

Sedimentos laminados de la Bahía Mejillones como registro de cambios temporales en la productividad fitoplanctónica de los últimos ~200 años

Temporal changes in phytoplankton productivity over the last ~200 years recorded from Mejillones Bay laminated sediments

MAGALY CANIUPÁN^{1,2}, TANIA VILLASEÑOR³, SILVIO PANTOJA^{2,4,*}, CARINA B. LANGE^{2,4},
GABRIEL VARGAS³, PRÁXEDES MUÑOZ⁵ & MARCO SALAMANCA⁴

¹ Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

² Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental (FONDAP-COPAS)

³ Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518 Correo 21, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile

⁴ Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción

⁵ Universidad Católica del Norte, Casilla 117, Coquimbo, Chile

*e-mail para correspondencia: spantoja@udec.cl

RESUMEN

Con el objetivo de reconstruir los cambios temporales de la productividad fitoplanctónica durante el pasado reciente, se han analizado los contenidos de carbono orgánico total, ópalo biogénico, “chlorins” y alquenonas en un testigo de sedimentos laminados recuperado de la Bahía Mejillones. Adicionalmente, los parámetros físicos medidos (contenido de agua, densidad seca, susceptibilidad magnética, rayos-X y escala de grises) contribuyeron a la caracterización de los sedimentos. El testigo recuperado con un sacatestigo de caja (Testigo 3; 23°03' S, 70°27' W; 80 m de profundidad de la columna de agua) registró una tasa de sedimentación de 0,18 cm año⁻¹ (basada en mediciones de ²¹⁰Pb). La extrapolación de esta tasa de sedimentación a la base del testigo da cuenta de una edad de ~223 años. Los sedimentos se caracterizaron por presentar una sucesión de láminas claras y oscuras de grosor milimétrico, que se diferencian tanto en sus propiedades físicas como en la composición. Así las láminas oscuras, de mayor densidad y menor contenido de agua, representarían períodos de mayor productividad fitoplanctónica mientras que las láminas claras, de menor densidad y mayor contenido de agua, reflejarían períodos de menor productividad, concordando con estudios previos. La buena preservación de las láminas, la ausencia de estructuras asociadas a procesos de bioperturbación, y los altos valores del δ¹⁵N sedimentario ($\bar{X} = 11,37 ‰$) sugieren que los niveles de oxígeno en el agua de fondo de la bahía han permanecido bajos durante el período de dos siglos de depositación de los sedimentos reportados aquí. Nuestro registro se divide en dos grandes intervalos de productividad: un intervalo de menor productividad fitoplanctónica, antes de AD 1820, asociado a condiciones relativamente más cálidas en el área de surgencia, y otro de mayor productividad y altamente variable, a partir de AD 1877, relacionado con condiciones relativamente más frías asociado a una intensificación de los vientos y de la surgencia costera. Nuestro trabajo sugiere que la productividad desde AD 1820 ha estado fuertemente condicionada por la producción primaria silíceá, y que especialmente a partir de AD 1877 se habría acoplado una mayor producción primaria calcárea.

Palabras clave: sedimentos laminados, carbono orgánico, “chlorins”, alquenonas, ópalo biogénico.

ABSTRACT

We analyzed the contents of total organic carbon, biogenic opal, chlorins, and alkenones (as productivity proxies) from a laminated sediment core recovered within Bahía Mejillones, northern Chile, in order to reconstruct recent temporal changes in phytoplankton productivity. Physical parameters (water content, dry bulk density, magnetic susceptibility, X-radiography, and grey scale intensity) were also used to characterize the sediments. A sedimentation rate of 0.18 cm year⁻¹ (based on ²¹⁰Pb measurements) was determined for the core (Core 3; 23°03' S, 70°27' W), which was recovered with a box-corer (water column depth: 80 m). By extrapolating this sedimentation rate to the base of the core, it yielded a total age of ~223 years. The sediments were characterized by a succession of light and dark millimetre-thick laminae, which differed in both physical properties and composition; the denser dark laminae had less water content and represented periods of increased phytoplankton productivity, whereas the less dense, light laminae had higher water

content and reflected less productive periods. The good preservation of the laminae, the absence of structures associated with processes of bioturbation, and the high sedimentary $\delta^{15}\text{N}$ values ($\bar{X} = 11.37 \text{ ‰}$) suggest low dissolved oxygen levels in the bay's bottom water during the two centuries of sedimentary deposition reported herein. Our record is divided into two large productivity intervals: one prior to AD 1820, with lower phytoplankton productivity and relatively warmer conditions, and another from ~AD 1877 to the present, characterized by higher productivity, high variability, and relatively colder conditions, and accompanied by intensified winds favouring coastal upwelling. We suggest that the productivity of Mejillones Bay since AD 1820 has been strongly dependent on siliceous production and that calcareous primary production has increased since AD 1877.

Key words: laminated sediments, organic carbon, chlorins, alkenones, biogenic opal.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se han estudiado sedimentos laminados de diferentes regiones del mundo por su importante rol en estudios océano-climáticos de alta resolución temporal (e.g., Behl & Kennett 1996, Kemp 2003, van Geen et al. 2003, Vargas et al. 2007). Los sedimentos laminados marinos constituyen un registro geológico poco común cuya formación y preservación está condicionada a la ocurrencia de tres condiciones específicas: (i) variaciones en la actividad biológica/química que resulten en cambios en la composición del sedimento, (ii) suficiente tasa de sedimentación para permitir la formación de apreciables capas, y (iii) condiciones ambientales que inhiban la alteración de estas capas por actividad bentónica, usualmente debida a condiciones de bajo contenido de oxígeno (Kemp 1996, 2003).

La presencia de sedimentos laminados ha sido documentada en una cuenca pequeña localizada en el norte de Chile, la Bahía Mejillones (23° S, Fig. 1, Ortlieb et al. 1994, 2000). Esta bahía, de 15 km de ancho y una profundidad máxima de 125 m, se encuentra en las proximidades del centro de surgencia de Punta Angamos, uno de los más productivos del norte de Chile (Strub et al. 1998) y que influye en las condiciones físicas y biológicas de la bahía (Marín & Olivares 1999, Marín et al. 2003).

La Bahía Mejillones se caracteriza por presentar niveles altos de productividad biológica pelágica, alcanzando $1.070 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Marín et al. 1993). Marín & Olivares (1999) muestran que la alta productividad de la cuenca estaría asociada al ingreso de aguas frías ($< 14 \text{ °C}$), con bajo contenido de oxígeno ($< 3 \text{ mL L}^{-1}$) y alta concentración de nitrato ($> 10 \text{ mg NO}_3^- \text{ m}^{-3}$) provenientes del centro de surgencia de Punta Angamos. Estudios

realizados por Navea & Miranda (1980) sugieren que el agua ecuatorial subsuperficial es la que ingresa a la bahía y caracteriza su condición oceanográfica bajo los 30 m.

La formación y preservación de sedimentos laminados de la Bahía Mejillones es favorecida por la alta productividad biológica, altas tasas de sedimentación ($0,154\text{-}0,171 \text{ cm año}^{-1}$; Vargas et al. 2004, 2005) y bajos niveles de oxígeno subsuperficial ($< 0,5 \text{ mL L}^{-1}$) asociados a la presencia de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO). Esta ZMO, que se localiza bajo los 50-60 m de profundidad, dependiendo de la época del año (Morales et al. 1999), intercepta la plataforma continental, inhibiendo el desarrollo de la macro y meiofauna bentónica (Páez et al. 2001), limitando así la bioperturbación de estos sedimentos, lo que favorece la preservación de las láminas.

