

Acumulación de C_{org} , N_{org} , P_{org} y BSi en la margen de Magdalena, BCS (México), durante los últimos 26 ka

Accumulation of C_{org} , N_{org} , P_{org} and BSi off the Magdalena margin, BCS (Mexico), during the past 26 kyr

A Sánchez^{1,2}, JD Carriquiry^{1*}

¹ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada, Baja California, México. * E-mail: jose_carriquiry@uabc.mx

² Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas - Instituto Politécnico Nacional, Apartado postal 592, La Paz, Baja California Sur, México.

Resumen

Las tasas de acumulación de carbono, nitrógeno y fósforo orgánico (C_{org} , N_{org} , P_{org}) y ópalo biogénico (BSi) fueron medidas en dos núcleos sedimentarios (GC31 y PC08) recolectados dentro de la zona de oxígeno mínimo en la margen de Magdalena, al occidente de Baja California Sur, México. Las tasas de acumulación de C_{org} , N_{org} y P_{org} fueron similares durante la etapa isotópica marina 2 (EIM-2), el último glaciario máximo (UGM) y el Holoceno tardío (3 ka-Reciente); sin embargo, la tasa de acumulación de BSi fue mayor en el UGM y la EIM-2 que en el Holoceno tardío. De manera general, la EIM-2 y el UGM estuvieron caracterizados por productividades primarias similares a la observada durante el Holoceno tardío. La razón N/P durante el EIM-2 y UGM fue equivalente a la observada durante el Holoceno tardío sugiriendo que N y P no fueron limitantes. De hecho, la razón BSi/C fue relativamente alta (surgencias intensas) cuando la razón N/P era relativamente baja, denotando niveles de productividad primaria semejantes entre la EIM-2, el UGM y el Holoceno tardío. Lo anterior indica que los niveles de productividad observados durante el Holoceno tardío son característicos, al menos, de los que existieron durante la EIM-2. Ello sugiere que desde entonces el sistema de vientos se ha mantenido, favoreciendo un transporte de Ekman a lo largo de la costa de California y Baja California, dando lugar a productividad primaria dominada por diatomeas.

Palabras clave: margen de Magdalena, zona de oxígeno mínimo, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, fósforo orgánico, sílice biogénico.

Abstract

The rates of accumulation of organic carbon, nitrogen and phosphorus (C_{org} , N_{org} , P_{org}), and of biogenic silica (BSi) were measured in sediment cores (GC31 and PC08) collected within the oxygen minimum zone of the Magdalena margin, off western Baja California Sur (Mexico). The rates of C_{org} , N_{org} and P_{org} accumulation were similar during marine isotopic stage 2 (MIS-2), the last glacial maximum (LGM) and the Late Holocene (LH, 3 kyr–Recent), whereas the rate of BSi accumulation was greater during LGM and MIS-2 than during LH. In general, primary productivity during the MIS-2 and the LGM was similar to that observed during LH. The N/P ratio during the MIS-2 and the LGM was equivalent to that found during LH, suggesting that N and P were not limiting factors. In fact, the BSi/C ratio was relatively high (intense upwelling) when the N/P ratio was relatively low, indicating similar levels of primary productivity during the MIS-2, the LGM and LH. The results show that the productivity levels during LH are characteristic, at least, of those that existed during the MIS-2. This indicates that the wind system has persisted since then, favouring an Ekman transport along the coast of California and Baja California, generating diatom-dominated primary productivity.

Key words: Magdalena margin, oxygen minimum zone, organic carbon, organic nitrogen, organic phosphorus, biogenic silica.

Introducción

Las márgenes oceánicas son sitios con una alta tasa de producción de carbono orgánico (C_{org}) y en estos lugares se tiene, al menos, la mitad de la productividad primaria oceánica (Walsh 1991, Lui *et al.* 2000). Hedges y Keil (1995) indican que más de 90% del C_{org} es sepultado en las márgenes continentales. Particularmente, Jahnke *et al.* (1990) sugieren que la mitad del flujo de C_{org} a lo largo del Pacífico nororiental ocurre dentro de la plataforma y en la pendiente continental. Walsh

Introduction

Oceanic margins tend to have high rates of organic carbon production, receiving at least half of the oceanic primary productivity (Walsh 1991, Lui *et al.* 2000). Hedges and Keil (1995) reported that at least 90% of the organic carbon is buried along continental margins. Jahnke *et al.* (1990) suggested that half of the organic carbon flow along the northeastern Pacific occurs over the continental shelf and slope. Walsh (1991) confirmed these calculations, estimating that the supply

(1991) ha confirmado estos cálculos al estimar que el suministro de nuevos nutrientes a la zona fótica a lo largo de las márgenes continentales es equivalente al flujo de C_{org} en las profundidades del océano abierto.

Las márgenes continentales de California y Baja California, situadas en el sistema de la Corriente de California, son sitios donde el reciclamiento de C_{org} es significativo (Hartnett *et al.* 1998, Ganeshram *et al.* 2002) debido a la remineralización de los productos exportados por la alta productividad primaria (Hartnett *et al.* 1998). El alto consumo de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica aportada por la gran productividad, que excede al abasto de oxígeno, genera una zona de oxígeno mínimo (ZMO) en el intervalo de profundidad de 200 a 800 m. Esta condición permite la preservación de los productos exportados (Hartnett *et al.* 1998), lo cual puede ser usado para inferir cambios en la productividad a partir de las tasas de acumulación del C_{org} , el nitrógeno y el fósforo orgánico (N_{org} y F_{org} , respectivamente), y el sílice u ópalo biogénico (BSi) (Muller-Karger 2005).

Varios estudios (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992, Ortiz *et al.* 1997, Dean *et al.* 1997, Gardner *et al.* 1997) han sugerido, a partir de la tasa de acumulación de C_{org} y la abundancia de diatomeas, que la margen norte de California experimentó una disminución en la productividad primaria durante el último glacial máximo (UGM), atribuyendo esto a un cambio en la dirección y la intensidad de los vientos que favorecen las condiciones de surgencias (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992). Sin embargo, estudios realizados en la margen central de California (Gardner *et al.* 1997, Mortyn y Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004) encontraron para el mismo periodo (UGM) una alta productividad primaria, proponiendo que la celda de alta presión del Pacífico Norte se movió hacia el sur durante el UGM generando vientos favorables de surgencias para esta región. De esta forma, la existencia de un gradiente latitudinal en el patrón de vientos favoreció el desarrollo de surgencias con una alta productividad primaria a lo largo de la parte central de California (Gardner *et al.* 1997, Mortyn y Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004), no así para la región al norte de California (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992, Ortiz *et al.* 1997, Dean *et al.* 1997).

El objetivo de este trabajo fue asociar los cambios en la acumulación de los sedimentos biogénicos en el margen Magdalena, Baja California Sur (Mexico), con los eventos climáticos de escala glacial-interglacial ocurridos en la zona. Asimismo, se analiza la respuesta del ecosistema marino a los cambios climáticos durante los últimos 26 ka.

Sistema de la Corriente de California

La intensidad de la Corriente de California y sus surgencias costeras asociadas, están controladas por el gradiente de presión atmosférico generado entre la celda de alta presión del Pacífico Norte y las celdas de baja presión de las Aleutianas y Norteamérica (fig. 1, Hickey 1979). La estacionalidad y la

of new nutrients to the photic zone along continental margins is equivalent to organic carbon flux in deep oceanic waters.

Significant organic carbon recycling occurs along the continental margins of California and Baja California, located in the California Current System (Hartnett *et al.* 1998, Ganeshram *et al.* 2002), owing to the export and remineralization of biomass from high primary productivity (Hartnett *et al.* 1998). High oxygen consumption for the oxidation of organic matter generated by productivity, exceeding the oxygen supply, creates an oxygen minimum zone (OMZ) in the 200–800 m depth range. This condition helps to conserve the biomass exported (Hartnett *et al.* 1998), which can be used to infer changes in productivity based on the rate of accumulation of organic carbon (C_{org}), nitrogen (N_{org}) and phosphorus (P_{org}), and of biogenic silica or opal (BSi) (Muller-Karger 2005).

