

Inv. Pesq	50 (4)	págs. 607-637	diciembre 1986
-----------	--------	---------------	----------------

## Visibilidad del disco de Secchi, clorofila *a* y materia orgánica particulada en la ría de Pontevedra (NO de España) \*

F. G. FIGUEIRAS

Instituto de Investigaciones Marinas  
Muelle de Bouzas, s/n Vigo-8 (Pontevedra)

F. X. NIELL

Departamento de Ecología Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga  
Campus Universitario de Teatinos. 29071 Málaga.

*Palabras clave:* Transparencia, clorofila, carbono y nitrógeno orgánicos particulados, A.C.N.A., circulación estuárica positiva, ría de Pontevedra, NO de España.

*Key words:* Transparency, chlorophyll, particulate organic carbon and nitrogen, N.A.C.W., positive estuarine circulation, ría of Pontevedra, NW of Spain

**RESUMEN:** El ciclo anual del fitoplancton, medido como clorofila *a*, y el de materia orgánica particulada, en la ría de Pontevedra, están controlados, además de por la estacionalidad, por las intrusiones de Agua Central Noratlántica (A.C.N.A.). Los nutrientes que aporta esta masa de agua rigen las esporádicas floraciones que se intercalan en el período de crecimiento, el cual abarca desde febrero-marzo hasta noviembre. El río tiene muy poca importancia en este control salvo cuando un excesivo caudal puede impedir el florecimiento a través de las pérdidas por difusión. Las mismas intrusiones de A.C.N.A. y la circulación que se establece con ellas determinan la organización espacial, a media escala, dentro de la ría y, en este aspecto, es muy importante el giro que se localiza a mitad de la ría.

El área de influencia del río queda limitada a las proximidades de la desembocadura y a momentos de moderado caudal.

El vertido de la fábrica de pasta de papel E.N.C.E.S.A. tiene una importancia muy notable en la zona interna de la ría, mediante la descarga de grandes concentraciones de carbono y nitrógeno particulado que pronto sedimentan en su mayor parte.

La transparencia del agua está sometida a un control semejante al de la biomasa, en el sentido de que las penetraciones de A.C.N.A. significan una mayor transparencia, seguida por un aumento de la turbidez, cuando el fitoplancton ha florecido. La distribución espacial de la turbidez viene controlada por la circulación.

**SUMMARY:** SECCHI DISK VISIBILITY, CHLOROPHYLL *a* AND PARTICULATE ORGANIC MATTER IN THE RIA OF PONTEVEDRA (NW OF SPAIN) — The annual cycle of phytoplankton, estimated as chlorophyll *a*, and of the particulate organic matter in the ría of Pontevedra, are controlled by oceanic intrusions of North Atlantic Central Water (N.A.C.W.) This water mass supplies nutrients that allow sporadic blooms during the growth season, from February-March to November. Runoff has little importance in this control but excessive flow can prevent the bloom

\* Recibido el 23 de abril de 1986. Aceptado el 15 de septiembre de 1986.

Trabajo financiado por el contrato entre la E.N.C.E.S.A. de Pontevedra y el Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo.

by means of diffusion losses. The circulation is shaped by the NACW intrusions, and an important gyre is located in the center of the ria.

Effluent from the EN.C.E.S.A. paper mill has a very noticeable impact on the inner zone by introducing concentrations of particulate organic matter. Most of this material sediments very rapidly.

Water transparency is controlled by the same processes. The NACW intrusions bring water of greater transparency, which becomes more turbid with phytoplankton growth. The spatial distribution of turbidity is clearly controlled by the circulation of the ria.

### INTRODUCCIÓN

Este trabajo es la continuación de dos anteriores (FIGUEIRAS *et al.*, 1985, 1986) que describían la hidrografía y los nutrientes de la ría. Aquí se tratará de la disponibilidad de luz y biomasa, dentro de una secuencia lógica que conduce a comprender la ecología del fitoplancton en esta área (fig. 1).

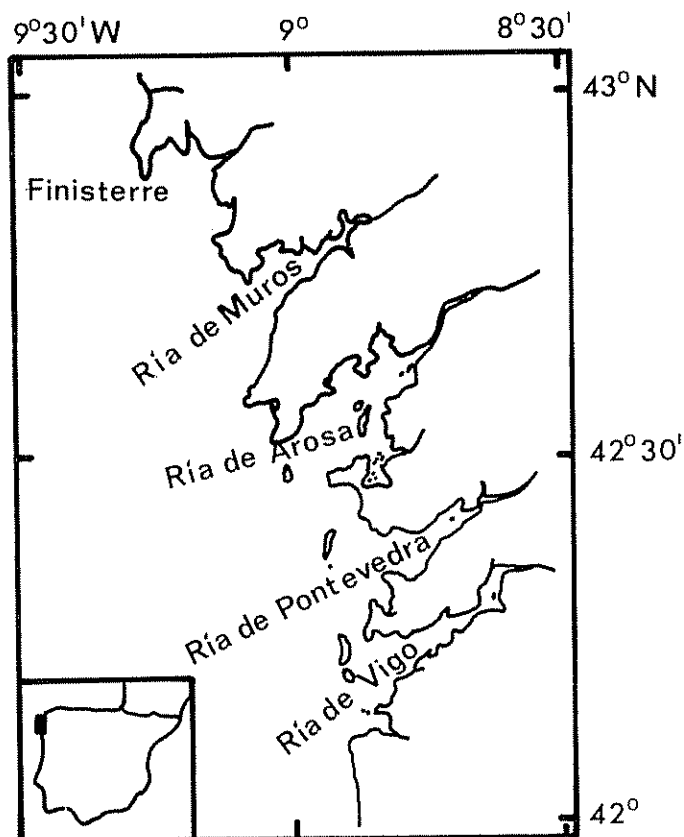


FIG 1 — Costa oeste de Galicia Las Rías Baixas

El régimen lumínico viene condicionado por la turbidez que, en un ambiente como las rías, es muy importante. Por otra parte, la estratificación limita la utilidad del disco de Secchi para medir la penetración de la luz en las distintas capas, pero, con todo, la información que aporta es muy interesante.

La biomasa de fitoplancton se mide aquí por los valores de clorofila y carbono y nitrógeno particulados. Es incorrecto considerar estas variables como estimaciones reales de la biomasa por la variabilidad individual en el contenido de clorofila y por la presencia de varias fracciones de seston en los datos brutos de materia orgánica particulada; no obstante, las tres variables son válidas para señalar cambios bruscos en las dimensiones espacio-temporales.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### MUESIREO

Previamente al muestreo del ciclo anual, fueron visitadas 13 estaciones (fig. 2 b). El estudio de los datos hidrográficos obtenidos (FIGUEIRAS *et al.*, 1985) posibilitó el establecimiento de dos retículos de muestreo diferentes con una frecuencia mensual: el muestreo *largo*, que comprendía toda la ría, y el

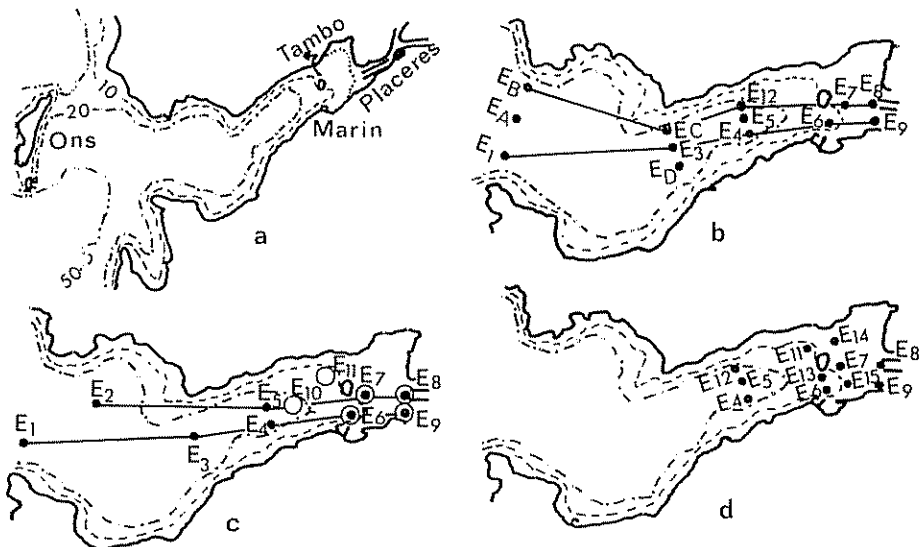


FIG. 2 — a) Mapa de la ría de Pontevedra con las isobatas en metros. b) Muestreo previo de febrero de 1980. c) Muestreos *largos* y *cortos*. Con círculos negros las estaciones de los *largos*, con círculos abiertos las de los *cortos*, y con ambos las comunes a los dos. d) Muestreos especiales en la zona interna en los días 14 y 24 de septiembre y 8 de octubre de 1981. En b y c están indicados los perfiles de la figura 8.

## CUADRO I

Días y horas de toma de muestras para el ciclo anual 1980-1981. Las alturas de marea son las dadas por las tablas para el puerto de Marín sin corregir.

<i>Mes/Tipo de muestreo</i>	<i>Día/Estaciones</i>	<i>Intervalo de tiempo transcurrido, horas GMT, desde la primera a la última estación</i>	<i>Hora pleamar</i>	<i>Alt. pleamar; alt. bajamar anterior</i>	<i>Carrera de marea</i>
Marzo/L	12/1-5	09 40-12 15	11 40	2,65 m; 1,08 m	1,57 m
	13/6-9	09 05-12 55	12 44	2,89 m; 0,83 m	2,06 m
Abril/L	10/1-5	09 35-12 10	11 15	2,67 m; 1,03 m	1,64 m
	11/6-9	10 00-11 35	12 19	2,90 m; 0,81 m	2,09 m
Abril/C	23/todas	08 30-10 25	10 33	2,46 m; 1,18 m	1,28 m
Mayo/C	8/todas	08 20-10 10	09 29	2,60 m; 1,03 m	1,57 m
Mayo/L	27/1-6	09 05-12 25	13 41	3,02 m; 0,83 m	2,19 m
	28/7-9	12 10-13 15	14 14	3,15 m; 0,74 m	2,41 m
Junio/C	3/todas	13 15-15 40	18 10	3,33 m; 0,89 m	2,44 m
Junio/C	25/todas	08 00-11 30	13 05	2,95 m; 0,95 m	2,00 m
Julio/L	8/1-5	08 00-11 00	11 53	2,94 m; 0,91 m	2,03 m
	9/6-9	09 45-11 00	12 50	3,08 m; 0,83 m	2,25 m
Julio/C	22/todas	07 15-11 10	10 38	2,58 m; 1,25 m	1,33 m
Agosto/L	6/1-5	07 50-11 25	11 35	2,82 m; 1,80 m	1,75 m
	7/6-9	08 50-10 50	12 37	2,97 m; 1,00 m	1,97 m
Septiembre/L	17/6-9	16 15-17 50	20 18	2,47 m; 1,24 m	1,23 m
	18/1-5	07 45-11 15	08 53	2,56 m; 1,35 m	1,21 m
Octubre/L	1/1-2	15 15-16 10	21 03	2,56 m; 1,08 m	1,48 m
	2/3-9	08 10-10 08	09 32	2,65 m; 1,31 m	1,34 m
Octubre/C	16/todas	15 00-17 31	19 51	2,50 m; 1,14 m	1,36 m
Noviembre/L	5/1-5	09 00-12 00	13 44	3,06 m; 0,83 m	2,23 m
	6/6-9	10 35-12 05	14 16	3,13 m; 0,73 m	2,40 m
Noviembre/C	19/todas	08 10-11 10	12 36	3,22 m; 0,75 m	2,47 m
Diciembre/L	3-1/5	09 20-12 35	12 32	2,78 m; 1,11 m	1,67 m
	4/6-9	09 50-11 45	13 12	2,88 m; 0,98 m	1,90 m
Enero/L	28/6-7	08 45-09 40	08 25	2,55 m; 1,31 m	1,24 m
	29/1-5	09 05-13 00	09 33	2,44 m; 1,39 m	1,05 m
Febrero/L	10/6-8	14 15-15 00	19 17	2,94 m; 0,74 m	2,20 m
	11/9	08 40	07 43	2,69 m; 0,89 m	2,07 m
	12/1-5	09 10-12 05	08 53	2,75 m; 1,05 m	1,70 m
Marzo/C	10/6-8	14 25-15 05	18 03	3,24 m; 0,48 m	2,76 m
	11/10, 11 y 9	13 30-17 14	18 51	3,04 m; 0,73 m	2,31 m

<i>Profundidades</i>	<i>Estaciones en la figura 2</i>
0 m	Todas
2 m	6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 y 15
5 m	Todas excepto 8, 9 y 14
10 m	Todas excepto 7, 8, 9, 14 y 15
20 m	Todas excepto 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14 y 15
30 m	A, B, 1 y 2

CUADRO II

Horario de toma de muestras y alturas de marea durante las observaciones que se llevaron a cabo cuando la factoría paró su proceso de producción en el año 1981. Las alturas de marea son las dadas por las tablas para el puerto de Matín sin corregir.