Estudios de series sedimentarias recuperadas de la Bahía Mejillones han proporcionado antecedentes sobre la composición de estos sedimentos (Ortlieb et al. 1994, 2000), la caracterización de las laminaciones y su origen (Vargas et al. 2004), las condiciones oceanográficas de sedimentación de la materia orgánica (Valdés et al. 2000, 2004), así como las fluctuaciones en la productividad y temperatura superficial del mar asociadas a eventos de escala interdecadal a secular (Vargas et al. 2007). Estas investigaciones indican que la estructura laminar sedimentaria está asociada a variaciones en la abundancia de especies fitoplanctónicas y materia orgánica. De esta manera, las láminas oscuras están dominadas por esporas de resistencia de *Chaetoceros* sp. y materia orgánica, caracterizando un sedimento menos poroso que reflejaría períodos de surgencia costera y productividad primaria intensificada, mientras que algunas de las láminas claras, en general más porosas, podrían estar asociadas con períodos de menor productividad y

eventualmente eventos oceanográficos de tipo ENSO (Vargas et al. 2004). El registro sedimentario de temperatura, productividad primaria, y vientos favorables a la surgencia en la zona, sugiere un incremento secular de la productividad a partir de AD 1820 concomitantemente con una mayor variabilidad de orden interdecadal (Oscilación Decadal del Pacífico, PDO, Mantua et al. 1997, Zhang et al. 1997), más importante a partir de AD 1877, y que sería resultado de una intensificación de los vientos costeros y de una mayor influencia del Agua Ecuatorial Subsuperficial, en los sistemas de surgencia del norte de Chile y sur de Perú (Vargas et al. 2007). En décadas recién pasadas, los estudios paleoceanográficos se han visto enriquecidos por la determinación de marcadores de productividad, como por ejemplo

los “chlorins”, alquenonas y ópalo biogénico. “Chlorins” son productos de transformación de clorofila, presente en todos los organismos fotosintéticos. Debido a que estos pueden ser estables por largos períodos de tiempo, han sido utilizados para reconstruir las fluctuaciones de la productividad primaria a diferentes escalas de tiempo (e.g., Eckardt et al. 1992, Harris et al. 1999). Las alquenonas son compuestos orgánicos (cetonas) producidos por un número restringido de especies de cocolitofóridos (e.g., Brassell et al. 1986, Prahl & Wakeham 1987). Su concentración en los sedimentos puede ser utilizada para reconstruir la productividad de cocolitofóridos en el tiempo, y la proporción relativa de alquenonas $C^{37:2}$ y $C^{37:3}$ para reconstruir la temperatura superficial del mar (e.g., Prahl & Wakeham 1987, Kennedy &

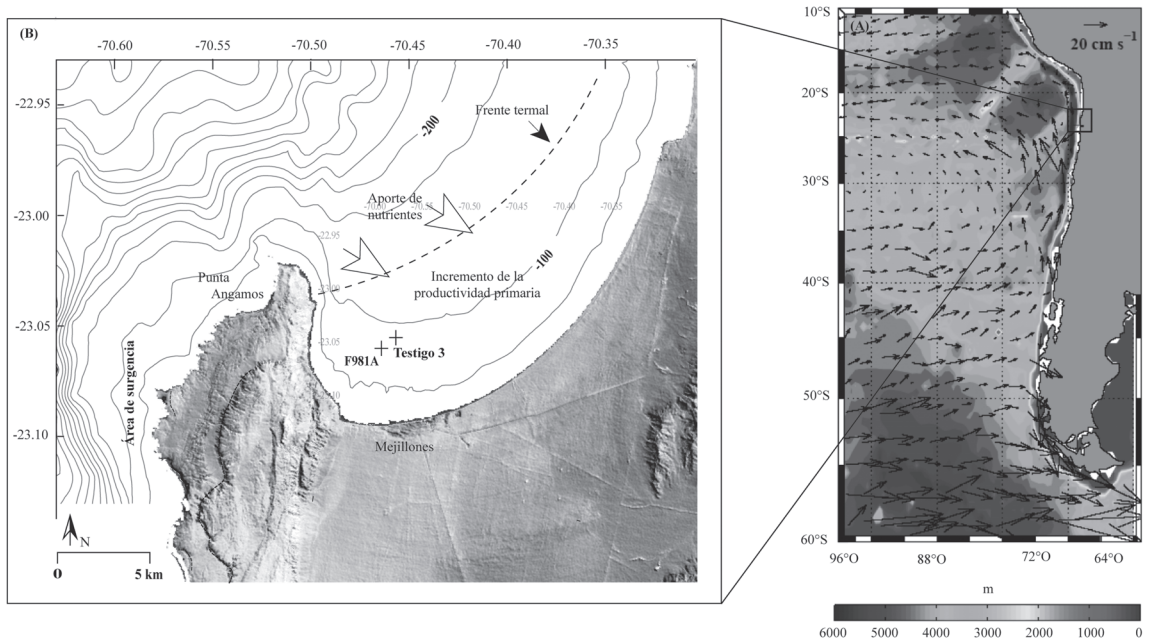


Fig. 1: Ubicación de la Bahía Mejillones en el margen Pacífico sureste y su contexto oceanográfico en el Sistema de la Corriente de Humboldt (modificado de Pizarro 2004), mostrando la localización de los testigos recolectados en la Bahía Mejillones utilizados en este trabajo. Se muestran los principales factores que influyen en la alta productividad primaria en la bahía. Durante la fase de intensificación de los vientos favorables a la surgencia, la bahía es aislada por un frente térmico constituyendo un subecosistema que amplifica el efecto fertilizador de la surgencia de Punta Angamos (Marín et al. 2003), que, junto con una circulación oceánica restringida, favorece altas tasas de acumulación de materia orgánica y restos biogénicos en el fondo marino (Vargas et al. 2004).

Location of Bahía Mejillones in the eastern South Pacific and its oceanographic context in the Humboldt Current System (modified from Pizarro 2004), showing the location of the cores recovered from Bahía Mejillones that were used in this work. The main factors that influence the bay’s high primary productivity are also shown. During the phase of intensified upwelling-favourable winds, the bay is isolated by a thermal front, constituting a sub-ecosystem that amplifies the fertilizing effect of the upwelling at Punta Angamos (Marín et al. 2003). This, along with a restricted oceanic circulation, favours high accumulation rates of organic matter and biogenic remains on the sea floor (Vargas et al. 2004).

Brassell 1992, Müller et al. 1998). El ópalo biogénico (sílice biogénico) es un compuesto inorgánico que forma parte del esqueleto silíceo de algunos microorganismos, y su presencia en los sedimentos puede ser usado como un marcador de paleoproduktividad, especialmente en regiones de alta productividad (Ragueneau et al. 2000). Las diatomeas contribuyen de manera sustancial a este ópalo (Lisitzin 1971) de tal manera que las fluctuaciones en la concentración de Si_{OPAL} pueden ser utilizadas como indicador de las fluctuaciones temporales de la abundancia de diatomeas.

En este estudio se analizan marcadores biogeoquímicos de productividad primaria a partir de muestras de sedimento laminado de la Bahía Mejillones, con el fin de profundizar en la caracterización de las láminas, así como en su significado paleoceanográfico, y así identificar los mecanismos responsables de la variabilidad de la producción primaria en los últimos 220 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras

El testigo utilizado en este estudio fue colectado con un sacatestigo de caja a 80 m de profundidad de columna de agua en el interior de la Bahía Mejillones (23°03,3' S, 70°27,4' O) (Fig. 1). El testigo fue recuperado durante el crucero ZOMEI, realizado entre el 28 de septiembre y primero de octubre de 2005 a bordo del AGOR Vidal Gormaz de la Armada de Chile. El testigo de caja fue submuestreado a bordo con cuatro plaquetas de acrílico (50 x 10 cm de longitud), las que fueron almacenadas en una cámara fría (2 °C) para su posterior análisis en el laboratorio. En este estudio se utilizó una plaqueta para análisis de ^{210}Pb (plaqueta 3C, submuestreo en secciones de 0,5 cm de espesor) y otra para análisis geoquímicos y de las propiedades físicas del sedimento (plaqueta 3D, submuestreo por láminas); en ambas se midió la susceptibilidad magnética a fin de apoyar su correlación lateral.

Imágenes de rayos X y escala de grises

Cada plaqueta fue radiografiada (Fig. 2) con un equipo médico convencional, con una configuración de 50 kV, 250 mA, a una tasa de

0,8 mA s⁻¹. La película o placa de contacto de la radiografía (“contact print”) fue utilizada para obtener la escala de grises. Con esta técnica se asigna a cada píxel de la imagen un valor entre 0 y 255 según la intensidad del gris (0: negro; 255: blanco).

