

EFFECTOS DEL AFLORAMIENTO COSTERO EN LA DIAGENESIS TEMPRANA DE LOS SEDIMENTOS DE LA BAHIA DE CONCEPCION, CHILE

Coastal Upwelling Effects on the Early Diagenesis of Sediments in Concepción Bay, Chile

RAMON AHUMADA¹, ROBERTO MORALES², ANNY RUDOLPH³ y PATRICIA MATRAI¹.

RESUMEN

Durante el período de surgencia, aguas subsuperficiales pobres en oxígeno y ricas en nutrientes se introducen en la Bahía de Concepción. Se genera así una alta producción local del sistema pelágico. La sobreproducción se incorpora a los sedimentos provocando una serie de cambios físico-químicos de las aguas y sedimentos, debido a la oxidación de la materia orgánica. En un intento de hacer comprensibles estos procesos se discute los cambios producidos y se propone un modelo general que explicaría dichos cambios.

ABSTRACT

During the upwelling period of Concepción Bay, poor oxygen and rich nutrients water intrudes into it. Thus, a local surplus production of the pelagic system is generated. Part of the organic matter thus produced sinks and settles on the bottom of the bay. Physico-chemicals changes in water and sediments occur during the oxidation of organic matter. In order to understand these processes, changes produced are discussed and a general model that explains such changes is proposed.

Keywords: Coastal zone, Nutrients, Anoxic sediments, Diagenesis model, Geochemistry.

INTRODUCCION

La Bahía de Concepción es una de las escasas bahías que existen en latitudes bajas y medias del margen oriental del Pacífico Sur. Posee una superficie de ca. 190 km² y se localiza en los 36°40' Lat. Sur y 73°02' Long. Oeste. A lo largo del borde oriental del Pacífico existe un flujo

¹Departamento de Biología y Tecnología del Mar. Pont. Universidad Católica de Chile, Sede Talcahuano.

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias. Universidad de Chile.

³Departamento de Química. Pont. Universidad Católica de Chile, Sede Talcahuano.

subsuperficial tipo jet hacia los polos, de aguas que poseen un bajo contenido de oxígeno disuelto y altas concentraciones de nutrientes (Silva y Konow, 1975; Shaffer, 1982 y Robles, 1978). Esta masa de agua ha sido denominada Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) y es la que mantiene la alta fertilidad de la zona costera de Perú y Chile, mediante la entrada de nutrientes a la capa fótica durante los eventos de surgencia.

En la zona costera frente a Concepción, se observa un predominio estacional de los vientos del cuadrante Sur durante mediados de primavera, verano y comienzos de otoño, lo que favorece los eventos de surgencia (Ahumada y Chuecas, 1979).

Durante este período, la bahía desarrolla condiciones excepcionales de fertilidad que dan origen a aguas discoloreadas, ocasionales mortandades masivas de organismos marinos (Ahumada y Arcos, 1976) y sedimentos negros reductores de fondo, con alto contenido de materia orgánica (Falke, 1939 y 1950; Gallardo *et al.*, 1972; Rudolph *et al.*, en prensa). El bajo contenido de oxígeno de las AESS, provoca condiciones especiales para la remineralización de la materia orgánica e incrementa los sedimentos reductores de la bahía.

Este trabajo, intenta explicar en forma general algunos de los procesos que estarían implicados en la diagénesis temprana de estos sedimentos.

MATERIALES Y METODOS

La información hidrográfica utilizada en el presente trabajo corresponde a muestreos mensuales de rutina, realizados en la Bahía de Concepción y áreas costeras adyacentes, desde octubre de 1979 a mayo de 1982. Las estaciones hidrográficas se muestran en la Fig. 1 y han sido designadas por números. Durante el año 1981 se comienza el análisis químico de los sedimentos (Rudolph *et al.*, en prensa). En este trabajo, se presentan los resultados de algunos sitios representativos y que han sido indicados con letras en la Fig. 1.

Las muestras hidrográficas fueron colectadas en muestreadores de PVC, del tipo Niskin de 4 l de capacidad. En cada estación hidrográfica se obtuvo secuencialmente muestras de: Oxígeno disuelto, sulfuros, pH, amonía, nitritos, nitratos, fosfatos, silicatos, clorofilas y salinidad. Para el análisis de nutrientes, las muestras de agua fueron filtradas en 0.45 micras y analizadas en el laboratorio en un período menor de seis horas después de su colección. Para los efectos de este trabajo, las estaciones hidrográficas del 1 al 4 fueron consideradas como de comportamiento externo de la bahía y las estaciones de 4BG a 7 como comportamiento propio de la bahía.