<i>Día</i>	<i>Intervalo de tiempo, horas GMT, desde la primera a la última estación</i>	<i>Hora de marea alta</i>	<i>Marea alta (m)/ Marea baja precedente (m)</i>
14-9-81	10.30 - 15.45	15.13	3,61/0,39
24-9-81	07.15 - 11.20	12.27	2,97/1,081
8-10-81	08.05 - 12.25	10.84	2,60/1,42

muestreo *corto* (fig. 2 c), localizado en la zona más interna. Fechas y otras características de ambos se ofrecen en el cuadro I.

La zona interna se muestreó, en especial (fig. 2 d y cuadro II), cuando paró la factoría.

#### VISIBILIDAD DEL DISCO DE SECCHI

La penetración de la luz se midió por medio del disco de Secchi y, para estimar el coeficiente de extinción medio ( $K$ ), se aplicó la relación:

$$K = \frac{a}{S}$$

donde  $a$  vale 1,7 y  $S$  es la profundidad a la que deja de ser visible el disco de Secchi.

#### DETERMINACIONES DE CLOROFILA $a$ Y MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA

El agua de mar se recogió mediante botellas Van Dorn de 10 litros de capacidad. De ellas se separaron dos alícuotas para la determinación de pigmentos y materia orgánica particulada. En ambos casos, el volumen filtrado dependía de la concentración de seston.

Para la extracción de clorofila  $a$  se empleó la metodología de SCOR-UNESCO (1966), y las lecturas espectrofotométricas y cálculos de concentración se hicieron de acuerdo con JEFFREY y HUMPHREY (1975).

Las alícuotas para la determinación de materia orgánica particulada se

filtraron a través de filtros de fibra de vidrio Whatman GF/C de 25 mm de diámetro y los análisis de carbono y nitrógeno orgánico particulado se hicieron en un CNH Perkin Elmer 240 Elemental Analyzer, siguiendo el método de FRAGA (1976).

## RESULTADOS

### TRANSPARENCIA DEL AGUA EN LAS DIFERENTES ESTACIONES DE LA RÍA

La figura 3 muestra la profundidad de la capa fótica (1 % de la luz incidente en superficie), estimada a partir de la profundidad de visión del disco de Secchi, para las diferentes estaciones de la ría; las estaciones 7 y 8 se omiten puesto que la profundidad de su capa fótica es mayor que su propia profundidad. La estación 9 siempre se encuentra con limitaciones de luz debido a que el vertido de la fábrica tiene lugar en sus proximidades.

La penetración de la luz en la columna de agua de las estaciones 1 y 2 es muy similar. En ambas toda la columna es fótica en agosto y noviembre, cuando la concentración de clorofila fue inferior a  $1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ . En agosto, la limitación del crecimiento estuvo determinada por los nutrientes (FIGUEIRAS *et al.*, 1986), mientras que, en noviembre, la menor radiación incidente y una mayor homogeneización de toda la columna (FIGUEIRAS *et al.*, 1985) impidieron el desarrollo. Para los otros meses, la profundidad de la capa fótica fue inferior a la profundidad muestreada, observándose mínimos que, en primavera, concuerdan bien con las intrusiones de A.C.N.A. (FIGUEIRAS *et al.*, 1985, 1986). Estas intrusiones no se reflejan en mínimos de visibilidad durante el verano debido a la mayor energía incidente y a que la estratificación impide la mezcla hasta la superficie, conservando la capa superficial libre de nutrientes y de fitoplancton.

La escasa visibilidad del mes de octubre es consecuencia de una purga de mar.

En contra de lo esperado, las intrusiones de A.C.N.A. traen agua con menor transparencia, debido a que la penetración oceánica es siempre de capas más superficiales, donde, a finales de primavera y durante el verano, existe siempre una picnoclina (FIGUEIRAS *et al.*, 1986).

La estación 3 se comporta de modo semejante a la 1, pero con una capa fótica algo menor, de acuerdo con su posición en la ría. Por esto y por su estructura hidrográfica, en julio, la capa fótica abarca toda la columna en tanto que no lo hace en agosto, debido a que en julio la intrusión oceánica no alcanzó este lugar.

Las estaciones 4 y 5 tienen un comportamiento distinto de las precedentes. Su régimen de luz corre paralelamente a la estratificación en superficie, señalando el origen continental de la turbidez. Las diferencias entre ellas son consecuencia de sus regímenes hidrográficos, y la capa fótica únicamente su-

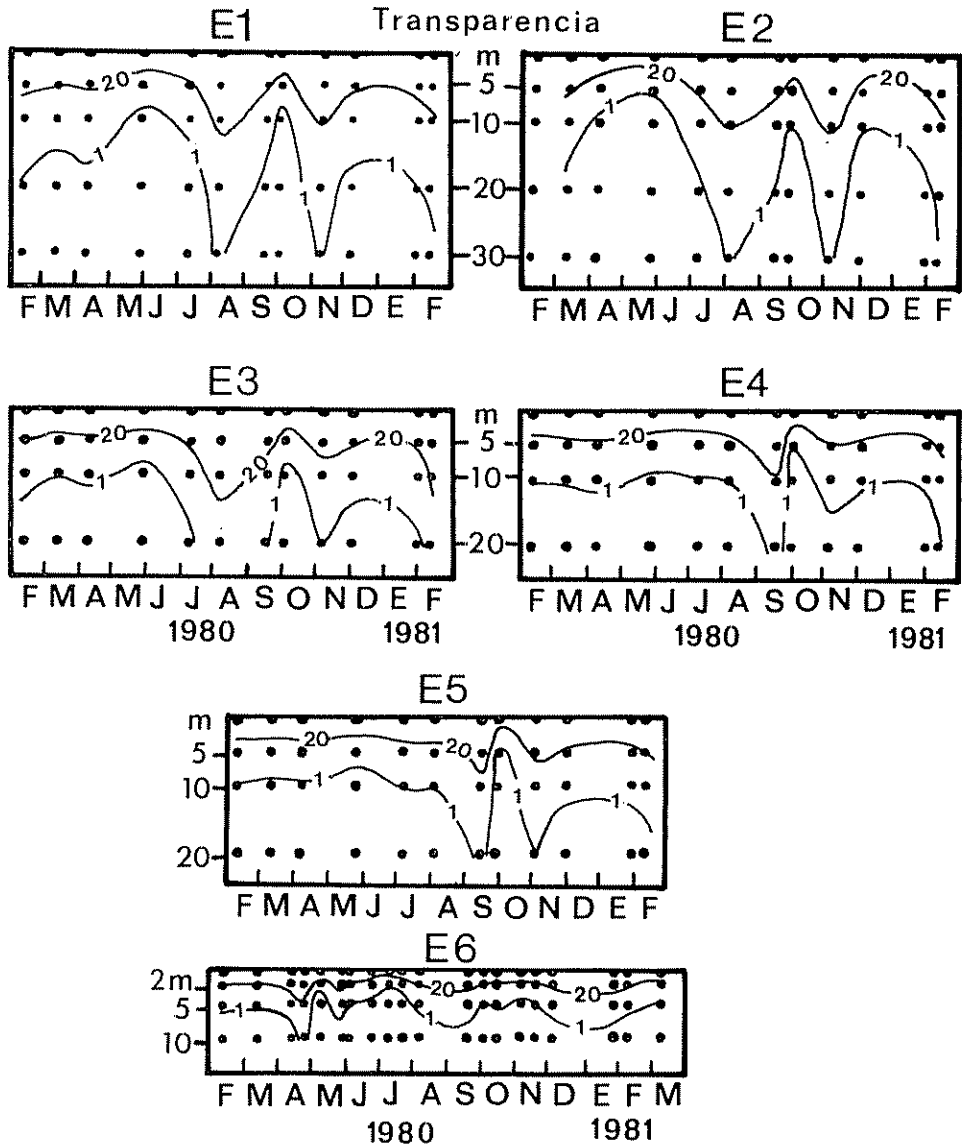


FIG. 3 — Transparencia del agua, expresada como tanto por ciento de la radiación incidente en superficie, a lo largo del período de estudio. El 20 por ciento es aproximadamente la profundidad de visión del disco de Secchi. El 1 por ciento se estimó a partir de la profundidad anterior.

para la profundidad de muestreo en septiembre, cuando la estructura física lo permite.

Consideraciones similares son aplicables a la estación 6, donde llegó el afloramiento del 23 de abril debilitando la estratificación (*loc. cit.*).

#### DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TURBIDEZ EN LA RÍA

La visibilidad del disco de Secchi es un modo útil de estimar los gradientes de turbidez, en lugares donde la atenuación lumínica viene dominada por la dispersión (COLLIN, 1982), porque el coeficiente de dispersión es independiente de la longitud de onda; en cambio, no tiene utilidad para determinar la turbidez de las distintas capas.

A partir de las medidas de visibilidad del disco de Secchi, a lo largo del período de observaciones, se distingue un gradiente de turbidez según el eje longitudinal de la ría (fig. 4). Existe otro gradiente, a lo largo del eje transversal, que se superpone al primero y modifica su dirección en las proximidades de la isla de Tambo. La importancia de ambos gradientes varía positivamente con el grado de estratificación en la ría (FIGUEIRAS *et al.*, 1985), lo que señala el origen interno de la turbidez: los aportes del río, el fitoplancton que allí se desarrolla y, principalmente, el vertido de la fábrica. No hay que descartar que la resuspensión del sedimento por la marea puede poner material particulado en la capa fótica (ROMAN y TENORE, 1978; KAWANA y TANIMOTO, 1981).

La distribución espacial de la turbidez muestra la función preponderante de la circulación de la ría sobre otras variables. La corriente de agua turbia que se dirige al océano bordeando la costa norte y el giro ciclónico a mitad de la ría destruyendo el gradiente son importantes.

Las observaciones que corresponden a los muestreos *cortos* (cuadro III) muestran, consideradas las de los muestreos *largos*, que la estación 6 es la más turbia, con excepción de la observación correspondiente al día 23 de abril de 1980, ya comentada previamente.

#### CLOROFILA Y CARBONO Y NITRÓGENO PARTICULADOS

##### *Distribuciones temporales*

El estudio de las distribuciones temporales es útil para determinar los períodos de proliferación que, conocidas otras variables, tales como régimen de luz, disponibilidad de nutrientes y condiciones físicas ambientales, permitirán determinar qué factor o combinación de factores los hace posibles.

La figura 6 muestra las distribuciones temporales en las estaciones 1 a 6, sin incluir las de carbono y nitrógeno particulados de la estación 6 porque, debido a su elevada contaminación procedente de los efluentes de la factoría, será comentada aparte. La radiación solar se da en la figura 5 con propósitos comparativos.