Several studies (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992, Ortiz *et al.* 1997, Dean *et al.* 1997, Gardner *et al.* 1997) have suggested, based on the rate of C_{org} accumulation and on the abundance of diatoms, that the northern California margin experienced a decrease in primary production during the last glacial maximum (LGM), attributing this to a change in the direction and intensity of winds that favour upwelling (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992). Studies conducted on the central California margin (Gardner *et al.* 1997, Mortyn and Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004), however, found high primary productivity for the same period (LGM), suggesting that the high-pressure cell in the North Pacific moved southwards during LGM and generated winds favourable for upwelling in this region. Hence, the existence of a latitudinal gradient in the wind pattern favoured the development of upwelling with high primary productivity along the central part of California (Gardner *et al.* 1997, Mortyn and Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004), but not along the northern part (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992, Ortiz *et al.* 1997, Dean *et al.* 1997).

This study aims to associate the changes in the accumulation of biogenic sediments off the Magdalena margin, Baja California Sur (Mexico), with the glacial-interglacial climatic cycles that occurred in the area. We also analyze the marine ecosystem's response to climatic changes during the last 26 kyr.

California Current System

The intensity of the California Current and of its associated coastal upwelling is controlled by the atmospheric pressure gradient generated between the North Pacific high-pressure cell and the Aleutian and North American low-pressure cells (fig. 1, Hickey 1979). The seasonality and position of these pressure systems not only modulate the North American climate, but are also part of the atmospheric teleconnections that extend throughout the Northern Hemisphere (Gardner *et al.* 1997). At present, the seasonal shift in the position of the North Pacific high-pressure cell causes a marked difference in the direction and intensity of the winds along the west coast of North America and of the California Current. In particular, just

posición de estos sistemas de presión no sólo modulan el clima de Norteamérica sino son parte de las teleconexiones atmosféricas que se extienden a través del hemisferio norte (Gardner *et al.* 1997). En la actualidad, el cambio estacional en la posición de la celda de alta presión del Pacífico Norte ocasiona una marcada diferencia en la dirección y la intensidad de los vientos a lo largo de la costa oeste de Norteamérica y de la Corriente de California. Particularmente, justo al norte de los 40°N (Huyer 1983), las surgencias sólo ocurren durante la primavera y el verano. En contraste, a lo largo de la costa de California y Baja California los vientos soplan consistentemente del norte resultando en un transporte de Ekman positivo a lo largo del año (fig. 1). La interacción entre los persistentes vientos del norte y la topografía costera genera intensas celdas de surgencias que promueven alta productividad primaria (Hendy *et al.* 2004).

En escala de tiempo geológico de los grandes ciclos climáticos se han presentado cambios en la posición de los centros de presión atmosférica, produciendo alteraciones en la intensidad de la Corriente de California (Herbert *et al.* 2001). El cambio en el sistema de vientos, particularmente en la posición de la celda de alta presión del Pacífico Norte durante la UGM (Kutzbach 1987), posiblemente afectó fuertemente la estructura del flujo de la Corriente de California (Herbert *et al.* 2001), así como también la ubicación de los sitios de surgencias costeras (Hendy *et al.* 2004).

north of 40°N (Huyer 1983), upwelling only occurs during spring and summer. In contrast, from the central coast of California to Baja California, the winds are consistently from the north, generating a positive Ekman transport throughout the year (fig. 1). The interaction between the persistent northerly winds and the coastal topography generates intense upwelling cells that favour high primary productivity (Hendy *et al.* 2004).

Over the geological time scale of the large climate cycles, changes have occurred in the position of atmospheric pressure centres, producing alterations in the intensity of the California Current (Herbert *et al.* 2001). The change in the wind system, especially in the high-pressure cell of the North Pacific during LGM (Kutzbach 1987), probably strongly affected the flow structure of the California Current (Herbert *et al.* 2001), as well as the location of coastal upwelling sites (Hendy *et al.* 2004).

Methods

Collection and dating of sediment cores

A gravity core (GC31, 387 cm long) and piston core (PC08, 1450 cm long) were collected at 700 m depth off the Magdalena margin, Baja California Sur (Mexico), during the OXMZ-01 campaign aboard the R/V *Melville* (fig. 1). The

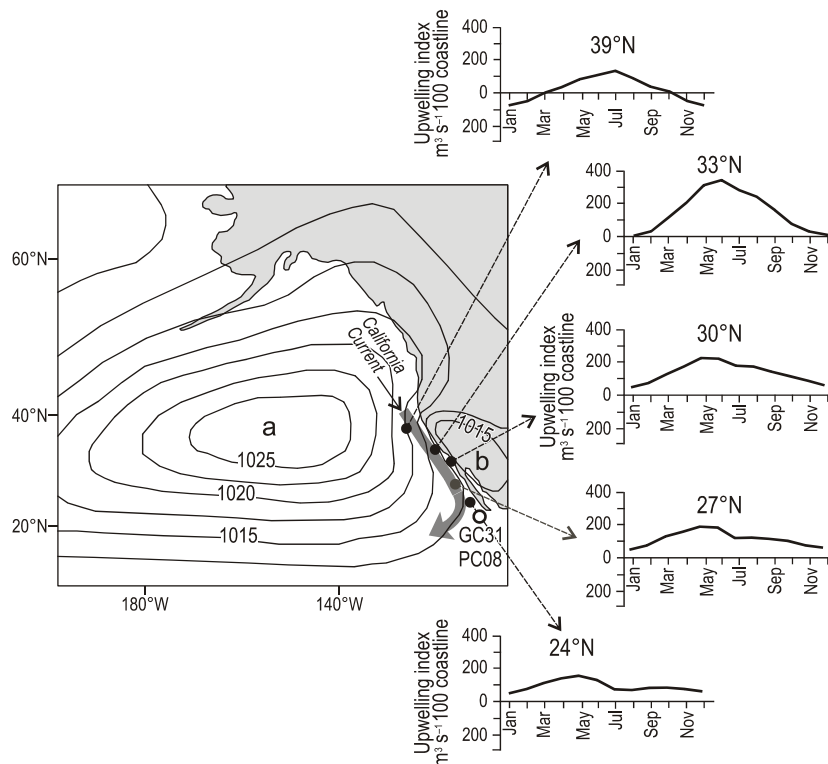


Figura 1. Localización del sitio de recolección de los núcleos GC31 y PC08 (círculo vacío) en la margen de Magdalena, Baja California Sur (México). Patrón de circulación atmosférico moderno y la Corriente de California (línea gris gruesa) durante el verano en el Pacífico nororiental (Hickey 1979). Variabilidad temporal y espacial de los índices mensuales de surgencia de Bakun (1973) para el periodo de 1967–1991. Los índices positivos indican surgencias.

Figure 1. Location of the collection sites of cores GC31 and PC08 (empty circle) on the Magdalena margin, Baja California Sur (Mexico). Modern atmospheric circulation pattern and California Current (narrow gray line) during summer in the northeastern Pacific (Hickey 1979). Temporal and spatial variability of the monthly upwelling indices proposed by Bakun (1973) for the 1967–1991 period. Positive indices indicate upwelling.

