

PRODUCCION Y DESTINO DE LA BIOMASA FITOPLANCTONICA EN UN SISTEMA DE BAHIAS EN CHILE CENTRAL: UNA HIPOTESIS¹

PRODUCTION AND FATE OF PHYTOPLANKTON BIOMASS IN AN EMBAYMENTS SYSTEM AT CENTRAL CHILE: AN HYPOTHESIS

Ramón Ahumada

RESUMEN

Se describe un evento de surgencia costera frente a la bahía de Concepción y se discute el efecto de fertilización de este evento en la zona costera y en el sistema de bahías que existe en el área. Para ello, se toma como ejemplo la bahía de Concepción, utilizando en su caracterización estacional toda la información disponible. El régimen estacional de vientos en la zona costera (36° Lat. S) produce condiciones favorables a la surgencia costera durante primavera-verano y la convergencia hacia la costa, durante el invierno. Los eventos de surgencia que ocurren en la zona costera producen pulsos de nutrientes que se introducen a los sistemas litorales restringidos (i.e., bahías), generando áreas de alta producción. El bajo contenido de oxígeno de las aguas de surgencia limita el aprovechamiento de la productividad primaria por parte de los peces pelágicos al interior de las bahías. Se produce así una sobreproducción de materia orgánica que, en parte, es acumulada en los sedimentos y parte entregada por advección al sistema adyacente. La fracción sedimentada sería reciclada en períodos de meses e incorporada al sistema pelágico durante el período de invierno. Se presenta evidencia de la ocurrencia de ambos procesos y se discute el rol subsidiario de estos sistemas restringidos a la zona costera adyacente.

Palabras claves: Surgencia costera, corrientes de plataforma, masas de agua, nutrientes, clorofila_a, Pacífico Sudeste, Chile.

ABSTRACT

The coastal upwelling process off Concepcion Bay was described and we discussed the fertilization effect over the embayment system that exist at this area. The climatological pattern at the coastal zona (36° Lat. South), produce two oceanographic features on an annual cycle: One period favourable to coastal upwelling event (Spring and summer) and another period of convergence of surface water to coast (Winter period). The upwelling event pulses supply nutrient to surface water and embayment system, producing, at these end areas, point of high production. The oxygen minimum water intruded to these embayments limiting the pelagic fish consumption and a surplus production was generated. The organic production which took place within embayment had two major fate: Advection to adjacent coastal waters and settle at the bottom. Sedimented fraction would be recycled over a month period of time and incorporated as oxidative nutrient to the pelagic system during the next winter.

Key words: Coastal upwelling, shelf current, water masses, nutrient, chlorophyll_a, Southeast Pacific coast, Chile.

INTRODUCCION

El presente trabajo es una revisión de información obtenida en más de 12 años de investigación oceanográfica por el Laboratorio de Oceanografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Sede Talcahuano. Los diferentes objetivos para los cuales se obtuvo la

información se refieren a estudios de procesos costeros específicos. Sin embargo, una revisión general de los datos y la información parcial obtenida de ellos, permite una aproximación holística sobre la interacción entre las masas de agua de circulación general, el proceso surgencia local y los efectos en las áreas costeras restringidas.

¹Contribución al Proyecto FONDECYT 0374/88.

Departamento de Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 127, Talcahuano, Chile.

Para lograr este objetivo se aceptó que la estacionalidad² es uno de los elementos básicos para definir la periodicidad del sistema. Por esta razón, se presentan argumentos sobre la estacionalidad del área, y en el desarrollo del problema se definen la estacionalidad sobre el cálculo de promedios para los diferentes parámetros durante diferentes años.

Por otra parte, debe tenerse en consideración que los procesos que se describen y se desean relacionar tienen escalas de tiempo diferentes. Sin embargo, en este caso están ligados por la estacionalidad. Si bien un evento de surgencia tiene una duración de algunos días, la probabilidad de ocurrencia dada por la dominancia de los vientos mantiene la estacionalidad. De la misma forma, la bahía de Concepción tiene un tiempo de residencia en este caso, menor que el de un evento de surgencia (≈ 4 días, Mesías y Salinas, 1988), pero mayor o igual que los lapsos de tiempo entre eventos de surgencia, además, que se debería considerar la inercia del sistema. En general, una vez establecido la dominancia de los vientos del sur y el período de surgencia frente a la bahía de Concepción, las condiciones hidrográficas internas de la bahía son las de las aguas afloradas. Una condición diferente se produce durante el invierno y, por tanto, es importante evaluar los cambios en la productividad de esta bahía.

El presente trabajo intenta demostrar esto y discutir los efectos de fertilización que ocurren al interior de la bahía en relación a la producción primaria y su posible destino a través de un período anual.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA COSTA CENTRO-SUR DE CHILE

Topografía

La costa de la Octava Región se extiende desde los 36° a 38,5° de Latitud Sur, con ca. 447 km de línea de costa. La zona costera de la región presenta características de excepción en relación a: a) la existencia de un sistema de bahías, b) presencia de una amplia

plataforma continental; c) cañones submarinos que interrumpen la continuidad de la plataforma; d) un activo sistema estacional de surgencia costera; y, e) la existencia de importantes aportes de agua de escurrimiento fluvial.

El sistema de bahías está formado por la bahía de Coliumo, bahía de Concepción, bahía de San Vicente y el golfo de Arauco (Figura 1). Todas las bahías, con excepción de la bahía de San Vicente, están controladas por fallas geológicas con rumbo N-S y, por tanto, su eje meridional está orientado al norte (Biro, 1979). Sin embargo, la línea general de la costa tiene una leve inclinación hacia los 25°.

La plataforma continental en el litoral de la Octava Región se extiende ca. 30 millas hacia el oeste, con profundidades menores de 160 m. Los cañones submarinos cortan la plataforma al norte de la bahía de Concepción, es el cañón del Itata, y al sur el cañón del Biobío. El primero de ellos tiene su eje central orientado al noroeste y el segundo orientado al oeste. A ambos cañones subma-

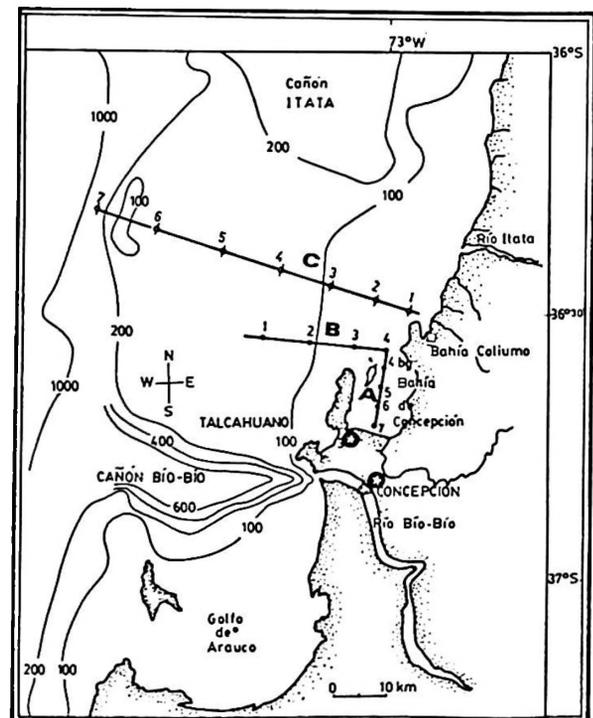


Figura 1. Costa de la VIII Región mostrando el sistema de bahías, la plataforma continental y la ubicación de los cañones submarinos. Además se muestra las estaciones y los cortes oceanográficos (A, B y C) realizados en la zona de estudio y cuya información es analizada en el presente trabajo.

