

Variaciones del sistema de surgencia de Punta Angamos (23° S) y la Zona de Mínimo Oxígeno durante el pasado reciente. Una aproximación desde el registro sedimentario de la Bahía Mejillones del Sur

Variations of Punta Angamos upwelling system (23° S) and the Oxygen Minimum Zone during the recent past. An approximation from sedimentary record of Mejillones del Sur Bay

JORGE VALDÉS^{1,2}, LUC ORTLIEB² & ABDEL SIFEDDINE^{2,3}

¹Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Facultad de Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile; e-mail: jvaldes@uantof.cl

²Institut de Recherche pour le Developpement (ex ORSTOM), UR 055 (PALEOTROPIQUE), Centre de Recherche Ile de France, 32 Avenue Henri Varagnat, F-93143 Bondy Cedex, Francia; e-mail: Luc.Ortlieb@bondy.ird.fr

³Programa de Geoquímica, Universidad Federal Fluminense, Niteroi, Río de Janeiro, Brasil

RESUMEN

Parámetros geoquímicos (carbono orgánico, sílice biogénica y cadmio) y petrográficos (materia orgánica) estudiados en un testigo de sedimento de la Bahía Mejillones del Sur fueron utilizados para inferir variaciones en la productividad biológica superficial y la oxigenación subsuperficial durante los últimos 2.000 años. Este estudio demuestra que al interior de la bahía la productividad ha disminuido hacia el presente mientras que la Zona de Mínimo Oxígeno se ha intensificado. Se plantea que las variaciones de la productividad se deben a un desplazamiento del centro de surgencia de Punta Angamos, más cerca o más lejos de la bahía y/o a cambios en su intensidad asociados al régimen de vientos locales. Por su parte, la oxigenación estaría influenciada por el ascenso o descenso de la Zona de Mínimo Oxígeno presente en el área. Una correlación de estos resultados con estudios de bioindicadores realizados en otros testigos de la Bahía Mejillones permiten reforzar la hipótesis de que eventos como la Pequeña Edad del Hielo y el Episodio Cálido de la Edad Media han quedado registrados en esta bahía del norte de Chile. Según el presente estudio, el primer periodo estaría caracterizado por un aumento de la productividad superficial y un descenso en la oxigenación subsuperficial de la bahía, mientras que el segundo periodo presentaría características opuestas.

Palabras clave: geoquímica, petrografía, materia orgánica, paleoceanografía, Chile.

ABSTRACT

Geochemical (organic carbon, biogenic silica and cadmium) and petrographic (organic matter) parameters analyzed in a sediment core of Mejillones del Sur Bay, have been used to reconstruct past variations in superficial biological productivity and subsuperficial oxygenation, during the last 2,000 years. This study tends to demonstrate that into the bay, the productivity has diminished up to the present, while the Oxygen Minimum Zone has intensified. Productivity variations can be attributed to changes in the upwelling intensity associated to changes in local wind system, and/or to displacement of the Punta Angamos upwelling center closer or far away of the bay. The variations of the subsuperficial oxygenation can be attributed to deep position changes of de Oxygen Minimum Zone. The geochemical and petrographic analysis of this study show a good correlation with bioindicator studies carried out in other sediment core of the bay, and reinforce the hypothesis that climatic events like the Little Ice Age and the Medieval Warm Period are recorded in this bay of northern Chile. The present study shows that the first climatic event was characterized by a high superficial productivity and a low subsuperficial oxygen availability, while the latter climatic event was characterized by a low productivity and a better subsuperficial oxygenation.

Key words: geochemistry, petrography, organic matter, paleoceanography, Chile.

INTRODUCCIÓN

La corriente de Humboldt es uno de los ecosistemas marinos de mayor productividad biológica del mundo, la cual se sustenta en los eventos de surgencia que ocurren en forma periódica en la zona costera (Shermann 1994, Shaffer et al. 1997). La Bahía Mejillones del Sur (23° S) forma parte de uno de estos centros de surgencia costera (Punta Angamos), el cual se caracteriza por ser uno de los más intensos del norte de Chile (Rodríguez et al. 1986, Rodríguez et al. 1991, Marín et al. 1993, Escribano 1998, Marín & Olivares 1999, Escribano & Hidalgo 2000, Thomas et al. 2001).

Los centros de surgencia juegan un rol fundamental en los ciclos geoquímicos y biológicos. Por ejemplo, la productividad primaria ayuda a controlar la repartición de carbono entre el gran reservorio oceánico y el pequeño reservorio atmosférico (Langue et al. 1990, Thunell et al. 1992), mientras que, desde el punto de vista de los recursos naturales, estos sistemas son los sustentadores de la mayor actividad pesquera desarrollada en el océano (Cañón & Morales 1985, Summerhayes et al. 1995, González et al. 1998, Iriarte et al. 2000). En estos ambientes la interacción océano-atmósfera es particularmente intensa, lo que los hace muy susceptibles a variaciones climáticas. Los estudios clásicos tendientes a comprender la forma en que responden diferentes parámetros oceanográficos frente a estas variaciones se basan en el análisis de series temporales que, en muchos casos, no permiten identificar mecanismos de larga duración. Bajo situaciones muy especiales, los sedimentos marinos pueden constituirse en un importante registro de condiciones oceanográficas pasadas que permiten, por una parte, trabajar con una alta resolución temporal (en casos muy excepcionales, en forma anual), y por otra, abarcar un largo intervalo de tiempo. Estudios en esta dirección han sido desarrollados en sistemas de surgencia de distintas partes del mundo (Lange et al. 1990, Divakar et al. 1992, Farrel et al. 1995, Weber et al. 1995, Martínez et al. 1996, Von Road et al. 1999).

Mejillones del Sur constituye uno de esos casos especiales. En esta bahía los restos biogénicos son el principal componente de los sedimentos acumulados en su ambiente de fondo. Estudios realizados por Ortlieb et al. (1994, 2000), Valdés (1998) y Valdés et al. (2000) muestran que el contenido de sílice biogénica y el de carbono orgánico puede alcanzar el 50 y 10% del peso seco, respectivamente. Esta situación es el resultado de condiciones climáticas y oceanográficas que favorecen la sedimentación

y preservación de detritus biogénico autóctono al interior de la bahía. La extrema aridez de la zona limita fuertemente el aporte de material continental, el cual queda restringido al transporte eólico de partículas y, posiblemente, a eventos esporádicos de flujos aluviales asociados a fases negativas de El Niño (Vargas 1998). Lo anterior, más la intensa surgencia de la zona hacen de la productividad biológica la principal fuente de aporte a la sedimentación marina.

La alta eficiencia de preservación en el ambiente de fondo de la bahía se explica por el brusco descenso de la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua. Normalmente en la Bahía Mejillones se registran valores inferiores a 1 mL L⁻¹ por debajo de los 50 m de profundidad (Escribano 1998), mientras que a partir de los 60 a 80 m, dependiendo de la época del año, estos valores son menores a 0,1 mL L⁻¹ (Valdés 1998). Esta situación de pobreza de oxígeno se explica por la influencia de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) que se extiende desde el sur de Perú hasta el centro de Chile, y que en la costa de Mejillones presenta una distribución vertical entre los 60 y 500 m de profundidad (Silva & Sievers 1981, Silva 1983). Debido a que la bahía tiene una profundidad máxima de 110 m, gran parte de su ambiente de fondo está bajo el dominio de esta ZMO.

Estas características de Mejillones han favorecido la formación de un registro sedimentario en el fondo de la bahía, útil para realizar reconstrucciones paleoambientales de alta resolución temporal. En esta perspectiva, testigos recuperados en distintos puntos de la bahía han sido estudiados en su composición bioestratigráfica y sedimentológica (Ortlieb et al. 1994, 2000, Vargas 1998, Páez et al. 2001), y geoquímicas (Valdés 1998, Valdés et al. 2000, Valdés & Ortlieb 2001). Si bien estos trabajos han aportado importantes antecedentes sobre la evolución de varios parámetros oceanográficos y climáticos a escala decadal-secular, durante los últimos milenios, es necesario identificar de manera más precisa cuáles son los principales mecanismos que determinan las características oceanográficas de la bahía, y cómo han interactuado a través del tiempo.

El presente trabajo se centra en estudiar la forma en que han evolucionado la productividad y la oxigenación subsuperficial de la bahía durante el pasado reciente, mediante el análisis de indicadores geoquímicos y petrográficos en un testigo de sedimento marino. Además, se propone una primera explicación respecto de los mecanismos (y su funcionamiento) que han condicionado la señal paleoceanográfica contenida en los sedimentos de la Bahía Mejillones.

MATERIALES Y MÉTODOS

En junio de 1996, durante una campaña paleoceanográfica realizada en Mejillones, se recuperaron 10 testigos de sedimento de hasta 90 cm de longitud. Uno de estos testigos, denominado 32E, recuperado a 75 m de profundidad y con una longitud total de 81 cm (72,5 cm de longitud continua más 8,5 cm de sedimento contenido en la válvula de penetración) fue utilizado en el presente trabajo (Fig. 1).

La estratigrafía fue estudiada mediante una imagen de rayos X tomada con un equipo médico convencional (tiempo = 0,16 s, distancia = 1 m, voltaje = 50 kV) y con el uso de una tabla de colores Munsell.

El sedimento contenido en la válvula se utilizó para realizar un análisis de radiocarbono según el método tradicional por "sintillación", previa eliminación de los carbonatos (Laboratorio de Oceanografía Dinámica y Climatología, París).

El testigo fue cortado en muestras de 2 cm de espesor, y en cada una de ellas se estudió la petrografía de la materia orgánica y se midió el contenido de sílice biogénica (Si_{bio}), carbono orgánico (C_{org}) y Cadmio (Cd).

La petrografía fue realizada sobre la materia orgánica total aislada de las fases carbonatos y silicatos del sedimento, mediante un tratamiento de las muestras con ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. Posteriormente se realizó

una determinación semicuantitativa del material recuperado (kerógeno) mediante microscopía de luz transmitida.