Los sedimentos fueron colectados con una draga tipo Van Veen y/o un sacatestigo de plexigass. Submuestras obtenidas de la draga fueron secadas a 60°C durante 12 horas y tamizadas en 0.45 mm para el análisis de materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno orgánico y fósforo total.

En las muestras obtenidas con sacatestigo se midió Eh y pH. El agua intersticial de los sedimentos fue extraída para análisis de sulfuro de hidrógeno y el sedimento secado a 60°C por 12 horas para análisis elemental.



Fig. 1.- Ubicación de las estaciones hidrográficas (●) y sitios de muestreo de sedimentos (x), en la Bahía de Concepción y áreas costeras adyacentes.

El análisis elemental del sedimento seco, se llevó a cabo usando el método PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) y utilizando el ciclotrón de la Universidad de Chile, Santiago. Réplicas de las muestras fueron enviadas al Croker Nuclear Laboratory de la Universidad de California, Davis, para análisis. Los resultados obtenidos muestran una incerteza de un 20%.

En general, referencias para los métodos analíticos utilizados son presentados en las Tablas 3 y 4.

RESULTADOS Y DISCUSION

Observaciones realizadas en octubre de 1979, en las aguas costeras frente a la Bahía de Concepción, permitieron establecer las características de las AESS antes de aflorar. Estos valores fueron tabulados y se muestran en la Tabla 1.

Durante las estaciones favorables a los eventos de surgencia, valores característicos de las AESS han sido observados en las aguas interiores a la Bahía de Concepción (Arcos, 1981; Ahumada *et al.*, 1983). Sin embargo, los valores de nutrientes y oxígeno disuelto se modifican en la capa fótica (*i. e.*, 1% de iluminación corresponde a *ca.* 15 m.). Los nutrientes disminuyen considerablemente, los nitratos se agotan y el oxígeno alcanza valores de sobresaturación que llegan a un 180%. Esta situación es consecuente con la alta biomasa fitoplanctónica registrada para esos períodos (*e. g.*, 50 mg Cl_am^{-3}).

Sobre la base de las concentraciones de nutrientes de las AESS y los requerimientos del fitoplancton (Redfield *et al.*, 1963), se establece que los compuestos del nitrógeno y específicamente los nitratos, se comportan como limitantes para el crecimiento de los fitoplancteres (Tabla 2). Sobre la base de los valores de esta tabla, es estimó en 2.2 g C m^{-3} la fertilidad potencial de las AESS, o bien, *ca.* 4.4. g Materia Orgánica m^{-3} como producción potencial. Se asume que el C orgánico corresponde a un 50% de la Materia Orgánica. Valores experimentales de 3.5 g C org. m^{-3} han sido encontrados para la MOP (A. Acuña, comunicación personal) en la Bahía de Concepción.

La alta producción de la Bahía origina una sobreproducción en el sistema pelágico y una parte importante de la materia orgánica sedimenta. Las condiciones de sedimentación, durante el período de surgencia determinan que las características subóxicas de las aguas del fondo de la bahía generen procesos geoquímicos de oxidación y reducción en los sedimentos y aguas adyacentes a ellos.

T A B L A 1

Características hidrográficas de las Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) frente a la Bahía de Concepción. Se considera una $S_{‰}$ 34.50 ($N = 22$), valor característico para las AESS en zona costera a una latitud de 369S.

SALINIDAD $S \times 10^{-3}$	TEMPERATURA °C	Oxígeno Disuelto $\text{ml O}_2 \text{ l}^{-1}$	$\sigma_t = (P-1) 03$	N-NO_3^- u mol l^{-1}	N-NO_2^- u mol l^{-1}	P-PO_4^{3-} u mol l^{-1}
34.50-34.60	9.61-10.26	0.27- 1.77	26.56-26.72	23.30-31.30	0.10- 1.34	2.55- 3.21
S : 34.55	T : 9.96	O_2 : 0.91	σ_t : 26.63	NO_3^- : 27.77	NO_2^- : 0.40	PO_4^{3-} : 2.90
SD : 0.028	SD : 0.207	SD : 0.369	SD : 0.047	SD : 2.100	SD : 0.290	SD : 0.208
Var: 0.00076	Var: 0.040	Var: 0.130	Var.: 0.002	Var : 4.230	Var : 0.084	Var : 0.041

T A B L A 2

Disponibilidad de nutrientes provenientes de las AESS y proporción teórica de su utilización por el plancton durante el afloramiento en la Bahía de Concepción. Se consideró en la elaboración de datos los promedios de las AESS correspondientes a una salinidad de 34.55‰ y una temperatura de 9.969C.

