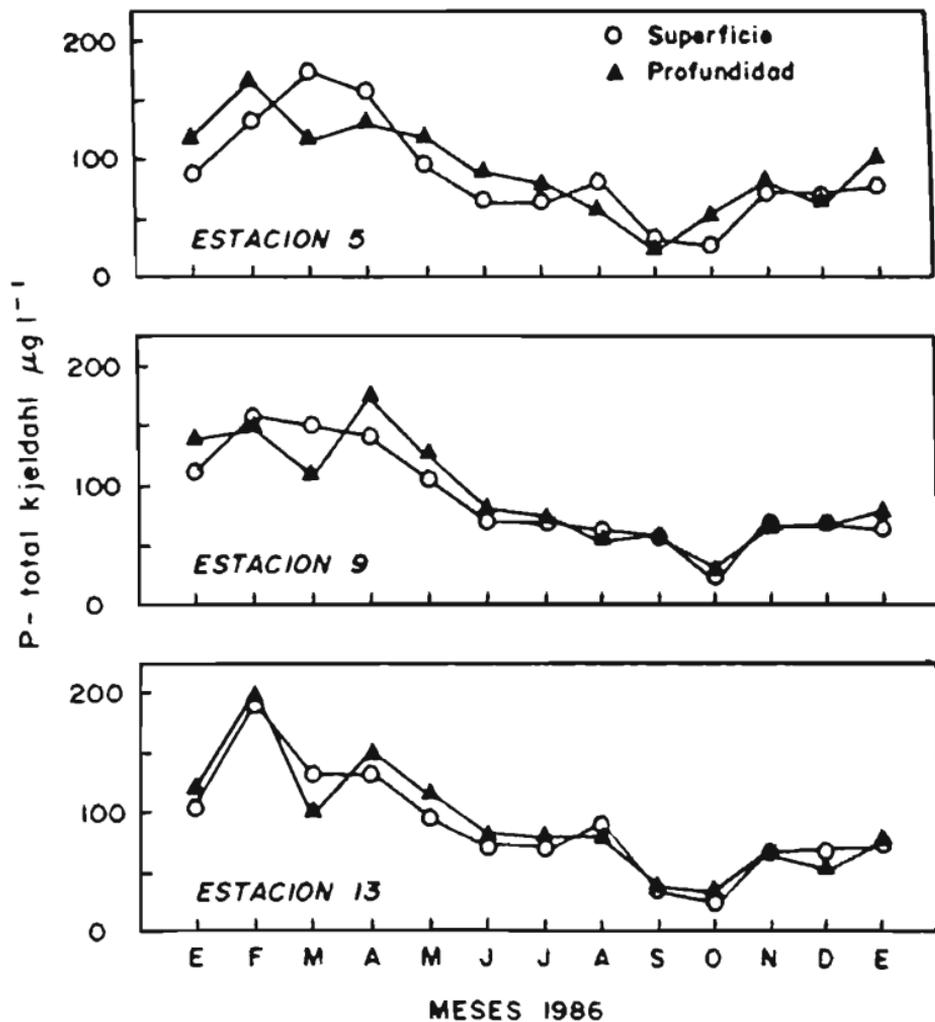


Fig. 17. Distribución de fósforo total en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

ESTACION 5

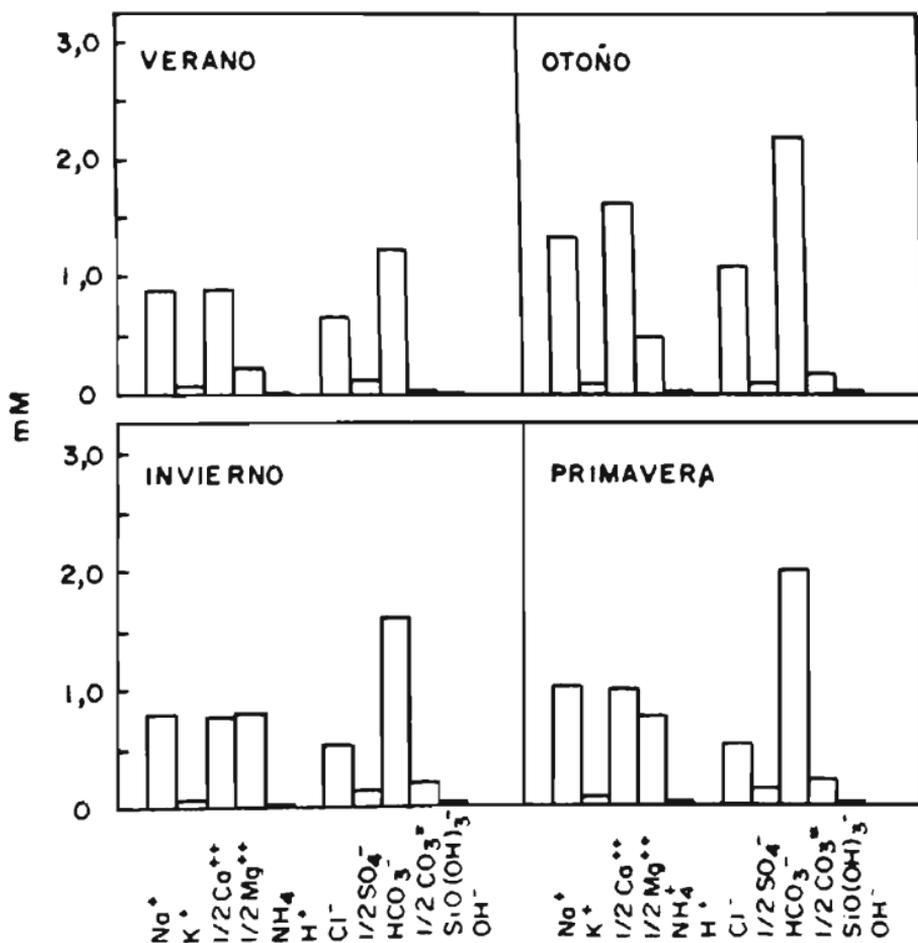


Fig. 18a. Distribución estacional de macroelementos en la Laguna de Aculeo durante 1986.