La Si_{bio} fue determinada por el método de extracción alcalina húmeda descrito por Mortlock & Fröelich (1989). El C_{org} fue medido por el método de Walkley y Black que consiste en una oxidación térmica de la materia orgánica, seguida de una valoración indirecta (Cobertera 1993). El Cd fue medido por espectrofotometría de absorción atómica con técnica de llama, en un equipo Perkin Elmer, modelo 1100 B. Se determinó un error relativo de un 5% para los resultados de Si_{bio} y C_{org} , y de un 3% para los resultados de Cd. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro EULA-Chile, de la Universidad de Concepción. Mayores antecedentes sobre los métodos utilizados pueden encontrarse en Valdés (1998).

Los datos obtenidos fueron utilizados para calcular tasas de acumulación según la siguiente fórmula:

$$TA = ts * d * c * 0,1 \quad (1)$$

donde TA = tasa de acumulación expresada en $g \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$, ts = tasa de sedimentación expresada en $cm \cdot ka^{-1}$ (cm por 1.000 años), calculada en función de la edad de radiocarbono medida en la base del testigo, d = densidad expresada en g

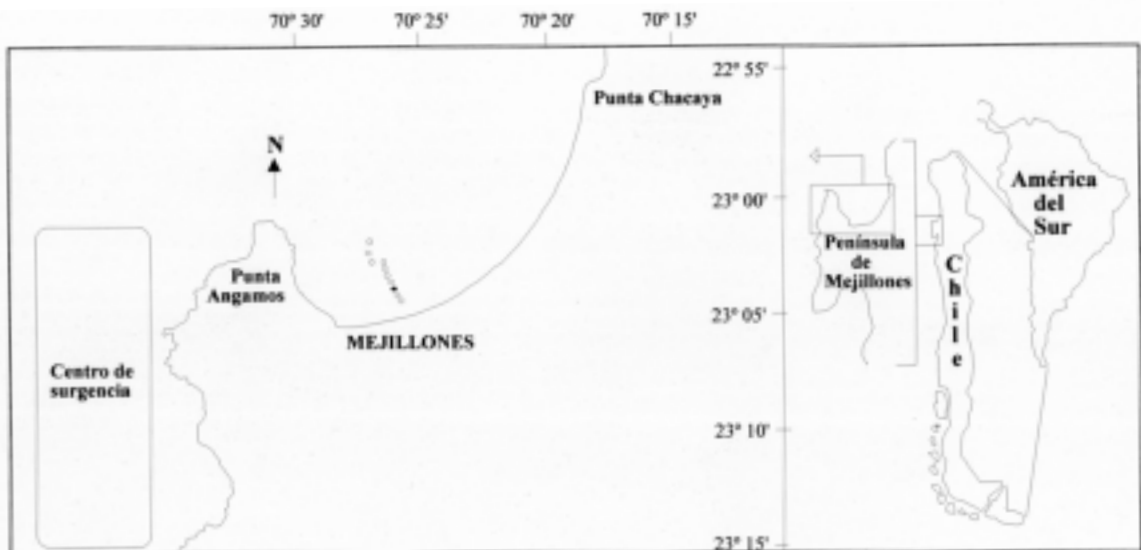


Fig. 1: Ubicación de la Bahía Mejillones en la costa de Chile y posición de los testigos recuperados en la campaña de 1996 (círculos vacíos) y del testigo 32E (círculo negro). Ubicación esquematizada del centro de surgencia de Punta Angamos.

Location of Mejillones Bay on the Chilean coast, the sedimentary cores obtained in 1996 (open circles) and of core 32E (full circle). Is also indicated in a schematic way the location of the Punta Angamos upwelling center.

cm^{-3} , c = concentración del componente respectivo expresado en porcentaje, y donde 0,1 es un factor que permite obtener los resultados en $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ a partir de %, cm y ka .

RESULTADOS

Estratigrafía

El testigo 32E se caracterizó por presentar una sucesión de capas de tonos verde-oliva (entre 5Y3/2 y 5Y 5/4) de diferente espesor. La parte superior del testigo estuvo dominada por un grueso estrato de color oscuro (5Y3/2), mientras que por debajo de los 54 cm las capas se presentaron inclinadas (Fig. 2). Esta última característica ha sido interpretada por Valdés (1998) y Ortlieb et al. (2000) como el registro de un evento sísmico de gran magnitud ocurrido en la zona en 1.200 años antes del presente (edad convencional medida en otro testigo, no corregida y no calibrada). La imagen radiográfica evidenció una estructura laminar (a veces infracentimétrica) que dominó a lo largo de toda la columna (Fig. 2). La base del testigo arrojó una edad convencional de radiocarbono (no calibrada) de 2.620 ± 90 años antes del presente (= antes de 1950).

Petrografía

El análisis al microscopio mostró la presencia de materia orgánica amorfa (MOA) que dominó a lo largo de todo el testigo, presentándose en tres tonalidades: amarillo, café y negro (Fig. 3). El estudio de palinofacies evidenció un predominio de la fracción amarilla con un 62%, seguido de la fracción café con un 33% y la negra con un 5%. Se observó que la fracción oscura (café y negra) fluctuó de manera opuesta a la fracción amarilla, y que alcanzó los valores más altos en la base del testigo (58 cm), mientras que el sedimento más reciente también mostró una tendencia al aumento de la fracción oscura (Fig. 4).

Geoquímica

El registro de Si_{bio} presentó una concentración media de $36 \pm 8\%$, con valores extremos de 24 y 53%. En general se observó una disminución de la concentración hacia el sedimento superficial, la cual se hizo más evidente a partir de los 40 cm. Los 5 cm superficiales de la columna de sedimento mostraron una sostenida disminución de la concentración (Fig. 4).

El C_{org} presentó un rango de variación entre 7 y 13%, con una media de $10 \pm 1\%$. En gene-

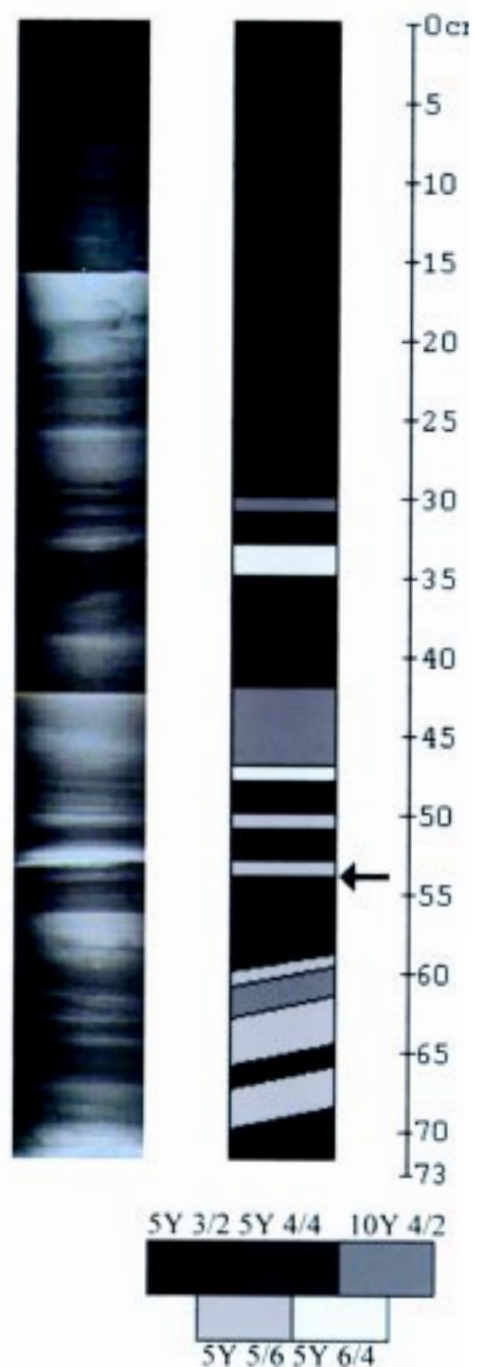


Fig. 2: Estratigrafía del testigo 32E según imagen radiográfica (derecha) y colores Munsell (izquierda). Se indica la edad de radiocarbono medida en la fracción decarbonatada de la base del testigo. Los planos de exposición de ambas imágenes no son los mismos.

Stratigraphy of the 32E core according the radiographic image (at right) and Munsell colors (at left). The mean radiocarbon age obtained on the decarbonated fraction of the sediment at the base of core is indicated. The two logs are not represented in the same orientation.

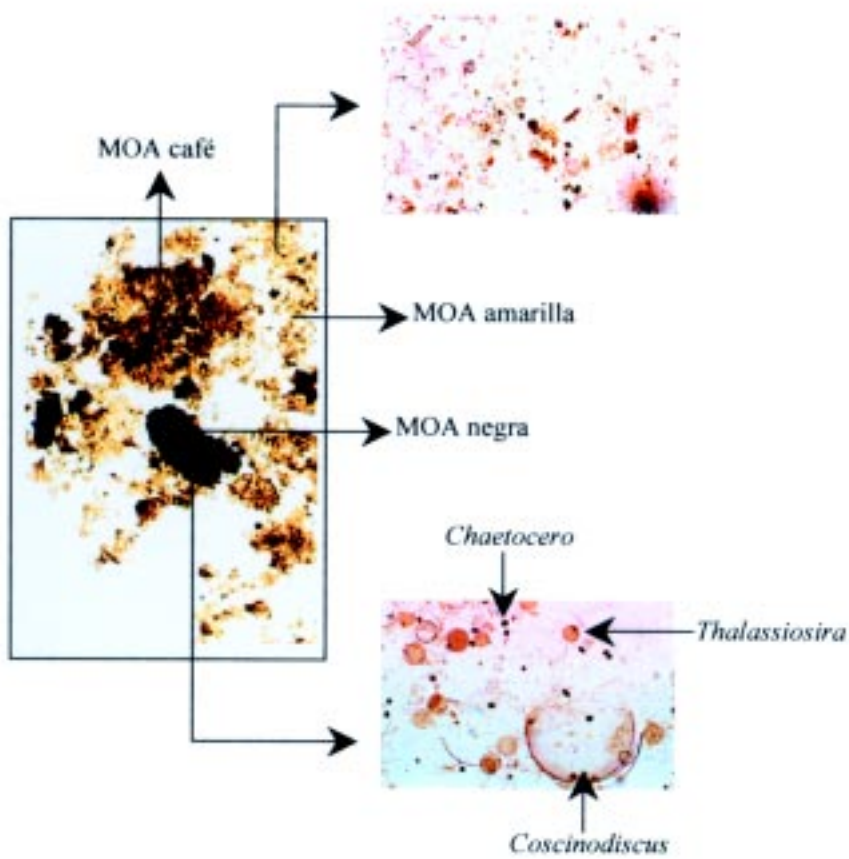


Fig. 3: Características de la materia orgánica vista en el microscopio de luz transmitida. Major characteristics of the organic matter as viewed in a transmitted-light microscope.