Plantilla de la plaqueta 3D

La imagen de rayos X tomada a la plaqueta 3D fue utilizada para generar una plantilla en la cual se dibujaron los límites de las láminas y sirvió para su muestreo posterior (Fig. 2E, 2F). Debido a que habían transcurrido dos meses entre la recolección del sedimento (septiembre 2005) y el submuestreo de láminas (noviembre 2005), el sedimento sufrió compactación, por lo cual la plantilla se redujo al 90 % respecto al largo de la radiografía original. Así, la plaqueta 3D midió 45 cm de largo al momento de su recuperación y toma de imagen radiográfica, y disminuyó a 40,6 cm de largo al inicio de los análisis.

Descripción y corte de láminas

Se identificaron 98 láminas en la plaqueta 3D. Utilizando la plantilla generada a partir de la imagen de rayos X (90 % de reducción), se realizó el corte de láminas. En cada lámina se midió el contenido de agua, la densidad y se realizaron los análisis geoquímicos pertinentes a este estudio. Todos los análisis consideran el tamaño final de la columna de sedimento (40,6 cm). El contenido de agua de cada lámina fue calculado a partir de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco. La densidad seca total (“dry bulk density”) fue calculada considerando el porcentaje de agua en masa y la densidad de los sólidos de acuerdo a la ecuación: densidad (g cm^{-3}) = masa seca / ((masa seca/2,65 g cm^{-3}) + (masa de agua/1,025 g cm^{-3})), donde 2,65 es la densidad de los sólidos y 1,025 es la densidad del agua (Bloesch & Evans 1982).

Susceptibilidad magnética y mineralogía FTIR

Se midió la susceptibilidad magnética (Ellwood 1980) en secciones de 0,5 cm en la plaqueta 3C y en algunas láminas de la plaqueta 3D, utilizando el sistema Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter modelo KLY-3S desarrollado por AGICO Inc.

Se realizaron tres mediciones para cada submuestra y se calculó el promedio para cada una de ellas, arrojando un error promedio de $\pm 0,03$ ($\text{SI cm}^{-3} \times 10^{-6}$; SI: Sistema Internacional) para estas repeticiones. El valor promedio para cada submuestra (lámina o sección de 0,5 cm) fue dividido por su volumen, obteniéndose un valor normalizado para cada una de ellas (susceptibilidad magnética por unidad de volumen, $\text{SI cm}^{-3} \times 10^{-6}$).

El contenido de minerales terrígenos en el sedimento fue determinado a través del análisis de mineralogía por Transformada de Fourier de

Espectrometría Infrarroja (FTIR). Los aspectos metodológicos han sido explicados en Bertaux et al. (1998), mientras que su aplicación en los sedimentos laminados de Mejillones en particular se muestra en Vargas et al. (2004, 2007). El espectro FTIR, centrado en el infrarrojo medio ($2,5\text{-}40 \mu\text{m}$), fue medido a partir de una preparación de 300 mg de KBr con sedimento total, y luego comparado con espectros de referencia. Las cantidades son expresadas en porcentaje en peso respecto de la masa de sedimento seco, con una precisión de 1% para las estimaciones (Bertaux et al. 1998).

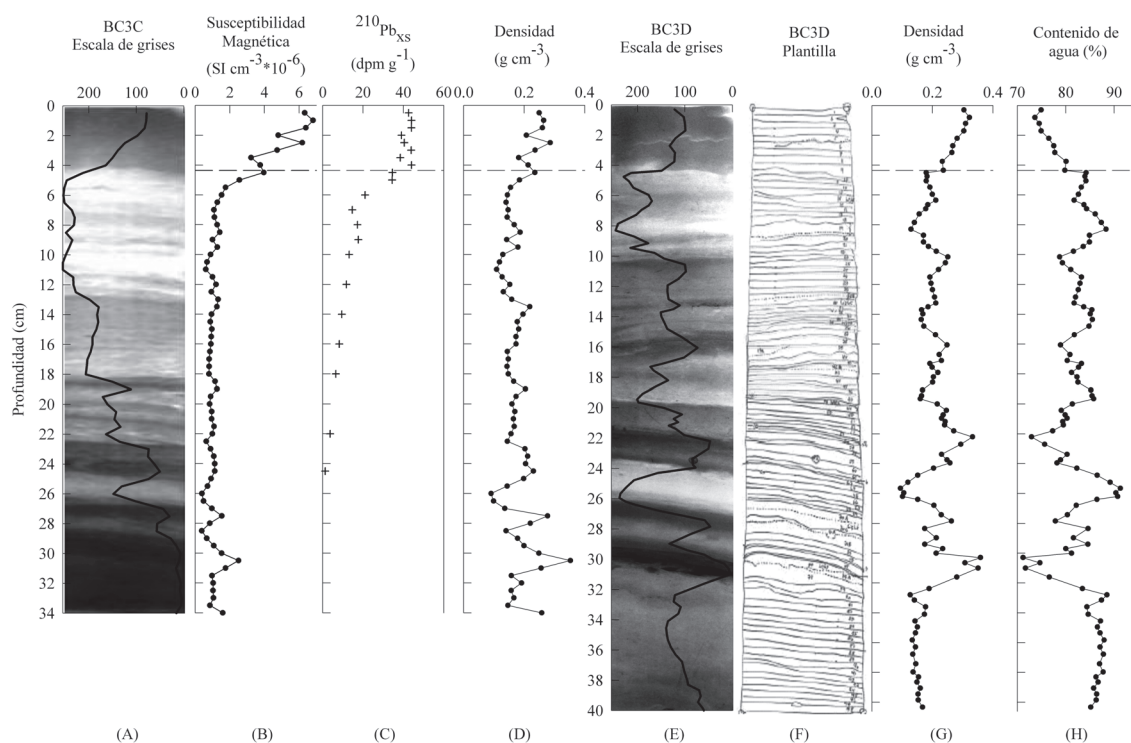


Fig. 2: Película de contacto (“contact print”) de las radiografías de las plaquetas 3C y 3D y parámetros medidos en ellas. (A) Película de contacto de la plaqueta 3C; (B) susceptibilidad magnética, expresada en unidades internacionales (SI), medida en secciones de 0,5 cm en la plaqueta 3C, normalizada por el volumen de cada sección submuestreada; (C) perfil de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (plaqueta 3C); (D) densidad del sedimento de la plaqueta 3C; (E) película de contacto de la plaqueta 3D; (F) plantilla de submuestreo de la plaqueta 3D (“template”) que muestra detalle de la estructura laminar del sedimento y el contacto entre láminas; (G) densidad del sedimento de la plaqueta 3D; (H) contenido de agua de la plaqueta 3D. Las imágenes reflejan el largo de cada plaqueta después de su compactación (3C = 34 cm y 3D = 40,6 cm; ver Materiales y Métodos). La línea de puntos indica el intervalo de mezcla superior.

Contact print of X-radiographs of slabs 3C and 3D and the parameters measured therein. (A) Contact print of slab 3C; (B) magnetic susceptibility, expressed in international units, measured in 0.5-cm sections of slab 3C, and normalized for the volume of each sub-sampled section; (C) $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ profile of slab 3C; (D) sediment density of slab 3C; (E) contact print of slab 3D; (F) template of slab 3D that shows details of the laminar structure and the contact between the laminae; (G) sediment density of slab 3D; (H) water content of slab 3D. Images reflect the final length of each slab after compaction (3C = 34 cm and 3D = 40.6 cm; see Materials and Methods). The dotted line indicates the upper mixed layer.

Mediciones de ^{210}Pb y cronología

Las mediciones de ^{210}Pb se realizaron a partir del submuestreo de la plaqueta 3C. Esta plaqueta midió 37,5 cm al momento de su recuperación y toma de imagen radiográfica, y disminuyó a 34 cm al inicio de los análisis (Fig. 2A). Los inventarios (I) de ^{210}Pb no sustentado o en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) son expresados en dpm cm^{-2} , y fueron calculados de acuerdo a Turekian et al. (1980): $I = \sum A_i \rho_i h_i$, donde A_i es el $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (dpm g^{-1}), ρ_i es la densidad aparente para el intervalo i (g cm^{-3}), y h el grosor del intervalo (cm). Las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ fueron determinadas desde el ^{210}Pb total menos la actividad de su isótopo padre, ^{226}Ra . Se estimó una tasa de sedimentación constante a partir del perfil de la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ con la profundidad en el testigo.