Métodos

Recolección y fechado de los núcleos sedimentarios

Los núcleos de gravedad (GC31, 387 cm de longitud) y de pistón (PC08, 1450 cm de longitud) fueron recolectados a 700 m de profundidad en la margen de Magdalena, Baja California Sur, México, durante la expedición OXMZ-01 a bordo del B/O *Melville* (fig. 1). El sitio de recolección se ubica en la parte central de la ZMO. Se utilizaron fechados de ^{14}C a partir de foraminíferos bentónicos y planctónicos para establecer la cronología de cada núcleo, lo que permitió estimar una tasa de sedimentación de $\sim 30 \text{ cm ka}^{-1}$ (van Geen *et al.* 2003). Los núcleos fueron muestreados cada 5 cm (resolución ~ 170 años) y cada muestra tuvo un espesor de 1 cm, integrando ~ 30 años. Las muestras fueron liofilizadas antes de las determinaciones de C_{org} , N_{org} , P_{org} y BSi.

Componentes biogénicos

El contenido de C_{org} y N_{org} se determinó mediante un analizador elemental LECO, previa remoción de carbonatos con HCl y sus valores se reportan con una precisión de $<0.5\%$. El P_{org} se determinó de acuerdo con Aspila *et al.* (1976) y el BSi según Mortlock y Froelich (1989), este último con una precisión de $<2\%$. Los resultados se expresan como %P/P.

Tasa de acumulación

Las tasas de acumulación (TA, $\text{mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$) de los componentes biogénicos fueron calculadas a partir de la densidad del sedimento seco (proporcionadas generosamente por Walter Dean USGS 2006), la tasa de sedimentación y el contenido de de cada componente biogénico.

Resultados

Contenido de C_{org} , N_{org} , P_{org} y BSi

En la figura 2 se presentan los valores porcentuales del C_{org} , N_{org} , P_{org} y BSi de los núcleos GC31 y PC08. Los valores porcentuales de C_{org} , N_{org} y P_{org} denotan la poca variabilidad existente durante la Etapa Isotópica Marina 2 (EIM-2), excepto en los intervalos de 19 y 14 ka en que se registraron pequeños incrementos en el C_{org} y N_{org} (fig. 2a, b). En contraste, el BSi a lo largo de la EIM-2 mostró una variabilidad más marcada en su contenido, alcanzando valores de hasta 10% (fig. 2d). El promedio de BSi para el UGM fue de $\sim 12\%$.

Los contenidos de C_{org} y N_{org} incrementaron sistemáticamente desde 4% y 0.4% hasta un máximo de $\sim 13\%$ y $\sim 1.5\%$, respectivamente, en el Holoceno medio (fig. 2a, b). A finales del Holoceno medio, los porcentajes de C_{org} y N_{org} decrecieron hasta 8% y 0.75%, respectivamente (fig. 2a, b). Para los últimos 2000 años, el contenido de C_{org} y N_{org} aumentó desde 7% y

collection site is located in the central part of the OMZ. The ^{14}C datings, based on benthic and planktonic foraminifera, were used to establish each core's chronology, and a sedimentation rate of $\sim 30 \text{ cm kyr}^{-1}$ was estimated (van Geen *et al.* 2003). The cores were sampled every 5 cm (resolution $\sim 170 \text{ yr}$) and each sample was 1 cm wide, integrating $\sim 30 \text{ yr}$. The samples were freeze-dried prior to determination of C_{org} , N_{org} , P_{org} and BSi.

Biogenic components

The content of C_{org} and N_{org} was determined using a LECO elemental analyzer, after previous removal of carbonates with HCl, and the values are reported with an accuracy of $<0.5\%$. The P_{org} content was determined according to Aspila *et al.* (1976) and BSi according to Mortlock and Froelich (1989), the latter with an accuracy of $<2\%$. The results are expressed as %P/P.

Accumulation rates

The accumulation rates ($\text{mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$) of the biogenic components were calculated based on the dry sediment density (kindly provided by Walter Dean, USGS, 2006), on the rate of sedimentation and on the content of each biogenic component.

Results

Content of C_{org} , N_{org} , P_{org} and BSi

The percentage values of C_{org} , N_{org} , P_{org} and BSi for cores GC31 and PC08 are shown in figure 2. The percent values of C_{org} , N_{org} and P_{org} indicate little variability during the Marine Isotopic Stage 2 (MIS-2), except between 19 and 14 kyr when small increases in C_{org} and N_{org} were recorded (fig. 2a, b). In contrast, BSi showed a greater variability throughout the MIS-2, reaching values of up to 10% (fig. 2d). The mean BSi content for the LGM was $\sim 12\%$.

The C_{org} and N_{org} contents increased systematically from 4% and 0.4% to a maximum of $\sim 13\%$ and $\sim 1.5\%$, respectively, in the Middle Holocene, but decreasing to 8% and 0.75%, respectively, at the end of this period (fig. 2a, b). During the last 2000 years, the C_{org} and N_{org} contents increased from 7% and 0.8% to a maximum of $\sim 11\%$ and $\sim 1.5\%$, respectively; these values are very similar to those attained at the end of the Middle Holocene (fig. 2a, b). The P_{org} content showed little variability during the Early Holocene, but increased from 6 kyr to the present accompanied by greater variability (fig. 2c).

The BSi content showed four percentage maxima during the Holocene (fig. 2d), corresponding to the following periods: $\sim 22\%$ at the beginning of the Early Holocene (11–10 kyr), $\sim 24\%$ during the Middle Holocene (7–5 kyr), $\sim 24\%$ at the end of the Middle and beginning of the Late Holocene (4–3 kyr), and similar values to these in the Recent Holocene (last 1000 years). The minimum value ($\sim 7\%$) was recorded at 7 kyr (fig. 2d).

0.8% hasta un máximo de ~11% y ~1.5%, respectivamente, siendo estos valores muy similares a los alcanzados a finales del Holoceno medio (fig. 2a, b). En el caso del P_{org} , el Holoceno temprano denotó muy poca variabilidad, pero a partir de los 6 ka al presente el contenido de P_{org} aumentó acompañado de una mayor variabilidad (fig. 2c).

El sílice biogénico (BSi) presenta cuatro máximos porcentuales durante el periodo del Holoceno (fig. 2d), los cuales corresponden con los siguientes periodos: principios del Holoceno temprano (11–10 ka), con un máximo de ~22%; Holoceno medio (7–5 ka), con un valor de ~24%; finales del Holoceno medio y principios del Holoceno tardío (4–3 ka), con ~24%; y finalmente en el Reciente (últimos 1000 años) con valores muy similares a los periodos previos (11–10, 7–5 y 4–3 ka). El valor mínimo, de ~7%, fue registrado en los 7 ka (fig. 2d).

Tasa de acumulación de C_{org} , N_{org} , P_{org} y BSi

Las tasas de acumulación (TAs) de los componentes biogénicos durante el último ciclo glaciario-interglaciario son mostradas en la figura 3. Durante la EIM-2, las TAs medias de C_{org} y N_{org} fueron de 807 ± 144 y 74 ± 11 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$, respectivamente. El UGM tuvo tasas medias de sepultamiento de 741 ± 96 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ de C_{org} y 74 ± 9 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ de N_{org} (fig. 3a, b). Las TA del P_{org} fueron de 58 ± 8 y 65 ± 4 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ para la EIM-2 y el UGM, respectivamente (fig. 3c). El contenido de BSi fue ligeramente mayor en el UGM (2079 ± 348 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) que en la EIM-2 (1854 ± 404 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) (fig. 3d).

Los componentes biogénicos presentaron mayor variabilidad en sus TAs durante el Holoceno que en la EIM-2 (fig. 3). Específicamente, las TAs de C_{org} , N_{org} y P_{org} incrementaron del Holoceno temprano hasta un máximo en el Holoceno medio, para posteriormente disminuir en el Holoceno tardío a valores similares que en el UGM. Las TAs de los componentes biogénicos para el Holoceno tardío fueron 637 ± 76 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ para el C_{org} , 77 ± 7 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ para el N_{org} , 64 ± 5 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ para el P_{org} y 1611 ± 220 $\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$ para el BSi.