²Esto significa que la señal de las variables estudiadas presentan un cambio estacional notable. La variabilidad en una misma estación, en diferentes años, es baja, lo que permite caracterizar los períodos estacionales con información recopilada en diferentes años.

rinosa se le atribuye origen de erosión fluvial y corrientes de turbidez producidos durante el Pleistoceno (Biró, 1979).

El drenaje fluvial está conformado por dos tipos de ríos que poseen regímenes de descarga diferentes: los ríos que se originan en la cordillera de los Andes y aquellos que tienen su origen en la cordillera de la Costa. Los primeros corresponden a cuencas con astas fluviales superiores a cuarto orden y presentan dos máximos en las descargas: uno producido por las características pluviométricas de una extensa área y otro posterior durante el deshielo en la cordillera de los Andes (i.e., Itata y Biobío). Los ríos que tienen su origen en la cordillera de la Costa tienen sus descargas asociadas a los regímenes locales de lluvia, siendo sus descargas casi inmediatas a los máximos pluviométricos del área costera.

Condiciones meteorológicas costeras

Las condiciones meteorológicas en la costa centro-sur de Chile están determinadas por las interacciones y desplazamientos estacionales del Centro Anticiclónico del Pacífico (CAP), del Sistema Depresionario del Extremo Sur y de la Depresión Continental. Esto genera núcleos climáticos regionales que se definen como áreas de marcadas influencias anticiclónicas (cálidas) o ciclónicas (frías) (Romero, 1979). Las influencias anticiclónicas-ciclónicas alternadas y la formación de frentes en la zona subtropical al norte de Nueva Zelanda, causan fuertes inestabilidades y períodos de mal tiempo durante el invierno en los 30° a los 40° de Latitud Sur de la costa americana. Estos amplios frentes se centran alrededor de los 35° de Latitud Sur, debido al desplazamiento al norte del CAP, de mayo a julio, generando un marcado régimen estacional de vientos y lluvias. La Figura 2 presenta las variaciones de los promedios mensuales de temperatura y lluvia, con el propósito de mostrar la estacionalidad local provocada por estos cambios de gran escala. Por su parte, la estacionalidad del régimen de vientos y sus componentes dominantes son un indicador de la probabilidad de ocurrencia de los eventos de surgencia. La frecuencia de registro horario de los componentes norte-sur de vientos (Figura 3), muestra que la dominancia de la componente sur alcanza siete o ocho meses en el año. El componente norte, en cambio, se hace dominante en los meses restantes. Los vientos del eje

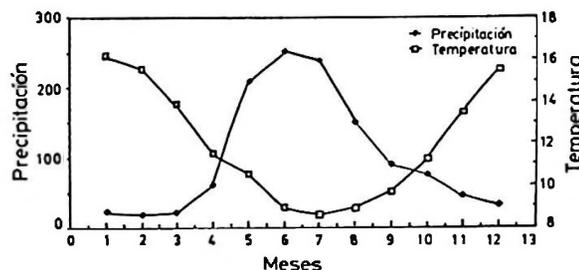


Figura 2. Promedios mensuales de temperatura y precipitación del área para una serie de tiempo de 24 años (1965-1988), obtenidos de la Estación Meteorológica de Bellavista, U. de Concepción.

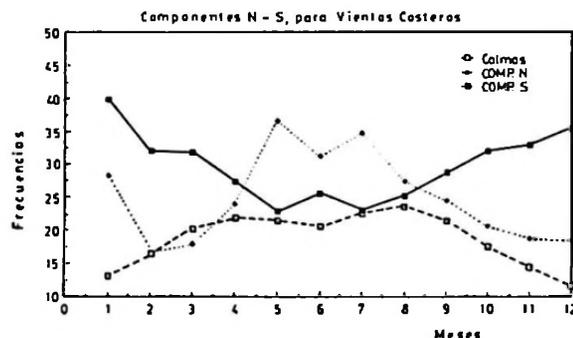


Figura 3. Promedios mensuales de la frecuencia de los componentes norte-sur de vientos para una serie de tiempo de 24 años (1965-1988). La información fue obtenida de la Estación Meteorológica de Bellavista, U. de Concepción.

este-oeste nunca se hacen dominantes en la escala de tiempo mensual. El registro de calmas a través del año presenta una alta frecuencia, con un leve incremento durante el invierno. Un análisis de los datos con observaciones de mayor frecuencia (datos promedios menores a seis horas) muestra que los vientos dominantes disminuyen su intensidad hacia el atardecer para establecerse un período de calma nocturna en la zona. Los efectos causales pueden ser las diferencias térmicas generadas por intercambio calórico entre continente-mar, lo que genera una componente de viento este-oeste compensatorio, pasando por un período prolongado de calma, lo que explicaría la frecuencia del registro de las calmas nocturnas.

Distribución y características de masas de agua

Las masas de agua identificadas en la zona costera centro-sur de Chile, son las Aguas

Subantárticas (ASAA), en el estrato superficial, y las Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS), sobre la plataforma y parte superior del talud continental (Silva y Konow, 1975). Al norte de Valparaíso, ocasionalmente y durante los períodos cálidos, se produce una aproximación superficial a la costa de la masa de agua subtropical (Silva y Konow, 1975).

Las ASAA tienen su origen en la parte norte del frente polar, su salinidad de $33,8 \times 10^{-3}$ y la temperatura de 12°C (Silva y Konow, *op. cit.*). Se desplaza superficialmente hacia el Ecuador bordeando la costa sudamericana con su límite inferior a ca. 100 m de profundidad. El sigma t que mejor caracteriza el agua de origen subantártica es de 25,6. Los aportes de escurrimiento de aguas continentales a partir de los 40° de Latitud Sur producen una importante dilución de la salinidad, lo que llevó a Brandhorst (1971) a proponer una masa de agua que denominó "Agua propia de los canales". Sin embargo, la escasa extensión geográfica que alcanza, alta variabilidad en los parámetros conservativos y escasa persistencia en la circulación general, recomiendan reconocer este evento como una modificación local de las ASAA.

La masa de agua ecuatorial subperforal (AESS) se forma en la región ecuatorial del Pacífico Sudeste, su condición subsuperficial y su escaso contenido de oxígeno se asocia a la Corriente Ecuatorial Subsuperficial (Corriente de Cromwell), la que al llegar a la costa sudamericana se extiende bajo la superficie hacia el sur (Wyrthi, 1965). Las AESS se extienden desde el norte de Perú hasta los 42°S , manteniendo su concentración de oxígeno en valores $> 1 \text{ ml O}_2 \text{ l}^{-1}$ (Brandhorst, 1971) y hasta los 52°S , si se usan los nutrientes como trazadores de su recorrido (Silva, 1977; Silva & Neshyba, 1979). Esta masa de agua se desplaza a profundidades entre 100 y 400 m. Los valores de origen corresponden a salinidades de $34,9 \times 10^{-3}$, temperatura $> 13,0^{\circ}\text{C}$ y un sigma-t de

26,5 (Silva y Konow, 1975). Frente a la bahía de Concepción esta masa de agua conserva un 77% del valor T-S de origen (Método de los Núcleos) (Ahumada y Chuecas, 1979).

Algunas de las características físicas y químicas de las masas de agua para la latitud de 36° , pueden ser modificadas sobre todo para la capa superficial (Tabla 1).