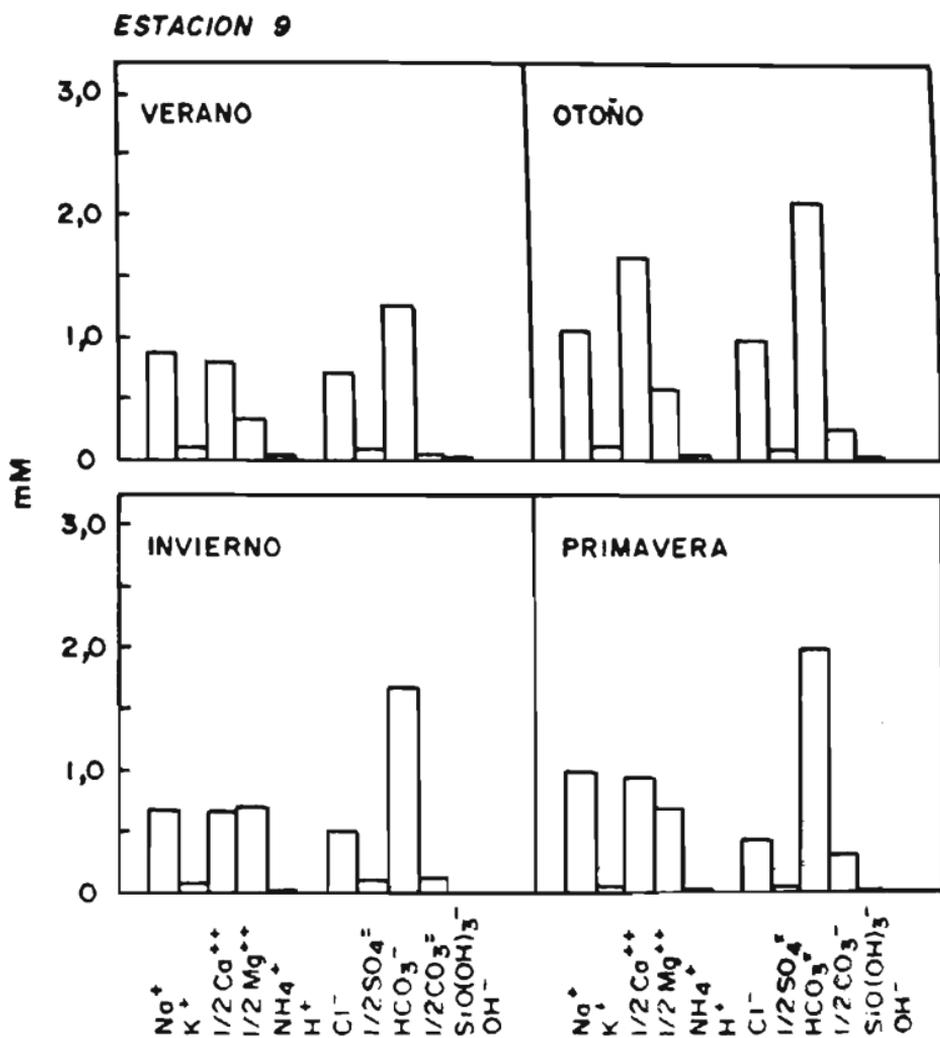


Fig. 18b. Distribución estacional de macroelementos en la Laguna de Aculeo durante 1986.

ESTACION 13

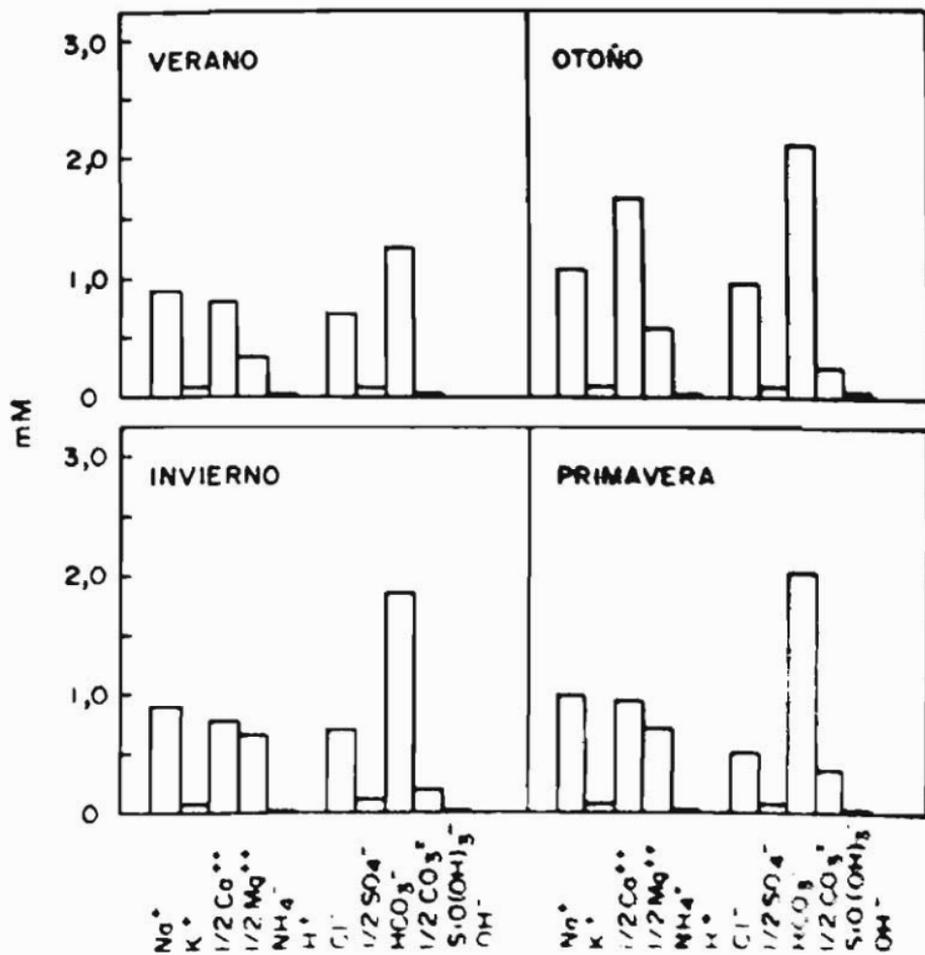


Fig. 18c. Distribución estacional de macroelementos en la Laguna de Aculeo durante 1986.