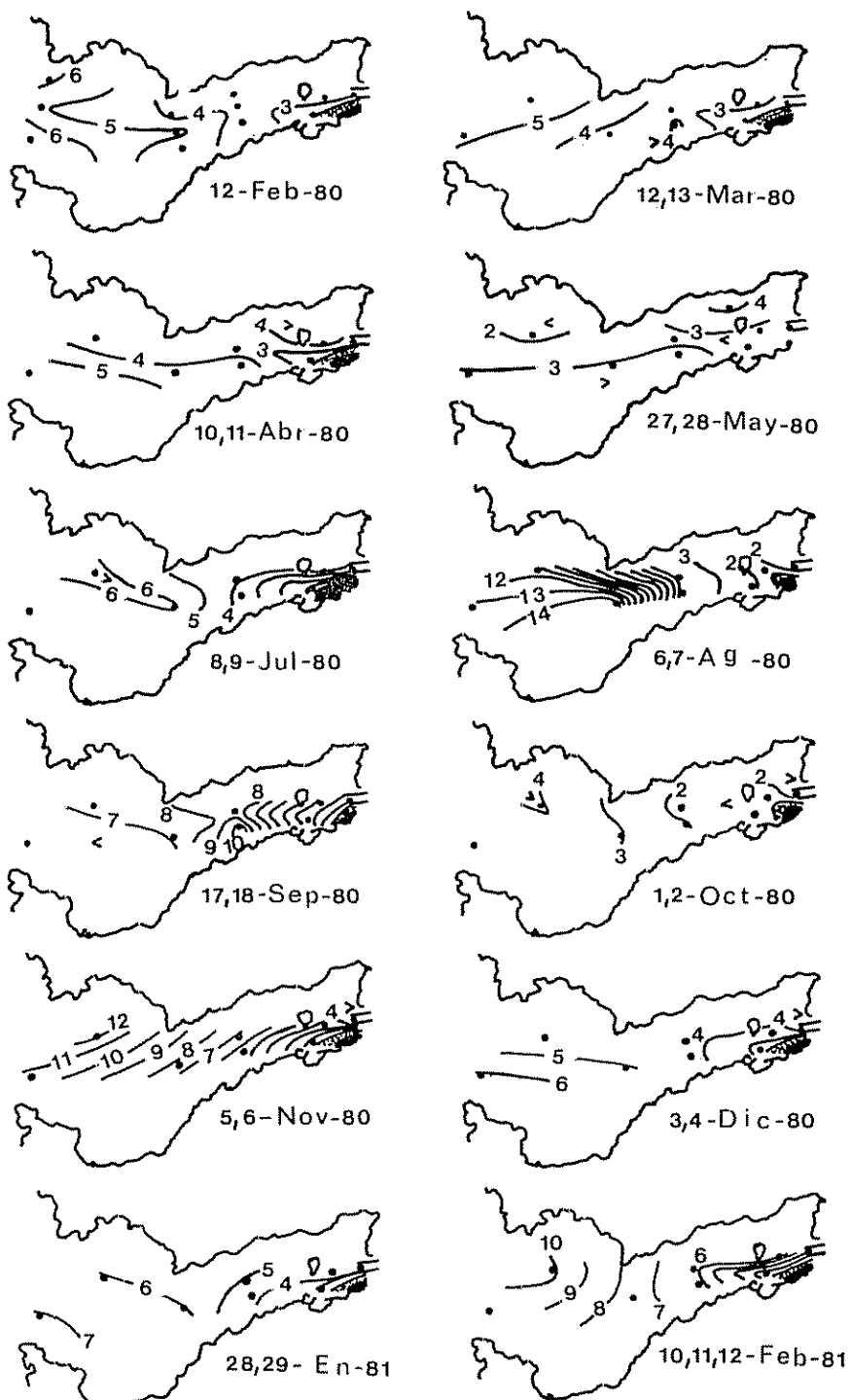


FIG 4.—Distribución espacial de la visibilidad del disco de Secchi.

CUADRO III

Profundidad de visión del disco de Secchi y coeficiente de extinción en los días de muestreo *cortos*. Se omite la estación 9 ya que su visibilidad es mínima. Es fácil estimar la profundidad de la capa fótica multiplicando por 2,7 la profundidad de visión del disco. Comparándola con las isóbatas de la figura 2a se puede conocer la fracción de columna de agua que queda incluida en ella.

<i>Día</i>	<i>Estación</i>	<i>Visibilidad del disco de Secchi (m)</i>	<i>Coficiente de extinción (m<sup>-1</sup>)</i>
23-4-1980	E10	4,00	0,43
	E11	4,00	0,43
	E6	5,00	0,34
	E7	3,00	0,57
	E8	4,00	0,43
8-5-1980	E10	2,50	0,68
	E11	2,50	0,68
	E6	1,00	1,70
	E7	2,00	0,85
	E8	1,00	1,70
3-6-1980	E10	3,00	0,57
	E11	3,00	0,57
	E6	2,00	0,85
	E7	4,50	0,38
	E8	3,00	0,57
25-6-1980	E10	3,50	0,49
	E11	2,50	0,68
	E6	1,50	1,13
	E7	1,25	1,36
	E8	1,25	1,36
22-7-1980	E10	7,00	0,24
	E11	7,50	0,23
	E6	1,00	1,70
	E7	>6,75	
	E8	>4,75	
16-10-1980	E10	2,50	0,68
	E11	3,75	0,45
	E6	2,00	0,85
	E7	2,50	0,68
	E8	2,50	0,68
19-11-1980	E10	4,50	0,38
	E11	2,25	0,76
	E6	1,75	0,97
	E7	4,40	0,39
	E8	4,00	0,43
10, 11-3-1981	E10	2,30	0,74
	E11	2,00	0,85
	E6	1,75	0,97
	E7	1,50	1,13
	E8	1,70	1,00

El rasgo más interesante de las distribuciones, desde la estación 1 a la 5, surge de la confrontación entre las tres variables; es fácil deducir que las tres presentan el mismo ciclo anual, señalando que, cuando el fitoplancton es abundante, la mayor parte de la materia orgánica particulada (MOP) procede de él. EPPLEY *et al.* (1977) encontraron que el 99 por ciento del carbono orgánico particulado (COP) pertenecía al fitoplancton en periodos de abundancia. Inversamente, cuando la concentración de células bajaba, de acuerdo con la concentración de clorofila *a*, la fracción de COP no autotrófico era mucho más importante. A pesar de ello, la correlación entre las tres variables, en nuestro caso, es muy buena.

En las tres distribuciones de la figura 6 se ve claramente que el periodo de crecimiento comprende desde marzo —primera intrusión de A.C.N.A. (FIGUEIRAS *et al.*, 1985, 1986)— a noviembre. Durante este último mes, la regeneración de nutrientes excede a la fotosíntesis en la ría (FIGUEIRAS *et al.*, 1986).

Dentro de la estación de crecimiento existe una gran variabilidad, con concentraciones mayores cuando penetra A.C.N.A. en la ría, si exceptuamos la marea roja de octubre. Existen máximos en profundidad muy llamativos en julio en las estaciones 1 y 2, y en septiembre en las estaciones 3, 4 y 5. En enero de 1981 comienza un nuevo ciclo anual.

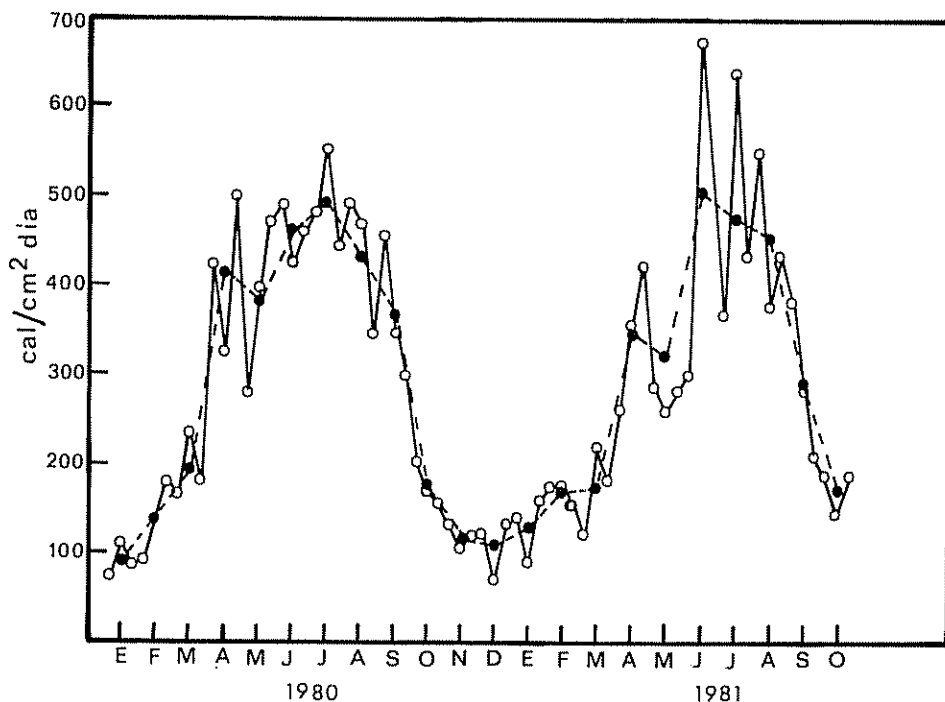


FIG. 5.— Energía incidente, en superficie, de la ría a lo largo del periodo de estudio. Con círculos negros, las medias mensuales; con abiertos, medias por grupos de 10 días

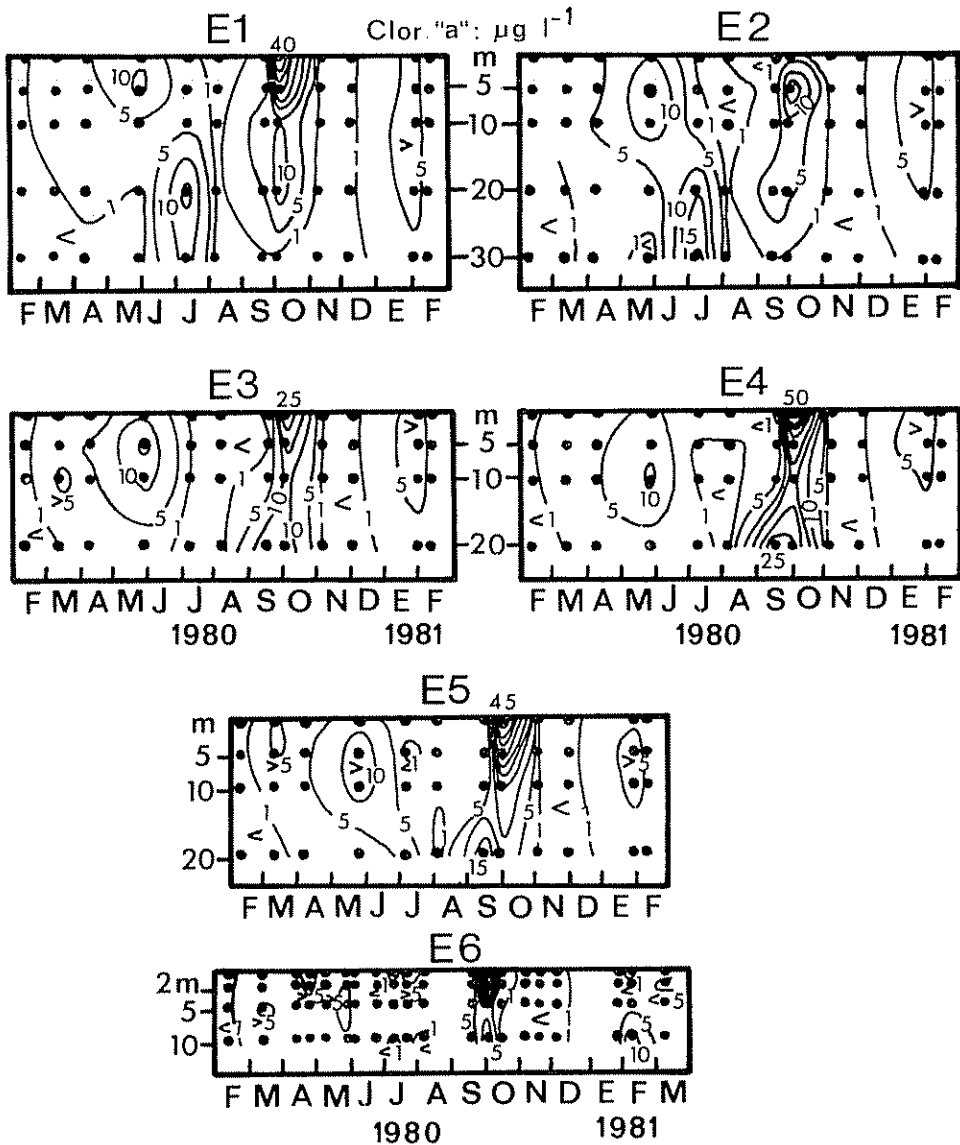


FIG. 6. — Distribuciones temporales de las concentraciones de clorofila *a* y carbono y nitrógeno particulados