Las ASAA se caracterizan, respecto de las AESS, por tener menor densidad, presentan mayor temperatura, ser bien oxigenadas, tener baja concentración de nutrientes y su flujo es hacia el Ecuador. La temperatura puede disminuir en las capas más superficiales por enfriamiento durante el invierno, no obstante, mantiene su temperatura a profundidades mayores de 15 m. Las AESS son frías (debido a su condición de aguas subsuperficiales), más densas, pobres en oxígeno, ricas en nutrientes y con flujo sur.

PROCESOS OCEANOGRÁFICOS COSTEROS

La dominancia de los vientos del sur, su intensidad y persistencia en escalas cortas de tiempo, favorecen las condiciones de generación de eventos de surgencia en el área. La dependencia física de la dirección e intensidad del viento, de estos eventos, ha llevado a estimar la variabilidad temporal y espacial de ellos sobre la base de índices de surgencia para Talcahuano (Arcos y Navarro, 1986). Los resultados obtenidos para las masas de agua sobre la plataforma continental confirman la caracterización del régimen hidrográfico propuesto por Ahumada y Chuecas (1979), con un período favorable a la surgencia de seis a siete meses en un ciclo anual. El análisis de los índices diarios de surgencia indican que la duración promedio de un evento es de siete a ocho días (Arcos y Navarro, 1986).

Durante el período de invierno, los vientos dominantes son del cuadrante norte y se produce un proceso de convergencia de las

Tabla 1
Características de las masas de agua costeras, alrededor de 36° de Latitud Sur

| Masa de agua | T $^{\circ}\text{C}$ | S $\times 10^{-3}$ | Sigma-t | O $_2$ disuelto ml l $^{-1}$ | [N-NO $_3$] $\mu\text{g l}^{-1}$ | [N-NO $_2$] $\mu\text{g l}^{-1}$ | [N-NH $_4$] $\mu\text{g l}^{-1}$ | [P-PO $_4$] $\mu\text{g l}^{-1}$ | [Si-SiO $_2$] $\mu\text{g l}^{-1}$ | Dirección flujo |
|--------------|----------------------|--------------------|---------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|
| ASAA | $>13,0$ | $<34,2$ | $<25,5$ | $>6,5$ | $< 3,5$ | $<0,5$ | $<0,3$ | $<0,3$ | $<10,0$ | Norte |
| AESS | $<11,5$ | $>34,5$ | $>26,5$ | $<1,0$ | $>25,0$ | $<2,5$ | $<5,0$ | $>2,5$ | $>20,0$ | Sur |

aguas sobre la costa (*downwelling*). Esta condición genera el hundimiento de las AESS y la dominancia de las ASAA en la capa superficial. Sin embargo, las características climáticas regionales introducen cambios locales en la salinidad (escurrimiento superficial y aportes fluviales), y temperatura (enfriamiento por intercambio térmico de las aguas superficiales con la atmósfera).

Surgencia costera

Estudios experimentales para conocer las celdas de circulación de la surgencia costera sobre la plataforma continental, frente a la bahía de Concepción, se han realizado en 1979 (Ahumada *et al.*, 1983 y 1986 datos no publicados). Aspectos relevantes de la información obtenida en 1983, será incluida y discutida en el presente trabajo.

El desfase de tiempo entre el viento observado y respuesta del mar en relación a las corrientes es de 32 a 18 horas, durante períodos de surgencia. Estos valores son consistentes con otros obtenidos con anterioridad

(Blanco, 1984). El desfase puede ser observado en la Figura 4, que muestra los cambios de intensidad del viento y corriente para la componente norte-sur. Los registros corresponden a observaciones cada 15 minutos, pro-

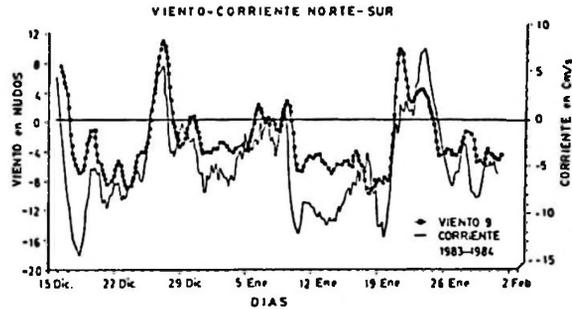


Figura 4. Correlación entre los componentes norte-sur del viento y la corriente, con datos promedios. La información del viento fue obtenida de la Estación Meteorológica de Bellavista y las corrientes con un correntómetro Aanderaa, medida a 40 m en una profundidad en la Boca Grande de la bahía de Concepción (F. Brito, com. pers.).

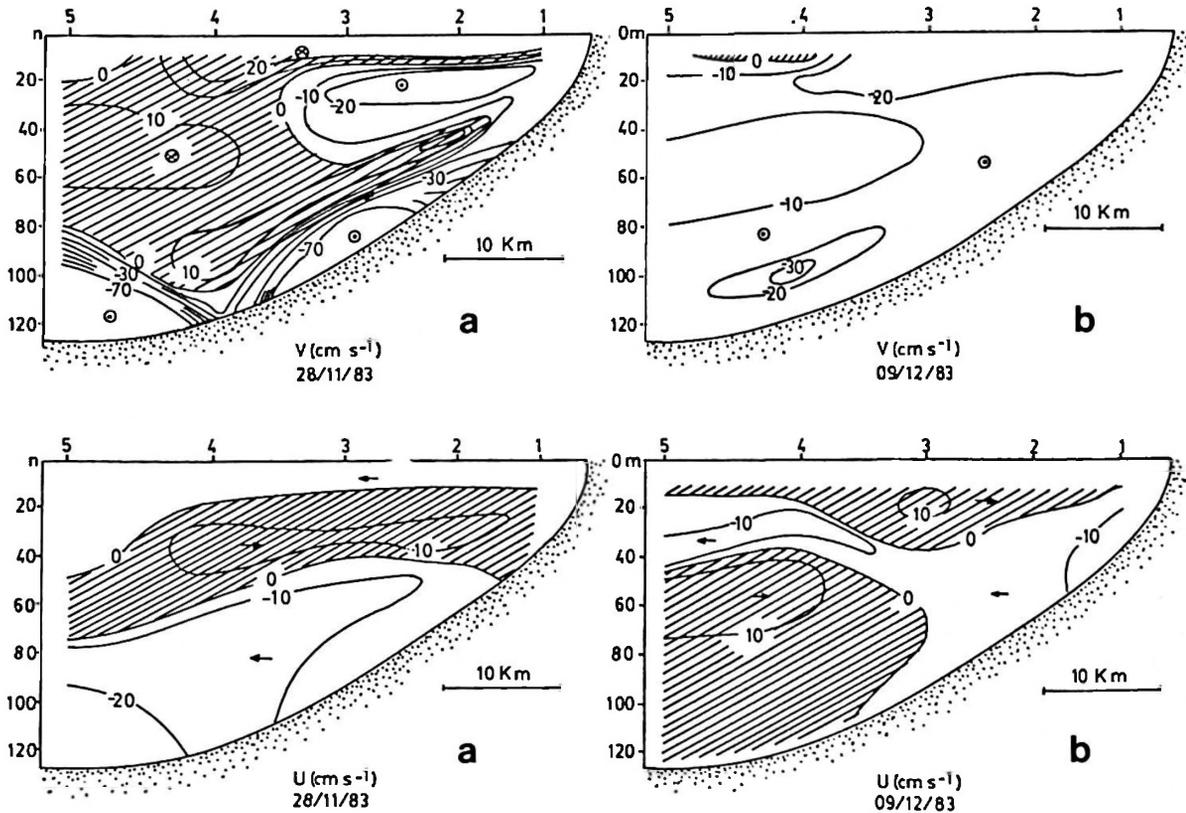


Figura 5. Corrientes instantáneas de los ejes V y U, medidas en el corte C, durante un día de surgencia activa (a, 28/Nov./83) y un día con viento dominante desfavorable a la surgencia (b, 09/Dic./83) (Ahumada, Bernal y Shaffer, 1985).

mediadas a seis horas, obtenidas a 40 m de profundidad con un correntómetro Aanderaa y se correlacionaron con observaciones de vientos obtenidas en la Estación Meteorológica de Bellavista, ca. 8 mn del punto de medición de corrientes.