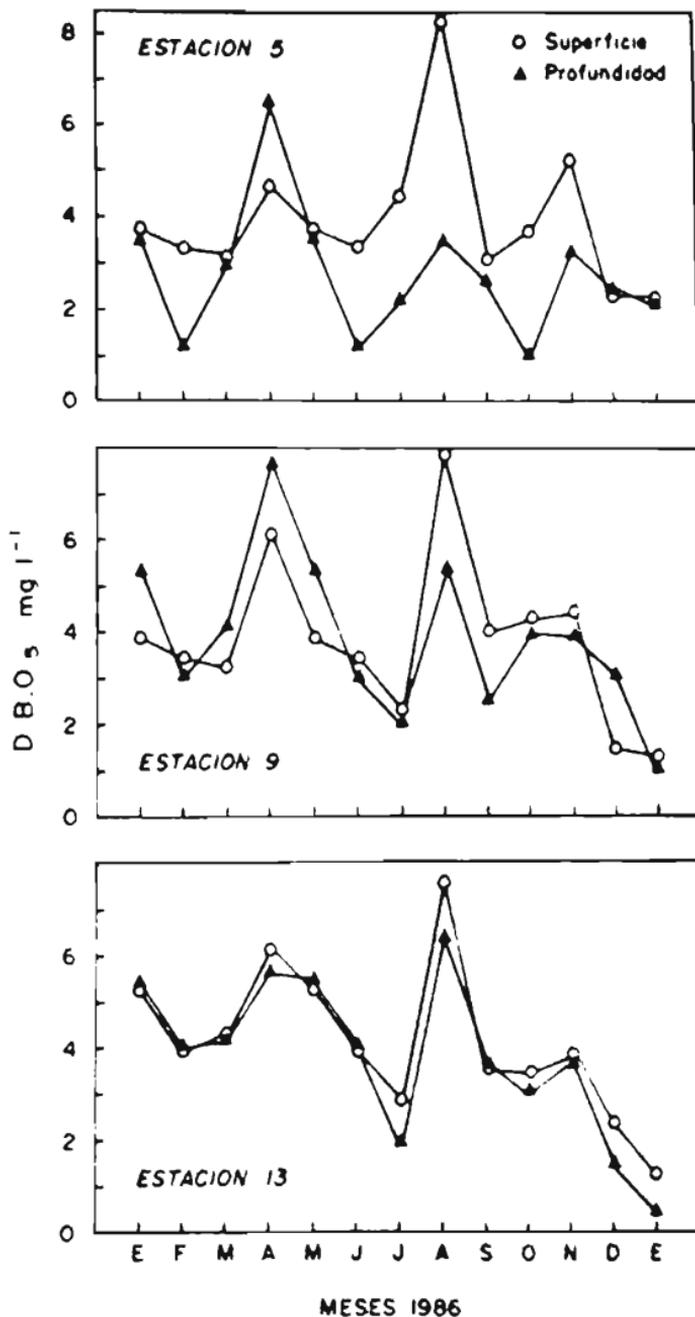


Fig. 19. Distribución de D.B.O₅ en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

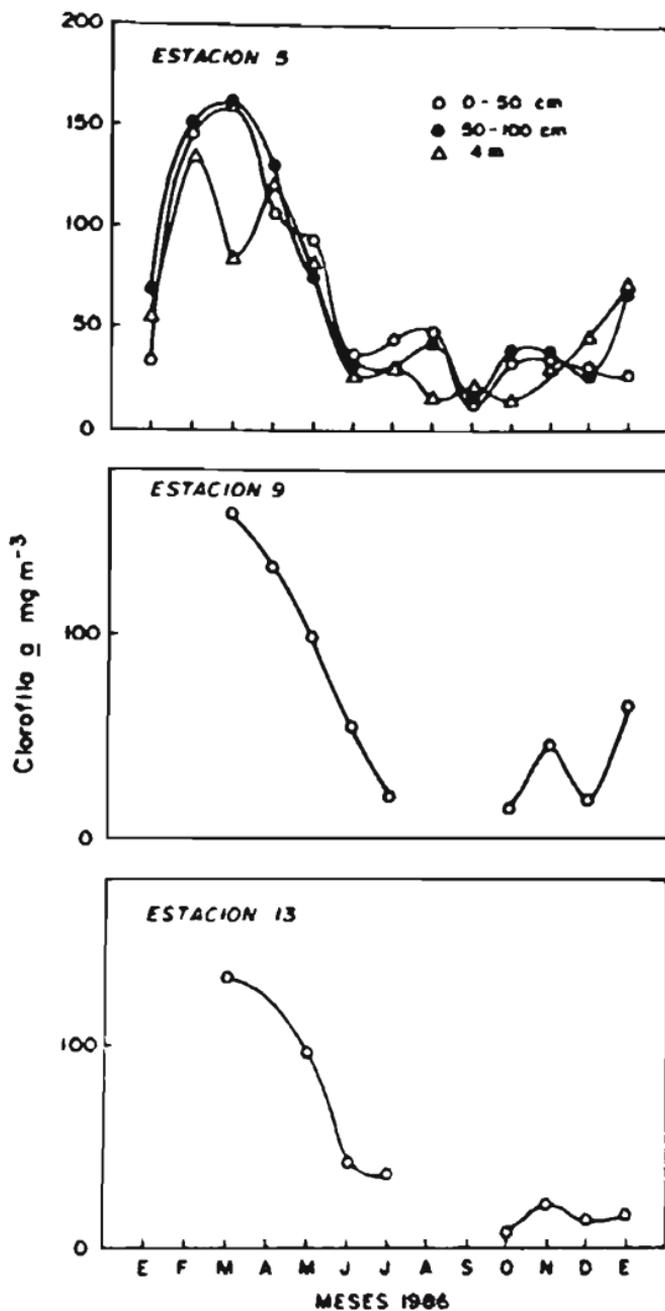


Fig. 20. Distribución de la clorofila a en superficie y profundidad en la Laguna de Aculeo durante 1986.

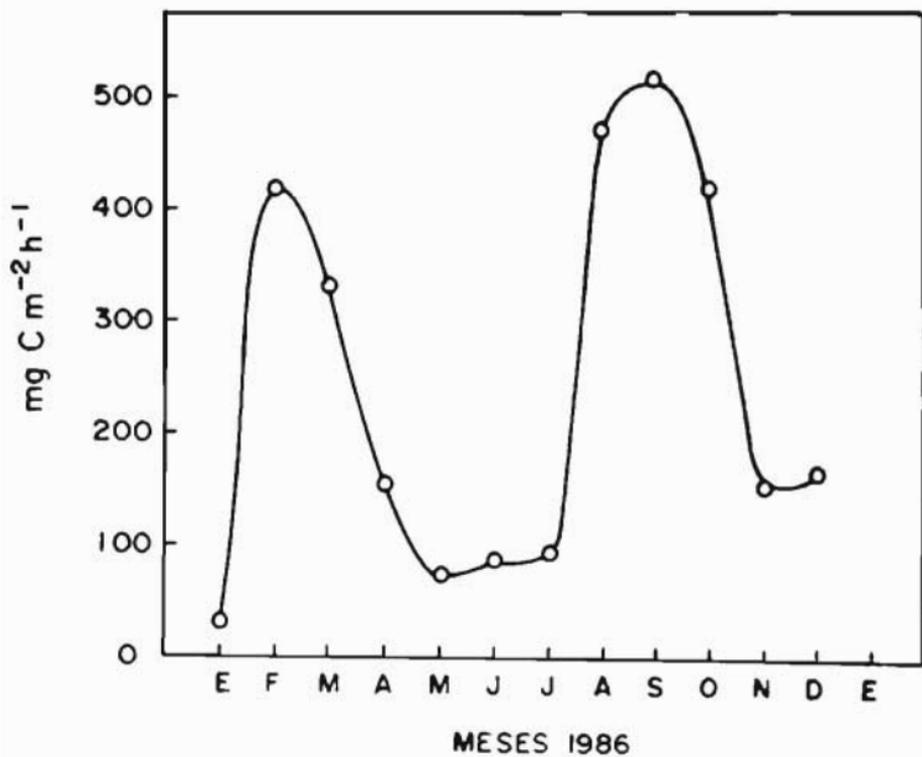


FIG. 21. Distribución de productividad primaria en la Laguna de Aculeo durante 1986 (Estación 5).