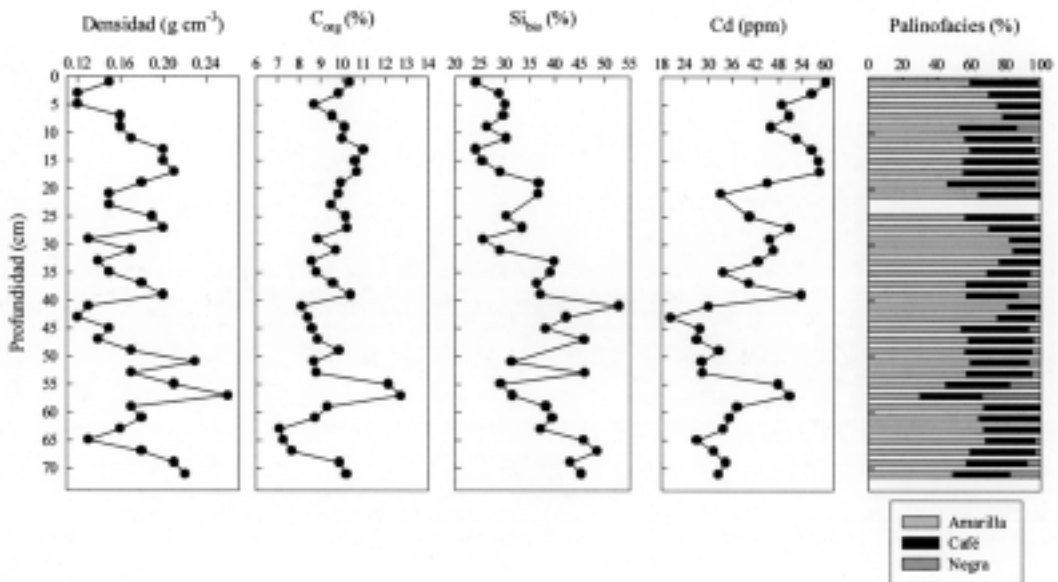


Fig. 4: Palinofacies y contenido de C_{org} , Cd y Si_{bio} en el testigo 32E. Palynofacies and content of C_{org} , Cd y Si_{bio} in the 32E core.

ral, la concentración fluctuó poco en torno a la media, mientras que se observó una tendencia al aumento hacia el sedimento superficial. Los 5 cm superiores mostraron un aumento del contenido de carbono orgánico (Fig. 4).

La concentración de Cd fluctuó entre 20 y 60 ppm, con una media de 41 ± 11 ppm. En general, el Cd mostró un aumento de la concentración hacia el sedimento superficial, aun cuando se observaron fuertes fluctuaciones a lo largo de toda la columna. Los 5 cm superficiales registran un aumento del contenido de Cd (Fig. 4).

En ninguno de los tres casos se logró establecer una relación clara entre las variaciones de los parámetros medidos y las características estratigráficas (color y/o presencia de laminaciones) del testigo.

El cálculo del coeficiente de correlación Pearson mostró una tendencia contraria entre las fluctuaciones de Si_{bio} y C_{org} . Un valor de $-0,57$ ($P < 0,05$) indica que el aumento de Si_{bio} está acompañado de manera significativa por una disminución de C_{org} . Igual interpretación puede realizarse entre la Si_{bio} y el contenido de Cd, cuyo coeficiente fue $-0,79$ ($P < 0,05$). En el caso del C_{org} y el Cd, el coeficiente ($0,65$; $P < 0,05$) mostró una correlación positiva y significativa.

Al calcular las tasas de acumulación para estos componentes del sedimento, se observaron diferencias importantes respecto de las ten-

dencias mostradas por las concentraciones absolutas. La Si_{bio} tuvo una tasa de acumulación media de 23 ± 6 g m^{-2} $año^{-1}$ con un valor máximo de 38 g m^{-2} $año^{-1}$ y uno mínimo de 13 g m^{-2} $año^{-1}$. En este caso, el perfil mostró una fuerte disminución de la tasa de acumulación hacia la época presente, mientras que en la sección más superficial del testigo se ha registrado un leve aumento alrededor de los 13 g m^{-2} $año^{-1}$, el cual es muy inferior a la media para el período abarcado por el testigo (Fig. 5).

La tasa de acumulación de C_{org} varió entre 4 g C m^{-2} $año^{-1}$ y 13 g C m^{-2} $año^{-1}$, con una media de 6 ± 2 g C m^{-2} $año^{-1}$. Se registraron sucesivas fluctuaciones de esta tasa alrededor de una media más o menos constante durante los pasados 2 milenios. El registro más reciente mostró un aumento en la acumulación de C_{org} (Fig. 5).

Por último la tasa de acumulación de Cd tuvo un rango entre $0,9$ mg Cd m^{-2} $año^{-1}$ y 5 mg m^{-2} $año^{-1}$, y una media de 3 mg Cd m^{-2} $año^{-1}$. A pesar de que se han registrado sucesivas fluctuaciones en la acumulación de Cd, el perfil general mostró un leve aumento hacia el presente, situación que se acentúa en la sección superficial del testigo (Fig. 5).

El coeficiente de correlación de Pearson entre las tasas de acumulación de Si_{bio} y C_{org} fue, a diferencia del obtenido en el caso de las concentraciones absolutas, positivo ($r = 0,43$; $P <$

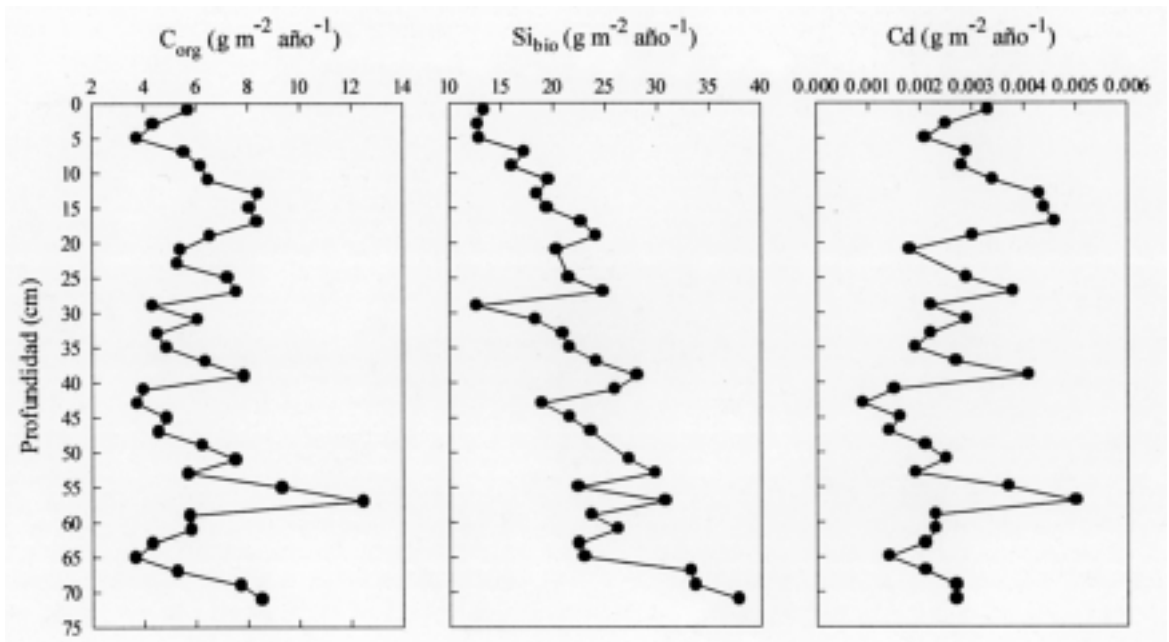


Fig. 5: Estimación de las tasas de acumulación de C_{org} , Cd y Si_{bio} , para los últimos 2 milenios, determinadas a partir del testigo 32E.

Estimates of the accumulation rates of C_{org} , Cd y Si_{bio} for the last 2 millennia, calculated in the 32E core.

0,05). Este valor, que sin ser significativo, sugiere una relación distinta a la registrada sobre la base de las concentraciones. También se observó una situación similar entre las tasas de acumulación de Si_{bio} y Cd, aun cuando el coeficiente de correlación ($r = 0,05$; $P < 0,05$) no permite establecer una relación clara entre ambos parámetros.

Al igual que en el caso de las concentraciones, las tasas de acumulación no presentaron relación alguna con la estratigrafía según colores Munsell y rayos X.

DISCUSIÓN

Registro petrográfico y geoquímico

No existen datos de palinofacies en sedimentos marinos de otras zonas de la costa de Chile. En el caso de Mejillones, los resultados del testigo 32E son concordantes con observaciones realizadas en otro testigo (32B) tomado a una mayor profundidad (90m)¹ (Fig. 1), respecto de las características de la materia orgánica (presencia de MOA de tres tonalidades) y del predominio de la fracción amarilla. Los autores plantean que la coloración amarilla corresponde a materia orgánica refractaria preservada durante periodos de baja productividad, mientras que la fracción oscura (café y negra) corresponde a materia orgánica metabolizable, preservada durante periodos de alta productividad.