Análisis geoquímicos

Los análisis de carbono orgánico total, nitrógeno total y los isótopos estables de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) y carbono ($\delta^{13}\text{C}$) fueron realizados sobre sedimento acidificado (~10 mg de sedimento húmedo fueron secados a 50°C x 5 h, y acidificado con vapor de HCl 0,6N x 5 h para remover el carbono inorgánico). Carbono orgánico y nitrógeno fueron medidos en un analizador elemental y los isótopos estables de N y C en un espectrómetro de masa de razón isotópica (precisión analítica $\pm 0,2\text{‰}$ para nitrógeno y $\pm 0,1\text{‰}$ para carbono) en la Universidad de California, Davis, Estados Unidos.

El contenido de ópalo biogénico fue determinado siguiendo el método de azul de molibdeno (Mortlock & Froelich 1989). Este método consiste en la extracción de ácido silícico desde sedimento liofilizado (~ 25 mg) y la lectura de su absorbancia en un espectrofotómetro a 812 nm. Los datos son informados como $\% \text{Si}_{\text{OPAL}} = 112,4 \times (C_s/M)$, donde C_s = concentración de sílice en la muestra en (mM), M = masa de la muestra en mg, y $112,4$ = peso molecular de Si (28,09) x volumen de extracción de NaOH (0,04 L) x 100.

“Chlorins” (clorofila y productos de transformación) fueron determinados siguiendo el método descrito por Villanueva & Hastings (2000). Este consiste en la extracción de pigmentos totales desde sedimento húmedo (~1

g) con acetona y en oscuridad para evitar la degradación de los pigmentos. El extracto es purificado usando NaCl y CH_2Cl_2 y la absorbancia se mide en un espectrofotómetro a 585, 665 y 750 nm. La concentración de “chlorins” es informada en nmol g^{-1} sedimento seco (nmol/gss) y es calculada de acuerdo a la ecuación: [“chlorins”] = $A/(\epsilon \times b)$, donde A (absorbancia) = $A_{665} - ((750-665)/(750-858) \times (A_{585} - A_{750}) + A_{750})$, ϵ = coeficiente de extinción molar de clorofila a 665 nm ($66,800 \text{ cm}^{-2} \text{ M}^{-1}$), y b = largo de la cubeta (1 cm).

Las alquenonas fueron extraídas desde ~ 3 g de sedimento húmedo (Prahl & Wakeham 1987). La purificación se realizó en columna de sílica gel con solventes de polaridad creciente. La fracción que contuvo las alquenonas fue analizada en un cromatógrafo de gas Shimadzu, con una columna SPB-5 (30 x 0,25 mm i.d.), operado con nitrógeno como gas de arrastre (10 psi), y temperatura programada ($75-130^\circ\text{C}$ a $10^\circ\text{C min}^{-1}$; $130-300^\circ\text{C}$ a 5°C min^{-1} y 20 min en modo isothermal); usando 5α colestano (100 ppm) como estándar interno y 14-heptacosano (100 ppm) como estándar de recuperación. La concentración de alquenonas $\text{C}_{37:2}$ y $\text{C}_{37:3}$ es expresada en μg^{-1} sedimento seco ($\mu\text{g gss}^{-1}$). La temperatura superficial del mar (TSM) fue reconstruida utilizando el índice UK'_{37} de acuerdo a Prahl et al. (1988).

Índice de productividad

Los proxies de productividad utilizados en este estudio (carbono orgánico, ópalo biogénico, “chlorins” y alquenonas) fueron combinados en un índice de productividad, que es utilizado como un estimador de las fluctuaciones de la productividad fitoplanctónica de la Bahía Mejillones. El índice de productividad se calculó promediando las tasas de acumulación de masa normalizadas de carbono orgánico, nitrógeno y “chlorins”, siguiendo lo propuesto en Hebbeln et al. (2002). Las tasas de acumulación de masa ($\text{mg cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) se calcularon como $\rho \times \text{TS} \times \text{C}$, donde ρ es la densidad de las láminas expresada en g cm^{-3} ; TS es la tasa de sedimentación en cm año^{-1} , y C es la concentración de cada compuesto. Las tasas de acumulación se normalizaron (en una escala de 0 a 1) restando a cada compuesto su valor mínimo y luego dividiendo este valor por la diferencia entre el valor máximo y mínimo.

Así el índice de productividad considera el promedio de las tasas de acumulación de masa de los compuestos y no sus concentraciones absolutas, evitando una sobrestimación por efectos de dilución. Este índice fue comparado con las tasas de acumulación de ópalo biogénico y de alquenonas, como indicadores de producción silíceo y de producción calcárea, respectivamente.

RESULTADOS

Distribución vertical de ^{210}Pb y susceptibilidad magnética

El perfil de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (en exceso) de la plaqueta BC3C (Fig. 2C) mostró valores constantes de actividad en los 4,35 cm superiores del testigo que reflejan la mezcla de sedimento. La distribución constante de la actividad en este segmento coincidió con un abrupto incremento de la susceptibilidad magnética de $7 \text{ SI cm}^{-3} \times 10^{-6}$ (Fig. 2B). La distribución constante de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y los valores altos de susceptibilidad magnética (Fig. 2B) sugieren que esta capa resultó de una sedimentación rápida, probablemente asociada a la remoción y resedimentación de material proveniente de la zona litoral de la bahía, producto del inicio de las operaciones de dragado para la construcción del megapuerto de Mejillones en diciembre del año 2002 (El Mercurio de Antofagasta N° 34.344). Estas actividades portuarias incorporarían hierro en los sedimentos superficiales, lo que explicaría el abrupto incremento de la susceptibilidad magnética hacia la superficie (Fig. 2B). Bajo esta capa, la actividad presentó un decaimiento de tipo exponencial con la profundidad, de acuerdo con la disminución de la actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ con la profundidad.

El valor de ^{210}Pb sustentado fue de $4,66 \pm 0,56 \text{ dpm g}^{-1}$ a los 25 cm del sedimento. La tasa de sedimentación calculada bajo la capa de mezcla fue de $0,18 \pm 0,02 \text{ cm año}^{-1}$, con un ajuste lineal entre profundidad y $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ de $r^2 = 0,91$. La extrapolación de la tasa de sedimentación hasta la base de la plaqueta 3D indica que el testigo abarca los últimos 223 años de depósito. En total, se obtuvieron 98 muestras de las cuales 89 corresponden a láminas bajo la capa de mezcla, las cuales, según el modelo geocronológico determinado

para todo el testigo, representarían intervalos de tiempo entre 1,1 a 5,6 años (2,3 años en promedio). La comparación visual entre las imágenes radiográficas de las dos plaquetas del mismo testigo (BC3), basada en segmentos donde se reconoce un estilo de laminación en común, así como de los niveles de gris y de sus propiedades sedimentarias (Fig. 2), apoya la determinación geocronológica derivada a partir de los datos de la plaqueta BC3C, para la columna de sedimentos de la plaqueta BC3D.

Caracterización de los sedimentos

Los sedimentos se caracterizaron por presentar un color oliváceo, con una gran cantidad de restos biogénicos (escamas y huesos de peces, fragmentos de conchas), y una gran abundancia de estructuras esféricas amarillas de textura esponjosa.

Las laminaciones que se observaron tenuemente en el sedimento fresco, fueron distinguidas con claridad en las imágenes de rayos X como bandas casi horizontales que varían su color en todo el rango de grises (Fig. 2A, 2E). El contacto entre láminas, en su mayoría, es marcado y definido, sin observarse estructuras asociadas a procesos de bioperturbación por macrofauna bentónica (ej. grietas o erosión de láminas) o corrientes en el fondo de la bahía. Las laminaciones presentaron gran variabilidad en su grosor, oscilando entre 2 y 10 mm. Láminas relativamente gruesas (5 a 10 mm de espesor) dominaron el estrato inferior de la plaqueta BC3D (bajo los 31 cm) (Fig. 2E).