Las corrientes instantáneas promedio observadas en el área costera sobre la plataforma continental (componentes $U+ \rightarrow 95^\circ$ y $V+ \rightarrow 5^\circ$) durante un evento de surgencia (Figura 5) muestran la estructura de celdas para un evento de surgencia y para un período de relajación. Estas representaciones corresponden a cinco muestreos realizados durante 18 días, iniciados el 28 de noviembre de 1983. Los vientos dominantes durante las mediciones fueron del sur y suroeste, de intensidad fuerte a moderada, cambiando a norte el día 8 de diciembre, y un nuevo cambio el día 11 a viento dominante del sur.

Durante un evento de surgencia activo, la componente V (paralela a la costa), muestra un flujo dominante positivo hacia el ecuador en superficie y tres núcleos de alta velocidad hacia los polos. Esta componente muestra entre las Ests. 4 y 5, el límite de la influencia costera superficial (aguas de surgencia), que alcanzan una distancia de 32 km de la costa, concordante con la extensión teórica de una celda de surgencia para esta latitud: un radio de deformación de Rossby. La componente U (perpendicular a la costa y positivo al Este) muestra una celda de surgencia bien desarrollada, con un flujo subsuperficial hacia la costa (entre los 20 y 70 m de profundidad) y dos flujos hacia el océano: uno superficial y otro profundo, formando una doble celda. Para el mismo período, se muestra el efecto sobre las aguas costeras de vientos desfavorables a la surgencia. En este caso, la componente V muestra un flujo hacia los polos en casi la totalidad de la columna de agua y una disminución de la velocidad. La componente U muestra un flujo superficial y otro profundo hacia la costa y un flujo intermedio contrario (hacia el océano). En general, en este caso las velocidades registradas son moderadas y no exceden los 12 cm s^{-1} .

La distribución espacial que presentan algunas variables como la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, confirman el origen de las AESS en el proceso de surgencia (Figura 6) (Ahumada *et al.*, 1985). Situación que es consistente con la distribución de nutrientes con concentraciones máximas en la capa del mínimo de oxígeno. Debido a la variabilidad de la columna de agua se presenta la infor-

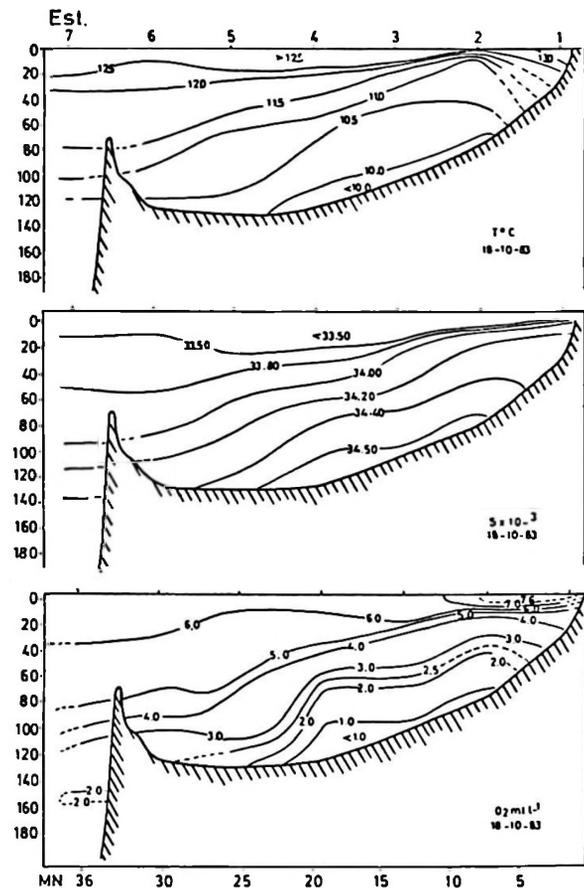


Figura 6. Distribución de temperatura, salinidad, y oxígeno disuelto en la plataforma continental (corte C) durante el período de surgencia (octubre de 1983).

mación resumida, en promedios, para tres estratos de profundidad (Tabla 2).

Debido al contenido de nutrientes de las aguas más profundas (estrato C) y al sistema de circulación costero, es evidente que los eventos de surgencia son los responsables de la fertilización de la franja costera. No obstante, el alto contenido de nitrato en las aguas, la relación N/P es de 11,4, lo que indicaría que el N se comportaría como limitante en relación a la "oferta potencial" de nutrientes al fitoplancton. Es interesante resaltar que las concentraciones de productos reducidos de los compuestos del nitrógeno (nitritos y amonía) son bajas. El hecho de que en el estrato A la concentración de nitratos promedio fue de $1,2 \mu\text{M}$, aparece como una contradicción que el N sea considerado como limitante; sin embargo, esto puede explicarse por el tiempo de acondicionamiento de las aguas superficiales, donde las aguas aflora-

Tabla 2
Valores promedio de tres estratos de la columna de agua frente a la bahía de Concepción,
definidos por el contenido de oxígeno disuelto

| Estrato | Prof. (z) | Estadísticos | T°C | $S \times 10^{-3}$ | Sigma-t | O ₂ dis. ml l ⁻¹ | Sat. % | [N-NO ₃] µg l ⁻¹ | [N-NO ₂] µg l ⁻¹ | [N-NH ₄] µg l ⁻¹ | [P-PO ₄] µg l ⁻¹ | [Si-SiO ₂] µg l ⁻¹ |
|---------|-----------|----------------|-------|--------------------|---------|--|--------|---|---|---|---|---|
| A | 0-10 | X | 14,05 | 34,49 | 25,80 | 7,47 | 128 | 1,20 | 0,05 | 0,54 | 0,30 | 12,91 |
| | | S | 1,08 | 0,10 | 0,28 | 0,93 | | 1,62 | 0,07 | 0,61 | 0,14 | 21,01 |
| N=27 | | S ² | 1,16 | 0,01 | 0,07 | 0,83 | | 2,53 | 0,00 | 0,36 | 0,02 | 449,74 |
| B | 15-40 | X | 11,44 | 34,50 | 26,33 | 2,87 | 47 | 15,29 | 0,33 | 2,25 | 1,97 | 11,15 |
| | | S | 0,46 | 0,12 | 0,11 | 1,27 | | 6,57 | 0,10 | 1,08 | 0,69 | 5,14 |
| N=13 | | S ² | 0,20 | 0,14 | 0,01 | 1,49 | | 39,94 | 0,01 | 1,16 | 0,44 | 24,38 |
| C | >47 | X | 10,65 | 34,64 | 26,58 | 0,57 | 9 | 32,65 | 0,77 | 0,37 | 2,96 | 22,76 |
| | | S | 0,32 | 0,08 | 0,10 | 0,20 | | 8,41 | 0,67 | 0,39 | 0,34 | 10,36 |
| N=22 | | S ² | 0,09 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | | 67,17 | 0,43 | 0,16 | 0,11 | 101,94 |

Los estratos fueron definidos como:

A > 100% Saturación de O₂ disuelto.