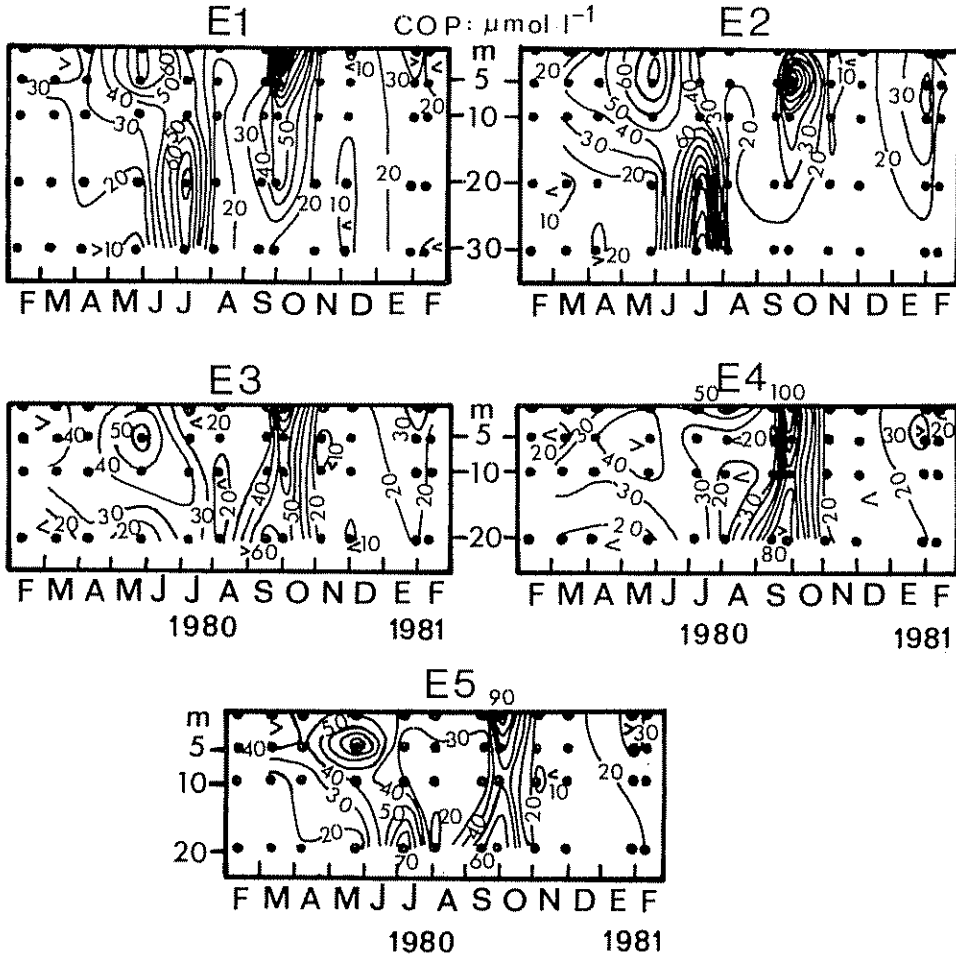


FIG. 6 continuación 1

Existen algunas discrepancias en la localización de los máximos de COP, NOP y clorofila. Puede ser indicativo de la existencia de poblaciones diferentes o también de la misma población con diferentes tasas de crecimiento (GOLDMAN *et al.*, 1979).

La estación 6 es representativa de todas las estaciones internas; su ciclo anual tiene los mismos comienzo y final que las estaciones comentadas anteriormente. Las diferencias más importantes están en que, por término medio, posee menor concentración de clorofila en toda la columna; sin embargo, cuando la estratificación física es más fuerte, la concentración de clorofila

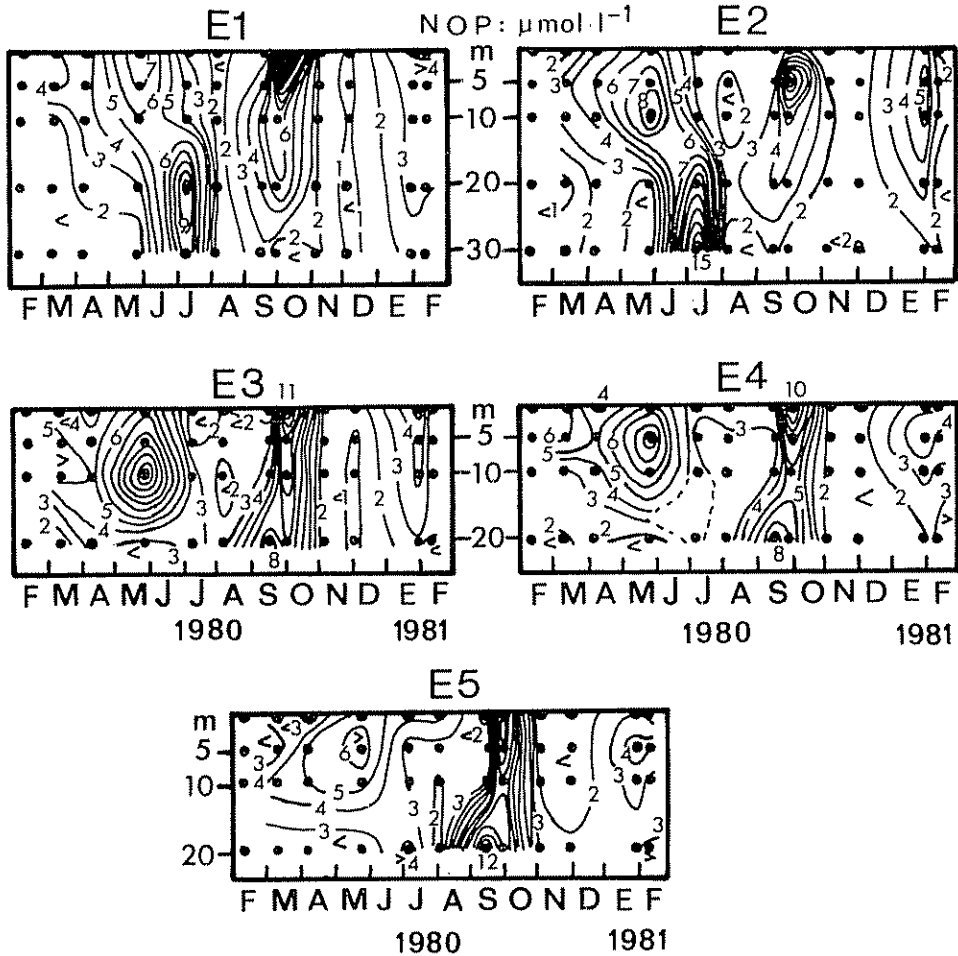


FIG. 6 continuación 2

se hace mayor con relación a las estaciones más externas, e inversamente, cuando la circulación estuárica está controlada por el agua oceánica, la concentración es menor. Se demuestra así la importancia de las intrusiones de A.C.N.A. en el control del desarrollo del fitoplancton; al mismo tiempo, se observa la influencia del río a través de la combinación de estabilidad-aporte de nutrientes en los períodos de baja biomasa general en toda la ría.

Las relaciones, más o menos definidas, establecidas para las estaciones externas de la ría entre MOP y clorofija son menos claras en las internas (6, 7, 8 y 9), donde la influencia del río, de la poca profundidad y, principal-

mente, de los efluentes de la fábrica, que arroja a la ría grandes concentraciones de COP y NOP, es muy importante (fig. 7). La contaminación de la fábrica comienza a ser más aparente después de la proliferación de primavera, si bien hacia finales de mayo no se detecta en las concentraciones totales debido a la detención del proceso de producción. La forma complicada de la gráfica es una consecuencia del emplazamiento de la estación 6 en un lugar donde un frente separa las influencias del giro ciclónico de las aguas interiores (FIGUEIRAS *et al.*, 1985), de forma que, cuando el A.C.N.A. penetra en la ría, las concentraciones y sus cocientes son más bajos. De tal modo es inversa la evolución de esta estación que, cuando la MOP decae, las concentraciones de clorofila se elevan (23 de abril y 22 de julio de 1980; confrontar figs. 6 y 7).

#### Distribuciones espaciales

Este tipo de distribuciones deben ser útiles para diferenciar áreas de la ría, si es que existen, atendiendo a la biomasa.

A través de los espectros de los extractos acetónicos de pigmentos y de observaciones microscópicas se concluye que la MOP de la superficie, en la

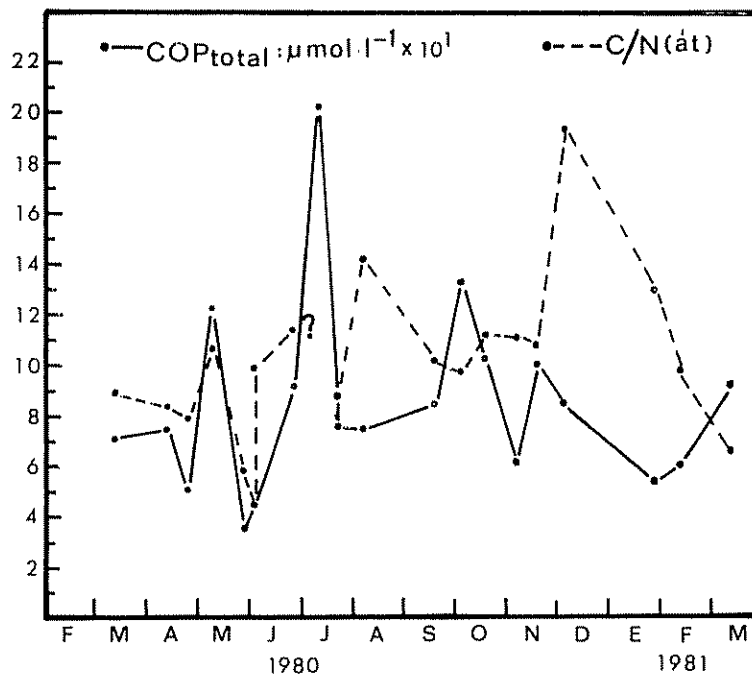


FIG 7 — Carbono orgánico particulado y relación C/N en la superficie de la estación 6.

estación 9, procede siempre del vertido de la fábrica, cuando está en funcionamiento.

La figura 8 muestra las distribuciones espaciales a lo largo de dos transectos longitudinales (figs. 2 b y 2 c) y pone de manifiesto los efectos de la estructura física y de la circulación sobre la biomasa, alimentada con nutrientes ingresados por el fondo y eliminada por la superficie. La influencia del giro ciclónico sobre las distribuciones de COP y NOP es bien patente.

Existe escasez de biomasa en febrero de 1980, cuando ni los nutrientes (FIGUEIRAS *et al.*, 1986) ni la luz (fig. 5) fueron limitantes. En marzo, como respuesta al primer aporte de nutrientes por el A.C.N.A., se produjo un crecimiento del fitoplancton en los 10 metros superficiales, más intenso en los lugares donde existía una débil estratificación (FIGUEIRAS *et al.*, 1985). Las distribuciones de COP y NOP presentan un esquema más complicado a causa de su mezcla con el efluente, mucho más aparente en el perfil meridional. La influencia del giro, al incorporar agua profunda a la superficie y fomentar el crecimiento de los organismos, es clara, especialmente en la zona externa (estaciones 3 y 5), donde no hay interferencias con los aportes terrestres.

En abril, sin intrusiones de agua oceánica, los nutrientes disminuyeron de manera notable y las distribuciones de las tres variables permanecieron muy semejantes a las de marzo, si bien con concentraciones algo mayores en la orilla norte, debido a la corriente superficial que transporta MOP.

La penetración de A.C.N.A., más profunda en mayo, aportó concentraciones mayores de nutrientes, lo que, acompañado de un incremento en la energía incidente (fig. 5), ocasionó un crecimiento del fitoplancton que se tradujo en concentraciones más altas de MOP y clorofila. Las mayores concentraciones se localizaron en sitios de moderada estratificación y condujeron al agotamiento de los nutrientes. La relación entre MOP y clorofila es ahora más obvia que nunca puesto que la fracción detrítica es muy pequeña y el vertido de la fábrica es nulo.