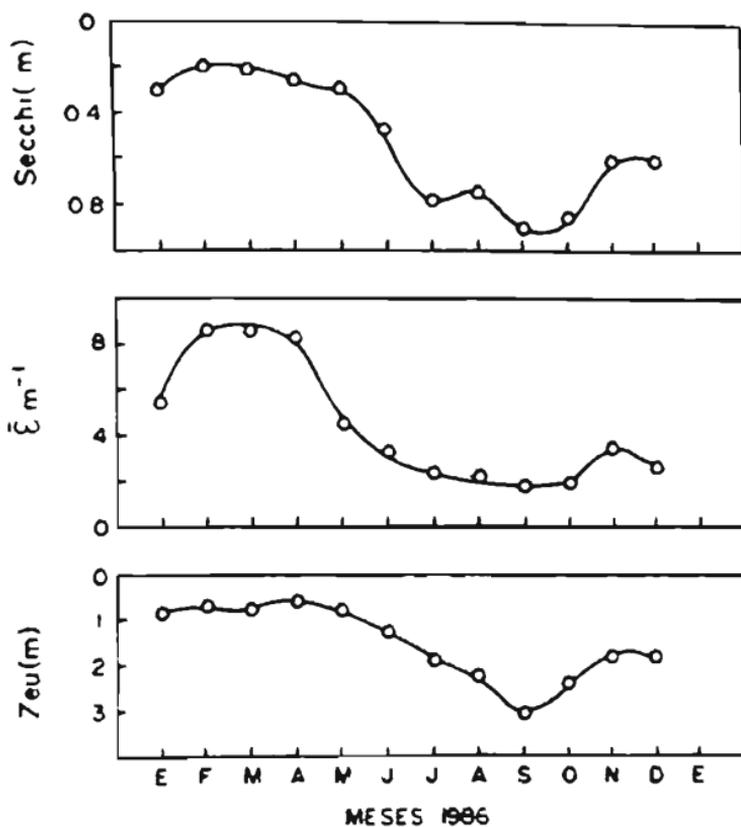
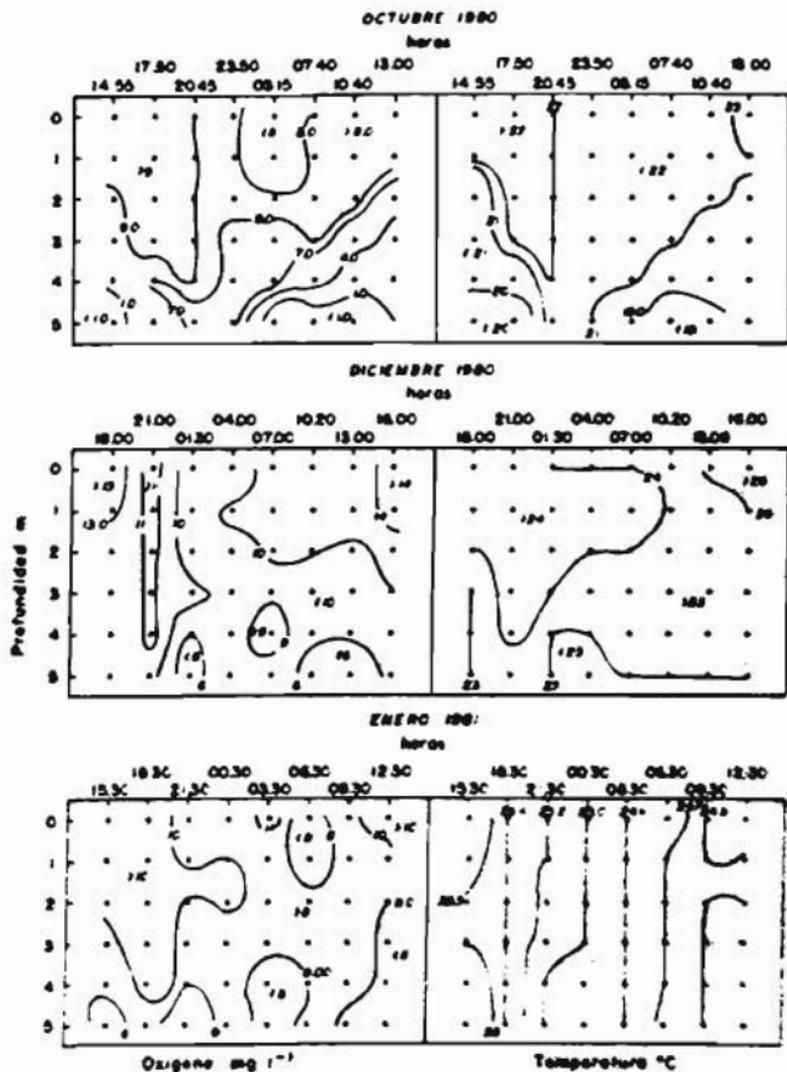


Fig. 22. Distribución de disco Secchi, luz y profundidad de zona fótica en la Laguna de Aculeo durante 1986.

Fig. 23B. VARIACION DEL OXIGENO Y TEMPERATURA EN LA ESTACION 5 DE LA LAGUNA DURANTE LA PRIMAVERA Y VERANO 1980-1981.