100% Saturación < B > 1 ml O₂ l⁻¹.

C < 1 ml O₂ l⁻¹.

das ricas en nutrientes tienen un tiempo de retardo en el consumo de los nutrientes por el fitoplancton.

Distribución de la biomasa fitoplanctónica

Para estudiar la distribución de la biomasa fitoplanctónica durante un evento de surgencia se realizó un muestreo de alta frecuencia. El análisis de los resultados de la muestra permitió obtener una aproximación de la variabilidad espacial para un período de activación y posterior relajamiento del sistema. Se detectó valores de biomasa de 25 mg Cl_a m⁻³. Durante la surgencia activa (28/11/83), la pluma de alta concentración de Cl_a

se presentó homogénea, ubicándose en los primeros 15 m de profundidad. Su extensión hacia el océano coincidió con un radio de deformación de Rossby (i.e., 32 km) y presentó concentraciones mayores en las estaciones 2, 3 y 4 (Tabla 3).

El inicio de un período de relajamiento (09/12/83) produjo un importante cambio en la distribución de la Cl_a, que se caracteriza por una disminución de la biomasa en todas las estaciones, excepto en la más oceánica, Est. 5 (ver Tabla 3). Esto podría deberse a un proceso advectivo que pudo tener dos orígenes: desde el área de surgencia o desde un área más oceánica, por el cambio de los vientos dominantes.

Tabla 3
Valores de clorofila_a para un corte perpendicular a la costa.
Los valores (mg Cl_a m⁻²) corresponden a la integración de muestras discretas durante el período de surgencia costera

| Fecha | Est. 1 mg Cl _a m ⁻² | Est. 2 mg Cl _a m ⁻² | Est. 3 mg Cl _a m ⁻² | Est. 4 mg Cl _a m ⁻² | Est. 5 mg Cl _a m ⁻² | Promedios mg Cl _a m ⁻² |
|----------------------------|--|--|--|--|--|---|
| 28/11/83 | 320,25 | 703,62 | 790,42 | 654,50 | 252,64 | 544,28 |
| 09/12/83 | 119,97 | 610,20 | 437,02 | 345,52 | 669,33 | 436,40 |
| 15/12/83 | 19,37 | 571,17 | 168,32 | 138,52 | 146,92 | 208,86 |
| Promedios | 153,19 | 628,33 | 465,25 | 379,51 | 356,29 | |
| Distancia de la costa (km) | 4,5 | 12,6 | 23,0 | 35,0 | 48,0 | |

Finalmente, tres días después de reiniciadas las condiciones favorables para la surgencia, aun no se observó una respuesta en la biomasa fitoplanctónica en el área (15/12/83), con excepción de la Est. 2, que muestra permanentemente una alta concentración de Cl_a. Esto indicaría que el tiempo de respuesta biológico del sistema, "acondicionamiento" de las aguas y la recuperación de biomasa fitoplanctónica, es mayor de 36 hrs., a pesar que las condiciones de disponibilidad de nutrientes hallan sido restablecidas.

La Est. 2 muestra un comportamiento diferente al resto de las estaciones, independiente de los estados de relajación o actividad del proceso de surgencia. Las concentraciones observadas en esa área se mantienen en niveles altos de Cl_a, aun cuando se puede observar una disminución de la biomasa en el tiempo. Una explicación razonable se refiere a que esa área recibe la sobreproducción de

la biomasa fitoplanctónica de la bahía de Concepción. Esto puede observarse si se compara la disminución de la biomasa promedio de los días de muestreo y los valores de la Est. 2, o bien si se observa la varianza del promedio de biomasa de esa estación, y se compara con las otras.

Por otra parte, las concentraciones de biomasa fitoplanctónica son mayores al interior de la bahía, que en la zona costera adyacente. De esta forma, es posible visualizar un gradiente positivo de clorofila hacia el interior de la bahía. Una evidencia de la continuidad espacial del aporte de biomasa de la bahía a las aguas adyacentes se muestra en la Figura 7, donde se presenta la distribución de Cl_a en el corte A-B, obtenido en el año 1979 (Ahumada, *et al.*, en prensa). El subsidio de materia-energía de estos sistemas puede asociarse al concepto de *outwelling*, que Odum (1980) ha usado para algunos sistemas litorales de

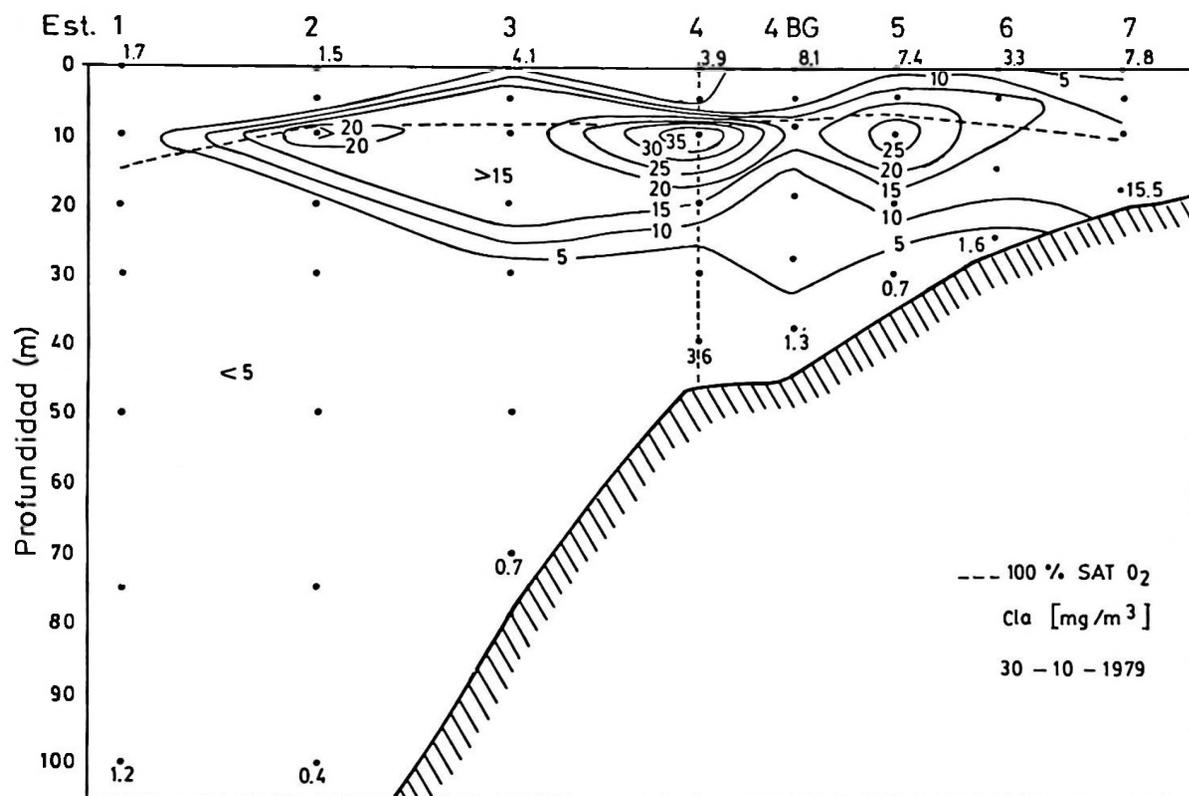


Figura 7. Distribución espacial de clorofila_a, utilizando el corte A (eje longitudinal de la bahía de Concepción) y corte B (perpendicular a la costa). La información corresponde a octubre de 1979.

alta producción. Un proceso similar ocurre en el golfo de Arauco (datos no publicados).