En julio, los nutrientes están totalmente agotados, excepto en los niveles más profundos de las estaciones 1 y 2 (FIGUEIRAS *et al.*, 1986). Dentro de una concentración baja de clorofila en toda la superficie, la cantidad aumenta en la zona interna, donde es asimismo mayor la cantidad de nitritos y fosfatos. Se acentúa así la importancia del río como fuente de nutrientes cuando el nitrato es el factor limitante. En esta situación se observaron concentraciones de clorofila más elevadas por debajo de la zona fótica (fig. 3), sin sobrepasar el alcance de la intrusión oceánica (FIGUEIRAS *et al.*, 1985). De aquí, teniendo en cuenta que el A.C.N.A. transporta una concentración menor de nutrientes que la que le corresponde por su origen, se deduce que se trata de poblaciones costeras que crecen en las capas superiores de A.C.N.A., donde nutrientes y luz se encuentran en las condiciones adecuadas. Con un nuevo vertido de la fábrica, la estación 9 volvió a presentar concentraciones elevadas de COP y NOP; en el resto de la ría, la correspondencia entre estas dos variables y la clorofila es obvia.



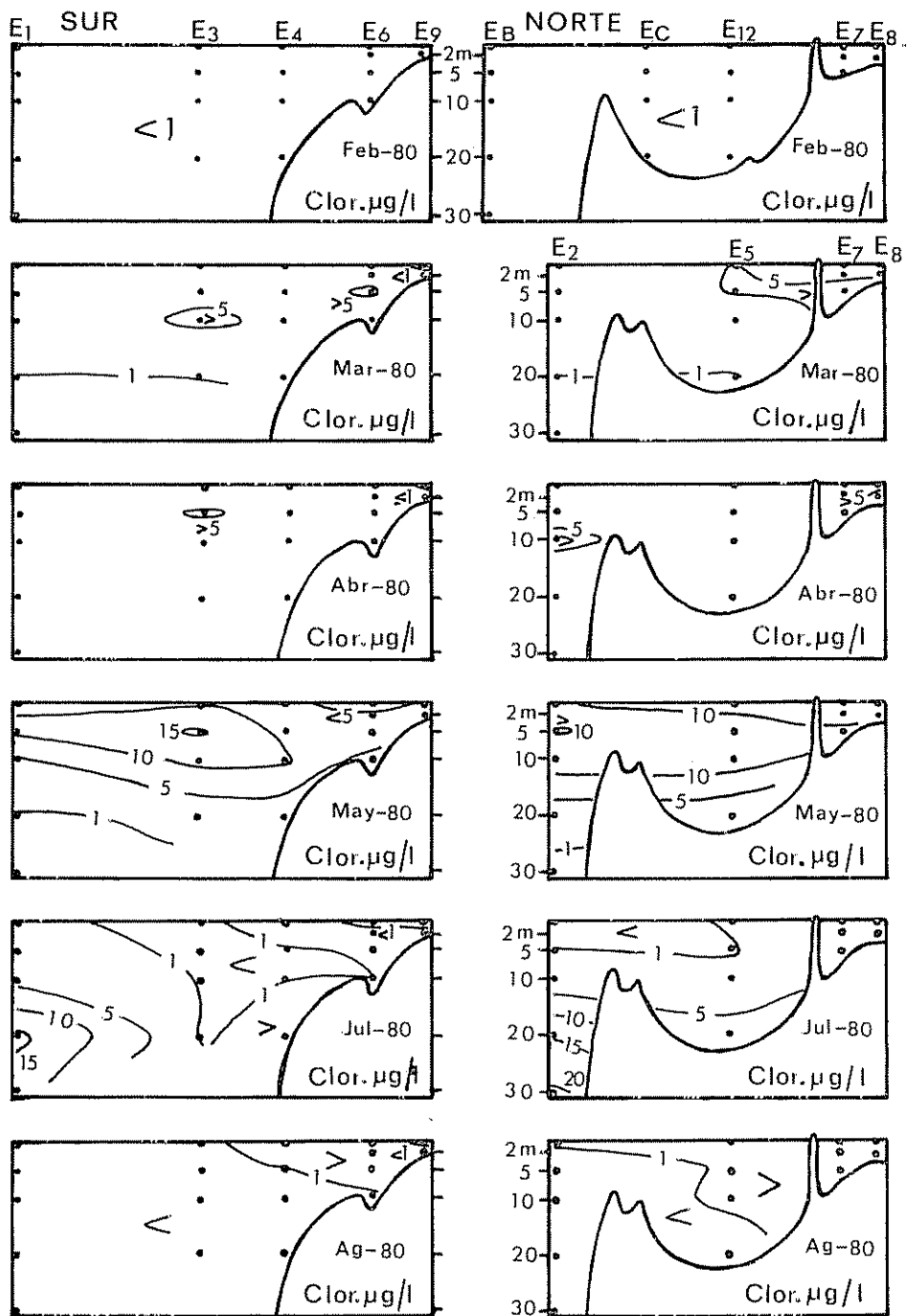


FIG 8 — Perfiles meridionales y septentrionales de clorofila y carbono y nitrógeno orgánicos particulados. La localización de los perfiles en la ría se da en la figura 2 (b y c)

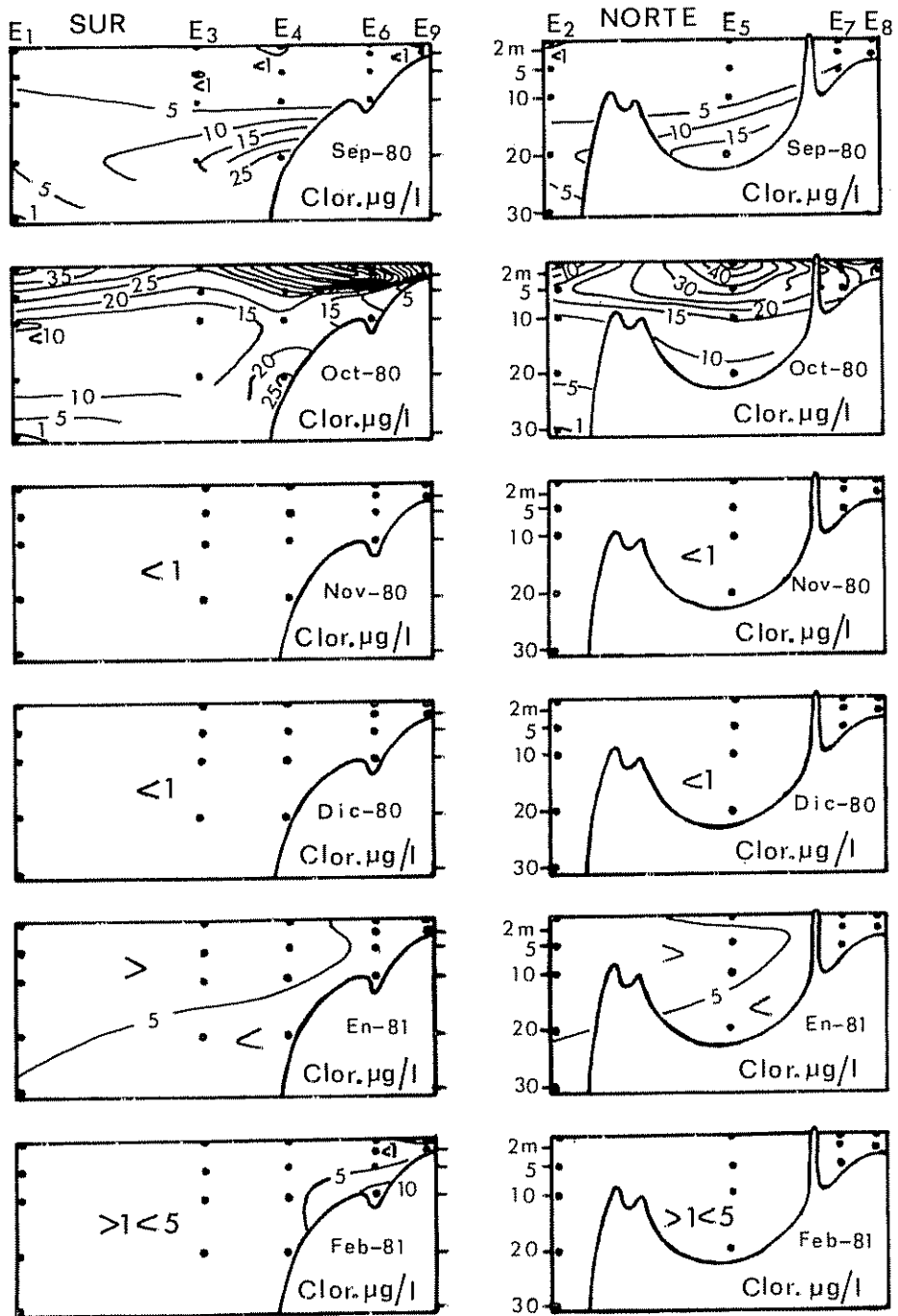


FIG 8 continuación 1

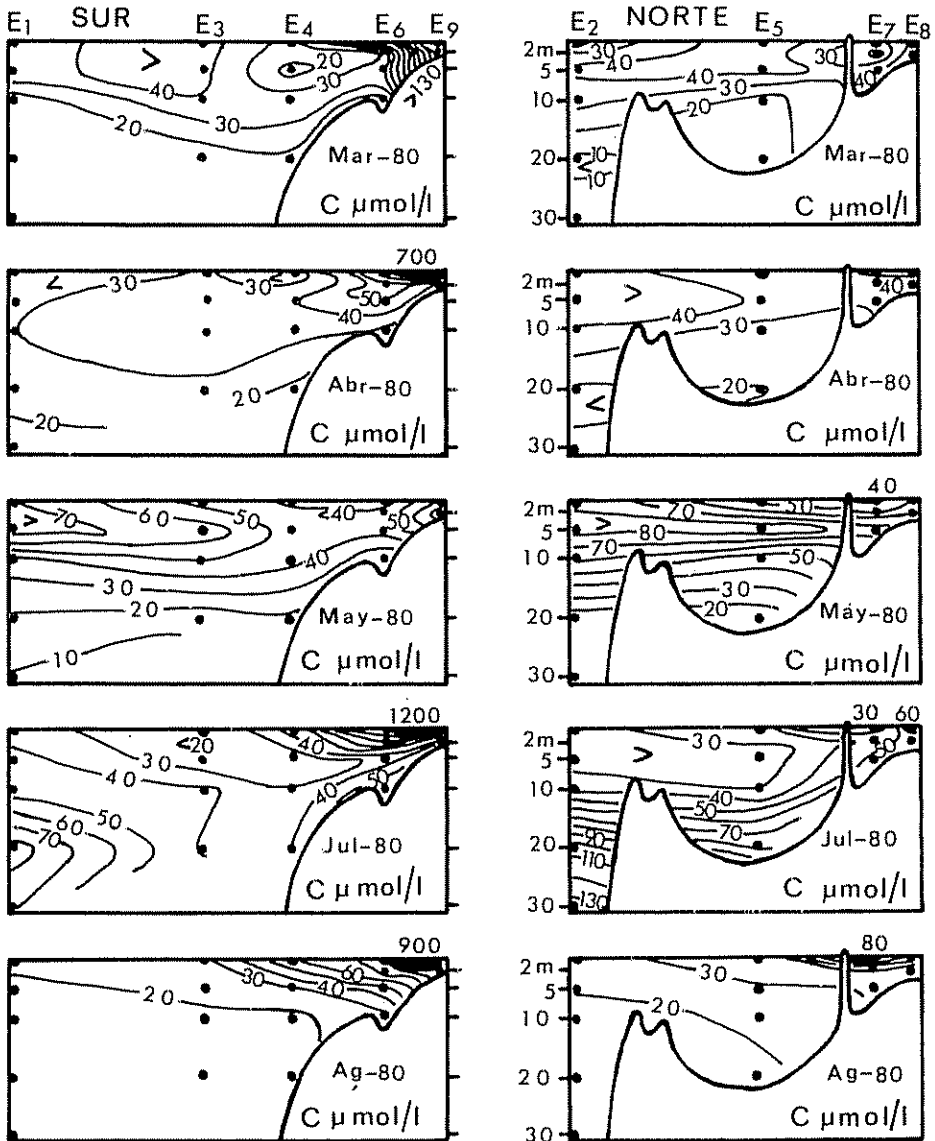


FIG 8 continuación 2

Agosto fue similar a julio, si bien no hubo transporte de organismos por el fondo. Clorofila y MOP son mayores en la zona interna y, comparando los dos perfiles, está clara la corriente de biomasa por la superficie, próxima a la costa norte, dirigiéndose hacia el mar.