Concentraciones Promc. (mg at/m ³)	AESS: Disponibilidad		Requerimiento		Proporción		Productividad	
	Proporción P	Proporción a	del PLANCTON (1)	Requerimiento	Utilización Teórica (2)	Utilización	Potencial	
Fósforo	1	1	1	1	1	1		
Nitrógeno	9.55	16	16	0.59	16	16		
Carbón	806.89	106	106	7.61	1351.81	1351.81		2.20 g C/m ³
Oxígeno disuelto	28.01	276	276	0.10	46.93	46.93		
Oxígeno saturación	195.81			0.70	328.04	328.04		
Concentración máxima en superficie	307.87			1.11	515.80	515.80		

(1)Redfield et al. (1963).

(2)Se considera como unidad la concentración de nitrógeno, por sus características de limitante.

En estas condiciones se observa un remanente de la concentración de Fósforo no utilizado por el plancton (i. e., 1.17 mg at/m³).

En estas condiciones las modificaciones principales se traducen en:

- a) Que la diagénesis temprana de los sedimentos recientes, ocurre en condiciones subóxicas (columna de agua) o anóxicas (proceso de las aguas intersticiales de los sedimentos).
- b) Cambio de las condiciones ambientales químicas del medio: pH cercanos a la neutralidad y Eh negativos.
- c) Que, la sedimentación de la materia orgánica producida en exceso (i.e., vía fotosíntesis y/o aportes por efluentes de desechos industriales y domésticos) se oxide en condiciones subóxicas y/o anóxicas, dependiendo del desarrollo del proceso de surgencia y del período estacional.

Con el propósito de reconocer algunos de los cambios que ocurren en el interior de la bahía, durante la surgencia y, así, establecer algunas reacciones químicas dominantes del sistema, se compara las características de las AESS fuera de la bahía y después de un tiempo de residencia en ella. Los cambios en las concentraciones y la presencia de nuevos compuestos en las aguas adyacentes al sedimento, son un índice de los procesos que allí están ocurriendo.

Fröelich *et al.* (1979) han establecido un modelo para la diagénesis de sedimentos con alta concentración de materia orgánica, que podría ayudar a reconocer los cambios en la bahía. Sobre la base de este modelo y conociendo algunas de las condiciones químicas ambientales propias del sistema en estudio durante el afloramiento, se ha buscado la presencia de los productos de reacción, tanto para la columna de agua, como para los sedimentos.

En la Tabla 3, se ha resumido información de dos años de muestreos mensuales, presentando rangos de variación de los parámetros medidos en el interior de la bahía que considera sólo las concentraciones que corresponden a valores de oxígeno disuelto menor de $1 \text{ ml } O_2 \text{ l}^{-1}$. Al comparar algunos de estos valores de concentración con los obtenidos para la misma masa de agua fuera de la bahía, puede observarse:

- i) Una disminución en el contenido de NO_3^- , los valores en el rango inferior son de $12.3 \text{ } \mu\text{mol l}^{-1}$;
- ii) Aumento en las concentraciones de NO_2^- , que pueden alcanzar $5.8 \text{ } \mu\text{mol l}^{-1}$;
- iii) Altas cantidades de NH_4^+ , se ha detectado valores máximos de $10.9 \text{ } \mu\text{mol l}^{-1}$;
- iv) Concentraciones altas de PO_4^{3-} , valores de $4.53 \text{ } \mu\text{mol l}^{-1}$;
- v) Presencia de sulfuro de hidrógeno en las aguas adyacentes al fondo.

TABLA 3

Rangos característicos de las aguas del mínimo de oxígeno en el interior de la Bahía de Concepción.