Los tres componentes geoquímicos medidos en el testigo de Mejillones mostraron concentraciones altas. Los valores de Cd son superiores, en promedio a los reportados para diferentes sistemas marinos. Por ejemplo, Van Geen et al. (1995) registraron hasta 19 ppm en la cuenca del Mar Negro, Rosenthal et al. (1995) midieron hasta 2,2 ppm en sedimentos subantárticos y Zheng et al. (2000) midieron hasta 9 ppm en testigos de la ZMO del margen continental de California. En Chile se han reportado valores de 6,27 y 5,1 ppm para la bahía de Concepción (Salamanca et al. 1988), y de 0,8 ppm a 3,5 ppm en la plataforma continental de la misma zona (Valdés 1999). En el caso del C_{org} , los resultados de Mejillones, si bien son altos, son similares a valores reportados en otros centros de surgencia. Por ejemplo, en el margen continental de Perú,

Henrich & Farrington (1984) registraron valores de hasta 10%, Delgado & Gomero (1988) registraron valores de hasta 20%, y Schrader (1992) registraron hasta 15% de C_{org} . En Chile, en el sistema de surgencia de la plataforma continental de Concepción Farías et al. (1996) reportaron valores de poco más de 3%, Thamdrup & Canfield (1996) midieron hasta 6% y Valdés (1999) registró valores máximos de 7,3%, todos en columnas de sedimento.

La Si_{bio} también está dentro de los valores descritos como típicos de centros de surgencia. Por ejemplo, Verardo & McIntyre (1994) midieron entre 1 y 14% en un testigo del centro de surgencia del Atlántico Ecuatorial, mientras que Gardner et al. (1997) midieron entre 1 y 60% de Si_{bio} en testigos de la Corriente de California.

El alto contenido de los componentes medidos en el testigo de Mejillones obedece a condiciones geográficas y oceanográficas especiales. Debido a que el aporte de material continental está restringido a detritus litogénico que no supera el 10% de la masa total de sedimento (Vargas 1998), los mayores constituyentes corresponden a restos biogénicos provenientes de la alta productividad biológica del sector (Valdés et al. 2000). En efecto, los sedimentos de Mejillones, que pueden ser catalogados como "biogénico silíceos" (más de 30% de Si_{bio} en promedio) (Reineck & Singh 1980), constituyen un depósito típico de áreas costeras de alta fertilidad (Seibold & Berger 1993). Además, la preservación de los constituyentes químicos del sedimento marino de Mejillones se ve favorecida por la existencia de un ambiente de depositación anóxico, el cual limita fuertemente la diagénesis temprana así como los procesos que pueden remover dichas sustancias hacia la columna de agua.

Cuando se comparan varios indicadores paleoambientales en un mismo testigo, en términos de sus concentraciones absolutas, la señal verdadera puede quedar oculta por un efecto de dilución que se produce cuando un componente aumenta en forma desmedida respecto del resto (Müller & Suess 1979, Seibold & Berger 1993, Verardo & McIntyre 1994). Para anular este efecto se recomienda trabajar con tasas de acumulación, ya que no solo facilita una correcta interpretación del registro geoquímico, sino que permite comparar, por ejemplo, el registro de carbono orgánico con mediciones de productividad primaria (Müller & Suess 1979).

Los coeficientes de correlación positivos encontrados entre las tasas de acumulación, a diferencia de las concentraciones absolutas, muestran que en el caso del testigo estudiado efectivamente se produce un efecto de dilución

¹ VALDÉS J, A SIFEDDINE & L ORTLIEB (2000) Paleoenvironmental interpretation of organic matter sedimentation in Mejillones Bay (23° S), Chile. Seventh Latin-American Congress on Organic Geochemistry, Foz do Iguacú, Brasil: 145-147.

entre los constituyentes del sedimento. Superado este problema, el registro del testigo 32E permite plantear que existe una relación directa entre los factores que condicionan la acumulación de cada uno de estos componentes en los sedimentos de fondo de la Bahía Mejillones. En otras palabras, las características oceanográficas influyen de manera similar en la acumulación de C_{org} , Si_{bio} y Cd en los sedimentos de Mejillones, de manera que cada uno de ellos puede aportar antecedentes sobre el comportamiento oceanográfico de la bahía durante el intervalo de tiempo abarcado por el testigo.

Utilidad paleoceanográfica del registro petrográfico y geoquímico de Mejillones

La MOA, predominante en el testigo de Mejillones, corresponde a una situación típica de ambientes de depositación con un alto porcentaje de C_{org} (Ramanampisoa et al. 1992), y dominados por un flujo de material principalmente fitoplanctónico.

Valdés y colaboradores (resultados no publicados) proponen un modelo conceptual de la sedimentación en la Bahía Mejillones, basado en el análisis de palinofacies e indicadores geoquímicos de un testigo muy próximo al utilizado en el presente trabajo. En este modelo la señal petrográfica (características de la materia orgánica) de los sedimentos se relaciona con la intensidad de la productividad y, probablemente, con la oxigenación de la columna de agua. Los autores demostraron que el aumento de la fracción oscura en los sedimentos es el resultado del aumento de la productividad, lo que permite una mejor preservación de la fracción lábil, la cual es favorecida por un mecanismo de floculación y un rápido tránsito a través de la columna de agua. Por su parte el aumento de la fracción clara refleja una disminución de la productividad y, posiblemente, una mayor oxigenación de la columna de agua, lo que favorece la degradación de la fracción lábil (MOA oscura), permitiendo solo la preservación de la fracción refractaria (MOA clara).

El cadmio puede ser considerado un buen indicador de oxigenación de aguas de fondo, ya que tiende a precipitar cuando se generan condiciones sulfato-reductoras, próximas al piso marino (Saager et al. 1992, Rosenthal et al. 1995, Van Geen et al. 1995, Morford & Emerson 1999). Se ha demostrado que el cadmio reacciona con FeS_2 para formar un compuesto insoluble que se acumula e inmoviliza en ambientes reductores y que solo la aireación de estos sedimentos puede liberar nuevamente el cadmio al agua en forma disuelta (Bostick et al.

2000). Este mismo comportamiento ha sido descrito para otros metales "redox-sensitivos" como vanadio, renio y molibdeno (Crusius & Thomson 2000, Yarincik et al. 2000, Zheng et al. 2000, Morford et al. 2001, Russel & Morford 2001). Debido a que en Mejillones la ZMO intercepta el piso marino, existen condiciones propicias para su precipitación y preservación. Esta característica fue utilizada por Valdés & Ortlieb (2001) para inferir condiciones de oxigenación del ambiente de depositación de la bahía durante los últimos milenios, sobre la base del registro de cadmio y molibdeno en testigos de sedimento marino.

La acumulación de C_{org} en sedimentos marinos está condicionada por una serie de factores, siendo los más importantes la productividad biológica y la disponibilidad de oxígeno (Calvert et al. 1992, Hollander et al. 1992, Jones & Manning 1994, Calvert et al. 1996). Por su parte, el contenido de Si_{bio} de los sedimentos marinos de áreas costeras de baja profundidad, en donde la disolución no juega un rol importante y en donde la surgencia es intensa, se asocia directamente a la producción de fitoplancton silíceo (Archer et al. 1993, Seibold & Berger 1993, PAGES 1993).

El testigo 32E muestra que cuando aumenta el flujo de Si_{bio} , también aumenta el flujo de carbono y la precipitación de cadmio. Es posible interpretar, entonces, que un aumento de la surgencia genera un alto flujo de detritus biogénico hacia el piso marino y una disminución del oxígeno disuelto del fondo de la bahía. No se descarta que una parte del cadmio que alcanza el piso marino en la bahía, lo haga vía adsorción sobre partículas orgánicas ("scavenging") (Brown et al. 1994, Dean et al. 1997) durante períodos de alta productividad. Sin embargo, el tránsito de estas partículas a través de una columna de agua bien oxigenada facilita la degradación de las sustancias orgánicas y la liberación del cadmio como forma disuelta, por lo que solo un ambiente de depositación pobre en oxígeno favorecerá la incorporación e inmovilización de este metal en el sedimento de fondo. Por ello proponemos que esta última condición es la principal responsable de la acumulación y preservación de cadmio en los sedimentos de Mejillones.

En el caso del C_{org} se propone que la alta preservación de carbono orgánico en los sedimentos de la Bahía Mejillones está mediada por la existencia de un ambiente de depositación pobre en oxígeno, pero que las variaciones en su acumulación (Fig. 5) pueden asociarse a cambios en la magnitud de la productividad biológica de las aguas superficiales, ocurridas en el pasado.

La interpretación anteriormente expuesta es graficada en la Fig. 6. En ella se incluye, también, un Índice de Preservación de materia orgánica lábil para el testigo 32E, que muestra que este tipo de material (de tono oscuro en el registro petrográfico, ver Fig. 4) es preservado más eficientemente cuando hay un mayor flujo de C_{org} (mayor productividad) y de Cd (ZMO más intensa), lo que demuestra el efecto de la productividad biológica sobre la oxigenación de fondo y el tipo de registro orgánico preservado en los sedimentos de la bahía. En otras palabras, la materia orgánica lábil presente en los sedi-

mentos es el resultado de una alta productividad biológica de la capa de agua superficial, y que posteriormente es preservada eficientemente en un ambiente de fondo pobre en oxígeno.