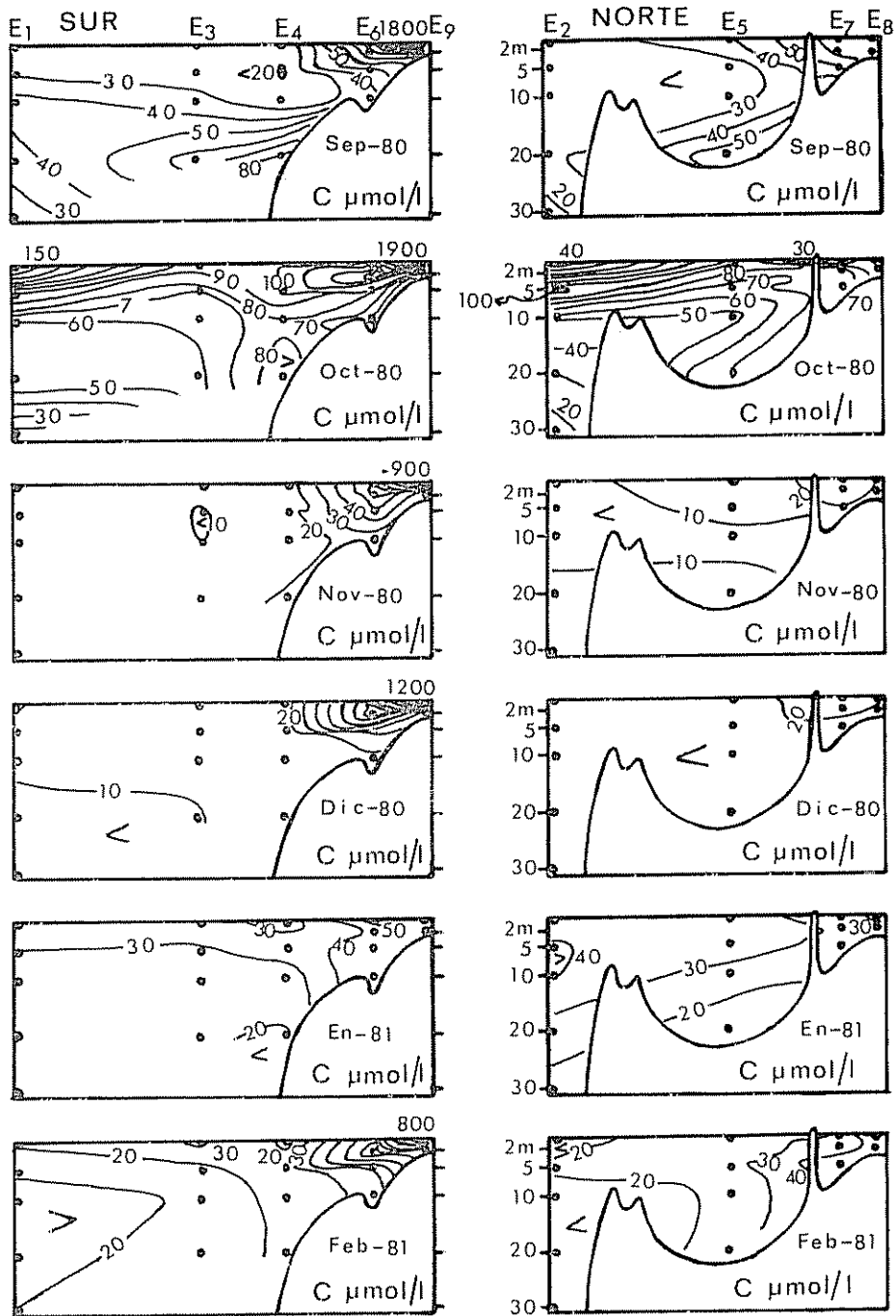


FIG 8 continuación 3

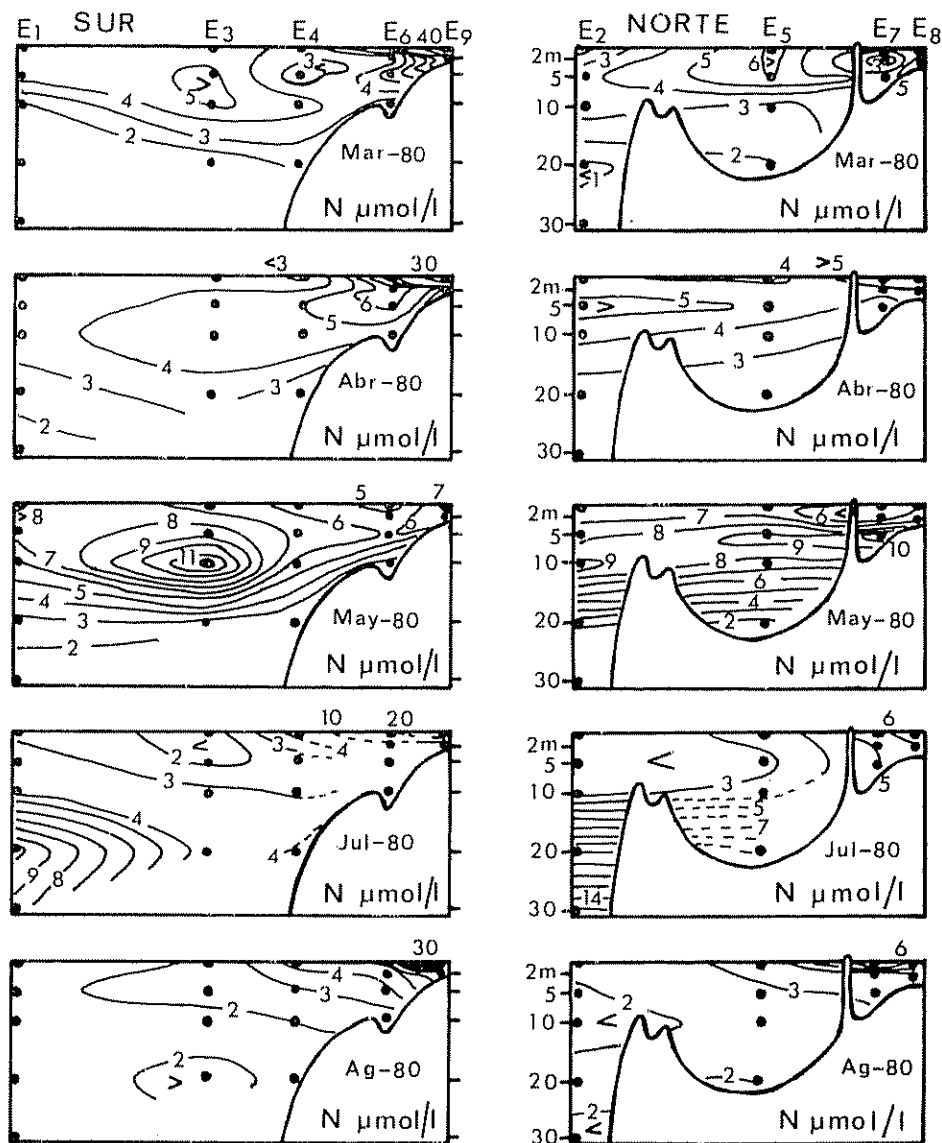


FIG 8 continuación 4

Con la intrusión de A.C.N.A. de septiembre (FIGUEIRAS *et al.* (1985), que no alcanza la superficie, las distribuciones en esta capa son muy semejantes a las de los dos meses previos. En la masa de agua rica en nutrientes, que se sitúa debajo de esta capa superficial, los máximos de clorofila se localizan

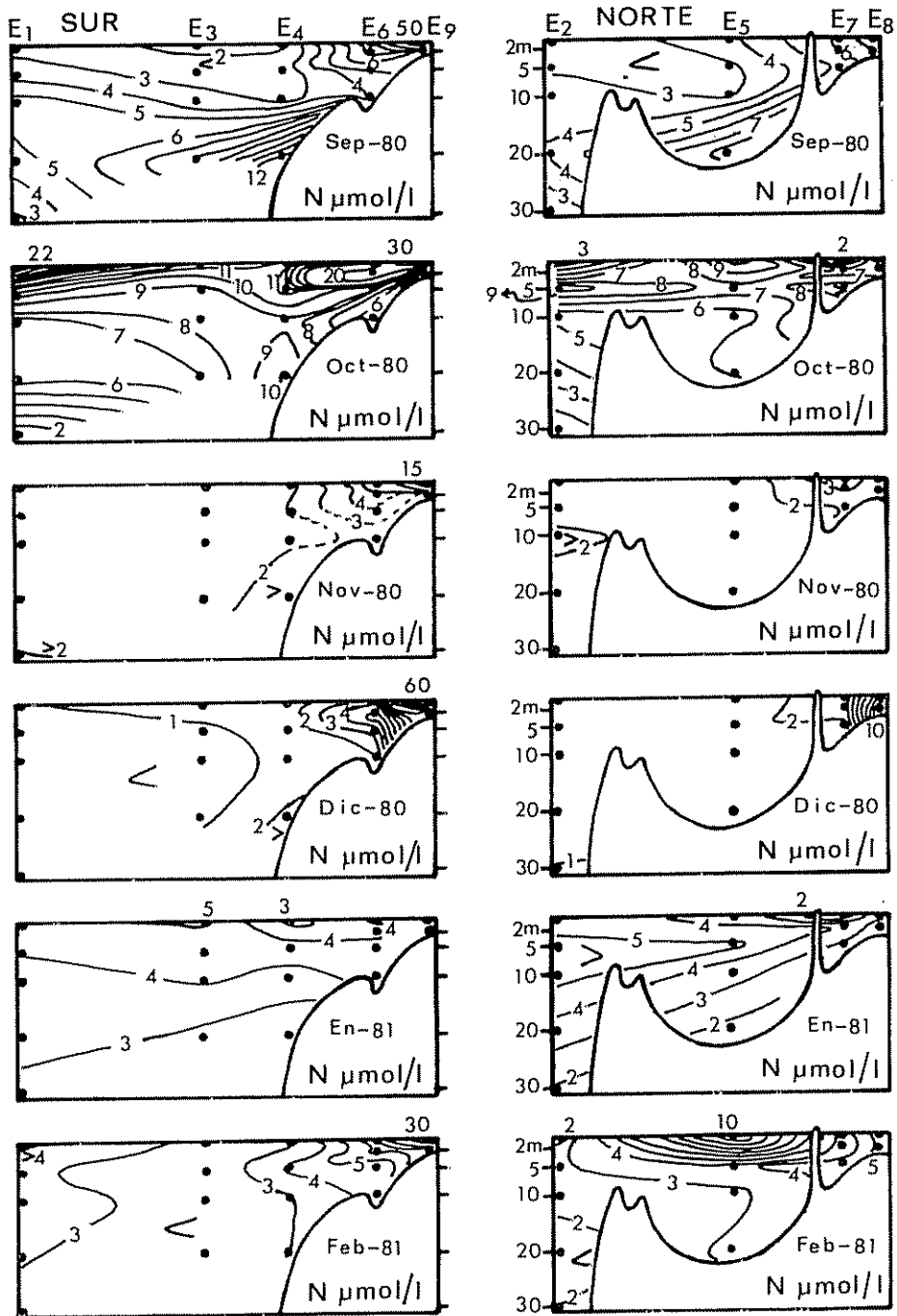


FIG. 8 continuación 5

en el límite más bajo de la capa fótica, excepto en las estaciones 4 y 5, donde dicha capa es más profunda que la columna de agua. En este último caso, los máximos se encuentran en el fondo y, puesto que los nutrientes no son limitantes, deben estar integrados por poblaciones que crecen a bajas intensidades de luz y, por lo tanto, sobreestimadas por la clorofila. Las distribuciones de COP y NOP parecen confirmarlo.