VARIABLES	RANGOS	UNIDADES	METODOS
S%	34.50-34.60	g/Kg	Salinómetro de Inducción
T°C	9.00-11.50	°C	Termómetros de Inversión
O ₂ disuelto	0.10- 1.00	ml O ₂ l ⁻¹	Winkler
% saturación	4 -15	%	
N-NO ₃ ⁻	12.30-28.50	μ mol l ⁻¹	Strickland & Parsons, 1972
N-NO ₂ ⁻	0.50- 5.98	μ mol l ⁻¹	Strickland & Parsons, 1972
N-NH ₄ ⁺	0.06-10.90	μ mol l ⁻¹	Koroleff (Grasshoff, 1976)
P-PO ₄ ³⁻	2.55- 4.53	μ mol l ⁻¹	Strickland & Parsons, 1972
pH	7.38- 7.60	- log [H ⁺]	Strickland & Parsons, 1972
H ₂ S-S	0.45- 4.47	μ mol l ⁻¹	Fonselius (Grasshoff, 1976)
Sigma-t	26.40-26.60		

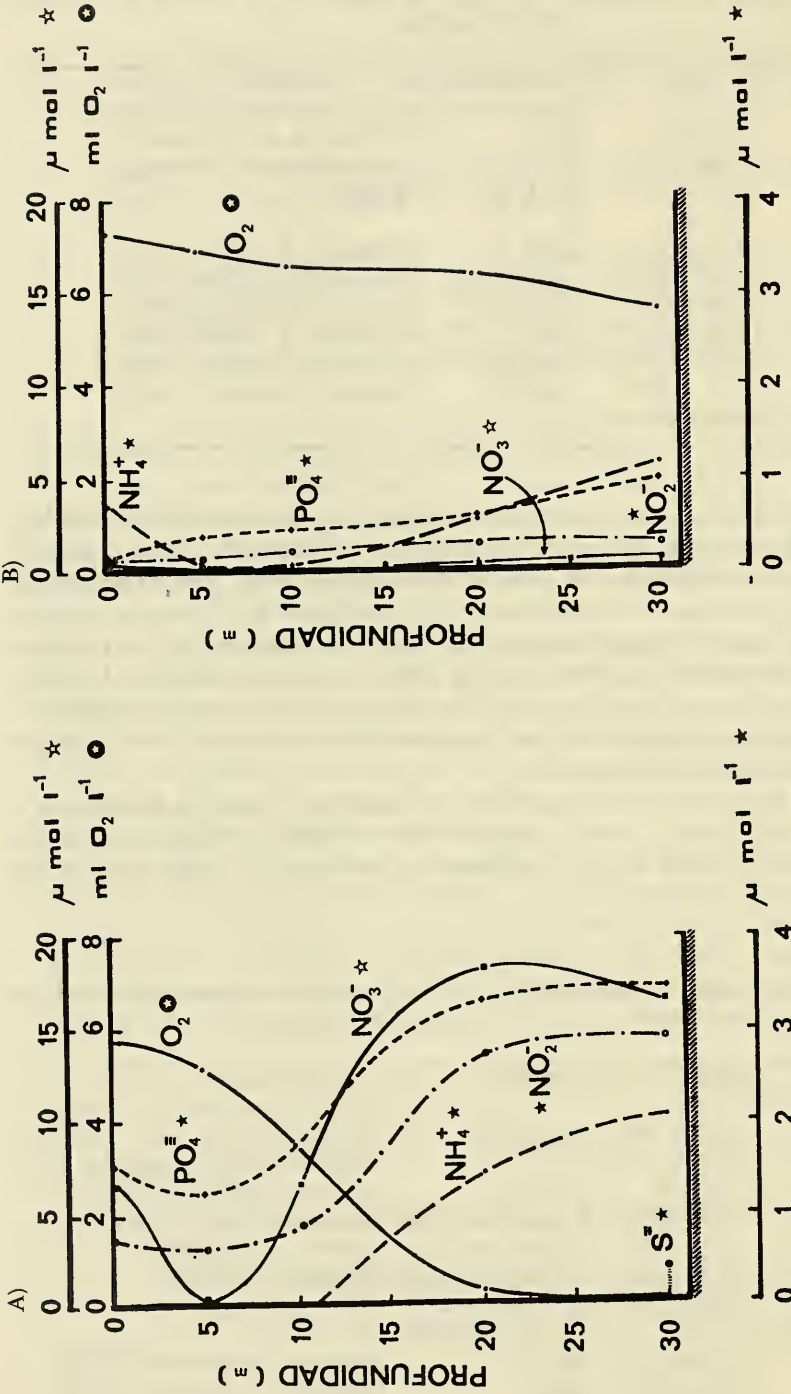
Los cambios detectados al examinar la información resumida, son confirmados aunque con menor resolución en la Fig. 2. Allí se muestra un perfil de la Est. 5 durante el período de surgencia (Fig. 2A) de las AESS. Si se compara los valores de la columna de agua bajo los 15 m de profundidad con los valores característicos de las AESS, se observa que los cambios son consistentes con los descritos. La Fig. 2B, en cambio, muestra el mismo perfil para un período de invierno. Las diferencias son significativas y, es evidente, que las masas de agua comprometidas durante estos dos períodos estacionales son diferentes.