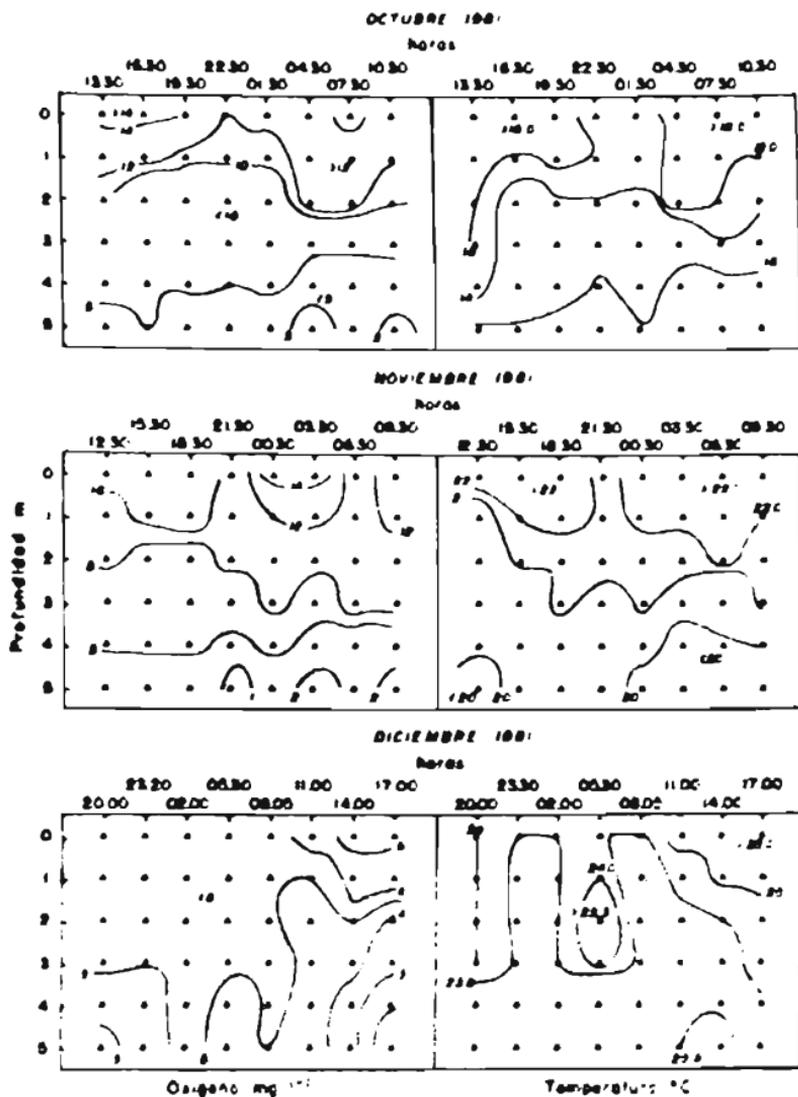


Fig. 23b. Variación del oxígeno y temperatura en la Estación 5 de la Laguna durante la primavera y verano 1980-1981.

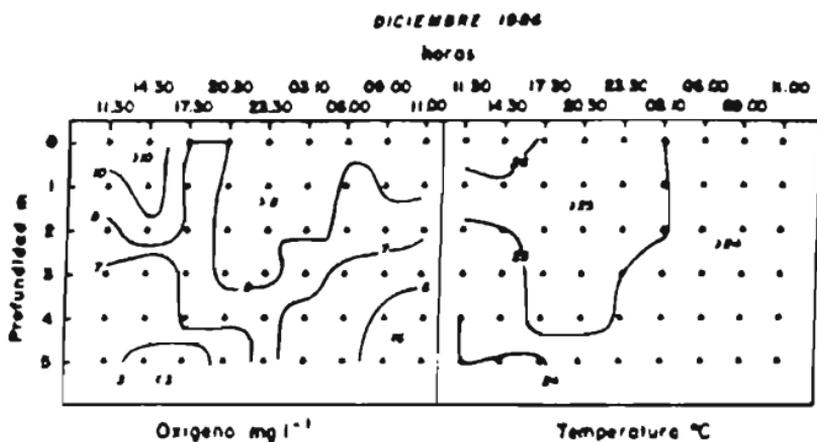


Fig. 23c. Variación del oxígeno y temperatura en la Estación 5 de la lacuna durante el verano 1986.

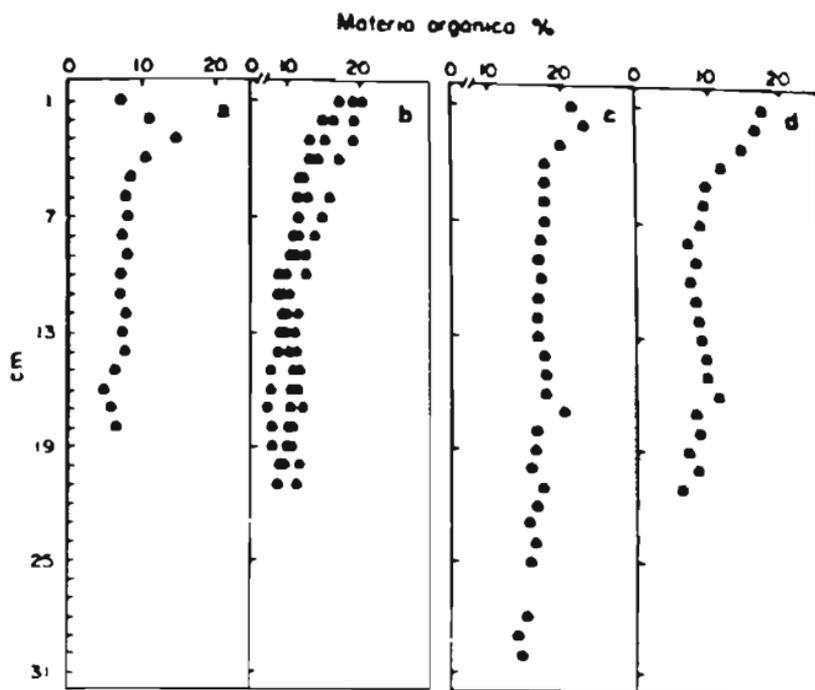


Fig. 24a. Distribución de materia orgánica en el perfil de sedimentos.
 a; Estación 13 b; Estación 14 (El Castaño, orilla sur)
 c; Estación 5 d; Estación 9