Diferencias locales: Costas abiertas/áreas restringidas

La dinámica de las aguas para una costa abierta es muy diferente a la dinámica de las áreas restringidas. Esto ha sido discutido para los estuarios (Bowden, 1967), donde una de las condiciones principales está definida por la entrada al sistema de aguas continentales proveniente del drenaje terrestre. La importancia estacional de las aguas de escurrimiento continental en la bahía de Concepción fue discutida por Ahumada y Chuecas (1979), clasificando su circulación como de "tipo estuarino". Sin embargo, durante el período de primavera-verano estos aportes no son gravitantes en la dinámica de la circulación, situación que es válida para otras bahías (*embayments*) de latitudes medias. No obstante, las características de las áreas restringidas, como la conformación topográfica, profundidad, orientación geográfica y

dimensión (Djurfeldt, 1989), además del forzamiento de los vientos locales, son importantes en la caracterización física del sistema (ej.: corrientes, tiempos de residencia de las aguas, estratificación, gradientes de presión, mezcla, difusión y ondas estacionarias). Estos parámetros característicos de cada bahía en particular dominan los procesos químicos y biológicos de estos sistemas. En bahías someras, la fricción de las aguas sobre el fondo, la ausencia de gradientes laterales y el gradiente vertical de densidad producen una importante disipación de energía, cambiando los tiempos de residencia de las aguas en relación a las aguas costeras. En otras palabras, en las bahías se produce un efecto de "tamponamiento" de los procesos físicos de la costa. Las características más notables de estos sistemas que tienen consecuencias ecológicas en la productividad son: i) mayor relación área/volumen; ii) producción de vórtices e incremento del tiempo de acondicionamiento de las aguas para la producción primaria (tiempo de residencia de las aguas); iii) incremento de las tasas y el volumen de

sedimentación; iv) rápida incorporación de los nutrientes de origen oxidativo al sistema pelágico, v) alta disponibilidad de alimento para peces pelágicos, y vi) condiciones excepcionales para la postura de huevos y crianza de los primeros estadios de larvas de peces.

BAHIA DE CONCEPCION: UN CASO DE ESTUDIO

La bahía de Concepción es un área restringida de 167,4 km² de superficie, una profundidad promedio de 18,5 m y un volumen aproximado de $3,09 \times 10^9$ m³ (5% error) de agua de mar. La distribución del volumen de aguas se estimó como: 6% en una cota inferior a los 10 m de profundidad; 36% en la cota inferior a los 20 m de profundidad, y 75% en la cota inferior a los 30 m de profundidad. Esto significa que profundidades superiores a 30 m se producen sólo en 25% del volumen. Estimaciones del tiempo de residencia de las aguas en el período estival fue 3,2 días (Mesías y Salinas, 1986).

El forzamiento del viento del cuadrante

sur sobre las aguas de la plataforma continental produce un ascenso, acercamiento a la costa, e intrusión de las AESS al interior de la bahía. Estas aguas, por su alta densidad, fluyen sobre el fondo, generando una fuerte estratificación, que durante este período es dominada por la temperatura. La diferencia de temperatura de las aguas surgentes, temperaturas < 11°C, contrasta con las aguas superficiales que alcanzan normalmente valores de 14°C, siendo la máxima diferencia en diciembre, cuando la temperatura superficial llega a valores mayores de 16°C. La salinidad en invierno presenta valores de $31,5 \times 10^{-3}$ en superficie, comienza a aumentar producto del afloramiento hasta alcanzar valores superiores a $34,45 \times 10^{-3}$.

Como una forma de caracterizar las condiciones físicas y químicas en que ocurren muchos procesos en la bahía de Concepción durante el período de surgencia, se entrega los promedios de once variables ambientales (Tabla 4). Por la escasa profundidad de la bahía, se calculó el promedio ponderado de las variables para dos estratos: capa superfi-

Tabla 4
Valores y tendencias de algunas variables durante el período de surgencia de las AESS en la bahía de Concepción.
Se considera dos estratos definidos por la isopícnica de 26,5 unidades de sigma t (inicio de la picnoclina)

| Variables | Promedios | | Unidades | Comentarios |
|----------------|--------------|------------|------------------------|--|
| | Capa superf. | Capa fondo | | |
| Salinidad | 34,50 | 34,60 | g kg ⁻¹ | Columna homogénea. |
| Temperatura | 13,60 | 11,10 | °C | Valores máximos de 16,5°C se alcanzan en diciembre. |
| Densidad | 1.026,3 | 1.026,7 | g dm ⁻³ | La mayor estratificación se logra en otoño por dilución superficial. |
| Oxígeno Dis. | 6,4 | <1,0 | ml l ⁻¹ | En capa superficial son comunes los valores sobresaturados. |
| pH | 8,4 | 7,6 | -log [H] | Valores >8,6 en capa superficial están asociados máximo biomasa fitoplancton. |
| Nitratos | 0,2 | 24,4 | μ mol l ⁻¹ | Compuesto limitante al crecimiento del fitoplancton. |
| Nitritos | 0,5 | 3,5 | μ mol l ⁻¹ | Aumentan su concentración hacia la cabeza de la bahía. |
| Amonio | 0,3 | 5,0 | μ mol l ⁻¹ | Valores máximos exceden los 50 μ mol l ⁻¹ en área adyacente a la Marisma Rocuant. |
| Fosfatos | 0,5 | 2,9 | μ mol l ⁻¹ | Valores máximos en áreas adyacentes a la Marisma Rocuant. |
| Silicatos | 2,0 | 26,8 | μ mol l ⁻¹ | Máximos de 4.960 mg m ⁻³ . |
| COP | 3.800 | 700 | mg m ⁻³ | |
| Ficción viento | 0,45 | | dinas cm ⁻² | Componente sur. |

cial y de fondo, delimitadas por el inicio de la isopícnica de 26,5. Para la delimitación de los estratos se utilizó la densidad, expresada como σ_t , en lugar de la capa del mínimo de oxígeno, debido a la baja profundidad de la bahía. Este parámetro presenta una mejor estimación de la estratificación y, usado en combinación con el oxígeno disuelto, da una idea de la mezcla turbulenta de las aguas superficiales.

La estratificación de las aguas en primavera-verano determina una débil capa de mezcla, produciéndose una fuerte oxiclina. La profundidad de la oxiclina (ca. 10 y 15m) depende de la intensidad de la surgencia y la intensidad del viento en la bahía. La actividad de la surgencia producida por vientos prolongados e intensos, seguidos de debilitamientos y calmas, producen una disminución significativa de la mezcla turbulenta, lo que produce un ascenso de las aguas pobres en oxígeno cerca de la superficie y, en ocasiones, producen mortandades masivas (Ahumada y Arcos, 1976).

Durante este período los perfiles de oxígeno son típicos, con valores de saturación o sobresaturación cerca de la superficie y condiciones de suboxia (i.e., $O_2 < \text{ml l}^{-1}$) o anoxia cercano al fondo. El pH del agua de mar sigue la tendencia de los perfiles de oxígeno, debido a la alteración del equilibrio del CO_2 por la actividad biológica (fotosíntesis-heterotrofia). En la superficie el pH presenta valores de 8,4, con una disminución de casi 0,8 unidades en las aguas cercanas al fondo (i.e., pH = 7,6), producto de la actividad heterotrófica.