Por otra parte, los resultados de análisis químicos realizados a muestras de sedimentos negros anóxicos de la Bahía de Concepción son entregados en la Tabla 4. Los sedimentos contienen un alto porcentaje

TABLA 4

Rangos característicos de variables químicas de los sedimentos negros anóxicos de la zona central interna en la Bahía de Concepción.

VARIABLES	RANGOS	UNIDADES	METODOS
pH	7.3 - 7.0	- log [H ⁺]	Medición directa (corr. Temperat)
Eh	(+100)-(-140)	mV	Medición directa, electrodos Eh.
H ₂ S	0.0 -50	μ mol l ⁻¹	Fonselius (Grasshoff, 1976)
Mat. Org.	16.17-10.87	% peso base seca	Combustión seca a 550°C
C. Org.	4.16- 2.22	% peso base seca	Gaudette et al (1974)
N. Org.	0.54- 0.30	% peso base seca	Kjeldahl combustión
C/N	9,85% peso	11.49 prop. at.	
Mat. Org./C. Org.	5.02	% peso base seca	
Fe	55.58-40.57	mg/g	Radiación X inducida (PIXE)
Si	21.25-15.76	mg/g	Radiación X inducida (PIXE)
P	435-278	ppm	Radiación X inducida (PIXE)
T°C	10 - 8.7		



EST. 5
22/04/81
EST. 5
13/01/81

Fig. 2.- Perfiles verticales de la columna de agua, mostrando la distribución de concentración de algunos de los parámetros medidos. A) Durante un período de afloramiento costero. B) En el período de convergencia de las aguas subantárticas sobre la costa.

de materia orgánica (*i.e.*, 16%; Rudolph *et al.*, en prensa), altas concentraciones de Fe sedimentario (*i.e.*, 55.58–40.57 mg g⁻¹), altas concentraciones de Si, presumiblemente, tecas de diatomeas (*i.e.*, 21.25–15.76 mg g⁻¹), la constante presencia de H₂S en el agua intersticial y una cantidad de P significativa (*i.e.*, 435–278 ppm).