El registro presentó intervalos bien diferenciados. Por ejemplo, se destacó un intervalo muy claro entre los 24 y 26,3 cm de profundidad (láminas 63 a 68) de muy baja densidad ($\sim 0,1 \text{ g cm}^{-3}$) y un alto contenido de agua (82-91 %) (Fig. 2E-2H). Un tramo de sedimento muy oscuro y con alta densidad ($\sim 0,36 \text{ g cm}^{-3}$) se observó a los 30,2-31,1 cm (láminas 76 a 78), que se destaca por marcar en su base una superficie de erosión e inyectar el sedimento que le subyace, característica que hacen atribuirle un origen diferente de la sedimentación hemipelágica que domina en la bahía (Vargas et al. 2004, 2005). Este intervalo ha sido interpretado como el depósito de un flujo de material desde los márgenes de la cuenca, producto del terremoto de mayo de

1836 ocurrido en Cobija (60 km al norte de Mejillones, Villaseñor et al. 2007¹). Adicionalmente, se observó una segunda capa oscura y densa entre los 26,8 y los 27,9 cm (láminas 70A a 71A) y una tercera a los 22-23 cm (láminas 56 a 59) (Fig. 2E-2H), sin embargo estas no presentan signos de erosión u otro fenómeno anómalo. Un intervalo de textura esponjosa particularmente notorio por su espesor se registró entre los ~ 24 y 28 cm de profundidad en la plaqueta 3D, el que podría corresponder a restos de diatomeas de gran tamaño (*Coscinodiscus* sp.), según lo descrito en Vargas et al. (2004).

En términos generales, los valores de la escala de grises se relacionaron significativamente con el contenido de agua y densidad, respectivamente (Fig. 3). La relación entre estos parámetros sugiere que las láminas claras, con mayor contenido de agua, estarían constituidas por material más poroso y menos denso que las láminas oscuras, similarmente a lo observado por Vargas et al. (2004).

Distribución vertical de los proxies geoquímicos

Los sedimentos de Bahía Mejillones son ricos en carbono orgánico (C_{org}). El C_{org} varió entre valores mínimos de 1,36-2,54 % (24-26 cm, láminas claras 66 y 67; Fig. 2E, 2F, 4B) y máximos de 8,11-8,96 % (20-23 cm, intervalos oscuros, láminas 56 a 61; Fig. 2E, 2F, 4B), y un contenido promedio de 6,51 %. En general, un menor contenido de C_{org} se registró en la base del testigo, desde los 40,6 a los 26 cm de profundidad ($\bar{X} = 5,5\%$), con respecto al estrato superior 26-4,35 cm donde el contenido de C_{org} incrementó paulatinamente, con valores cercanos al 7 %. Este mismo patrón se observó en el contenido de nitrógeno total (N_{total}), con valores promedios de 0,48 % en la sección inferior del testigo y 0,69 % en los 26 cm superiores (Fig. 4C).

Los sedimentos tienen alto contenido de “chlorins” (clorofila y productos de degradación) y alquenonas (compuestos

producidos por cocolitofóridos) (Fig. 4D, 4E), cuyas concentraciones promedio fueron de 477,0 nmol gss⁻¹ y 11,7 µg gss⁻¹, respectivamente, y presentaron patrones similares al C_{org} en la columna sedimentaria. Las concentraciones más bajas de “chlorins” ($\bar{X} = 357,0$ nmol gss⁻¹) y alquenonas ($\bar{X} = 5,0$ µg gss⁻¹), registradas en la base del testigo (bajo los 26 cm de profundidad), estuvieron acompañadas por un menor contenido de C_{org} ; mientras que sobre los 26 cm y hacia la superficie del sedimento, las concentraciones de ambos compuestos incrementaron notoriamente, alcanzando concentraciones en promedio de 547,0 nmol gss⁻¹ y 15,5 µg gss⁻¹, respectivamente.

El contenido de ópalo biogénico (Si_{OPAL}) fue alto en todo el registro, con un promedio de 16,6 % y con los valores más altos en la base del testigo (Fig. 4F).

Los valores de $\delta^{15}N$ sedimentario fueron en promedio 11 ‰ a lo largo de todo el registro con valores mayores entre los 12 y 26 cm de profundidad (Fig. 4G). Los valores del $\delta^{13}C$ fluctuaron alrededor de -18 ‰ (Fig. 4H), indicando que la materia orgánica es típicamente de origen marino. Valores isotópicos más pesados (alrededor de -14 ‰) se registraron a los 31 cm de profundidad (correspondientes a láminas oscuras 77 y 78A, Fig. 2E, 2F, 4H) con una fuerte excursión negativa (-20 y -25 ‰) a los 24-26 cm, coincidente con el intervalo de láminas claras descrito anteriormente (láminas 65 a 68; Fig. 2E, 2F, 4H), el cual podría corresponder a un tipo en particular de grandes diatomeas concéntricas, tal como se ha señalado previamente.

Índice de productividad

El registro muestra que la productividad, calculada promediando las tasas de acumulación de masa normalizadas de carbono orgánico, nitrógeno y “chlorins”, se incrementa a partir de ~AD 1820 y es persistentemente alta y variable a partir de AD 1877 (Fig. 5D). En este segundo intervalo (entre ~4 y 26 cm) es notoria una mayor covarianza de la productividad con el color de las láminas ($r^2 = 0,473$; $n = 57$; $P < 0,01$), de modo que láminas oscuras están asociadas a valores más altos del índice de productividad respecto de las láminas claras.

¹ VILLASEÑOR T, VARGAS G, PANTOJA S, LANGE C (2007) Searching for sedimentary records of the 1877-large subduction earthquake in northern Chile (23°S). Quaternary International 167-168: 434. Abstracts del XVII INQUA Congress, Cairns, Australia.

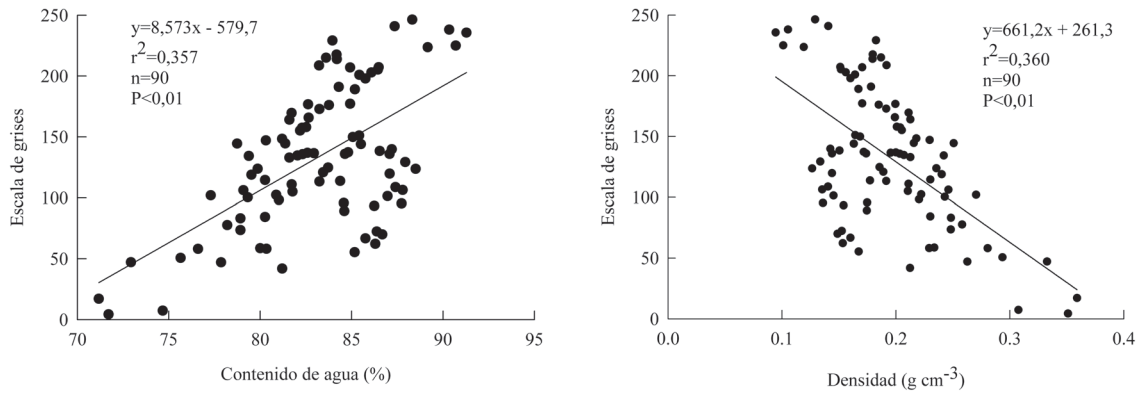


Fig. 3: Relación entre el nivel de gris promedio y (A) el contenido de agua, y (B) la densidad de las láminas de la plaqueta 3D.

Relationship between the average grey scale and (A) the water content, and (B) the density of the laminae in slab 3D.