Razones elementales C/N, C/P, N/P y C/BSi

Las razones elementales C/N, C/P y N/P mantuvieron muy poca variabilidad durante la EIM-2 con respecto a la observada durante el Holoceno, mientras que la razón elemental BSi/C mostró gran variabilidad a lo largo de los últimos 26 ka (fig. 4). La razón elemental C/N durante la EIM-2 y el UGM mostró muy poca variabilidad, excepto por dos valores de ~9 después de los 15 ka y al final de la EIM-2 (fig. 4a). A lo largo del Holoceno, la razón elemental C/N decrece de ~11 en el Holoceno temprano hasta un mínimo de ~8 a inicios en el tardío (fig. 4a). Durante el Holoceno medio y parte del Holoceno temprano, la razón elemental de C/N denotó un cambio de ~5 unidades (fig. 4a).

Las razones elementales C/P y N/P mostraron la misma variabilidad a lo largo del registro sedimentario (fig. 4b, c). En

Accumulation rates of C_{org} , N_{org} , P_{org} and BSi

The accumulation rates (ARs) of the biogenic components for the last glacial-interglacial cycle are shown in figure 3. During the MIS-2, the mean ARs of C_{org} and N_{org} were 807 ± 144 and 74 ± 11 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$, respectively. The LGM had mean burial rates of 741 ± 96 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$ of C_{org} and 74 ± 9 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$ of N_{org} (fig. 3a, b). The ARs of P_{org} were 58 ± 8 and 65 ± 4 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$ for the MIS-2 and the LGM, respectively (fig. 3c). The BSi content was slightly higher during the LGM (2079 ± 348 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$) than during the MIS-2 (1854 ± 404 $\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$) (fig. 3d).

The ARs of the biogenic components showed greater variability during the Holocene than during MIS-2 (fig. 3). Specifically, the ARs of C_{org} , N_{org} and P_{org} increased from the

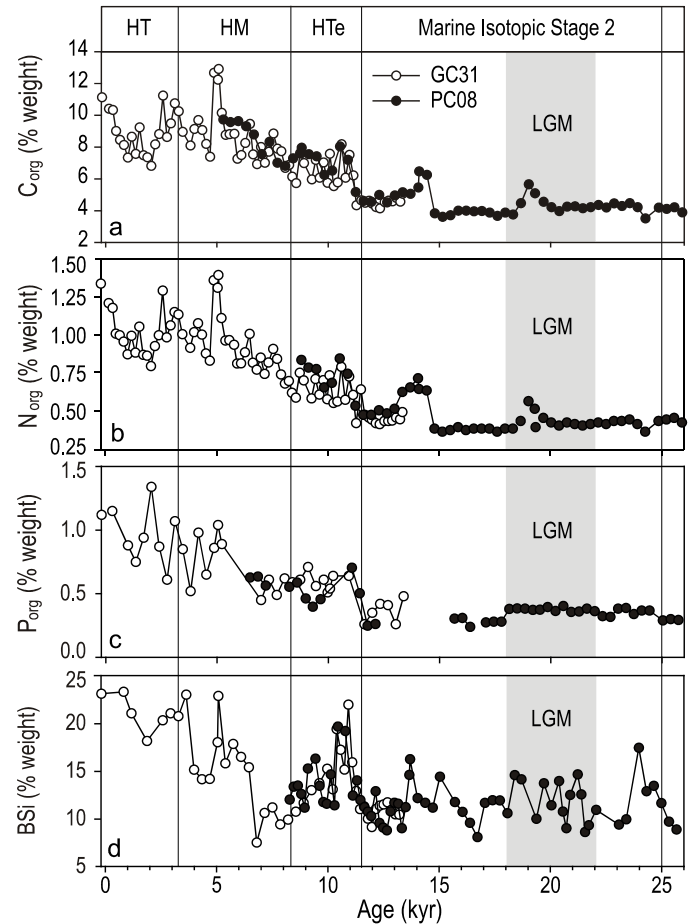


Figura 2. Valores porcentuales de los componentes biogénicos para los núcleos GC31 y PC08 durante los últimos 26 ka. (a) Carbono orgánico (C_{org}). (b) Nitrógeno orgánico (N_{org}). (c) Fósforo orgánico (P_{org}). (d) Sílice biogénico (BSi). LGM: último glacial máximo. HT: Holoceno tardío. HM: Holoceno medio. HTe: Holoceno temprano.

Figure 2. Percentage values of the biogenic components for cores GC31 and PC08 during the last 26 kyr. (a) Organic carbon (C_{org}). (b) Organic nitrogen (N_{org}). (c) Organic phosphorus (P_{org}). (d) Biogenic silica (BSi). LGM: last glacial maximum. HT: Late Holocene. HM: Middle Holocene. HTe: Early Holocene.

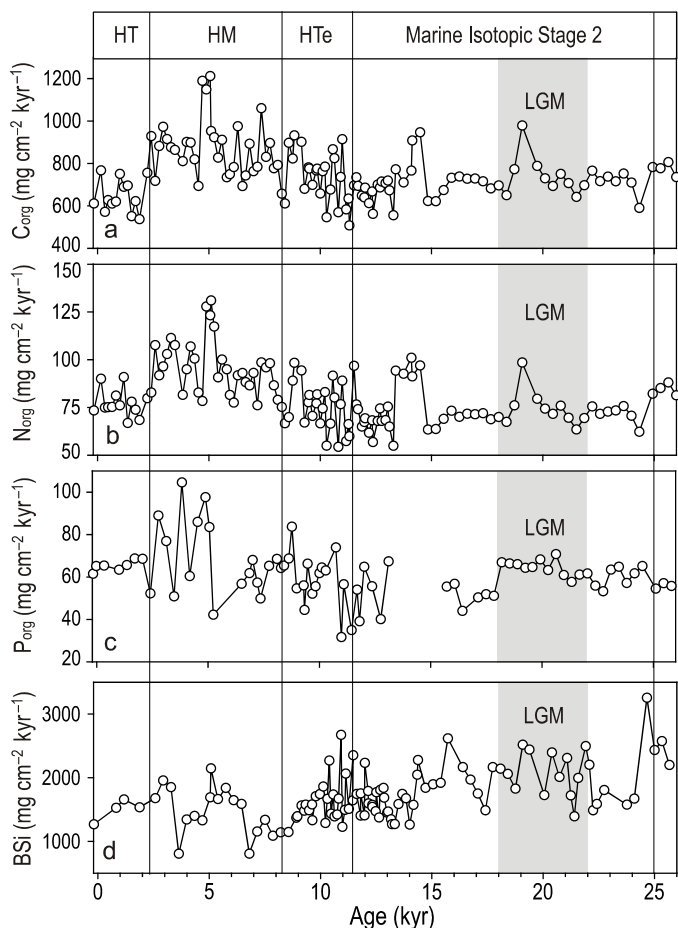


Figura 3. Tasas de acumulación ($\text{mg cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) de los componentes biogénicos para los núcleos GC31 y PC08 durante los últimos 26 ka. (a) Carbono orgánico (C_{org}). (b) Nitrógeno orgánico (N_{org}). (c) Fósforo orgánico (P_{org}). (d) Sílice biogénico (BSi). LGM: último glacial máximo. HT: Holoceno tardío. HM: Holoceno medio. HTe: Holoceno temprano.