Interpretación paleoceanográfica y paleoclimática

El testigo de Mejillones permite realizar una primera aproximación a la forma en que han interactuado, a lo largo de los pasados dos milenios, la productividad biológica (sobre la base del registro de C_{org}) y la oxigenación del am-

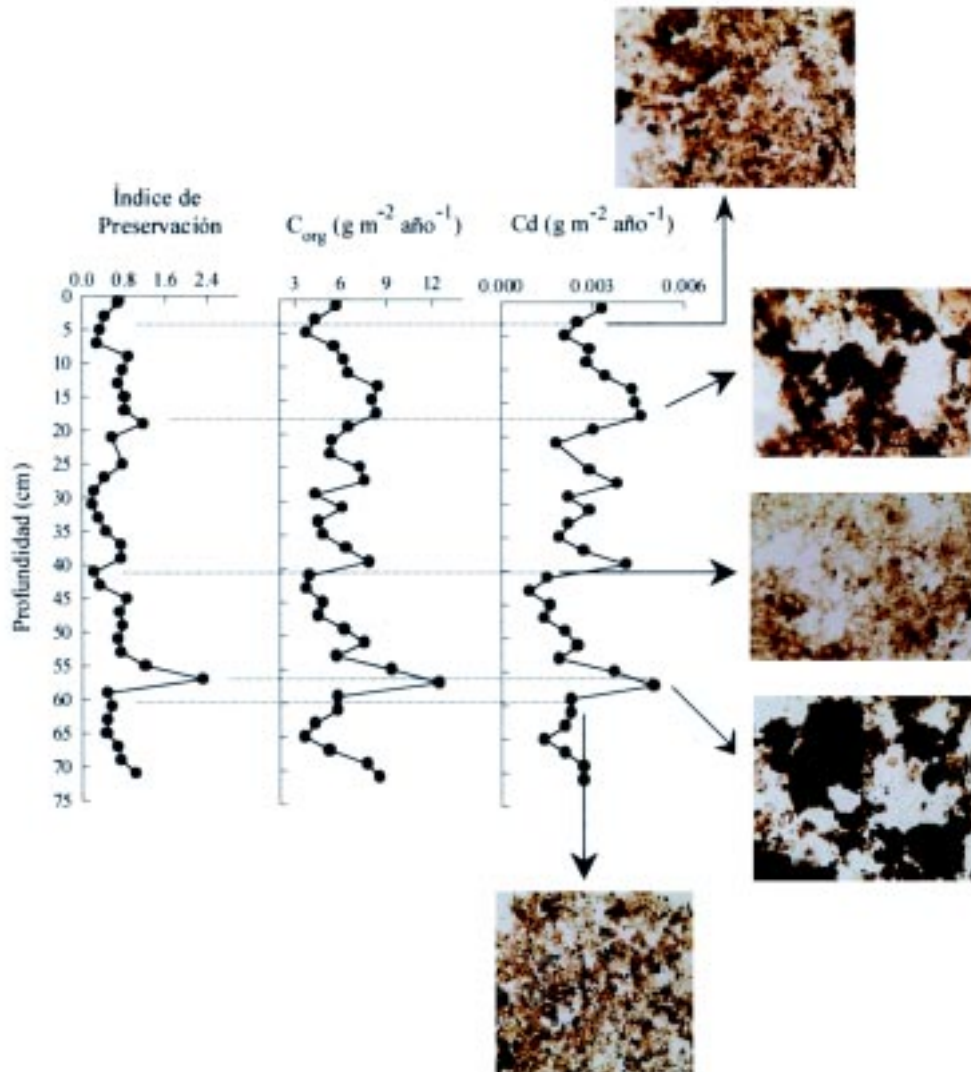


Fig. 6: Perfiles del Índice de Preservación (MOA café + MOA negra / MOA amarilla) y tasa de acumulación de C_{org} de los pasados dos milenios. Se indica la relación entre la variación de estos parámetros y el tipo de materia orgánica predominante en dicha sección del testigo 32E.

Profiles of the Preservation Index (brown AOM + black AOM / yellow AOM) and C_{org} accumulation rate for the last two millennia. Note the relationship between the variation among these parameters and the kind of organic matter in each section of the 32E core.

biente de fondo de la bahía (sobre la base del registro de cadmio). Si bien la correlación significativa y positiva entre ambos registros se refleja en ciclos muy bien sincronizados, la tendencia general de ambos perfiles hacia el presente se orienta en direcciones opuestas (Fig. 5). En otras palabras, las variaciones de corta duración muestran que el aumento de la productividad está acompañado por una intensificación de la ZMO de la bahía, mientras que el descenso de la productividad es coincidente con una ZMO menos intensa. Sin embargo, el registro muestra que mientras la productividad biológica disminuye hacia el presente, la ZMO se ha intensificado. En conclusión, las tendencias generales de productividad biológica superficial y oxigenación subsuperficial en la Bahía Mejillones del Sur, en el pasado, si bien son sincrónicas en ciclos de corta duración, parecen responder a mecanismos diferentes en el largo plazo (Fig. 5). Esta aparente contradicción puede ser explicada en función de las características oceanográficas locales.

Marín & Olivares (1999) proponen un modelo conceptual en el cual la productividad primaria al interior de la Bahía Mejillones depende de la surgencia costera que ocurre en el exterior de ella (Punta Angamos) (Fig. 1). Este modelo relaciona los procesos de mezcla vertical que ocurren en Punta Angamos, con la fuerte estratificación del interior de la bahía, de manera que el efecto fertilizador de las aguas de surgencia se ve favorecido. Según este modelo la surgencia de Punta Angamos promueve una mayor o menor productividad biológica en la bahía dependiendo de su intensidad. Un mecanismo de dependencia similar ha sido propuesto por Sievers & Vega (2000) para la bahía de Valparaíso y el centro de surgencia de Punta Curaumilla.

Este modelo que sitúa el mecanismo de surgencia, principalmente, fuera de la bahía puede ser sustentado, también, por la excelente preservación de la estructura primaria de los sedimentos de la bahía. La presencia de láminas infracentimétricas identificadas en los diferentes testigos marinos estudiados en Mejillones, permite plantear que no existe un mecanismo que altere la forma en que los sedimentos han sido depositados y preservados, como podría ser el caso del ingreso de aguas por el fondo de la bahía, si el proceso de surgencia ocurriese dentro de ella. De esta manera, y tomando como base el modelo de Marín & Olivares (1999), es posible suponer que una intensidad cada vez menor de la surgencia en Punta Angamos explique la tendencia general hacia una disminución de la productividad durante los pasados dos milenios.

En Punta Angamos la surgencia corresponde al afloramiento de Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS), que se relaciona con el ciclo anual de vientos (González et al. 1998). En general, en el norte de Chile la surgencia se asocia al predominio de vientos del sur y suroeste que resultan de la interacción entre el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y las depresiones continentales (Cañón & Morales 1985, Fuenzalida 1990, Rutllant 1993). De esta forma, y asumiendo una constancia en los demás factores que influyen en los procesos de surgencia costera (e.g., batimetría, geometría de la línea de costa), se sugiere que los períodos de baja productividad (i.e., débil surgencia) identificados en el testigo 32E se asociarían a un régimen de vientos sur-suroeste menos intenso, lo que pudo haber provocado el ascenso de una masa de agua con un menor potencial productivo (Fig. 7B). Un mecanismo similar es utilizado por Herguera & Berger (1994) para explicar la disminución de la productividad registrada en el Pacífico Ecuatorial Oeste, durante el período postglacial. En Punta Angamos, un fenómeno de estas características ha sido reportado para la época actual (enero de 1997) por González et al. (1998), quienes concluyeron que la débil surgencia registrada en la fecha indicada se debió a la escasez de vientos intensos del suroeste lo que provocó un bajo bombeo de Ekman y un afloramiento de Aguas Subantárticas (ASAA), caracterizada por un mínimo de salinidad y un bajo contenido de nutrientes (Cañón & Morales 1985).

En función de la dependencia de la Bahía Mejillones, del centro de surgencia de Punta Angamos, otro mecanismo que puede explicar las fluctuaciones de la productividad, y su disminución hacia el presente, puede ser el desplazamiento del centro de surgencia (Summerhayes et al. 1995) más cerca o más lejos de la bahía. Este mecanismo ha sido evaluado por Schrader (1992) en la costa central de Perú, y por Zhao et al. (2000) en el centro de surgencia del noroeste de África, para explicar los cambios en la productividad durante los pasados 400.000 y 35.000 años, respectivamente. Así, un desplazamiento del centro de surgencia de Punta Angamos más lejos de la bahía afectaría negativamente la productividad dentro de esta, ya que las aguas de surgencia no alcanzarían a fertilizar la zona interna de la bahía (Fig. 7C). Por el contrario, si el centro de surgencia se desplaza hacia la bahía, la productividad sería favorecida.

De esta manera, los ciclos de productividad registrados en el testigo 32E pueden deberse a uno de los mecanismos descritos anteriormente (modificación en la intensidad de la surgencia).

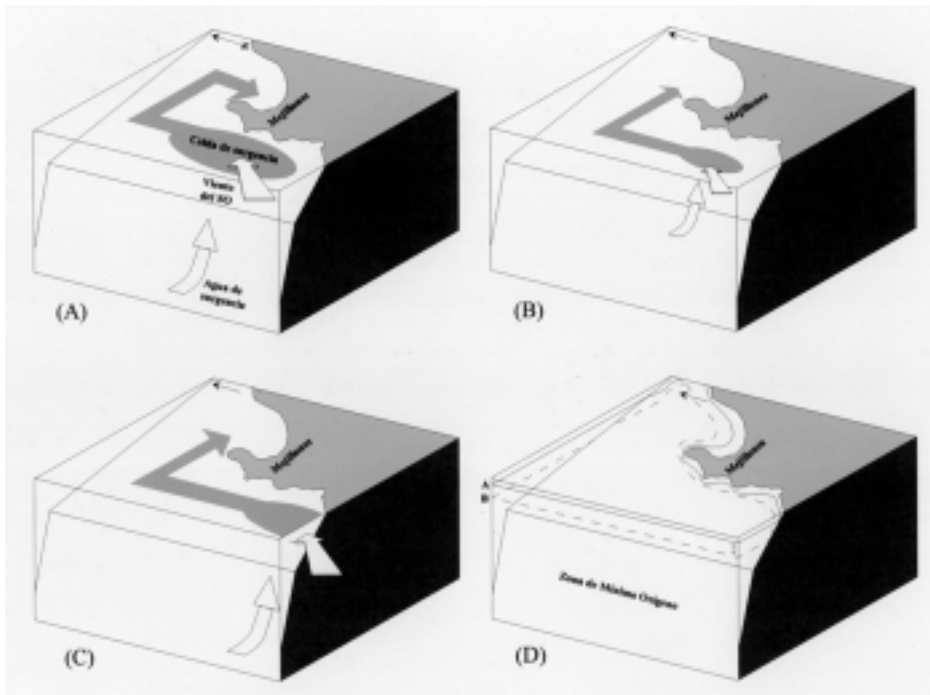


Fig. 7: Representación esquemática de los mecanismos oceanográficos que han actuado durante los pasados dos milenios en la zona de Mejillones, y que han sido reconocidos en el registro sedimentario del testigo 32E. Tamaño de las flechas representa la intensidad. La letra A corresponde a una surgencia más intensa y más próxima de la bahía, B representa una disminución de la intensidad de la surgencia, C representa un desplazamiento de la celda de surgencia, y D representa los cambios en la posición de la ZMO y su efecto al interior de la bahía. Para más detalles leer el texto y Tabla 1.