Las concentraciones de los nutrientes en relación a la capa superficial alcanzan dos órdenes de magnitud mayor en nitratos (i.e., de 0,8 a 29,4 μM); nitritos e iones amonio (i.e., 0,03 a 3,5 μM y 0,02 a 5 μM , respectivamente), y un orden de magnitud de diferencia en los fosfatos (i.e., 2,9 $\mu\text{mol l}^{-1}$) y silicatos (i.e., 26,8 $\mu\text{mol l}^{-1}$). La relación N/P se mantiene en 11,3 al interior de la bahía, a pesar de la disminución de los nitratos. La proporción entre $[N-NO_3^-] - [N-NO_2^-] - [N-NH_4^+]$ se incrementa en favor de los compuestos reducidos hacia la cabeza de la bahía y al parecer son, entre otras variables, las generadoras de una distribución discreta de dos taxocenosis fitoplanctónicas en la bahía de Concepción (González *et al.*, 1987). Durante este período, son los nitratos los que actúan como reactivo limitante del proceso de productividad primaria y su concentra-

ción llega prácticamente a cero en las aguas superficiales (Ahumada *et al.*, 1984).

La producción primaria estimada fue de 3,5 $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$, con valores máximos que alcanzaron 6,8 $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$, lo que explica que en la capa superficial, durante eventos de surgencia de AESS, se produzca: a) un aumento en la concentración de oxígeno disuelto (i.e., $>7,5 \text{ ml } O_2 \text{ l}^{-1}$), siendo común encontrar valores de sobresaturación de oxígeno, producido principalmente por actividad fotosintética; b) la disminución de la concentración de compuestos del nitrógeno, fósforo y silicio, al ser utilizados como nutrientes, i.e., 0,2 μM $[N-NO_3^-]$; 0,3 μM $[N-NH_4^+]$; 0,5 μM $[P-PO_4^{3-}]$ y 2,4 μM silicatos; c) disminución de la concentración de compuestos inorgánicos oxidados del nitrógeno en favor a los compuestos reducidos. Si se compara las concentraciones de estos compuestos con los de las aguas subsuperficiales de la plataforma se observa diferencias locales importantes.

Durante el invierno las ASAA presentes en la zona costera y sobre la plataforma continental, producen cambios en la disponibilidad de oxígeno en las aguas sobre los sedimentos y una serie de cambios químicos y biológicos ocurren en los sedimentos blandos y en general en la bahía de Concepción. La estacionalidad de los cambios en el oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, se presentan en una variabilidad mensual (Figura 8), con el propósito de conocer sus fluctuaciones. La presencia estacional de las aguas del mínimo de oxígeno en la bahía, es consistente con la advección de nitratos y el incremento de la biomasa fitoplanctónica. En invierno, las aguas oxigenadas muestran una leve disminución cerca de los sedimentos, y la concentración de nitratos fue superior a 5 $\mu\text{mol l}^{-1}$, lo que indicaría que los nutrientes en este período pueden ser de origen oxidativo.

Con propósitos comparativos para establecer las diferencias estacionales se presenta los promedios de las variables relacionadas a la productividad del área (Tabla 5).

Es interesante observar que las diferencias de radiación y biomasa pigmentaria son cercanas o mayores al 60%. Sin embargo, la biomasa expresada como C, los compuestos del N disponible y la productividad, se acercan al 50% de lo producido en el período de surgencia. Esto indicaría que, a pesar que la energía radiante, al igual que los pigmentos, disminuye notablemente; la fijación de car-

bono e índice de la tasa de producción primaria se hacen más eficientes. Otro aspecto interesante es la relación en el contenido de pigmentos fotosintéticos (Cl_a/Cl_c), que presenta cambios estacionales interesantes (1,08 y 0,90 para verano e invierno, respectivamente).

HIPOTESIS SOBRE LA PRODUCCION DE LAS AGUAS COSTERAS

Desde el punto de vista de la producción y su destino, existe importante información para el período de surgencia, que permite establecer hechos e inferir una hipótesis. La producción primaria en la bahía es controlada principalmente por nutrientes preformados que llegan a la zona fótica por advección vertical. La activación y relajación de los eventos de surgencia, generan pulsos (en escalas de tiempos de días), los cuales producen los "manchones" de biomasa en las aguas costeras. En las áreas restringidas por efecto del tiempo de residencia de las aguas se produce un efecto de sobreproducción, alcanzando la biomasa valores de $40 \text{ mg } Cl_a \text{ m}^{-3}$ como máximo, y valores de $5 \text{ mg } Cl_a \text{ m}^{-3}$ como mínimo. Los consumidores secundarios representados en la zona costera por copépodos (i.e., *Calanus chilensis*, *Paracalanus parvus*, *Acartia tonsa*) tienen un rango de biomasa de 1.000 a 46.400 ind., m^{-3} . Su abundancia está asociada a los pulsos de surgencia activa-relajación, donde los mayores números de individuos ocurren durante la relajación del sistema (Peterson *et al.*, 1988). Sin embargo, la alta producción orgánica de la

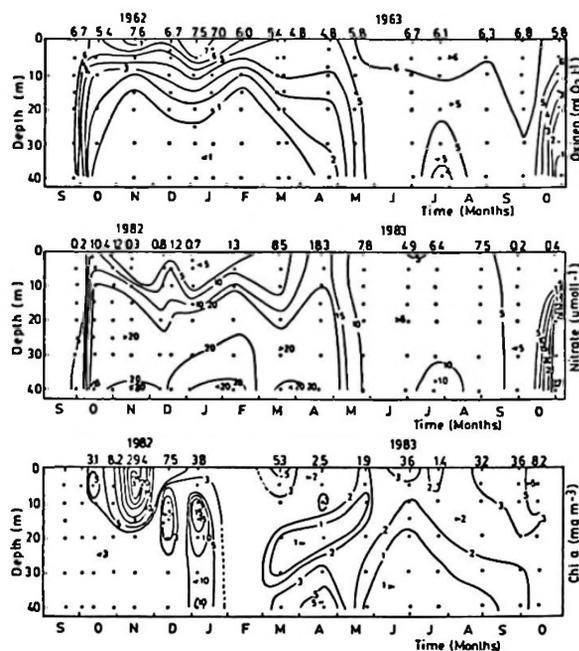


Figura 8. Distribución temporal de oxígeno disuelto, nitratos y clorofila_a en la Est. 4 bg, en una serie de tiempo de un ciclo anual (bahía de Concepción).

bahía estimada por los altos valores de COP (rangos de $700\text{-}3.800 \text{ mg m}^{-3}$), ha llevado a estudiar algunas rutas alternativas de la producción (i.e., "loop bacteriano"). Pantoja *et al.* (1989) han estimado la producción secundaria bacteriana para la bahía de Concepción en $2,5 \times 10^6 \text{ cel ml}^{-1} \text{ día}^{-1}$, equivalente a $600 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, por lo que el componente bacteriano juega un rol importante en este tipo de ecosistema. Balances de carbono a partir