Figure 3. Accumulation rates ($\text{mg cm}^{-2} \text{kyr}^{-1}$) of the biogenic components for cores GC31 and PC08 during the last 26 kyr. (a) Organic carbon (C_{org}). (b) Organic nitrogen (N_{org}). (c) Organic phosphorus (P_{org}). (d) Biogenic silica (BSi). LGM: last glacial maximum. HT: Late Holocene. HM: Middle Holocene. HTe: Early Holocene.

la EIM-2 y el UGM, las razones elementales de C/P y N/P se mantuvieron con muy poca variabilidad. En el Holoceno, los valores de C/P y N/P oscilaron entre 60–20 y 5–1, respectivamente (fig. 4b, c). Las razones elementales C/P y N/P para el UGM fueron muy similares a las de los últimos 2 ka (fig. 4b, c).

La razón BSi/C a largo del registro denotó gran variabilidad (fig. 4d). En la EIM-2, la razón BSi/C promedió ~ 1.25 , con máximos de 1.5 y mínimos de 0.75. El UGM presentó un promedio de ~ 1.25 . A principios del Holoceno, la razón BSi/C alcanzó un máximo de ~ 1.5 , para luego disminuir gradualmente a un mínimo de ~ 0.25 hacia el Holoceno medio. En el Holoceno medio y tardío, la razón BSi/C tuvo un promedio de ~ 0.75 , con un mínimo de ~ 0.40 a inicios del Holoceno tardío (fig. 4d).

Early Holocene to a maximum in the Middle Holocene, and then decreased in the Late Holocene to values similar to those for the LGM. The ARs recorded for the Late Holocene were $637 \pm 76 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ of C_{org} , $77 \pm 7 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ of N_{org} , $64 \pm 5 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ of P_{org} and $1611 \pm 220 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ of BSi.

Elemental ratios (C/N, C/P, N/P and C/BSi)

The C/N, C/P and N/P ratios showed little variability during the MIS-2 relative to that observed during the Holocene, whereas the BSi/C ratio showed great variability throughout the last 26 kyr (fig. 4).

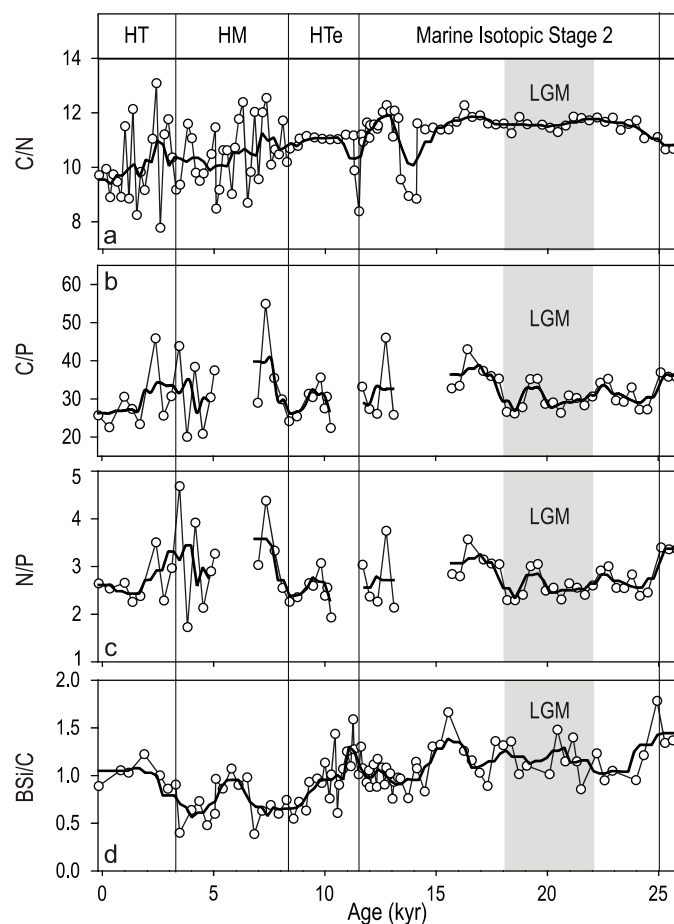


Figura 4. Razones elementales (línea gris con círculos) para los núcleos GC31 y PC08 durante los últimos 26 ka. (a) Carbono orgánico/nitrógeno orgánico (C/N). (b) Carbono orgánico/fósforo orgánico (C/P). (c) Nitrógeno orgánico/fósforo orgánico (N/P). (d) Sílice biogénico/carbono orgánico (BSi/C). LGM: último glacial máximo. HT: Holoceno tardío. HM: Holoceno medio. HTe: Holoceno temprano. La línea negra representa una media móvil de 300 años.

Figure 4. Elemental ratios (grey line with circles) for cores GC31 and PC08 during the last 26 kyr. (a) Organic carbon/organic nitrogen (C/N). (b) Organic carbon/organic phosphorus (C/P). (c) Organic nitrogen/organic phosphorus (N/P). (d) Biogenic silica/organic carbon (BSi/C). LGM: last glacial maximum. HT: Late Holocene. HM: Middle Holocene. HTe: Early Holocene. The black line represents a mobile mean of 300 years.

Discusión

Paleoproductividad primaria

La EIM-2 se caracterizó por una TA en sus componentes biogénicos con un valor muy cercano al registrado durante el Holoceno tardío (3 ka-Reciente). La distribución y el sepultamiento del BSi y el C_{org} están cercanamente relacionados con la productividad primaria superficial (Leinen *et al.* 1986). La TA media del BSi fue mayor durante la EIM-2 ($\sim 1800 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$) y el UGM ($\sim 2000 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$) que durante el Holoceno tardío ($\sim 1600 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$), indicando que la productividad primaria fue dominada en ambos periodos por flujos de diatomeas (fig. 3). Es también relevante mencionar que la TA del BSi incrementó hasta $\sim 2500 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ durante el UGM. Igualmente, la TA media del C_{org} durante la UGM fue de $741 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$, mientras que en el Holoceno tardío tuvo un promedio de $647 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$, lo que permite inferir que la EIM-2 y el UGM pueden haber sido igualmente de productivos que el Holoceno tardío (fig. 3). Estos resultados son consistentes con estudios previos que han reportado TAs de C_{org} y BSi para latitudes medias y bajas durante la EIM-2 y el UGM (Pedersen 1983, Lyle *et al.* 1988, Gardner *et al.* 1997, Mortyn y Thunell 1997, Kienast *et al.* 2004, Hendy *et al.* 2004). Una pregunta relevante respecto a los niveles similares de acumulación de C_{org} durante la EIM-2 y el UGM *versus* el Holoceno tardío es si esto indica niveles de productividad primaria o simplemente es el resultado de una mejor preservación de los productos exportados al fondo marino.

Las masas de agua que actualmente bañan la margen continental de Baja California y California corresponden al Agua Intermedia del Pacífico Norte (AIPN) y el Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE). Estas dos masas de agua se caracterizan por su alto contenido de oxígeno en sus lugares de formación, el cual es consumido casi totalmente hasta niveles subóxicos debido a la oxidación de los productos exportados de la productividad primaria en la margen oriental del Pacífico Ecuatorial y Subtropical (Thunell y Kepple 2004). Esto ha permitido el desarrollo de una ZMO que mantiene una alta preservación de materia orgánica en los sedimentos (Hartnett *et al.* 1998). Varios estudios paleoceanográficos (e.g., Keigwin y Jones 1990, Behl y Kennett 1996, Stott *et al.* 1999) han sugerido que la ZMO del Pacífico nororiental ha sido altamente sensible a cambios climáticos y oceanográficos que han afectado la ventilación de esta región.