Schematic representation of oceanographic mechanism acting in Mejillones area during the past 2 millennia, and recording in 32E sedimentary core. Size of arrow represent intensity. Letter A represent a more intense upwelling account nearer to the bay, B represent a weak upwelling, C represent a displacement of upwelling cell, and D represent changes in OMZ position and their effect into the bay. For more detail see the text and Table I.

cia; desplazamiento del centro de surgencia), o a una combinación de ambos. No obstante la ciclicidad de la productividad, la tendencia general de la curva (Fig. 5) muestra que en el largo plazo estos mecanismos han actuado de manera que la resultante ha sido una disminución de la productividad hacia el presente.

Al igual que la productividad, la otra característica oceanográfica que ha sufrido variaciones en los pasados dos milenios en la bahía es la oxigenación subsuperficial. La sincronía entre las curvas de flujo de C_{org} y de cadmio demuestran el efecto directo del aumento de materia orgánica en suspensión, sobre la disponibilidad de oxígeno de las aguas de fondo. Sin embargo, la tendencia contraria registrada hacia el presente, permite suponer una cierta independencia de la oxigenación respecto de la variación de la productividad. Como se planteó anteriormente, la condición de bajo contenido de oxígeno de las aguas de fondo de la bahía se debe, principalmente, a la presencia en el área de la ZMO, de manera

que una modificación, por ejemplo una profundización o una disminución del espesor de esta capa de agua, puede afectar la oxigenación subsuperficial al interior de la bahía. Por ejemplo, Cannariato & Kennet (1999) determinaron que la ZMO del margen continental de California había variado su espesor (y con ello la ubicación del límite superior) durante los pasados 60 ka, en relación con los ciclos de productividad de las aguas superficiales y la ventilación de las aguas subsuperficiales. Si se observa la tendencia del flujo de cadmio (Fig. 5) se puede interpretar que hace 2.000 años la ZMO se encontraba a mayor profundidad, de manera que el límite superior se ubicaba, probablemente, más abajo, lo que propició un ambiente de fondo, dentro de la bahía, un poco más oxigenado que en la actualidad. Esta condición ha variado hacia el presente debido, probablemente, a un ascenso del límite superior de la ZMO, lo que ha intensificado la condición subóxica-anóxica del ambiente de fondo de la bahía (Fig. 7D).

La Tabla 1 resume, a modo de matriz de doble entrada, la forma en que la ZMO y el centro de surgencia han actuado, y el efecto que su accionar ha tenido sobre la productividad y la oxigenación en la bahía. Se propone, según esta combinación de factores, que los principales forzantes de las características oceanográficas de la bahía Mejillones, al menos durante los últimos dos milenios, han sido la intensidad y el desplazamiento horizontal del centro de surgencia de Punta Angamos y el desplazamiento vertical de la ZMO presente en el área.

Una comparación con el registro biológico de la Bahía Mejillones

Tanto el perfil de flujo de C_{org} como el de flujo de cadmio mostraron dos períodos con claras similitudes con los descritos a partir del estudio de bioindicadores realizados en otros testigos de la misma bahía.

En la Fig. 8 se resumen las principales interpretaciones realizadas en el testigo 32E, y se

realiza una comparación con las interpretaciones propuestas por Ortlieb et al. (2000) para los testigos 24 y 5A. En el testigo 32E se pueden identificar cinco períodos de baja productividad y aguas de fondo más oxigenadas, entre los cuales está el centrado en los 34 cm. También se pueden contabilizar cuatro períodos de alta productividad y baja oxigenación de fondo, dentro de los cuales destaca, por su duración, el periodo centrado en los 12 cm.

Ortlieb et al. (2000), estudiando un testigo proveniente de la boca de la bahía (115 m de profundidad), identificaron dos secciones relevantes dentro de la secuencia bioestratigráfica. Una de ellas estaba datada en 850 años antes del presente y se caracterizaba por la co-ocurrencia de restos de sardina, un fuerte déficit de foraminíferos planctónicos, y una total ausencia de formas sinistales de *Neogloboquadrina pachyderma*, especie indicadora de aguas frías. Los autores plantearon que esta sección representaba un período de baja productividad y aguas superficiales cálidas. La otra sección del testigo comprende,

TABLA 1

Matriz de doble entrada en donde se combinan los factores propuestos como los principales responsables de las variaciones oceanográficas reconocidas en el testigo 32E, durante los pasados dos milenios: tono gris oscuro indica factores que podrían explicar las variaciones cíclicas registradas en las curvas de flujo de C_{org} (productividad biológica) y flujo de cadmio (oxigenación); (Ω) indica los mecanismos responsables de la parte del ciclo que muestra un aumento de la productividad y un descenso en la concentración de oxígeno de fondo de la bahía; (Φ) indica los mecanismos responsables de la parte del ciclo que muestra una disminución de la productividad y un aumento de la concentración de oxígeno de fondo de la bahía; tono gris claro indica los factores que explican la tendencia general de las curvas de paleoproductividad y flujo de cadmio (oxigenación); en blanco se indican los mecanismos que no actuarían de manera combinada en la Bahía de Mejillones, según el registro del testigo 32E

Combination of factors interpreted as being the major controls of oceanographic variations recognized in the 32E core, during the last two millennia: dark grey tone corresponds to factors that may explain the cyclic variations in the profiles of C_{org} flux (biological productivity) and cadmium flux (oxygenation); (Ω) indicates the mechanisms responsible for the productivity increase and the oxygen decrease at the base of the water column; (Φ) indicates the mechanisms interpreted as responsible for the productivity decrease and the oxygen increase at the bottom of the bay; light grey tone corresponds to factors that explain the general trend of paleoproductivity and the cadmium flux (bottom oxygenation); in white are shown the mechanisms which do not interact directly in Mejillones bay, according the sedimentary record of the 32E core.

		Centro de surgencia			
		Cerca	Lejos	Fuerte	Débil
ZMO	Arriba	Ω Productividad \uparrow Oxígeno \downarrow	Productividad \downarrow Oxígeno \downarrow	Ω Productividad \downarrow Oxígeno \uparrow	Productividad \downarrow Oxígeno \downarrow
	Abajo	Productividad \uparrow Oxígeno \uparrow	Φ Productividad \downarrow Oxígeno \uparrow	Productividad \uparrow Oxígeno \uparrow	Φ Productividad \downarrow Oxígeno \uparrow

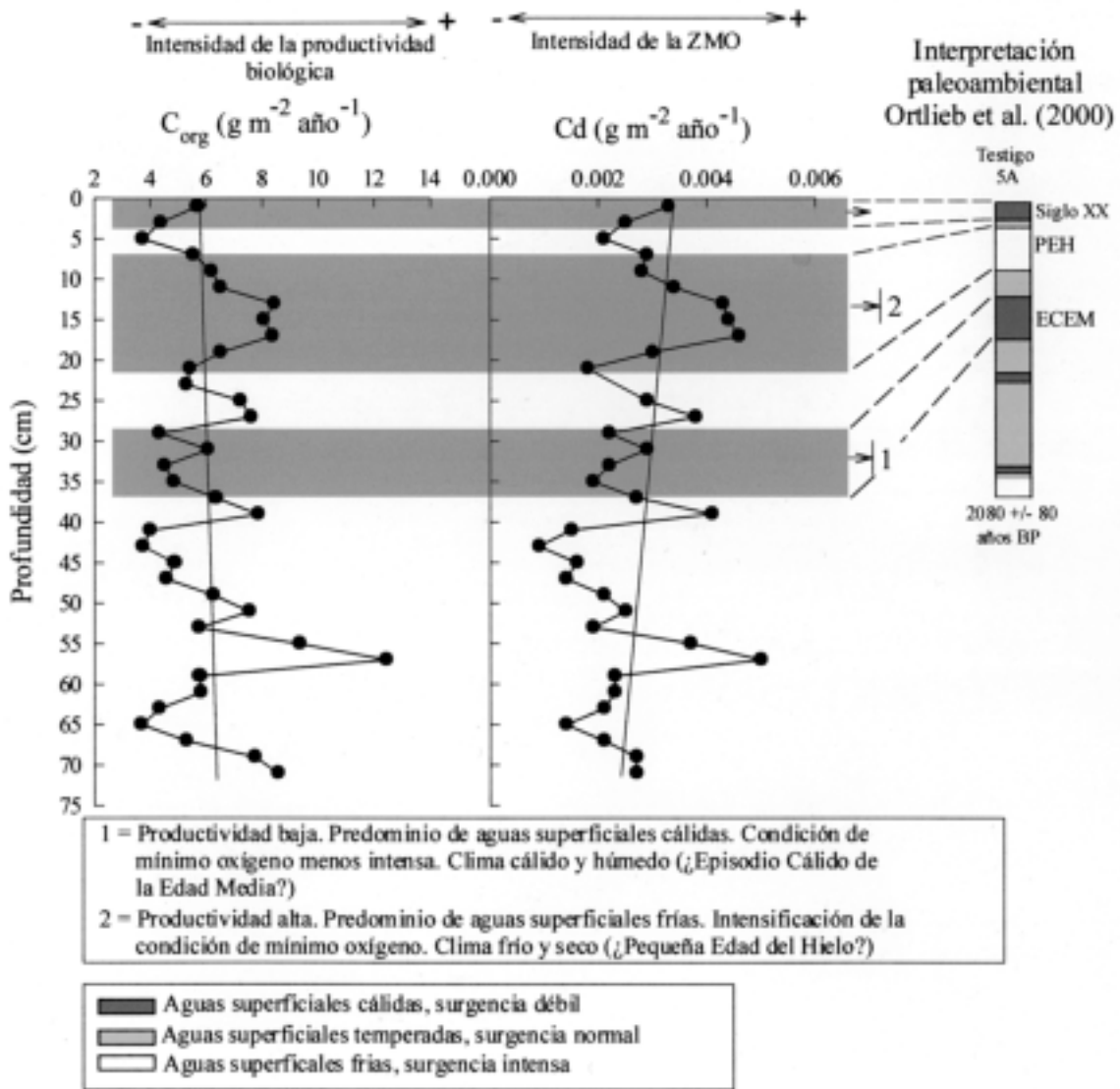


Fig. 8: Comparación entre el registro geoquímico y biológico en la Bahía Mejillones del Sur. También se presenta una adaptación de la figura interpretativa propuesta por Ortlieb et al. (2000) sobre la base del estudio de bioindicadores, y se correlacionan ambas interpretaciones. El testigo 5A tiene una longitud de 34 cm: ZMO = Zona de Mínimo Oxígeno; ECEM = Episodio Cálido de la Edad Media; PEH = Pequeña Edad del Hielo; BP = antes del presente (antes de 1950).