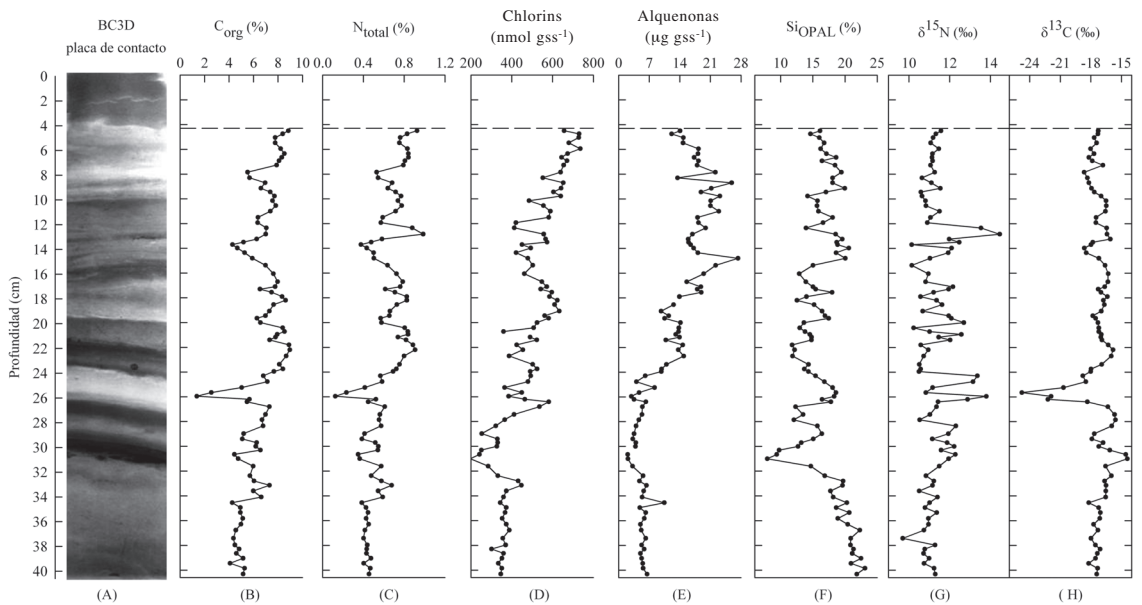


Fig. 4: Distribución de los componentes geoquímicos analizados en la plaqueta 3D. (A) Placa de contacto, (B) Carbono orgánico (% C_{org}), (C) nitrógeno total (% N_{total}), (D) concentración de “chlorins” (nmol gss^{-1}), (E) concentración de alquenonas ($\mu\text{g gss}^{-1}$), (F) ópalo biogénico (% Si_{OPAL}), (G) $\delta^{15}N$ del sedimento (‰), (H) $\delta^{13}C$ (‰) de la materia orgánica. La línea de puntos indica el intervalo de mezcla superior; gss = gramos de sedimento seco.

The distribution of the geochemical components analyzed in slab 3D. (A) Contact print, (B) Organic carbon (% C_{org}), (C) total nitrogen (% N_{total}), (D) concentration of chlorins (nmol gdw^{-1}), (E) concentration of alkenones ($\mu\text{g gdw}^{-1}$), (F) biogenic opal (% Si_{OPAL}), (G) sedimentary $\delta^{15}N$ (‰), (H) $\delta^{13}C$ (‰) of sedimentary organic matter. The dotted line indicates the upper mixed layer; gss (in Spanish) = grams dry weight.

DISCUSIÓN

Caracterización de los sedimentos y ambiente de depositación

Los sedimentos analizados en este trabajo presentaron alto contenido de carbono orgánico (~1-9 %), coincidentes con los valores reportados por Valdés et al. (2004) y Vargas et al. (2004), comparables con otros registros de zonas de alta productividad como la zona de surgencia peruana (2-13 %, Gutiérrez et al. 2006), y Chile Central (2-6 %, Thamdrup & Canfield 1996). La composición isotópica estable de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) de la materia orgánica sedimentaria evidenció que el carbono orgánico es principalmente de origen marino ($\bar{X} = -18 \text{‰}$) y deriva de la alta productividad de la cuenca (Marín et al. 2003, Vargas et al. 2004). La extrema aridez de la zona restringe el aporte de material continental a partículas líticas transportadas por el viento (Vargas 2002).

Los sedimentos se caracterizaron por presentar una sucesión de láminas claras y oscuras de entre 2 y 10 mm de grosor, concordantes con lo reportado por Ortlieb et al. (1994, 2000), Valdés et al. (2000, 2004) y Vargas et al. (2002, 2004) para la Bahía de Mejillones. Las propiedades físicas medidas en el testigo (densidad y contenido de agua) muestran que las láminas claras están constituidas por material más poroso y menos denso que las láminas oscuras (Fig. 3), concordando con estudios previos (Vargas et al. 2004). Vargas et al. (2004) mostraron que las láminas oscuras, de mayor densidad y menor contenido de agua, están enriquecidas en esporas de resistencia de *Chaetoceros* (indicadoras de surgencia), aglomerados de materia orgánica y partículas líticas, y reflejarían periodos de surgencia costera intensa e incremento de la productividad fitoplanctónica. Tanto análisis visuales de los sedimentos de la plaqueta 3D, como la comparación entre el índice de productividad y la escala de grises, muestran que las láminas oscuras están enriquecidas relativamente en remanentes biogénicos, y en particular en escamas de peces, mientras que los análisis geoquímicos evidencian un mayor contenido de carbono orgánico y “chlorins” (Fig. 4) y reflejarían periodos de mayor productividad oceánica, que induciría una mayor tasa de

exportación de restos biogénicos y materia orgánica al fondo de la bahía, coincidiendo con lo propuesto en trabajos previos (Valdés et al. 2004, Vargas et al. 2004).

El buen estado de preservación de las láminas evidencia que los niveles de oxígeno en las aguas de fondo que interceptan los sedimentos han permanecido bajos durante el período de depositación de ca. 223 años del testigo, aplacando la bioperturbación. A su vez, los altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ (9,7-14,4 ‰, Fig. 4G) sedimentario son coincidentes con esta interpretación por cuanto la desnitrificación es favorecida en zonas costeras caracterizadas por la presencia de una ZMO (e.g., Cline & Kaplan 1975), la que fracciona fuertemente los isótopos de nitrógeno, enriqueciendo en ^{15}N el nitrato remanente (Brandes & Devol 1997). En efecto, el nitrato isotópicamente pesado es transportado a las aguas superficiales y es consumido por el fitoplancton, aumentando posteriormente la señal isotópica en el registro sedimentario (Brandes & Devol 1997).

Variabilidad en los indicadores de productividad fitoplanctónica

Las fluctuaciones de la productividad fitoplanctónica en el pasado han sido estimadas a partir de compuestos orgánicos e inorgánicos específicos, cuya variabilidad en el tiempo estaría asociada a cambios en la abundancia de los organismos que los producen. En este trabajo se utilizaron “chlorins”, carbono orgánico y nitrógeno como estimadores de productividad fitoplanctónica, y se comparó su variabilidad con aquella del ópalo biogénico y de alquenonas, usadas como indicadores de la producción primaria silfcea y calcárea, respectivamente (Fig. 5).

El índice de productividad fitoplanctónica muestra un incremento a partir de AD 1820, luego valores bajos cerca de AD 1860, y valores persistentemente altos y variables a partir de AD 1877. Tanto la variabilidad como el incremento de los valores de este índice son comparables con la variación del flujo de componentes líticos (Fig. 5B), indicando que estas variaciones habrían estado fuertemente asociadas al viento sur responsable de la surgencia costera en la zona. Este incremento secular de la surgencia costera y la producción primaria en la Bahía Mejillones explicaría la

disminución de la temperatura superficial del mar (Fig. 5A) por la intensificación de los afloramientos de aguas frías en la superficie. Una intensificación de la productividad primaria se ha sugerido a partir de registros sedimentarios en otras regiones de la costa oeste de América del Sur, como en el sistema de surgencia del Perú. En efecto, McCaffrey et al. (1990) y Gutiérrez et al. (2006), analizando sedimentos laminados de esta región, observaron un aumento en el flujo de carbono orgánico durante el siglo 20, que atribuyen al incremento del viento a lo largo de la costa observado en el registro instrumental (Jahncke et al. 2004). Tanto en Mejillones como a lo largo de la costa peruana, un incremento de los vientos costeros sería acompañado de una mayor influencia de las Aguas Ecuatoriales

Subsuperficiales en los sistemas de surgencia, lo que contribuiría a fertilizar el océano y a incrementar la hipoxia/anoxia en la Bahía Mejillones en particular (Vargas et al. 2007).