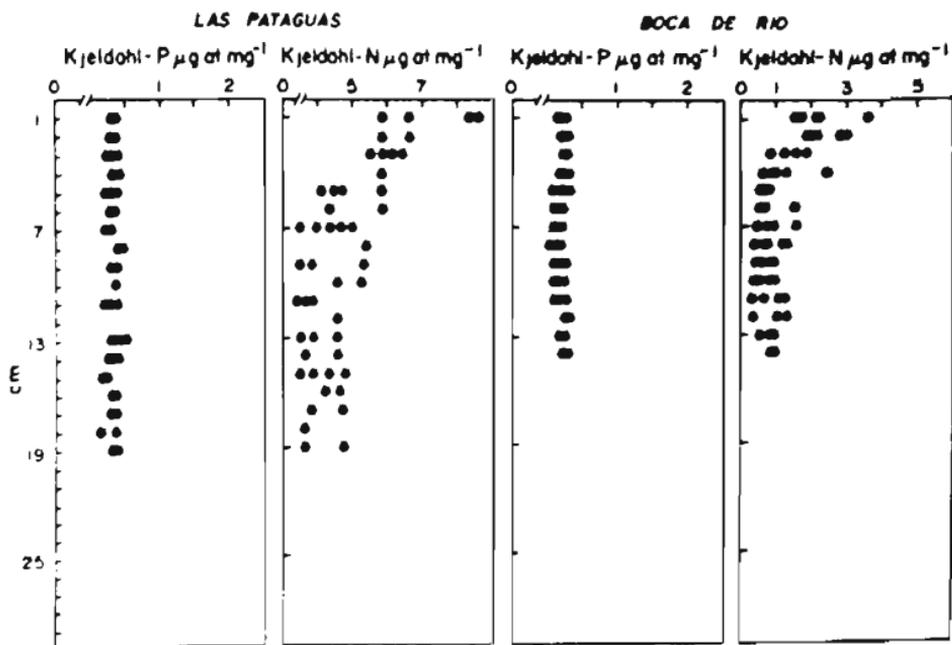


Fig. 24b. Distribución de fósforo y nitrógeno Kjeldahl en perfil de sedimentos de las estaciones 9

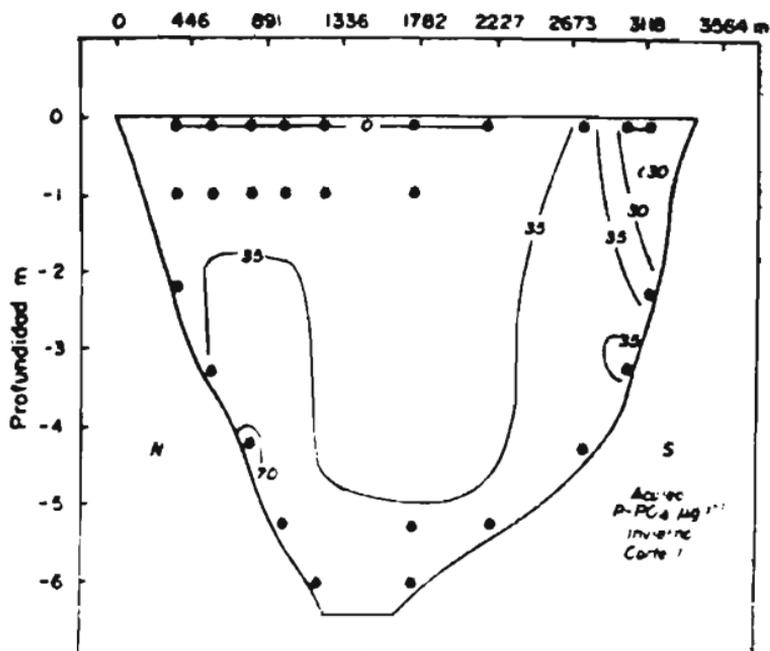


Fig. 25a. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculeo. Transecta 1., desde Bocaquao a Ptila. el León, rumbo sur 350° .

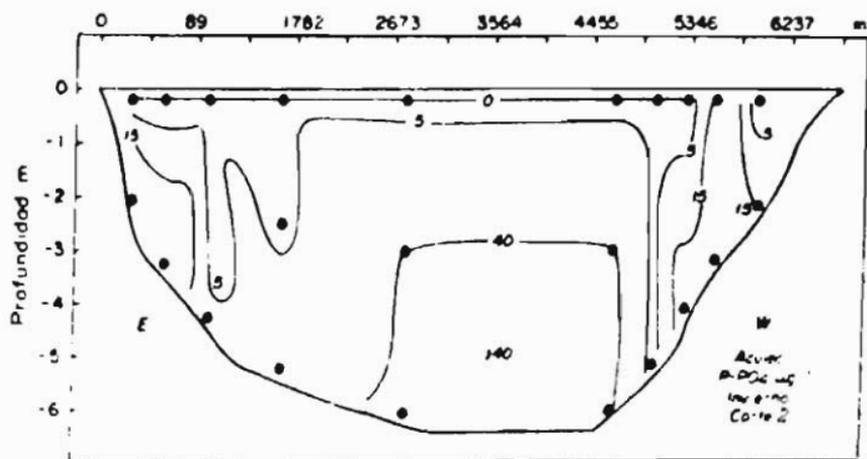


Fig. 25b. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculeo. Transecta 2., desde San Francisco a Las Pataguas, rumbo W 315°.

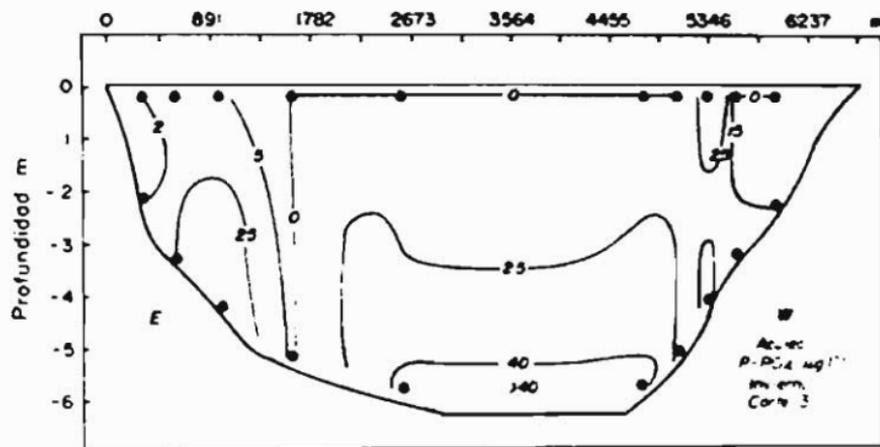


Fig. 25c. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculeo. Transecta 3., desde Casa de Maquinas a playa El Durazno, rumbo E 260°.