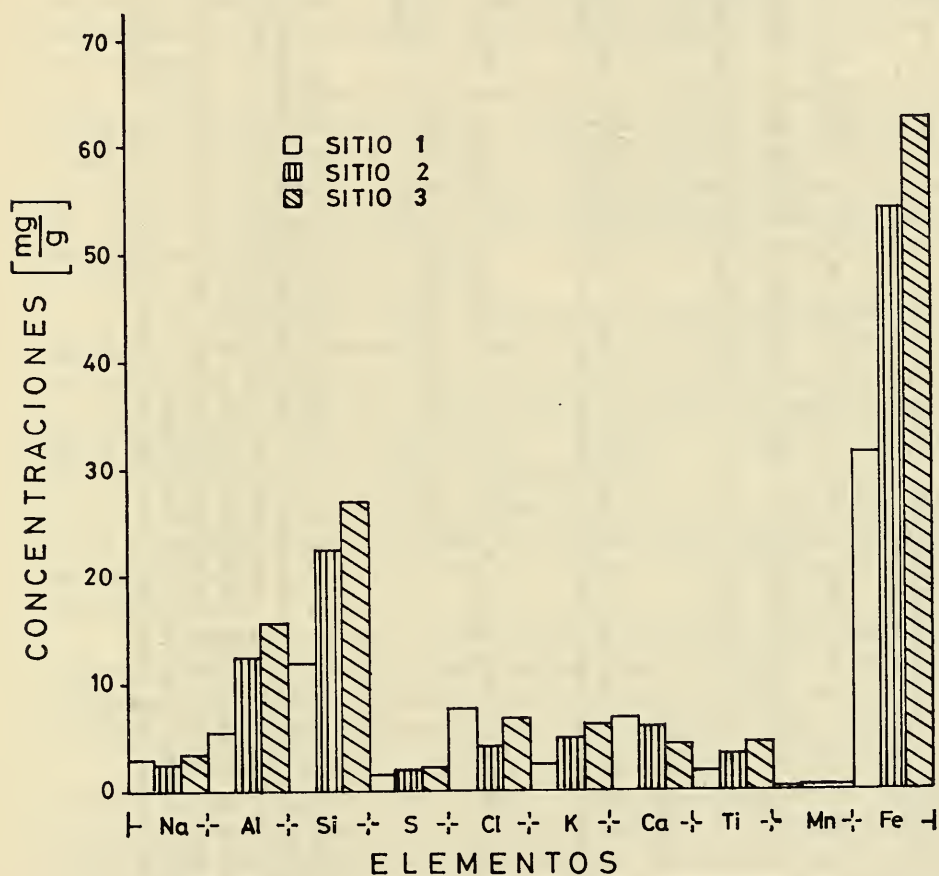


Fig. 3.- Concentraciones promedio de elementos químicos detectados en los sedimentos de la bahía. Se consideró tres sitios representativos de los sedimentos.

La Fig. 3, muestra las concentraciones promedio para tres sitios de muestreo que se establecieron en la bahía. El sitio 1 tiene sedimentos con concentraciones bajas de materia orgánica (*ca.* 3%), el sitio 2 y el sitio 3 poseen concentraciones altas, 14% y 16%, respectivamente. Nueve de los elementos que se muestran en el gráfico poseen concentraciones mayores de 1 mg g⁻¹ con excepción del Mn que presenta concentraciones menores. De ellos, el Fe muestra la más alta concentración, después cabe destacar las altas concentraciones de Si, Ca, Ti, y S. Es curioso observar que para: Fe, Mn, Ti, K, S y Si su concentración es menor cuando hay menos materia orgánica en los sedimentos.

Por otra parte, los valores de pH cercanos a 7 y los valores de Eh de - 140 mv en los sedimentos sugieren que en los fondos de la bahía ocurriría un activo proceso de diagénesis de los sedimentos. Además, si se considera las relaciones C:N:P en los sedimentos, se puede apreciar una disminución de un orden de magnitud del C y N en relación al contenido de P. Sin embargo, la relación C:N es de 11.5 en proporciones atómicas, insinuando, por tanto, su origen orgánico. De tal manera que la desproporción con el P, sólo podría explicarse como una acumulación de este en el tiempo.

Siguiendo el modelo de Fröelich *et al.*, (1979) y tomando en cuenta algunas relaciones estequiométricas, como la cantidad de oxígeno disponible y los cambios en las concentraciones de algunos oxidantes posibles en el agua y sedimentos se propone un modelo para la bahía. Este consta de cuatro ecuaciones parciales y una ecuación general que pretende, en una primera aproximación, explicar la diagénesis temprana de los sedimentos de la Bahía de Concepción.

De acuerdo al modelo propuesto, la limitación impuesta por el oxígeno disuelto (*i.e.*, menos de 1 ml O_2 l^{-1}) determina que los NO_3^- sean reducidos para así oxidar la materia orgánica; posteriormente los aceptores de electrones, serán el Fe^{3+} y, finalmente, los SO_4^{2-} . El orden secuencial de la utilización de los aceptores de electrones lo establece la energía libre de Gibbs de las reacciones comprometidas.

Sin embargo, la lenta difusión y la escasa turbulencia de las aguas intersticiales, serían los factores responsables para que las distintas etapas del proceso de oxidación se realicen simultáneamente en sitios muy cercanos.

Es probable, por lo tanto, que en capas más profundas de sedimentos, ocurran procesos de fermentación con producción de CH_4 , como lo demuestran algunas evidencias en áreas de la plataforma continental adyacentes a la bahía (Gallardo, 1976 y 1977; Morita *et al.*, 1981).