En 1990, Bakun postulaba que la intensificación de los vientos favorables a la surgencia registrados en diferentes regiones como la Corriente de California, Perú, Península Ibérica y Marruecos, sería un mecanismo de retroalimentación positiva de los sistemas costeros al calentamiento global. Bakun (1990) señaló que al incrementar el contraste termal entre la tierra y el océano se intensificarían los vientos generadores de surgencia con efectos importantes sobre la productividad marina. Dado que la surgencia de Punta Angamos (de la cual la Bahía Mejillones forma parte) es fuertemente dependiente de los

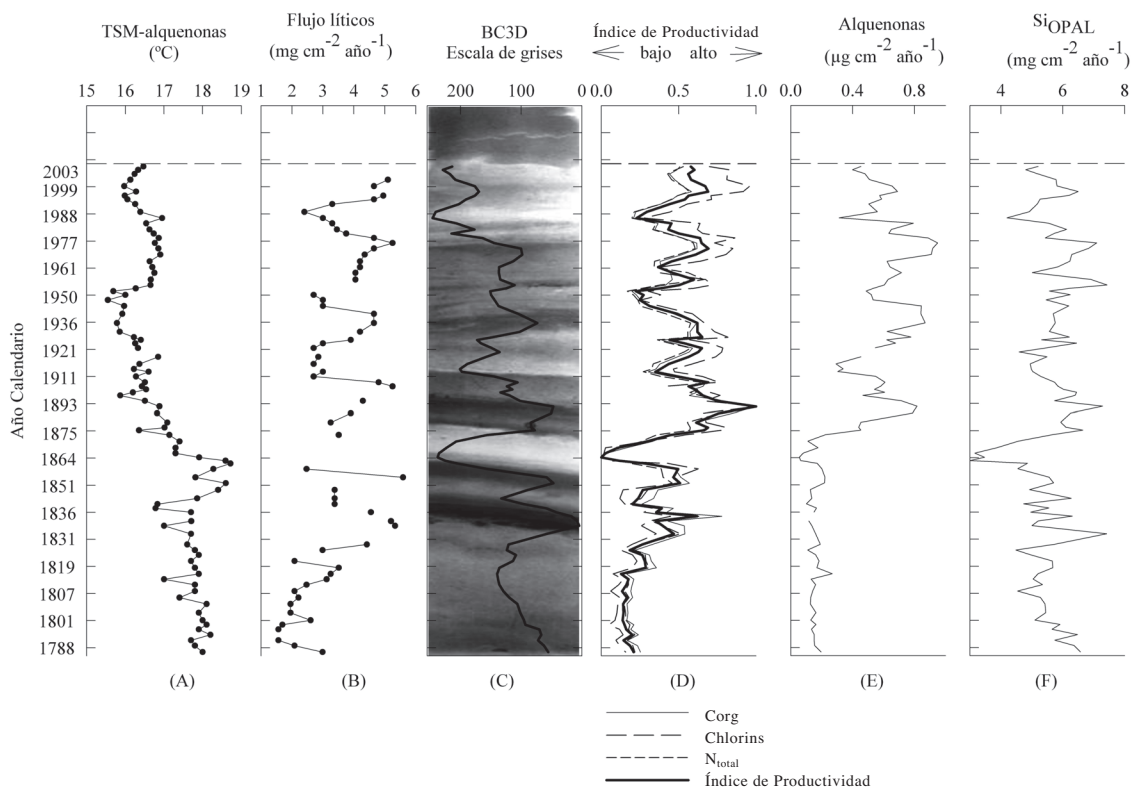


Fig. 5: (A) Temperatura superficial del mar (TSM) basada en alquenos, (B) flujo de componentes líticos, (C) Escala de grises sobre la placa de contacto de la plaqueta 3D, (D) Índice de productividad y tasas de acumulación normalizadas de C_{org} , "chlorins" y N_{total} ; tasas de acumulación de alquenos (E) y opal biogénico (F; Si_{OPAL}). La línea de puntos indica el intervalo de mezcla superior.

(A) Alkenone-based sea surface temperature (TSM), (B) Lithic fluxes, (C) Grey scale drawn on the contact print of slab 3D, (D) Productivity index and normalized accumulation rates of C_{org} , chlorins, and N_{total} ; Accumulation rates of alkenones (E) and biogenic opal (F; Si_{OPAL}). The dotted line indicates the upper mixed layer.

vientos costeros y de la circulación estacional asociada al borde este del anticiclón subtropical (Rutllant et al. 1998, 2003), es probable que la intensificación de los vientos favorables a la surgencia haya sido una respuesta a cambios océano-climáticos a escala de la cuenca del Pacífico, tal como lo indican recientemente Vargas et al. (2007). Nuestro registro muestra, además, que la productividad fitoplanctónica responde en forma positiva a esta intensificación de la surgencia, incrementando el aporte de los indicadores de fotosíntesis (“chlorins”, Fig. 4D), como también de carbono orgánico y nitrógeno en el sedimento. La comparación del índice de productividad con las tasas de acumulación de ópalo biogénico y alquenonas (Fig. 5), muestra que la producción primaria habría sido condicionada principalmente por la producción del fitoplancton silíceo, y que a partir de AD 1877 la producción calcárea se habría incrementado. Esto indicaría que la producción de diatomeas en este sistema de surgencia costera habría respondido en forma inmediata al cambio secular en el forzamiento océano-climático desde inicios del siglo 19, mientras que la producción calcárea se habría intensificado posteriormente, a fines del siglo 19, probablemente por un cambio en la distribución vertical y en la temporalidad de las floraciones (“blooms”) de ambos tipos de fitoplancton, asociado a una estructura de la columna de agua caracterizada por una mayor estratificación por el calentamiento regional (Vargas et al. 2007), acoplado con una intensificación de la surgencia y el subsecuente enfriamiento de las aguas en el borde costero.

CONCLUSIONES

El registro sedimentario reciente de la Bahía Mejillones se compone de una sucesión de láminas claras y oscuras de grosor milimétrico que presentan diferencias en sus propiedades físicas y composición; siendo las láminas más oscuras en general más densas y las láminas relativamente más claras generalmente más porosas. Los marcadores de productividad primaria utilizados en este trabajo apoyan la idea que el primer tipo de láminas representaría períodos de productividad primaria intensificada respecto del segundo tipo.

Los sedimentos se caracterizan por un alto contenido de carbono orgánico, buena preservación de las láminas y altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ sedimentarios, sugiriendo que las condiciones de oxígeno del agua de fondo han permanecido bajas al menos durante el período de 223 años reflejado en la columna sedimentaria. La variabilidad en el grosor de las láminas indica que en todo este período estas representan intervalos de 1 a 6 años, sugiriendo que estos sedimentos registran una variabilidad interanual (ENSO), además de la interdecadal (ENSO-like) y secular reportada en trabajos anteriores.

Nuestro registro se divide en dos grandes intervalos de productividad: un intervalo de menor productividad fitoplanctónica, antes de AD 1820, asociado a condiciones costeras relativamente más cálidas, y otro de mayor productividad y de mayor variabilidad a partir de AD 1877, con condiciones relativamente más frías en las aguas surgentes que influyen la bahía Mejillones. La intensificación de la productividad habría estado condicionada por una respuesta inmediata, a escala secular, de la producción silíceo a un forzamiento climático y oceanográfico dado por la intensificación de los vientos costeros y una mayor influencia de las Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales en los eventos de surgencia a partir de AD 1820. Solo a partir de AD 1877 se habría acoplado una mayor producción primaria calcárea evidenciada por una mayor representación de cocolitofóridos, a partir del incremento en la concentración de alquenonas, en los sedimentos. Esto sugiere que el incremento de la productividad primaria se asociaría a una intensificación secular de la surgencia, así como a cambios en la producción fitoplanctónica de acuerdo con una reorganización en la estructura de la columna de agua en la bahía.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT 1040503 adjudicado a SP y el Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental (Centro FONDAP-COPAS). Agradecemos a la Escuela de Graduados de la Universidad de Concepción

por una beca de estudios a AMC, y el apoyo profesional en el laboratorio de L. Núñez, R. Castro, y A. Ávila, y el apoyo de terreno del comandante y tripulación del AGOR Vidal Gormaz durante el crucero ZOMEI-sedimento. La mineralogía del testigo BC3D (susceptibilidad magnética y FTIR) fue estudiada gracias al proyecto FONDECYT 11060484 adjudicado a GV. Agradecemos los valiosos comentarios de los revisores anónimos y del Editor Asociado, Claudio Latorre.