La reconstrucción de los perfiles batimétricos del $\delta^{13}\text{C}$ del ΣCO_2 , a partir del $\delta^{13}\text{C}$ de foraminíferos bentónicos en el Océano Pacífico occidental (Herguera *et al.* 1992, Keigwin 1998, Matsumoto *et al.* 2002) y oriental (Stott *et al.* 1999), sugiere que el Océano Pacífico tuvo una mayor ventilación durante el UGM que en el presente. De hecho, Keigwin y Jones (1990), y Behl y Kennett (1996) encontraron que mientras los sedimentos laminados en el Golfo de California y la Cuenca de Santa Bárbara se formaron durante el periodo interglaciar, los sedimentos bioturbados de estos sitios se formaron durante la

The C/N ratio for the MIS-2 and the LGM showed very little variability, except for two values of ~ 9 after 15 kyr and at the end of the MIS-2 (fig. 4a). Throughout the Holocene, the C/N ratio decreased from ~ 11 in the Early Holocene to a minimum of ~ 8 at the beginning of the Late Holocene, showing a change of ~ 5 units during the Middle and part of the Early Holocene (fig. 4a).

The C/P and N/P ratios showed the same variability throughout the sedimentary record (fig. 4b, c). During the MIS-2 and the LGM they presented little variability. During the Holocene, the C/P and N/P values ranged from 60 to 20 and from 5 to 1, respectively, and during the LGM they were similar to those of the last 2 kyr (fig. 4b, c). The C/P and N/P elemental ratios for LGM were very similar to those of the last 2 kyrs.

The BSi/C ratio showed great variability throughout the register (fig. 4d). The mean BSi/C value for the MIS-2 was ~ 1.25 , with a maximum of 1.5 and minimum of 0.75, while for the LGM it was ~ 1.25 (fig. 4d). The BSi/C ratio reached a maximum of ~ 1.5 at the beginning of the Holocene, and then decreased gradually to a minimum of ~ 0.25 at the beginning of the Middle Holocene. During the Middle and Late Holocene, the BSi/C ratio had a mean value of ~ 0.75 , with a minimum of ~ 0.40 at the beginning of the Late Holocene (fig. 4d).

Discussion

Primary paleoproductivity

The ARs of the biogenic components recorded for the MIS-2 were similar to those obtained for the Late Holocene (3 kyr-Recent). The distribution and burial of BSi and C_{org} are closely related to surficial primary productivity (Leinen *et al.* 1986). The mean AR of BSi was greater for the MIS-2 ($\sim 1800 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$) and the LGM ($\sim 2000 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$) than for the Late Holocene ($\sim 1600 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$), indicating that primary productivity was dominated in both periods by diatom fluxes (fig. 3). It is important to note that the AR of BSi increased to $\sim 2500 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ during the LGM (fig. 3). Likewise, the mean AR of C_{org} was $741 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ during the LGM and $647 \text{ mg cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$ during the Late Holocene, suggesting that the MIS-2 and the LGM were just as productive as the Late Holocene (fig. 3). These results coincide with previous studies that have reported ARs of C_{org} and BSi for middle and low latitudes during the MIS-2 and the LGM (Pedersen 1983, Lyle *et al.* 1988, Gardner *et al.* 1997, Mortyn and Thunell 1997, Kienast *et al.* 2004, Hendy *et al.* 2004). A relevant question regarding the similar levels of C_{org} accumulation during the MIS-2 and the LGM *versus* the Late Holocene is whether this indicates levels of primary productivity or is it simply the result of a better conservation of the organic matter exported to the sea floor.

The water masses that currently bathe the continental margin of Baja California and California are the North Pacific Intermediate Water (NPIW) and the Equatorial Subsurface

época glacial. Estos autores atribuyeron estas diferencias sedimentarias a un incremento en el contenido de oxígeno disuelto de las masas de agua que ventilaron a estas regiones, lo que permitió la presencia de organismos bioturbadores que a su vez inhibieron la formación de sedimentos laminados. Si el AIPN que ventiló el Pacífico nororiental durante la EIM-2 y el UGM hubiese estado más oxigenada habría de esperarse una mayor degradación de la materia orgánica (y por lo tanto un decremento en la TA) en estos periodos. Sin embargo, el hecho de que encontremos estas TAs de C_{org} y BSi en la margen de Magdalena sugiere que la productividad primaria y la lluvia de materia orgánica fueron los factores que controlaron la acumulación de carbono orgánico en esta región, y no el resultado de un artefacto preservacional.

Sobre la base de estas observaciones pudiera parecer que la margen de Magdalena experimentó un decremento en la productividad primaria superficial durante el Holoceno tardío. Lyle *et al.* (1988) han mostrado que ocurren cambios en la dominancia de plancton calcáreo u opalino a través del tiempo en el Pacífico Tropical oriental, donde el plancton opalino predomina en periodos de surgencias. De hecho, la dominancia de diatomeas incrementa considerablemente durante las surgencias mientras que la producción de carbonatos es baja (Thunell *et al.* 1995).

Nuestra idea de una similar productividad primaria durante la EIM-2 y el UGM *versus* el Holoceno tardío en la margen de Magdalena es consistente con los resultados de simulación obtenidos del modelo atmosférico del grupo COHMAP (1988). El escenario de las condiciones climáticas modeladas por COHMAP para la región del Pacífico Norte durante la EIM-2 y el UGM fueron comparadas con las condiciones de la circulación atmosférica moderna. Los resultados sugirieron que la celda de alta presión del Pacífico Norte pudo haberse desplazado hacia una posición más al sur durante la EIM-2 y el UGM. Este desplazamiento de la celda de alta presión del Pacífico Norte pudo haber resultado en la intensificación de los vientos a lo largo de California y Baja California ocasionando con ello que las surgencias fueran permanentes, y concomitantemente, la productividad primaria (Gardner *et al.* 1997, Mortyn y Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004).

Los resultados obtenidos de la productividad primaria tanto para la margen de Magdalena como para el margen central de California son opuestos a los reportados para la margen continental externa de Oregon a $\sim 42^\circ\text{N}$ (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992) y del norte de California (Gardner *et al.* 1997). Lyle *et al.* (1992) sugieren que el desplazamiento de la celda de alta presión del Pacífico Norte durante la EIM-2 y el UGM fue poco favorable para el desarrollo de surgencias debido a una disminución en el flujo de los vientos del norte sobre la superficie del océano a esta latitud, lo cual pudo haber ocasionado que la productividad primaria decayera durante este periodo.

Las diferencias en la productividad primaria registradas en las márgenes continentales de Oregon ($\sim 42^\circ\text{N}$) y norte de California (38°N) *versus* las márgenes central de California ($31\text{--}33^\circ\text{N}$) y de Magdalena ($\sim 22^\circ\text{N}$), pudo ser el resultado

Water (ESSW). These two water masses are characterized by a high oxygen content at their formation sites, which is almost completely consumed to suboxic levels owing to oxidation of the primary production exported along the eastern margin of the equatorial and subtropical Pacific (Thunell and Kepple 2004). This has allowed the development of an OMZ that maintains the preservation of organic matter in the sediments (Hartnett *et al.* 1998). Several paleoceanographic studies (e.g., Keigwin and Jones 1990, Behl and Kennett 1996, Stott *et al.* 1999) have suggested that the OMZ of the northeastern Pacific has been highly sensitive to the climatic and oceanographic changes that have affected ocean ventilation in this region.

The reconstruction of the bathymetric profiles of $\delta^{13}\text{C}$ of ΣCO_2 , based on $\delta^{13}\text{C}$ values of benthic foraminifera in the western (Herguera *et al.* 1992, Keigwin 1998, Matsumoto *et al.* 2002) and eastern Pacific Ocean (Stott *et al.* 1999), suggests that ventilation of the Pacific Ocean was greater during the LGM than at present. In fact, Keigwin and Jones (1990), and Behl and Kennett (1996) found that laminated sediments in the Gulf of California and Santa Barbara Basin formed during the interglacial period, but that bioturbated sediments at these sites formed during the glacial period. Those authors attributed these differences to an increase in the dissolved oxygen content of the water masses that ventilated these regions, allowing the presence of bioturbating organisms which, in turn, inhibited the formation of laminated sediments. If the NPIW that ventilated the northeastern Pacific during the MIS-2 and the LGM would have been more oxygenated, then greater degradation of organic matter would be expected (and therefore a decrease in the AR) during these periods. The fact that the ARs of C_{org} and BSi reported herein were found along the Magdalena margin indicates that primary production and the sinking of organic matter, rather than conservation, were the factors controlling the accumulation of C_{org} in this area.