Comparison between the geochemical and petrographical records in the 32E core. These data seem to correlate fairly well with an interpretative reconstruction of the 5A core based upon biological indicators (according Ortlieb et al. 2000). Core 5a is 34 cm long: ECEM = Medieval Warm Period; PEH = Little Ice Age. BP = before present (prior to 1950).

aproximadamente, los siglos XVI a XIX y, en términos de la composición de bioindicadores, se caracterizó por la ausencia de restos de sardina y un fuerte incremento del foraminífero *N. pachyderma*, incluida la forma sinistral. Esta sección fue interpretada como el registro de aguas frías presentes en la bahía y una intensa surgencia. Finalmente Ortlieb et al. (2000) proponen que estas dos secciones reconocidas en los testigos estudia-

dos corresponderían al registro del Episodio Cálido de la Edad Media (ECEM) y a la Pequeña Edad de Hielo (PEH), respectivamente, períodos que han sido bien documentados en el Hemisferio Norte, pero de los cuales aún no está clara su incidencia a escala global (Keigwin 1996, Von Road et al. 1999, Broecker 2000).

Un cálculo preliminar realizado en el testigo 32E en función de la edad de radiocarbono de

la base de este testigo permiten indicar que la sección comprendida entre los 32 y 28 cm correspondería al período entre los 1.050 y 700 años antes del presente, mientras que la sección entre los 20 y 7 cm correspondería al período entre los 600 y los 100 años antes del presente. El primer período se caracteriza por una baja del flujo de C_{org} y cadmio, lo que se interpreta como una disminución de la productividad biológica al interior de la bahía, y una ZMO ubicada a mayor profundidad, lo que propició un ambiente un poco más oxigenado dentro de la bahía. Por el contrario, el segundo período se caracterizaría por condiciones totalmente opuestas, ya que se habría registrado una mayor productividad, mientras que la ZMO estaría más arriba afectando una mayor parte del fondo de la bahía.

Aun cuando las interpretaciones del testigo 32E están basadas solo en una datación (y por lo tanto deben ser tomadas con cautela), esta aproximación muestra una buena correlación entre el registro geoquímico y petrográfico del testigo 32E y el registro biológico del testigo 5A de Ortlieb et al. (2000), de manera que se refuerza la idea de que eventos océano-climáticos tipo ECEM y la PEH hayan tenido una influencia planetaria.

Las características del último siglo también parecen ser coincidentes entre ambos tipos de registros, ya que en el testigo 32E, al igual que en el reportado por Ortlieb et al. (2000) muestra que los pasados 100 años se caracterizaron por una baja productividad (predominio de aguas superficiales cálidas), aunque claramente se observa un tránsito de estas condiciones hacia una mayor productividad (predominio de aguas superficiales frías).

CONCLUSIONES

El centro de surgencia de Punta Angamos y la ZMO han afectado de manera combinada las características oceanográficas de Mejillones, las cuales han quedado registradas en los sedimentos laminados del fondo de la bahía. Esta combinación se ha manifestado en una sincronía durante períodos cortos, entre la productividad y la oxigenación de fondo, mientras que en un período de dos mil años ambos factores han evolucionado en sentido contrario; la productividad ha disminuido y la condición de mínimo oxígeno se ha intensificado. Se propone que los factores determinantes en las características oceanográficas de la bahía, al menos durante los pasados 2.000 años, han sido el desplazamiento horizontal de la celda de surgencia y

variaciones de la intensidad de la surgencia de Punta Angamos, y el desplazamiento vertical de la ZMO presente en el área.

El registro geoquímico y petrográfico del testigo 32E mostró una buena correlación con el registro biológico estudiado en otro testigo de la bahía, reforzando la hipótesis de que eventos climáticos tipo el Episodio Cálido de la Edad Media y la Pequeña Edad del Hielo, han quedado registrados en los sedimentos de esta bahía.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Departements Soutien et Formation aux Communautés Scientifiques du Sud (DSF), Francia, por la beca otorgada al primer autor para realizar una estadía de perfeccionamiento, durante la cual se realizó parte del trabajo presentado en este artículo.

Los autores desean agradecer el aporte de los correctores anónimos que ayudaron a mejorar este artículo. Agradecemos el financiamiento del proyecto FONDECYT 2960074.

LITERATURA CITADA

- ARCHER D, M LYLE, K RODGERS & P FROELICH (1993) What control opal preservation in tropical deep-sea sediments? *Paleoceanography* 8: 7-21.
- BOSTICK B, S FENDORF & M FENDORF (2000) Disulfide disproportionation and CdS formation upon cadmium sorption on FeS_2 . *Geochemica et Cosmochemica Acta* 64: 247-255.
- BROECKER W. (2000) Abrupt climate change: causal constraints provided by the paleoclimate record. *Earth-Science Reviews* 52: 137-154.
- BROWN JA, D COLLING, J PARK, D PHILLIPS, Y ROTHER & J WRIGHT (1994) Ocean chemistry and deep-sea sediments. The Open University/Pergamon Editors, Oxford, United Kingdom. 133 pp.
- CALVERT S, R BUSTIN & T PEDERSEN (1992) Lack of evidence for enhanced preservation of sedimentary organic matter in the oxygen minimum of the Gulf of California. *Geology* 20: 757-760.
- CALVERT S, R BUSTIN & E INGALL (1996) Influence of water column anoxia and sediment supply on the burial and preservation of organic carbon in marine shales. *Geochemica et Cosmochemica Acta* 60: 1577-1593.
- CANNARIATO K & J KENNETT (1999) Climatically related millennia-scale fluctuations in strength of California margin oxygen-minimum zone during the past 60 k.y. *Geology* 27: 975-978.
- CAÑÓN J & E MORALES (1985) Geografía de Chile, Tomo IX, Geografía del mar de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile. 244 pp.
- COBERTERA E (1993) Edafología aplicada: suelos, producción agraria, planificación territorial e impacto ambiental. Ediciones Catedra, Concepción, Chile. 73 pp.
- CRUSIUS J & J Thomson (2000) Comparative behavior of authigenic Re, U, and Mo during reoxidation and subsequent long-term burial in marine sediments. *Geochemica et Cosmochemica Acta* 64: 2233-2242.