La aplicación del modelo permite explicar la coexistencia de concentraciones de NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ en las zonas cercanas al fondo, ya que se producirían procesos de remineralización de la materia orgánica acompañados de procesos de desnitrificación. Esto último explicaría también la desproporción N/P en las aguas interiores y su contenido en los sedimentos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Dirección de Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile a través de los Proyectos DIUC 17/79 y DIUC 177/82.

BIBLIOGRAFIA

- Ahumada, R. y D. Arcos, 1976. Descripción de un fenómeno de varada 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 estacionales de la Bahía de Concepción y áreas adyacentes. *GAYANA Miscelánea* 8: 1-56.
- Ahumada, R., A. Rudolph and V. Martínez, 1983. Circulation and fertility of waters in Concepcion Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 16, 95-105.
- Arcos, D. F., 1981. Upwelling and the distribution of Chlorophyll *a* within the Bay of Concepción, Chile. M. Sc. Thesis, Marine Environmental Science, State University of New York, Stony Brook, 32 págs.
- Demaison, G. J. and G. T. Moore, 1980. Anoxic Environment and oil source bed genesis. *AAPG Bull.*, 64: 1179-1209.
- Falke, H., 1939. Ueber rezente Sedimentbildung in der Bucht von Concepción (Mittel-Chile). *Petroleum*, 35: 640-644.
- Falke, H., 1950. Das Fischsterben in der Bucht von Concepcion (Mittel-Chile). *Senckenbergiana*, 31(1, 2): 57-77.
- Fröelich, P., G. P. Klinkhammer, M. L. Bender, N. A. Luedlke, G. R. Heath, D. Cilling, P. Dauphin, D. Hammord, B. Hartman and A. Maynard, 1979. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern Equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43(7): 1075-1090.
- Gallardo, V. A., 1976. On a benthic sulfide system on the continental shelf of north and central Chile. Proceedings of International Symposium on Coastal Upwelling. Centro de Investigaciones Submarinas (CIS), Coquimbo, Univ. del Norte: 113-118.
- Gallardo, V. A., 1977. Large benthic microbial communities in the sulfide biota under Perú-Chile Subsurface Countercurrent. *Nature*. 2688(5618): 331-332.
- Gallardo, V. A., J. G. Castillo y L. A. Yáñez, 1972. Algunas consideraciones preliminares sobre la fauna bentónica de los fondos sublitorales blandos en la Bahía de Concepción. *Bol. Soc. Biol. Concepción*, 44: 169-190.
- Gaudette, H., W. Flight, L. Toner y D. Folger, 1974. An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Jour. Sel. Petrology*. 44(1): 249-253.
- Grasshoff, K., 1976. *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie: Weinheim. New York, 426 págs.
- Morita, R. Y., R. Iturriaga and V. A. Gallardo, 1981. Thioploca: methilotroph and signifinance in the food chain. *Kieler Meeresforsch. Sonderh*, 5: 384-389.
- Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards, 1961. The influence of organisms on the composition of Sea-water, 26-77 pp., In: M. N. Hill (Ed.), *The Sea*, vol. II. Interscience Publishers, New York, 544 págs.
- Richards, F. A., 1977. Marine Areas of Anomalous Chemistry, Resulting from oxygen deficiencies, pp. 117-127 IN: N. R. Andersen & B. J. Zahuranec (Eds.). *Oceanic Sound Scattering Prediction*. Mar Science 5. Plenum Press, 859 págs.
- Robles, F. L. E., 1979. Water masses and Circulation in the S. E. Pacific and "El Niño" Event. Two volumes Ph. D. Thesis University of Wales, College of Swansea, 175 págs.
- Rudolph, A., R. Ahumada y S. Hernández. (En prensa). Distribución de la Materia Orgánica, Carbono Orgánico, Nitrógeno Orgánico y Fósforo Total en los sedimentos recientes de la Bahía de Concepción, Chile. *Biología Pesquera*, 13.
- Shaffer, G., 1982. On the upwelling circulation over the wide shelf off Perú: I. Circulation. *J. Mar. Res.*, 40(2): 293-314.
- Silva, H. y D. Konow, 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Suroriental (Expedición Krill. Cruceros 3-4 Julio-Agosto, 1974) *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur* 3: 63-75.
- Strickland, J. D. A. and T. R. Parsons, 1972. *A practical Hand book of Seawater Analysis*. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167: 1-310.