Based on the above observations, it would seem that the Magdalena margin experienced a decrease in surficial primary productivity during the Late Holocene. Lyle *et al.* (1988) have shown that changes in the dominance of calcareous or iridescent plankton occur over time in the eastern tropical Pacific, the latter predominating during upwelling periods. In fact, the dominance of diatoms increases considerably during upwelling events when the production of carbonates is low (Thunell *et al.* 1995).

Our theory regarding a similar primary productivity during the MIS-2 and the LGM *versus* the Late Holocene along the Magdalena margin is consistent with the atmospheric model simulation results obtained by the COHMAP group (1988). The scenario of the climatic conditions modelled by COHMAP for the North Pacific during the MIS-2 and the LGM were compared to modern atmospheric circulation conditions. The results indicated that the high-pressure cell of the North Pacific could have shifted southwards during the MIS-2 and the LGM, resulting in an intensification of the winds along California and Baja California, and thus causing permanent upwelling and,

de las diferencias latitudinales en el patrón de vientos prevalentes durante la EIM-2 y el UGM. El patrón de vientos superficiales estimado durante el UGM mediante simulación por Kutzbach (1987) mostró una persistente celda de baja presión en Norteamérica que ocasionó un cambio latitudinal de la celda de alta presión del Pacífico Norte. Consecuentemente, se generó un gradiente mayor de presión entre el continente y el océano, lo cual según diversos autores puede explicar una productividad primaria similar en la margen central de California durante la EIM-2 y el UGM *versus* el Holoceno tardío (Anderson *et al.* 1989, Mortyn y Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004). Este estudio también nos permite apoyar ese mismo argumento para explicar la acumulación de componentes biogénicos para la margen de Magdalena durante el UGM y la EIM-2 *versus* el Holoceno tardío.

En el presente, el cambio estacional en la posición de la celda de alta presión del Pacífico Norte ocasiona una marcada diferencia en la dirección y la intensidad de los vientos a lo largo de la costa oeste de Norteamérica. En particular, justo al norte de los 40°N (Huyer 1983), las surgencias sólo ocurren durante la primavera y el verano. En contraste, a lo largo de la costa de California y Baja California los vientos son consistentemente del norte resultando en un transporte de Ekman positivo a lo largo del año (Huyer 1983). Estas diferencias regionales modernas pueden servir como un análogo para explicar las diferencias latitudinales observadas en la paleoproductividad durante la EIM-2 y el UGM.

Razones elementales C/N, C/P, N/P y BSi/C

Las razones elementales de C/N, C/P, N/P y BSi/C de la materia orgánica determinan la fuente y magnitud relativa de los flujos de carbono y nutrientes, por lo que estas razones pueden ser factores claves para estimar la capacidad del océano global como sumidero de CO₂ (Schneider *et al.* 2003). La razón elemental C/N ha sido ampliamente usada para conocer el origen de la materia orgánica que fue preservada en el registro sedimentario (Ruttenberg y Goñi 1997). La materia orgánica de origen marino depositada en el sedimento tiene una razón C/N media global de 8 con un máximo de ~12 y mínimo de ~6 (Schneider *et al.* 2003). La razón C/N a lo largo del registro sedimentario de GC31 y PC08 tuvo un promedio de ~10, con un máximo de ~13 y un mínimo de 8. De hecho, la razón C/N en la margen de Magdalena disminuyó sistemáticamente de la EIM-2 al Holoceno tardío hacia valores más cercanos al promedio global de 8. De tal forma, la fuente primaria de materia orgánica a la margen de Magdalena ha sido predominantemente de origen marino. Los flujos de BSi en la margen de Magdalena sugirieron que la fuente de materia orgánica estuvo principalmente compuesta de diatomeas.

La región del Pacífico nororiental mexicano se caracteriza por la presencia de una intensa ZMO que promueve la pérdida de N debido a la desnitrificación (Codispoti 1995), limitando con ello la productividad primaria (Ganeshram *et al.* 2000). Algunos estudios realizados a lo largo de la margen

concomitantemente, la productividad primaria (Gardner *et al.* 1997, Mortyn and Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004).

Los resultados de productividad primaria obtenidos para ambas la Magdalena y la margen central de California difieren de los reportados para la margen continental off Oregon (Lyle *et al.* 1992, Sancetta *et al.* 1992) y el norte de California (Gardner *et al.* 1997). Lyle *et al.* (1992) sugieren que el desplazamiento de la célula de alta presión del Pacífico Norte durante la MIS-2 y el LGM no fue favorable para el desarrollo de upwelling debido a una disminución en el flujo de viento del norte sobre la superficie del océano a esta latitud, lo cual podría haber causado una disminución en la productividad primaria durante este período.

Las diferencias en la productividad primaria registradas para la Oregon (~42°N) y el norte de California (38°N) *versus* la margen central de California (31–33°N) y la Magdalena (~22°N) podrían ser el resultado de diferencias latitudinales en los patrones de viento prevalentes durante la MIS-2 y el LGM. La simulación de vientos superficiales durante el LGM (Kutzbach 1987) reveló una persistente célula de baja presión sobre el norte de América que causó un cambio latitudinal de la célula de alta presión del Pacífico Norte. En consecuencia, un gradiente de presión más fuerte fue generado entre el continente y el océano, lo cual, según varios autores, puede explicar una productividad primaria similar a lo largo de la margen central de California durante la MIS-2 y el LGM *versus* el Holoceno Tardío (Anderson *et al.* 1989, Mortyn and Thunell 1997, Hendy *et al.* 2004). El presente estudio respalda este argumento para explicar la acumulación de componentes biogénicos a lo largo de la margen de Magdalena durante la MIS-2 y el LGM *versus* el Holoceno Tardío.

En el presente, el cambio estacional en la posición de la célula de alta presión del Pacífico Norte produce una marcada diferencia en la dirección e intensidad de los vientos a lo largo de la costa oeste de Norteamérica. En particular, justo al norte de 40°N (Huyer 1983), el upwelling sólo ocurre durante la primavera y el verano. En contraste, a lo largo de la costa de California y Baja California los vientos son consistentemente del norte, resultando en un transporte de Ekman positivo a lo largo del año (Huyer 1983). Estas diferencias modernas pueden servir como un análogo para explicar las diferencias latitudinales observadas en la paleoproductividad durante la MIS-2 y el LGM.