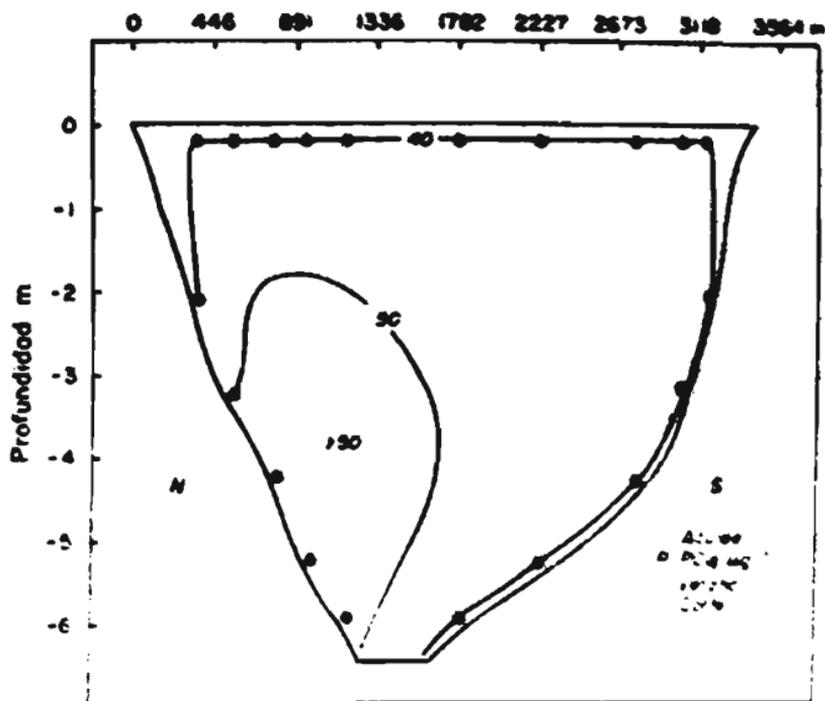


Fig. 25d. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 1., igual que para invierno.

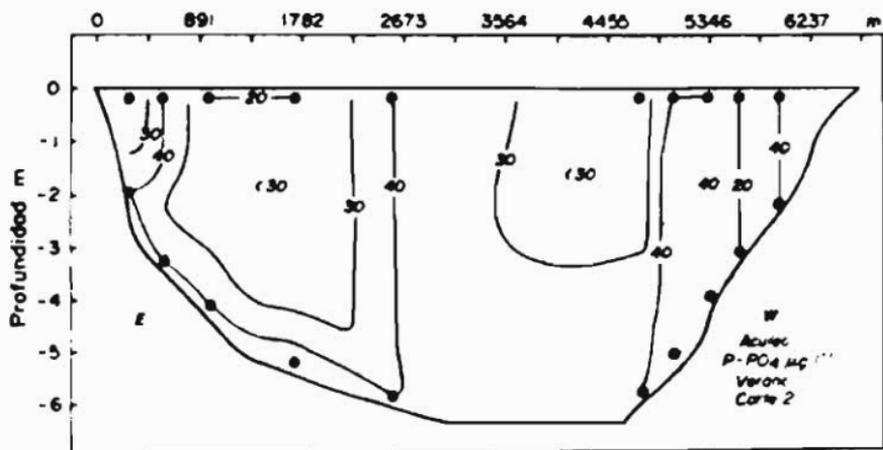


FIG. 25e. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 2., igual que para invierno.

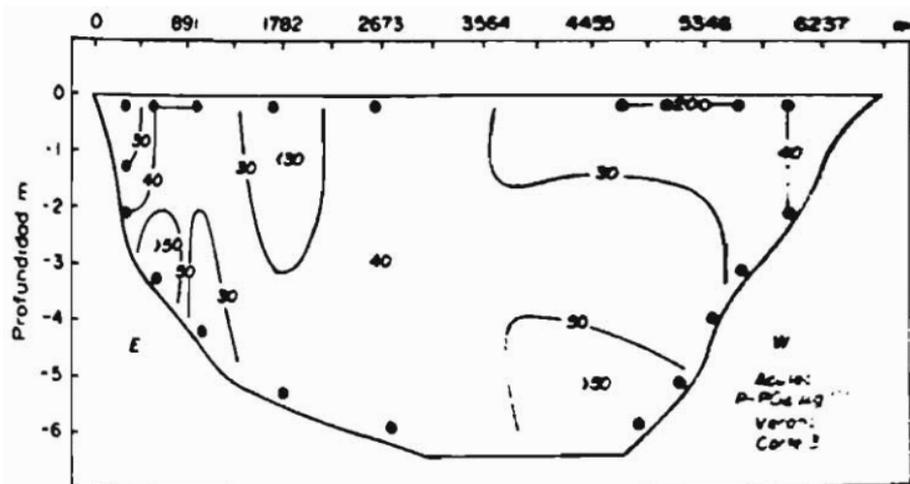


Fig. 25f. Distribución del ortofosfato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 3., igual que para invierno.

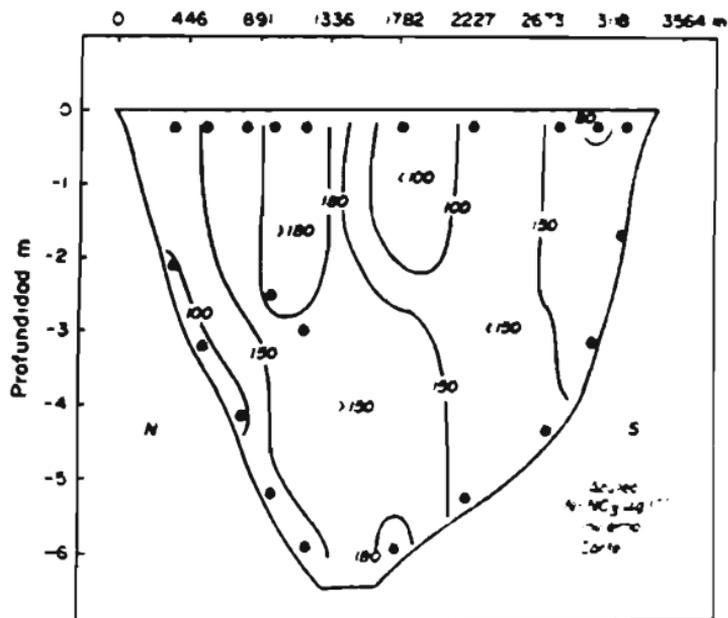


Fig. 26a. Distribución del nitrato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculeo. Transecta 1., igual que para ortofosfato.

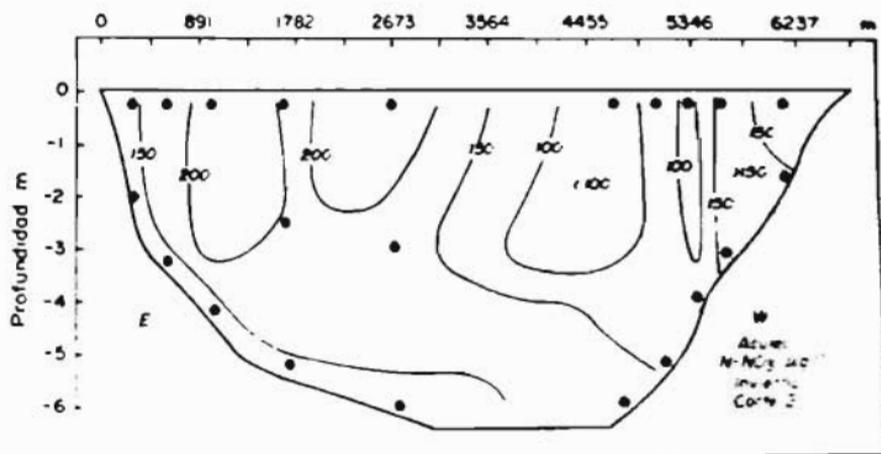


Fig. 26b. Distribución del nitrato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculeo. Transecta 2., igual que para ortofosfato.