La marea roja de los primeros días de octubre elevó espectacularmente las concentraciones de las tres variables en toda la ría. La distribución de clorofila muestra que en el agua profunda, única con concentraciones apreciables de nutrientes originados por la remineralización (FIGUEIRAS *et al.*, 1986), no aparecen poblaciones costeras. Esto puede conducir a la impresión errónea de que los organismos que forman la marea roja crecen en la ría y después son transportados al océano por la corriente de superficie. Teniendo en cuenta las horas y días en las que fueron hechas las observaciones (cuadro I), es fácil inferir un motivo de migración diaria (EPPLEY *et al.*, 1968; BLASCO, 1978) con movimientos hacia abajo, donde los nutrientes son abundantes, durante la noche y retorno a la superficie cuando la luz está disponible. De este modo se puede explicar el máximo de clorofila de la estación 2 en los 5 m de profundidad y el máximo secundario de la estación 4 a 20 m. Las acumulaciones en las estaciones 4 y 5 son la consecuencia del movimiento dirigido hacia arriba, favorecido por la elevación del agua del fondo, que debilita los gradientes durante la mezcla. El traslado en la estación 6 a 2 m de profundidad es el resultado de la interacción del transporte horizontal con el giro ciclónico. Esta influencia en la distribución de la clorofila no se manifiesta en las de COP y NOP a causa de las altas concentraciones de MOP que expulsa la fábrica. Sin embargo, las distribuciones de las tres variables son paralelas en el perfil norte.

Con el enfriamiento invernal las aguas de superficie se mezclan con las del fondo y desaparece la estratificación (FIGUEIRAS *et al.*, 1985). Por ello, a pesar de que las concentraciones de nutrientes son altas, las de clorofila y MOP son bajas y homogéneas en toda la ría excepto en la zona intermedia, en donde la estratificación permite que las poblaciones sigan creciendo, a pesar de la existencia de pérdidas por difusión. De todos modos, los datos de MOP en esta zona pueden estar alterados por el río, por poblaciones bentónicas resuspendidas y por el vertido.

Con el nuevo año, en enero, un pequeño aumento en la energía incidente (fig. 5) no es suficiente para que la capa fótica alcance la profundidad de la capa de mezcla (figs. 3 y 6 en FIGUEIRAS *et al.*, 1985), salvo en las estaciones más interiores. A pesar de ello, las concentraciones de clorofila y MOP aumentaron hasta los niveles de la primera intrusión de A.C.N.A. del ciclo estudiado (marzo de 1980). La mezcla por enfriamiento, en enero, afectó a las capas superiores de A.C.N.A. en la costa.

En febrero de 1981, las condiciones de mezcla son muy semejantes a las del mes anterior.

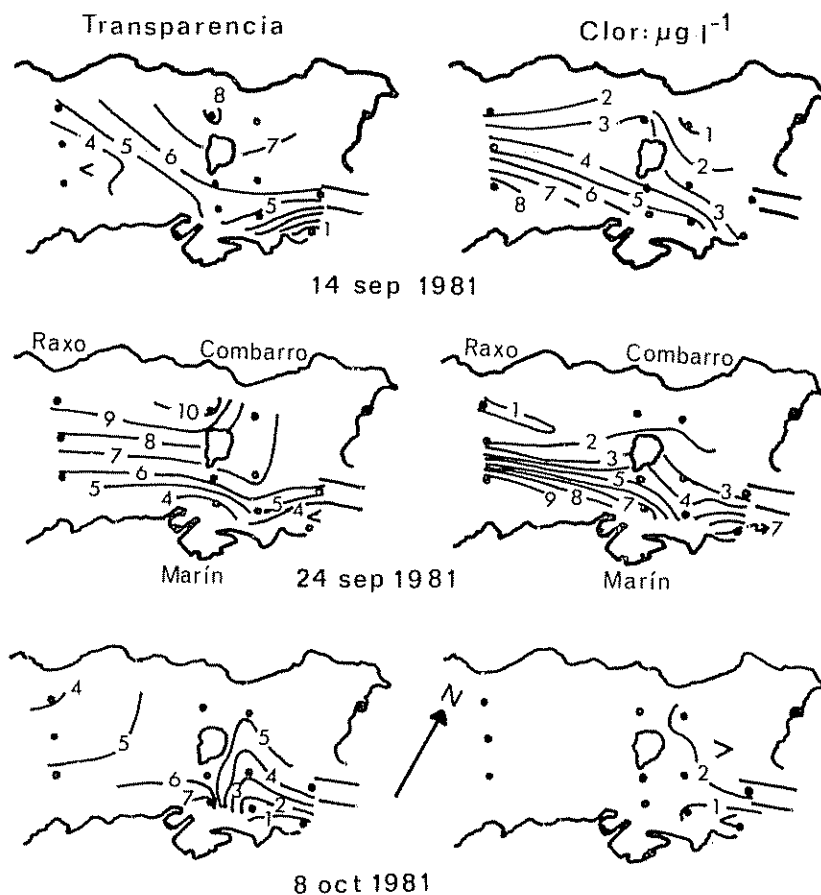


FIG 9 — Visibilidad del disco de Secchi y concentraciones de clorofila *a* y carbono y nitrógeno particulados en la zona interna de la ría.

En las observaciones de los muestreos *cortos* se repite el esquema general de los *largos*; no obstante, se pone de manifiesto una mayor influencia del río, cuyas descargas son especialmente importantes.

#### LA ZONA INTERNA

##### *Transparencia del agua*

La figura 9 pone de manifiesto el origen interno de la turbidez y, más concretamente, la importancia del efluente, por lo que no es extraño que, cuando paró la fábrica (24 de septiembre), la transparencia fuera mayor que



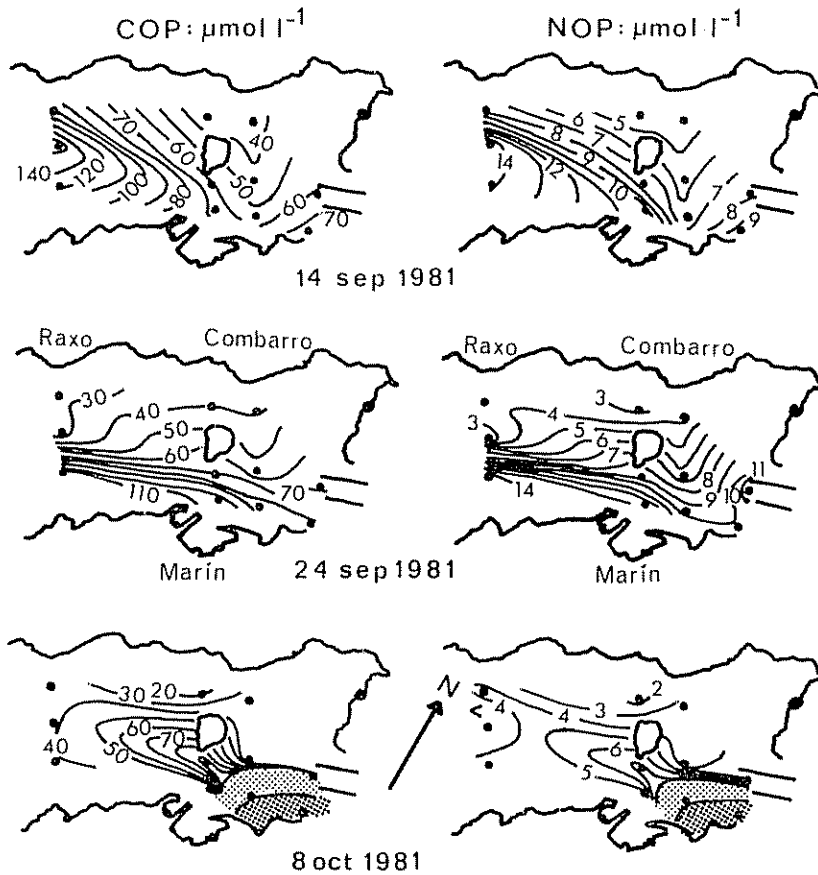


FIG 9 continuación

en otros días. Esta influencia fue mucho más patente el 8 de octubre, cuando el agua que penetró por la orilla sur (Marín) carecía de clorofila y MOP viva.

La marea viva del 14 de septiembre (cuadro II) redujo la influencia del efluente en las estaciones más internas, introduciéndolo en el banco de Placeres.

#### *Clorofila y materia orgánica particulada*

Las distribuciones de clorofila y MOP siguen la corriente que se dirige hacia el interior por la orilla sur y transporta poblaciones de fitoplancton los días 14 y 24 de septiembre. El flujo mayor del día 14 permite detectar clorofila en la estación 9.

CUADRO IV  
 Densidad ( $\sigma_t$ ) y clorofila *a* ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) en el día 8-10-1981

<i>Estación</i>	<i>Profundidad</i> (m)	$\sigma_t$	<i>Clorofila a</i>
E12	0	20,554	—
	5	25,072	3,47
	10	25,303	1,54
	20	25,444	0,17
E5	0	22,944	1,68
	5	24,876	24,12
	10	25,287	13,13
	20	25,562	1,27
E4	0	24,355	1,53
	5	25,274	3,90
	10	25,340	0,64
	20	25,586	1,00
E6	0	23,826	1,62
	2	24,856	7,61
	5	25,169	4,68
	10	25,291	1,01
E13	0	22,998	1,99
	2	24,752	11,48
	5	25,185	4,24
	10	25,350	1,03
E11	0	22,519	1,54
	2	24,474	2,27
	5	25,137	15,88
	10	25,346	1,14
E14	0	18,574	2,14
	2	24,841	5,03
E7	0	20,929	1,74
	2	23,823	6,57
	5	24,727	10,39
E15	0	22,405	—
	2	23,918	4,45
	5	25,214	1,36
E8	0	21,853	2,57
	2	23,463	2,85
E9	0	12,724	—
	2	24,629	1,41

Llama la atención la escasez de biomasa, en superficie, del día 8 de octubre a causa de la corriente de superficie que impuso el río. En la interfase que separa el agua de superficie del agua de fondo, había grandes concentraciones de clorofila (cuadro IV). En este lugar las velocidades de corriente se encuentran disminuidas. Las distribuciones de COP y NOP de este día

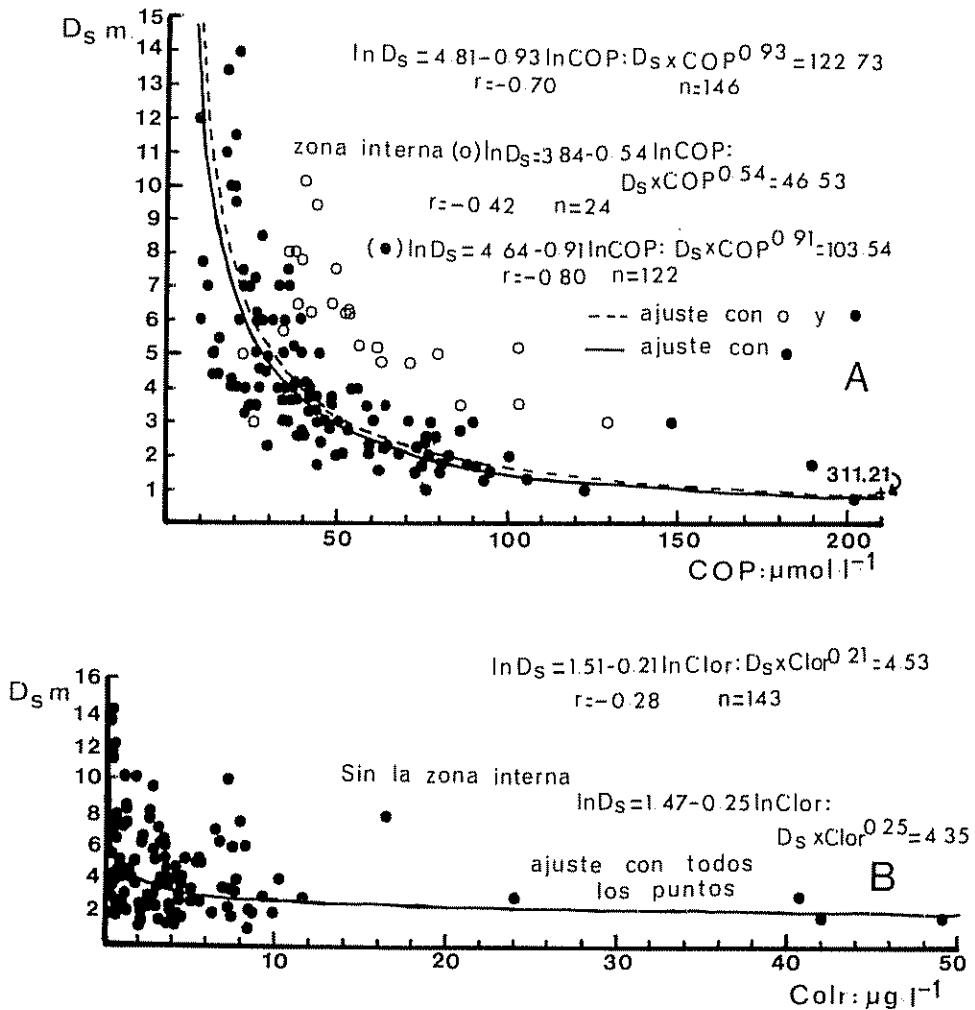


FIG. 10 — Relaciones entre la profundidad de visión del disco de Secchi y las concentraciones de carbono orgánico particulado (A) y clorofila *a* (B). Las concentraciones de COP y clorofila son las calculadas, a partir de las muestras discretas, para una columna de agua con la misma profundidad que la visibilidad del disco. Las estaciones con una visibilidad mayor que su propia profundidad se descartaron. La estación 9 se desechó siempre porque no presenta clorofila.