Tabla 5
Condiciones oceanográficas estacionales promedio para la bahía de Concepción
(Períodos de "Surgencia" y "Circulación Estuarina")

| Variables | Valores promedios | | Unidades | Diferencias estacionales |
|--|-------------------|--------------|---|--------------------------|
| | P. surgencia | P. estuarino | | |
| Radiación | 465,7 | 194,3 | cal cm^2 | -59,0% diferencia |
| Temperatura | 12,8 | 13,5 | "C | +5,5% diferencia |
| Salinidad | 34,45 | 33,97 | g kg | -1,4% diferencia |
| [NO ₃ +NO ₂ -NH ₄] | 28,40 | 13,50 | µM | -52,5% diferencia |
| Relación Redfield | 10,3/1 | 15/1 | N/P µM | |
| Clorofila _a | 50,0 | 16,0 | mg m^{-3} | Valores máximos |
| Clorofila _b | 309,8 | 60,6 | mg m^{-2} | -80,4% diferencia |
| Clorofila _c | 285,0 | 67,3 | mg m^{-2} | -76,4% diferencia |
| Biomasa fitoplancton | 12,6 | 6,3 | mg C m^{-2} | -50,0% diferencia |
| Producción primaria | 190,0 | 95,4 | mg C $\text{m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ | -50,5% diferencia |
| Índice fotosintético | 3,5 | 1,8 | mg C mg Cl _a h^{-1} | -48,0% diferencia |

de la producción primaria y donde se incluye las tasas de transferencia y sedimentación, muestran un desbalance positivo que sale de la bahía (Bernal *et al.*, 1989), lo que refuerza la hipótesis de *outwelling*, no sólo para el período de surgencia.

Una parte importante de la producción generada por la entrada de nutrientes durante el período de surgencia sedimenta en la bahía, equivalente al 40% del C fijado por fotosíntesis, y pasa a formar parte de los sedimentos reductores. La fracción sedimentada tiene una lenta remineralización por las condiciones de baja tensión de oxígeno. Sin embargo, al cambiar el régimen a circulación estuarina cambia el contenido de oxígeno de las aguas y se producen nutrientes de origen oxidativo, produciéndose una fertilización local. En este período la relación N/P es de 17/1, y la concentración de nutrientes al interior de la bahía es 3 veces mayor que la de las aguas adyacentes, pero aproximadamente 1/3 del promedio de verano. Estas condiciones crean un centro potencial de fertilidad al interior de estas áreas restringidas, un área de desove y prerreclutamiento (Rojas y Mujica, 1981) y un subsidio de materia orgánica para las aguas adyacentes.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el financiamiento otorgado al Laboratorio de Oceanografía por las siguientes instituciones: Dirección de Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DIUC), Agencia Sueca para la Investigación de los Países en Desarrollo (SAREC) y Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT). Además desea expresar el reconocimiento a todos los investigadores y estudiantes que colaboraron en el desarrollo de los distintos proyectos realizados durante los últimos cinco años.

LITERATURA CITADA

- AHUMADA, R. y D. ARCOS. 1976. Descripción de un fenómeno de varazón y mortandad de peces en la bahía de Concepción, Chile. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, 5: 101-111.
- AHUMADA, R. y L. CHUECAS. 1979. Algunas características hidrográficas de la bahía de Concepción y áreas adyacentes, Chile, *Gayana, Misc.*, 8: 1-56.
- AHUMADA, R., A. RUDOLPH & V. MARTÍNEZ. Circulation and fertility of waters in Concepcion Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16: 95-105.
- AHUMADA, R., R. MORALES, A. RUDOLPH y P. MATRAL. 1984. Efectos del afloramiento costero en la diagénesis temprana de los sedimentos de la bahía de Concepción, Chile. *Bol. Soc. Biol. Concepción, Chile*, 55: 135-146.
- AHUMADA, R., P. BERNAL y G. Shaffer. 1985. Dinámica física y biooceanográfica de una zona de surgencia costera. Informe de Avance. Proyecto Investigación DIUC-SAREC 1/83. Dirección de Investigación, Pontificia Universidad Católica de Chile, 95 pp.
- ARCOS, D. y N. NAVARRO. 1986. Análisis de un índice de surgencia para la zona de Talcahuano, Chile (Lat. 37°S). *Invest. Pesq. (Chile)*, 33: 91-98.
- BERNAL, P., R. AHUMADA, H. GONZÁLEZ, S. PANTOJA y A. TRONCOSO. 1989. Flujo de energía en un modelo trófico en la bahía de Concepción. *Biología Pesquera*, 18: En prensa.
- BIRÓ, L. 1979. Geología de la franja costera entre Cocholhue y Coronel, provincia de Concepción (36°35'-37° Lat. Sur), Chile. En: V.A. Gallardo (Ed.). *Actas Seminario-Taller sobre Desarrollo e Investigación de los Recursos Marinos de la Octava Región, Chile*. Universidad de Concepción: 20-30.
- BLANCO, J.L. 1984. Características de la circulación sobre la plataforma continental de Talcahuano. Tesis para optar al título de Oceanógrafo. Universidad Católica de Valparaíso. 42 pp.
- BOWDEN, K.F. 1967. Circulation and Diffusion. Pages: 15-36. En: G.H. Lauff (Ed.). *Estuaries*. Amer: Assoc. Adv. Sci. Publ., 83: Washington, D.C.
- DJURFELDT, L. 1989. Circulation and mixing in a coastal upwelling embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9(11): 1003-1016.
- GONZÁLEZ, H., P. BERNAL y R. AHUMADA. 1987. Desarrollo de la dominancia local en la taxocenosis de fitoplancton de la bahía de Concepción, Chile, durante un evento de surgencia. *Revista Chilena de Historia Natural*, 60(1): 19-35.
- MESÍAS, J. y S. SALINAS. 1986. Corrientes en la bahía de Concepción, Chile. *Biología Pesquera*, 15: 55-62.
- ODUM, E. 1980. The status of three ecosystem level hypotheses regarding salt marsh estuaries: Tidal subsidy, outwelling, and detritus based food chains, pages 485-495. En: V. Kennedy (Ed.), *Estuarine Hypotheses*. Academic Press.
- PANTOJA, S., H. GONZÁLEZ & P. BERNAL. 1989. Bacterial biomass and production in a shallow bay. *J. Plank. Res.* 11(3): 599-604.
- PETERSON, W.T., D., ARCOS, G.B., McMANUS, H. DAM, D. BELLANTONI, T. JOHNSON & P. TISELUS. 1988. The nearshore zone during coastal upwelling: Daily variability and coupling between primary and secondary production off central Chile. *Prog. Oceanogr.*, 20: 1-40.
- ROJAS, O. y A. MUJICA. 1981. Delimitación de las áreas de desove, prerreclutamiento y estimación de la abundancia relativa de huevos y larvas de peces pelágicos de importancia económica. Subsecretaría de Pesca-Instituto de Fomento Pesquero, Informe Técnico, 82 pp.
- ROMERO, H. 1979. Influencia del océano sobre la estructura climática de Chile: Un elemento del espacio geográfico oceánico. Págs. 66-78. En: V.A. Gallardo (Ed.). *Actas Seminario-Taller sobre Desarrollo e Investigación de los Recursos Marinos de la Octava Región, Chile*. Universidad de Concepción. 567 pp.
- SILVA, N. 1977. Water mass structure and circulation off southern Chile. M.S. Thesis, Oregon State University, Corvallis, Oregon. 83 pp.
- SILVA, N. y D. KONOW. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de aguas en el Pacífico Sudoriental. Expedición Krill. Crucero 3-4. Julio-agosto 1974. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, 3: 63-75.

SILVA, N. & S. NESHYBA. 1979. On the southernmost extension of the Peru-Chile Undercurrent. *Deep-Sea Res.*, 26: 1387-1393.

WYRTHI, K. 1965. Circulation and water masses in the Eastern equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. and Limnol.*, 1(2): 14-28.