- DEAN W, J GARDNER & D PIPER (1997) Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 4507-4518.
- DELGADO C & R GOMERO (1988) Textura, carbono orgánico y carbonatos de los sedimentos del margen continental peruano. *Boletín del Instituto del Mar del Perú* (volumen extraordinario): 1-10.
- DIVAKAR P, C PRAKASH & CH RAO (1992) The upwelling record in the sediments of the western continental margin of India. *Deep-Sea Research* 39: 715-723.
- ESCRIBANO R (1998) Population dynamics of *Calanus chilensis* in the Chilean eastern boundary Humboldt Current. *Fisheries and Oceanography* 7: 245-251.
- ESCRIBANO R & P HIDALGO (2000) Spatial distribution of copepods in the north of the Humboldt Current region off Chile during coastal upwelling. *Journal of Marine Biology* 80: 1-8.
- FARIAS L, L CHUECAS & A DURÁN (1996) Reactividad y remineralización de carbono orgánico total y nitrógeno total en sedimentos anóxicos de Bahía Concepción. *Gayana Oceanología (Chile)* 4:117-127.
- FARREL J, T PEDERSEN, S CALVERT & B NIELSEN (1995) Glacial-interglacial changes in nutrient utilization in the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 377: 514-517.
- FILIPPELLI G & M DELANEY (1996) Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 1479-1495.
- FUENZALIDA R (1990) Proceso de surgencia en la región norte de Chile, latitudes 20°30'S-21°45' S. *Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Serie Ciencias del Mar (Chile)* 2: 79-104.
- GARDNER J, W DEAN & P DARTNELL (1997) Biogenic sedimentation beneath the California Current system for the past 30 Ky and its paleoceanographic significance. *Paleoceanography* 12: 207-225.
- GONZÁLEZ HE, G DANERI, D FIGUEROA, JL IRIARTE, N LEFEVRE, G PIZARRO, R QUIÑONES, M SOBARZO & A TRONCOSO (1998) Producción primaria y su destino en la trama trófica pelágica y océano profundo e intercambio océano-atmósfera de CO₂ en la zona norte de la corriente de Humboldt (23° S): posibles efectos del evento El Niño, 1997-98 en Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 429-458.
- HENRICH S & J FARRINGTON (1984) Peru upwelling region sediments near 15°S. 1. Remineralization and accumulation of organic matter. *Limnology and Oceanography* 29: 1-19.
- HERGUERA J & W BERGER (1994) Glacial to postglacial drop in productivity in the western equatorial Pacific: mixing rate versus nutrient concentrations. *Geology* 22: 629-632.
- HOLLANDER D, J MCKENZIE & H ten HAVEN (1992) A 200 year sedimentary record of progressive eutrophication in lake Greifen (Switzerland): implications for the origin of organic-carbon-rich sediments. *Geology* 20: 825-828.
- IRIARTE J, G PIZARRO, V TRONCOSO & M SOBARZO (2000) Primary production and biomass of size-fractionated phytoplankton of Antofagasta, Chile (23-24° S) during pre-El Niño and El Niño 1997. *Journal of Marine Systems* 26: 37-51.
- JONES B & D MANNING (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology* 111: 111-129.
- KEIWIN L (1996) The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargasso Sea. *Science* 274: 1504-1508.
- LANGE C, S BURKE & W BERGER (1990) Biological production off southern California is linked to climatic change. *Climatic Change* 16: 319-329.
- LANGE C & W BERGER (1993) Paleoclimatic significance of Santa Barbara laminated sediments: a history of upwelling and El Niño Events. *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 74: 372.
- MARÍN V, L RODRÍGUEZ, J VALLEJO, E FUENTESECA & E OYARCE (1993) Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de la Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural* 66: 47-491.
- MARÍN V & G OLIVARES (1999) Estacionalidad de la productividad primaria en bahía Mejillones del Sur (Chile): una aproximación proceso-funcional. *Revista Chilena de Historia Natural* 72: 629-641.
- MARTINEZ PH, PH BERTRAND, I BOULOUBASSI, G BARELLE, G SHIMMIELD, B VAUTRAVERS, F GROUSSET, S GUICHARD, Y TERNOIS & MA SICRE (1996) An integrated view of inorganic and organic biogeochemical indicators of paleoproductivity changes in a coastal upwelling area. *Organic Geochemistry* 24: 411-420.
- MORFORD J & S EMERSON (1999) The geochemistry of redox-sensitive trace metals in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 1735-1750.
- MORFORD J, A RUSSELL & S EMERSON (2001) Trace metal evidence for changes in the redox environment associated with the transition from terrigenous clay to diatomaceous sediment, Saanich Inlet, BC. *Marine Geology* 174: 355-369.
- MORTLOCK R & P FRÖLICH (1989) A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research* 36: 1415-1426.
- MÜLLER P & E SUESS (1979) Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the ocean-I. Organic carbon preservation. *Deep-Sea Research* 26A: 1347-1362.
- ORTLIEB L, O ZÚÑIGA, R FOLLEGATI, R ESCRIBANO, I KONG, L RODRÍGUEZ, PH. MOURGUIART, J VALDÉS & P IRATCHET (1994) Paleoceanografía de la bahía de Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile): resultados preliminares para el último milenio. *Estudios Oceanológicos (Chile)* 13: 45-55.
- ORTLIEB L, R ESCRIBANO, R FOLLEGATI, O ZÚÑIGA, I KONG, L RODRÍGUEZ, J VALDÉS, N GUZMÁN & P IRATCHET (2000) Ocean-climatic changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment of Northern Chile (23°S). *Revista Chilena de Historia Natural* 73: 221-242.
- PÁEZ M, O ZÚÑIGA, J VALDÉS & L ORTLIEB (2001) Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micróxicos de la Bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía (Chile)* 36: 123-133.
- PAGES (1993) Research protocols for Pale. Paleoclimatic of Arctic lakes and estuaries. *PAGES Workshop Report Series* 94-1: 1-33.
- RAMANAMPISOA L, PH BERTRAND, J DISNAR, E LALLIER-VERGES, B PRADIER & N TRIBOVILLARD (1992) Étude à haute resolution d'un cycle de carbone organique des argiles du Kimméridgien du Yorkshire (Grande-Bretagne): resultants de géochimie et de pétrographie organique. *Compte-Rendus à l'Académie des Sciences, Paris* 314: 1493-1498.
- REINECK H & I SINGH (1980) Depositional sedimentary environments: with reference to terrigenous clastics. Second edition. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 549 pp.

- RODRÍGUEZ L, O ZÁRATE & E OYARCE (1986) Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la Bahía de Mejillones del Sur. *Revista de Biología Marina* 22: 75-96.
- RODRÍGUEZ L, V MARÍN, M FARÍAS & E OYARCE (1991) Identification of an upwelling zone by remote sensing and in situ measurement: Mejillones del Sur Bay (Antofagasta- Chile). *Scientia Marina* 55: 467-473.
- ROSENTHAL Y, E BOYLE, L LABEYRIE & D OPPO (1995) Glacial enrichments of authigenic Cd and U in subantarctic sediments: a climatic control on the elements oceanic budget? *Paleoceanography* 10: 395-413.
- RUSSELL A & J MORFORD (2001) The behavior of redox-sensitive metals across a laminates-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia. *Marine Geology* 174: 341-354.
- SAAGER P, H de BAAR & R HOWLAND (1992) Cd, Zn, Ni and Cu in the Indian Ocean. *Deep-Sea Research* 39: 9-35.
- SALAMANCA M, L CHUECAS & F CARRASCO (1988) Heavy metal content and distribution in surface sediments from three areas of Chilean coast. *Gayana Miscelanea (Chile)* 9: 3-16.
- SCHRADER H (1992) Comparison of Quaternary coastal upwelling proxies off central Peru. *Marine Micropaleontology* 19: 29-47.
- SHAFFER G, O PIZARRO, L DJURFELD, S SALINAS & J RUTLLANT (1997) Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-1992 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* 27: 217-235.
- SHERMAN K (1994) Sustainability, biomass yields, and health of coastal ecosystem: an ecological perspective. *Marine Ecology Progress Series* 112: 277-301.
- SIEBOLD E & W BERGER (1993) The sea floor: an introduction to marine geology. Springer-Verlag, ciudad, país. 355 pp.
- SIEVERS H & S VEGA (2000) Respuesta físico-química de la bahía de Valparaíso a la surgencia generada en Punta Curaumilla y al fenómeno El Niño. *Revista de Biología Marina y Oceanografía (Chile)* 35: 153-168.
- SILVA N & H SIEVERS (1981) Masas de agua y circulación en la región de la rama costera de la corriente de Humboldt latitudes 18° S - 33° S. (Operación oceanográfica MarChile X - ERFEN Y). *Ciencia y Tecnología del Mar CONA (Chile)* 5: 5-50.
- SILVA N (1983) Masas de agua y circulación en la región norte de Chile, latitudes 18-32° S (Operación oceanográfica MarChile XI- ERFEN II). *Ciencia y Tecnología del Mar CONA (Chile)* 7: 47-84.
- SUMMERHAYES C, K EMEIS, M ANGEL, R SMITH & B ZEITZSCHEL (1995) Upwelling in the ocean: modern processes and ancient records. *Environmental Sciences Research Report* 18: 1-37.
- THAMDRUP B & D CANFIELD (1996) Pathways of carbon oxidation in continental margin sediments off central Chile. *Limnology and Oceanography* 41: 1629-1650.
- THOMAS A, J BLANCO, M CARR, P STRUB & J OSSES (2001) Satellite-measured chlorophyll and temperature variability off northern Chile during the 1996-1998 La Niña and El Niño. *Journal of Geophysical Research* 106: 899-915.
- THUNELL R, M OINGMIN, S CALVERT & F PEDERSEN (1992) Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the south China Sea: productivity variations and surface water pCO₂. *Paleoceanography* 7: 143-162.
- VALDÉS J (1998) Evolución oceanográfica reciente de la Bahía Mejillones del Sur (23° S). Evidencia geoquímica en sedimentos marinos. Tesis Doctoral, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 114 pp.
- VALDÉS J (1999) Contenido de cadmio y carbono orgánico en un testigo de sedimento de la plataforma continental de Concepción (36° S). *Gayana Oceanología (Chile)* 63: 35-40.
- VALDÉS J & L ORTLIEB (2001) Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la Bahía Mejillones del Sur (23° S): indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino. *Investigaciones Marinas (Chile)* 29: 25-35.
- VALDÉS J, L LÓPEZ, S LOMÓNACO & L ORTLIEB (2000) Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de materia orgánica en Bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 35: 169-180.
- VAN GEEN A, D McCORKLE & G KLINKHAMMER (1995) Sensitivity of the phosphate-cadmium-carbon isotope relation in the ocean to cadmium removal by suboxic sediments. *Paleoceanography* 10: 159-169.
- VARGAS G (1998) Approches méthodologiques en paléocéanographie réalisées à partir de carottes de la Baie de Mejilles, Chile (23° S). *Diplôme d'Etudes Approfondies, Iniversité Bordeaux, Bordeaux, France*. 32 pp.
- VERARDO D & A McINTYRE (1994) Production and destruction: control of biogenous sedimentation in the tropical Atlantic 0-300,000 years B.P. *Paleoceanography* 9: 63-86.
- VON ROAD U, M SCHAAF, K MICHELS, H SCHULZ, W BERGER & F SIROCKO (1999) A 500-yr record of climate in varved sediments from the Oxygen Minimum Zone off Pakistan, northern Arabian Sea. *Quaternary Research* 51: 39-53.
- WEBB T (1991) The spectrum of temporal climatic variability: current estimates and the need for global and regional time series. En: Bradley R (ed) *Global changes of the past: 61-82*. OIES Global Change Institute, Boulder, Colorado, USA.
- WEBER M, M WIEDICKE & V RIECH (1995) Carbonate preservation history in the Peru basin: paleoceanography implications. *Paleoceanography* 10: 775-800.
- YARINCIK K, R MURRAY, T LYONS, L PETERSON & G HAUG (2000) Oxygenation history of bottom water in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578,000 years: Results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn and Fe). *Paleoceanography* 15: 593-604.
- ZHAO M, G EGLINTON, S HASLETT, R JORDAN, M SARTHEIN & Z ZHANG (2000) Marine and terrestrial biomarker records for the last 35,000 years at ODP site 658C of NW Africa. *Organic Geochemistry* 32: 919-930.
- ZHENG Y, A VAN GEEN, R ANDERSON, J GARDNER & W DEAN (2000) Intensification of the northeast Pacific oxygen minimum zone during the Bölling-Alleröd warm period. *Paleoceanography* 15: 528-536.