(fig. 9) reflejan la importante mezcla que se establece entre los tres cuerpos de agua en la vecindad de la isla de Tambo.

*Relaciones entre la transparencia del agua y las concentraciones de COP y clorofila*

De todas las relaciones probadas, sólo una fue apropiada a los datos. Correspondió a la ya clásica de SHAPIRO *et al.*, 1975; CARLSON, 1980; RULL *et al.*, 1984, es decir:

$$D_s \cdot X^a = b$$

donde  $D_s$  es la visibilidad del disco de Secchi en metros,  $X$  es la otra variable en  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  la clorofila y en  $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$  el COP, y  $a$  y  $b$  son dos constantes. Los resultados se expresan gráficamente en la figura 10, donde se ve que el mejor ajuste ocurre con el COP, lo que era previsible si se tiene en cuenta que esta variable refleja el material particulado tanto vivo como no vivo. La correlación, siendo buena, no es inmejorable, e indica que hay otro u otros materiales no orgánicos que explicarían gran parte de la varianza restante (FRAGA, 1979).

La falta de correlación significativa entre visibilidad del disco de Secchi y concentración de clorofila sugiere la presencia importante de material no autótrofo y la adaptación a la disponibilidad de luz por parte del fitoplancton.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Conocida la importancia de las aguas costeras en la circulación en la ría (FIGUEIRAS *et al.*, 1985) y como fuente de nutrientes para ésta (FIGUEIRAS *et al.*, 1986), en este trabajo se pone de manifiesto que esta importancia no es menor para otras variables.

La turbidez, principalmente de origen interno, sigue una distribución inversa a la salinidad, con una transparencia mayor en la orilla sur y un gradiente brusco donde se localiza el giro. Pero lo más importante del agua costera radica en el hecho de que el crecimiento del fitoplancton es únicamente posible cuando la circulación de la ría está controlada por ella; no sólo porque es la fuente de nutrientes, sino también porque fija la velocidad de los dos flujos principales de un modo tal que hace que la corriente de superficie tenga una magnitud inferior a la tasa de crecimiento del fitoplancton. Ésta es la misma circunstancia que hace que los aportes de nutrientes por el río, cuando éstos son realmente importantes, no tengan ninguna consecuencia para el crecimiento algal debido a las pérdidas por difusión que imponen. La influencia del río está limitada a momentos de escaso-moderado flujo.

Comparando los comienzos de las proliferaciones en los dos años (1980-1981) con los niveles de energía incidente (fig. 5) y con la estabilidad del ambiente físico (FIGUEIRAS *et al.*, 1985), así como con la concentración de sales nutrientes (FIGUEIRAS *et al.*, 1986), se puede deducir que la luz, salvo en el mes de diciembre y, quizá, para varias estaciones del interior en noviembre (fig. 3), no fue factor limitante del crecimiento. La escasez de biomasa, en febrero de 1980, viene determinada por pérdidas difusivas impuestas por el fuerte flujo de las capas superficiales; dicho de otra manera, la tasa de pérdida por difusión es mucho mayor que la tasa de crecimiento del fitoplancton (KIERSTEAD y SLOBODKIN, 1953)

La ría se comporta como un sistema estable de exportación de materia orgánica particulada por superficie y de importación de sales minerales por el fondo y ello es posible por la estructura física del agua costera en la que es bien manifiesta una picnoclina, a finales de primavera-verano, que mantiene separadas el agua superficial y el A.C.N.A. Esta picnoclina es, por sí misma, un lugar apropiado para el desarrollo de las poblaciones, al darse un ambiente con condiciones favorables de luz y nutrientes (mes de julio, fig. 8).

El mismo sistema de circulación es asimismo importante para explicar el mantenimiento de una marea roja en la ría y para la reintroducción de organismos previamente exportados al océano (niveles apropiados de luz) en los momentos entre afloramientos.

En un trabajo precedente (FIGUEIRAS y ZAPATA, 1984), se establecieron las condiciones necesarias pero no suficientes para que una marea roja se desarrolle y pueda persistir en las rías. Esencialmente consisten en una moderada estratificación física y una proliferación anterior de diatomeas que pueda agotar los nutrientes y, al mismo tiempo, dar lugar a un umbral de materia orgánica particulada tal que permite que la posterior regeneración de nutrientes en la capa superficial pueda soportar semejante población de flagelados (WANGERSKY, 1977). En el caso que aquí se comenta, la proliferación de diatomeas estuvo soportada por la intrusión de A.C.N.A. del mes de septiembre y, puesto que, en esta estación, la estratificación física se debe principalmente a la temperatura, los gradientes de densidad son los adecuados para la migración vertical de los organismos (BLASCO, 1978). En un ambiente como éste, una marea roja será posible e incluso se mantendrá tanto tiempo como la situación física no sea perturbada por tormentas o, más claramente, por un nuevo suceso de afloramiento costero. Así es fácil suponer que, cuando este sistema dinámicamente estable tenga una marea roja en su seno, ésta será más intensa y/o frecuente en las rías sureñas, puesto que las aguas superficiales fluyen en esa dirección en los meses de verano (FRAGA *et al.*, 1982). Si la migración vertical es cierta, el sistema de circulación de las rías potencia el desarrollo de la marea roja y ayuda a la migración de los organismos hacia la superficie, en el interior de la ría en busca de la luz, y facilita su migración hacia la profundidad en la costa, donde los gradientes verticales de densidad son más débiles y las concentraciones de nutrientes mucho mayores.

En enero de 1981 (fig. 8) penetraron en la ría cantidades apreciables de clorofila y MOP por el fondo. Para explicar esto se debe recurrir al mismo mecanismo que da origen a las mareas rojas. Las células, al sedimentar en las aguas costeras, son reintroducidas, por la circulación de la ría, hasta alcanzar regímenes lumínicos aceptables. Es incorrecto pensar, en este caso, en un crecimiento costero como el de julio porque la mezcla alcanzó las capas superiores de A.C.N.A. (FIGUEIRAS *et al.*, 1985) y es casi seguro que la capa fótica no lo hizo (figs. 3 y 5). Más aún, las penetraciones por el fondo aportan concentraciones de sales nutrientes que no pueden apoyar el supuesto de un crecimiento costero (FIGUEIRAS *et al.*, 1986).

Por el contrario, en febrero, con una mezcla parecida a la del mes anterior, las concentraciones de clorofila y MOP, en el fondo, fueron más bajas. El posible mecanismo para comprender estas diferencias reside en el control de las tasas de hundimiento por parte de la intensidad de luz (BIENFANG *et al.*, 1983). Este autor dice que la tasa de hundimiento de las diatomeas se hace significativamente más lenta a intensidades de luz del 1-3 por ciento de la irradiación en superficie. En febrero este nivel se situó a profundidades mayores que las de enero (figs. 3 y 5), de tal modo que el material particulado vivo alcanzó niveles más profundos que las bocas de las rías y quedó fuera del sistema de circulación.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores R. MARGALEF y F. FRAGA sus valiosas orientaciones y la lectura crítica del manuscrito. A. FERNÁNDEZ y A. AYALA tomaron parte en el análisis de las muestras. M. ZAPATA, R. CASAL, J. BUELA y A. HERMIDA colaboraron en el trabajo de campo. El Dr. F. FERNÁNDEZ ayudó en los trabajos con el ordenador. A todos ellos nuestra gratitud.

## BIBLIOGRAFÍA

- BIENFANG, K. P., J. SZYPER y E. LAWS — 1983 Sinking rate and pigment responses to light-limitation of a marine diatom: implications to dynamics of chlorophyll maximum layers. *Oceanol. Acta*, 6 (1): 55-62.
- BLASCO, D. — 1978 Observations on the diel migration of marine dinoflagellates of the Baja California Coast. *Mar. Biol.*, 46: 41-47.
- CARLSON, R. E. — 1980. More complication in the chlorophyll-Secchi disk relationships. *Limnol. Oceanogr.*, 25 (2): 379-382.
- COLLIN, F. — 1982. Light absorption in the waters of the EMS-DOLLARD estuary and its consequences for the growth of phytoplankton and microphytobenthos. *Neth. J. Sea Res.*, 15 (2): 196-216.
- EPPLEY, R. W., O. HOLM-HANSEN y J. D. H. STRICKLAND. — 1968. Some observations of the vertical migration of dinoflagellates. *J. Phycol.*, 4: 333-341.
- EPPLEY, R. W., W. G. HARRISON, S. W. CHISHOLM y S. STEWART — 1977. Particulate organic matter in surface waters off Southern California and its relationship to phytoplankton. *J. Mar. Res.*, 35 (4): 671-696.
- FIGUEIRAS, F. G. y M. ZAPATA — 1984. Perspectivas para el estudio del fitoplancton en las rías gallegas. *Cuad. da A de Cienc. Mar. Sem. de Est. Gal.*, 1: 193-208.
- FIGUEIRAS, F. G., F. X. NIELL y M. ZAPATA — 1985. Hidrografía de la ría de Pontevedra (NO de España) con mención especial al banco de Placeres. *Inv. Pesq.*, 49 (3): 451-472.
- FIGUEIRAS, F. G.; F. X. NIELL y C. MOURIÑO — 1986. Nutrientes y oxígeno en la ría de Pontevedra, NO de España. *Inv. Pesq.*, 50 (1): 97-115.
- FRAGA, F. — 1976. Distribución del carbono orgánico particulado en la región de afloramiento del NW de África y su relación con el nitrógeno particulado. I. Marzo 1973. *Res. Exp. Cient. B/O Cornide de Saavedra*, 5: 19-30.
- 1979. Profundidad de visión del disco de Secchi y su relación con las concentraciones de fitoplancton y arcilla. *Inv. Pesq.*, 43 (2): 519-528.
- FRAGA, F., C. MOURIÑO y M. MANRÍQUEZ. — 1982. Las masas de agua de la costa de Galicia: junio-octubre. *Res. Exp. Cient. B/O Cornide de Saavedra*, 10: 51-77.
- GOLDMAN, C. J., J. J. MACARTHY y D. PEAVEY. — 1979. Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton oceanic waters. *Nature*, 279 (5710): 210-215.
- JEFFREY, S. W. y HUMPHREY. — 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanz.*, 167: 191-194.
- KAWANA, K. y T. TANIMOTO — 1981. Temporal variation of resuspended matter for one tidal cycle in the HIUCHINADA area. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 37: 173-178.
- KIERSTAD, H. y L. B. SLOBODKIN. — 1953. The size of water masses containing phytoplankton blooms. *J. Mar. Res.*, 12: 141-147.
- ROMAN, R. M. y K. R. IENORE — 1978. Tidal resuspension in Buzzards Bay, Massachusetts. I. Seasonal changes in the resuspension of organic carbon and chlorophyll *a*. *Est. Coast. Mar. Sci.*, 6: 37-46.
- RULL, V.; T. VEGAS y J. NAVARRO. — 1984. Extinción de la luz en los embalses españoles. Relaciones con la concentración de clorofila y las partículas en suspensión. *Oecologia Aquatica*, 7: 25-36.
- SCOR-UNESCO. — 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. *Monographs on Oceanographic Methodology*. UNESCO, París, 1: 11-18.
- SHAPIRO, J., J. B. LUNDQUIST y R. E. CARLSON — 1975. Involving the public in Limnology. An approach to communication. *Verh. Intern. Verein. Limnol.*, 19: 866-874.
- WANGERSKY, J. P. — 1977. The role of particulated matter in the productivity of surface waters. *Helgolander wiss. Meeresunters.*, 30: 546-564.