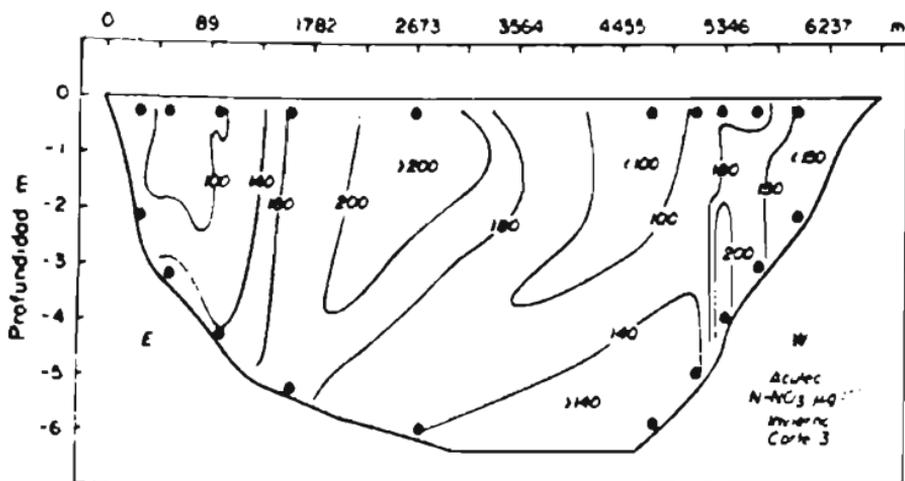


Fig. 26c. Distribución del nitrato en muestreo seriado de invierno en la Laguna de Aculec. Transecta 3., igual que para ortofosfato.

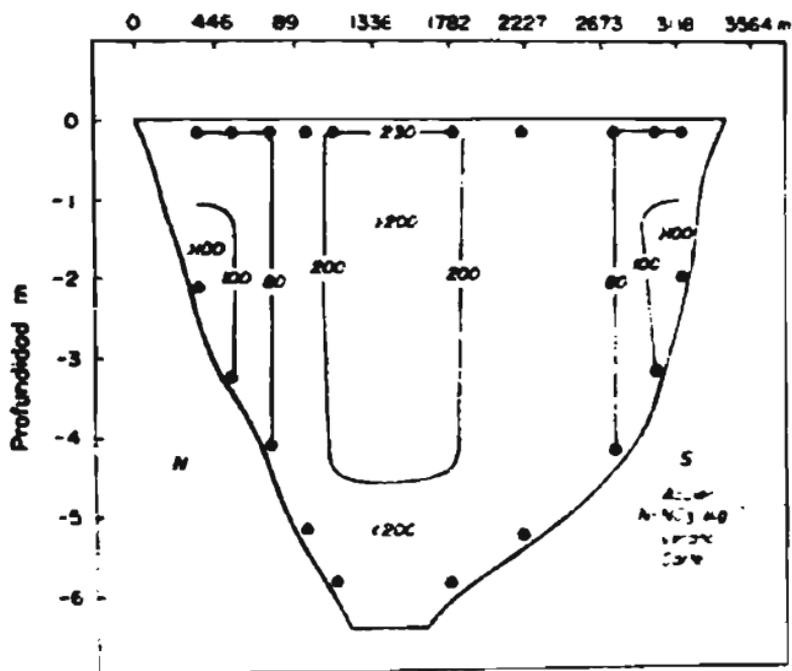


Fig. 26c. Distribución del nitrato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 1., igual que para invierno.

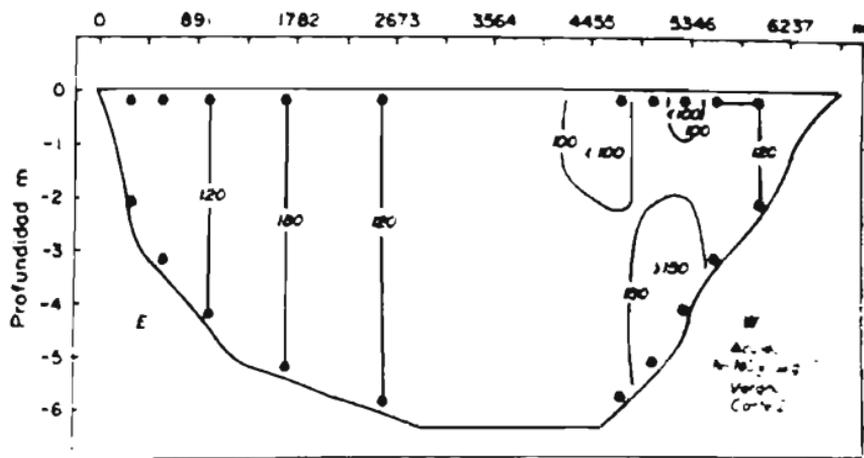


FIG. 26e. Distribución del nitrato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 2., igual que para invierno.

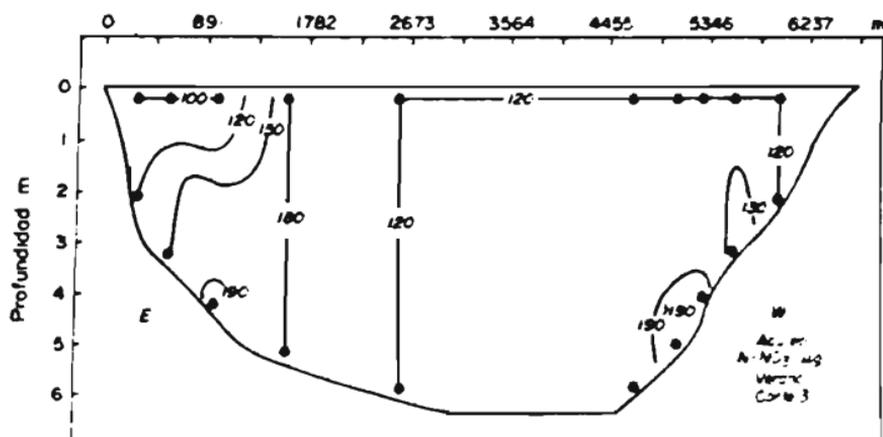


Fig. 26f. Distribución del nitrato en muestreo seriado de verano en la Laguna de Aculeo. Transecta 3., igual que para invierno.