LITERATURA CITADA

- BAKUN A (1990) Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247: 198-201.
- BEHL RJ & JP KENNETT (1996) Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific during the past 60 ky. *Nature* 379: 243-246.
- BERTAUX J, F FROELICH & P ILDEFONSE (1998) Multicomponent analysis of FTIR spectra: Quantification of amorphous silica and crystallized mineral phases in synthetic and natural sediments. *Journal of Sedimentary Research* 68: 440-447.
- BLOESCH J & RD EVANS (1982) Lead-210 dating of sediments compared with accumulation rates estimated by natural markers and measured with sediment traps. *Hydrobiologia* 92: 579-586.
- BRANDES JA & AH DEVOL (1997) Isotopic fractionation of oxygen and nitrogen in coastal marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 1793-1801.
- BRASSELL SC, G EGLINTON, IT MARLOWE, U PFLAMANN & M SARNTHEIN (1986) Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment. *Nature* 320: 129-133.
- CLINE JD & IR KAPLAN (1975) Isotopic fractionation of dissolved nitrate during denitrification in the eastern tropical north pacific ocean. *Marine Chemistry* 3: 271-299.
- ECKARDT C, G PEARCE, B KEELY, G KOWALESKA, R JAFFE & JR MAXWELL (1992) A widespread and abundance chlorophyll transformation pathway in the aquatic environment. *Organic Geochemistry* 19: 217-277.
- ELLWOOD BB (1980) Induced and remanent magnetic properties of marine sediments as indicator of depositional processes. *Marine Geology* 38: 223-224.
- GUTIÉRREZ D, A SIFEDDINE, JL REYSS, G VARGAS, F VELAZO, R SALVATECCI, V FERREIRA, L ORTLIEB, D FIELD, T BAUMGARTNER, M BOUSSAFIR, H BOUCHER, J VALDÉS, L MARINOVIC, P SOLER & P TAPIA (2006) Anoxic sediments off central Peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries. *Advances in Geosciences* 6: 119-125.
- HARRIS P, M ZHOA, A ROSELL-MELÉ, R TIEDEMANN, M SARNTHEIN & JR MAXWELL (1999) Chlorins accumulation rate as a proxy for Quaternary marine primary productivity. *Nature* 383: 63-65.
- HEBBELN D, M MARCHANT & G WEFER (2002) Paleoproductivity in the southern Peru-Chile Current through the last 33,000 yr. *Marine Geology* 186: 487-504.
- JAHNCKE J, DM CHECKLEY & GL HUNT (2004) Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries Oceanography* 13: 208-223.
- KENNEDY JA & SC BRASSELL (1992) Molecular stratigraphy of the Santa Barbara basin: comparison with historical records of annual climate change. *Organic Geochemistry* 19: 235-244.
- KEMP AES (1996) Laminated sediments as palaeo-indicators. En: Kemp AES (ed) *Palaeoclimatology and palaeoceanography from laminated sediments: vii-xii*. Geological Society, Special Publication 116. The Geological Society London, London, United Kingdom.
- KEMP AES (2003) Evidence for abrupt climate changes in annually laminated marine sediments. *Philosophical Transactions the Royal Society* 361: 1851-1870.
- LISITZIN AP (1971) Distribution of siliceous microfossils in suspension and in bottom sediments. En: Funnell BM & WR Riedel (eds) *The micropaleontology of oceans: 173-195*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- MANTUA NJ, SR HARE, Y ZHANG, JM WALLACE & RC FRANCIS (1997) A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069-1079.
- MARÍN V, L RODRÍGUEZ, L VALLEJOS, J FUENTESECA & E OYARCE (1993) Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural* 66: 479-491.
- 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.
- MARÍN V, L DELGADO & R ESCRIBANO (2003) Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chile coast): a remote sensing in situ analysis. *Investigaciones Marinas (Chile)* 31: 47-55.
- MCCAFFREY MA, JW FARRINGTON & DJ REPETA (1990) The organic geochemistry of Peru margin surface sediments: I. A comparison of the C37 alkenone and historical El Niño records. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54: 1713-1724.
- MORALES CE, SE HORMAZÁBAL & JL BLANCO (1999) Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18-24°S): implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research* 57: 909-932.
- MORTLOCK R & P FROELICH (1989) A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Research Part A* 36: 1415-1426.
- MÜLLER PJ, G KIRST, G RUHLAND, I VON STORCH & A ROSELL-MELÉ (1998) Calibration of the alkenone paleotemperature index U^{K}_{37} based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N-60°S). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62: 1757-1772.
- NAVEA E & O MIRANDA (1980) Ciclo anual de las condiciones oceanográficas en Mejillones del Sur (Chile). *Revista de Biología Marina (Chile)* 17: 97-133.

- ORTLIEB L, O ZÚÑIGA, R FOLLEGATI, R ESCRIBANO, I KONG, L RODRÍGUEZ, PH MOURGUIART, J VALDÉS & P IRATCHET (1994) Paleoceanografía de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile): Resultados preliminares para el último milenio. *Estudios Oceanológicos (Chile)* 13: 39-49.
- ORTLIEB L, R ESCRIBANO, R FOLLEGATI, O ZÚÑIGA, I KONG, L RODRÍGUEZ, J VALDÉS, N GUZMÁN & P IRATCHET (2000) Recording of ocean-climate changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment off 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* 36: 129-139.
- PIZARRO O (2004) Observing the Peru-Chile Current System. *COPAS Newsletter* N° 6, 1-2. URL: <http://copas.udec.cl>
- PRAHL FG, LA MUEHLHAUSEN & DL ZAHNLE (1988) Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 2303-2310.
- PRAHL FG & SG WAKEHAM (1987) Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for paleotemperature assessment. *Nature* 330: 267-369.
- RAGUENEAU OP, A TRÉGUER, RF LEYNAERT, MA ANDERSON, DJ BRZEZINSKI, RC DEMASTER, J DUGDALE, G DYMOND, R FISCHER, C FRANÇOIS, E HEINZE, V MAIER-REIMER, D MARTIN-JÉZÉQUEL, M NELSON & B QUÉGUINER (2000) A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy. *Global and Planetary Change* 26: 317-365.
- RUTLLANT J, H FUENZALIDA & P ACEITUNO (2003) Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: the 1997-1998. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 108, 4538, doi: 10.1029/2002JD003357.
- RUTLLANT J, H FUENZALIDA, R TORRES & D FIGUEROA (1998) Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): experimento DICLIMA. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 405-427.
- STRUB PT, JM MESÍAS, V MONTECINO, J RUTLLANT & S SALINAS (1998) Coastal ocean circulation off western South America. En: Robinson AR & KH Brink (eds) *The sea: the global coastal ocean, regional studies and syntheses*: 273-313. Wiley, New York, USA.
- THAMDRUP B & DE CANFIELD (1996) Pathways of carbon oxidation in continental margin sediments off central Chile. *Limnology and Oceanography* 41: 1629-1650.
- TUREKIAN K, K COCHRAN, L BENNINGER & R ALLER (1980) The sources and sinks of nuclides in Long Island Sound. *Advances in Geophysics* 22: 129-163.
- VALDÉS J, L LÓPEZ, S LOMÓNACO & L ORTLIEB (2000) Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de la materia orgánica en bahía Mejillones del Sur (23°S), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 35: 169-180.
- VALDÉS J, A SIFEDDINE, E LALLIER-VERGES & L ORTLIEB (2004) Petrographic and geochemical study of organic matter in surficial laminated sediments from an upwelling system (Mejillones del Sur bay, northern Chile). *Organic Geochemistry* 35: 881-894.
- VAN GEEN A, Y ZHENG, JM BERNHARD, KG CANNARIATO, J CARRIQUIRY, WE DEAN, BW EAKINS, JD ORTIZ & J PIKE (2003) On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography* 18: 1029-2003.
- VARGAS G (2002) Interactions ocean-atmosphère au cours des derniers siècles sur la côte du Désert d'Atacama: analyse multi-proxies des sédiments lamiinés de la Baie de Mejillones (23° S). Tesis de Doctorado, Université Bordeaux I, France. 290 pp.
- VARGAS G, L ORTLIEB, J PICHON, J BERTAUX & M PUJOS (2004) Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23° S). *Marine Geology* 211: 79-99.
- VARGAS G, L ORTLIEB, E CHAPRON, J VALDÉS & C MARQUARDT (2005) Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23° S). *Tectonophysics* 399: 381-398.
- VARGAS G, S PANTOJA, J RUTLLANT, CB LANGE & L ORTLIEB (2007) Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters* 34, L13607, doi: 10.1029/2006GL028812.
- VILLANUEVA J & D HASTINGS (2000) A century-scale record of preservation of chlorophyll and its transformation products in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 2281-2294.
- ZHANG Y, JM WALLACE & DS BATTISTI (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate* 10: 1004-1020.

Editor Asociado: Claudio Latorre

Recibido el 24 de mayo de 2007; aceptado el 11 de noviembre de 2008