Elemental ratios (C/N, C/P, N/P and BSi/C)

Las razones elementales de C/N, C/P, N/P y BSi/C de la materia orgánica determinan la fuente y magnitud relativa de los flujos de carbono y nutrientes; por lo tanto, estas razones pueden ser factores clave para estimar la capacidad del océano como sumidero de CO₂ (Schneider *et al.* 2003). La razón elemental C/N ha sido ampliamente usada para conocer el origen de la materia orgánica preservada en el registro sedimentario (Ruttenberg and Goñi 1997). La materia orgánica de origen marino depositada en el sedimento tiene una razón C/N media global de 8, con un máximo de ~12 y un mínimo de ~6 (Schneider *et al.* 2003). La razón C/N a lo largo del registro sedimentario de GC31 y PC08 tuvo un promedio de ~10, con un máximo de ~13 y un mínimo de 8. De hecho, la razón C/N en la margen de Magdalena disminuyó sistemáticamente de la EIM-2 al Holoceno tardío hacia valores más cercanos al promedio global de 8. De tal forma, la fuente primaria de materia orgánica a la margen de Magdalena ha sido predominantemente de origen marino. Los flujos de BSi en la margen de Magdalena sugirieron que la fuente de materia orgánica estuvo principalmente compuesta de diatomeas.

oriental del Pacífico han demostrado que la desnitrificación disminuyó durante periodos glaciares (Ganeshram *et al.* 2000, Thunell y Kepple 2004) promoviendo un incremento en el reservorio de N (e.g., Ganeshram *et al.* 2000). Esta situación aparentemente propició un incremento de la productividad primaria, pues esta región ya no estaba limitada en N, aunque si probablemente constreñida por una deficiencia en micronutrientes como el Fe (Martin 1990). De hecho, el inventario de N y la razón N/P incrementaron debido a que el proceso de desnitrificación habría sido menor durante la EIM-2 y el UGM, suponiendo que el P se mantuvo constante debido a su largo tiempo de residencia (~20–30 ka; Delaney 1998). Las razones elementales de N/P fueron muy similares para los periodos de la EIM-2 y el UGM *versus* el Holoceno tardío (3 ka al Reciente) indicando que la proporción de N y P fue mantenida (fig. 4c), y sugiriendo que el nivel de desnitrificación fue relativamente constante en la margen occidental de México (Ganeshram *et al.* 2000, Thunell *et al.* 2004). En efecto, Deustch *et al.* (2004) determinaron la respuesta de la razón $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de los nitratos al cambio en el balance del N para el periodo glacial-interglacial. Los resultados del modelo de cajas fueron comparables con los datos paleoceanográficos disponibles, indicando que no hubo cambios significativos en la razón $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ entre el periodo glacial (EIM-2 y UGM) y el Holoceno tardío.

Tyrrell (1999) indicó que el fitoplancton requiere de proporciones constantes de N y P, y sugirió que una razón N/P mayor que la razón de Redfield puede suprimir la fijación de N. El decremento en la desnitrificación durante el glacial en la margen de Mazatlán llevó a un aumento en el inventario de N y de la razón N/P, debido a que el N incrementó más rápidamente que el P. Concomitantemente, la fijación de N fue reducida con un decremento en la productividad marina en periodos glaciares (Ganeshram *et al.* 2000). De hecho, la fijación de N y la productividad primaria son favorecidas cuando la razón N/P es baja, ya que esto tiende a balancear la pérdida de N a causa de la desnitrificación (Haug *et al.* 1998). En efecto, la razón N/P de la margen de Magdalena fue baja durante la EIM-2 y el UGM, con valores muy cercanos a los del Holoceno tardío (fig. 4c), lo cual concuerda con lo propuesto por Ganeshram *et al.* (2002) y Haug *et al.* (1998) sobre una mejor utilización del N a bajas razones del N/P. De esta forma, la fijación de N y el contenido de P no fueron limitantes durante la EIM-2 y el UGM, llevando a una productividad primaria similar en la margen de Magdalena.

Goñi *et al.* (2003) analizaron los flujos de componentes biogénicos en la Cuenca Cariaco, encontrando que la razón BSi/C varió entre 0.2 y 1.2. La razón BSi/C fue máxima y sincrónica con periodos de intensas surgencias y alta productividad primaria, dominada principalmente por diatomeas, mientras que la razón BSi/C decreció cuando la columna de agua estuvo bien estratificada y la productividad primaria fue muy baja. En el caso de la margen de Magdalena, la razón BSi/C fue muy similar para la EIM-2, el UGM y el Holoceno tardío (fig. 4d). Por lo anterior, nosotros sugerimos que las

Magdalena margin decreased systematically from the MIS-2 to the Late Holocene towards values closer to the global mean of 8. Thus, the main source of organic matter to the Magdalena margin has been predominantly of marine origin. The BSi fluxes along the Magdalena margin indicated that diatoms were the predominant source of organic matter.

The northwestern Pacific region of Mexico is characterized by an intense OMZ that promotes N loss due to denitrification (Codispoti 1995), thus limiting primary productivity (Ganeshram *et al.* 2000). Studies conducted along the eastern Pacific margin off Mexico have shown that denitrification decreased during the glacial period (Ganeshram *et al.* 2000, Thunell and Kepple 2004) which lead to an increase in the N reservoir (e.g., Ganeshram *et al.* 2000). This situation apparently lead to an increase in primary productivity, especially since this region was no longer N-limited, albeit probably constrained by a deficiency of micronutrients such as Fe (Martin 1990). In fact, the N inventory and N/P ratio increased as a result of lower denitrification activity during the MIS-2 and the LGM, assuming that P remained constant owing to its long residence time (~20–30 kyr; Delaney 1998). The N/P ratios were similar for the MIS-2 and the LGM *versus* the Late Holocene (3 kyr–Recent), indicating that the proportion of N and P was maintained (fig. 4c) and that the level of denitrification was relatively constant along Mexico's western margin (Ganeshram *et al.* 2000, Thunell *et al.* 2004). Deustch *et al.* (2004) determined the response of the $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ nitrate ratio to the change in N balance for the glacial-interglacial period. The box-model results were comparable to the paleoceanographic data available, indicating that the $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratio did not change significantly between the glacial period (MIS-2 and LGM) and the Late Holocene.

Tyrrell (1999) reported that phytoplankton requires constant proportions of N and P, and suggested that a N/P ratio greater than the Redfield ratio can suppress N fixation. The decrease in denitrification during the glacial period along the Mazatlán margin led to an increase in the N inventory and the N/P ratio, because N increased more rapidly than P. Concomitantly, N fixation was reduced by a decrease in marine

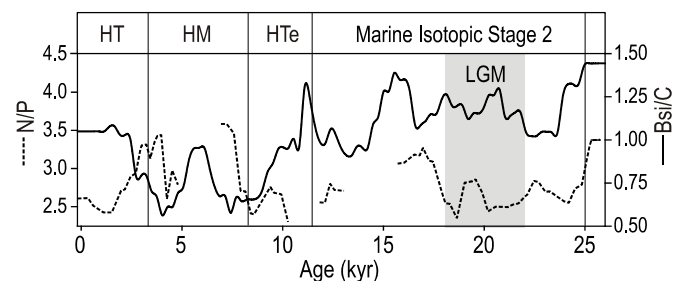


Figura 5. Razones elementales N/P (línea segmentada) y BSi/C (línea continua) para los núcleos GC31 y PC08 con una media móvil de 300 años. Los datos son mostrados en la figura 4c–d.

Figure 5. Elemental ratios of N/P (broken line) and BSi/C (continuous line) for cores GC31 and PC08, with a mobile mean of 300 years. The data are shown in figure 4c–d.

condiciones de surgencias fueron tan prevalecientes e intensas durante la EIM-2 y el UGM como lo fueron en el Holoceno tardío y la época Reciente. De esta forma, la comunidad planctónica primaria fue dominada por diatomeas y, posiblemente, en los periodos donde la razón del BSi/C fue baja prevalecieron otras comunidades planctónicas como por ejemplo los coccolitofóridos. De hecho, la excelente preservación de una capa de coccolitofóridos en la Cuenca Soledad entre 13 y 12 ka (van Geen *et al.* 2003), justo antes de un máximo en la razón BSi/C entre 12 y 11 ka (fig. 4d), confirma la alternancia en la comunidad planctónica, lo cual ha sido ampliamente observado a lo largo de la margen de California (Lyle *et al.* 1988, Thunell *et al.* 1995).

Al comparar las razones N/P y BSi/C (fig. 5) se puede observar que conforme disminuyó la razón N/P, la respuesta de la razón BSi/C fue un aumento, y viceversa, lo cual se observa entre la EIM-2 y el Holoceno medio y tardío. De manera general, la relación inversa entre las razones N/P y BSi/C concuerda con lo propuesto sobre una mejor utilización y asimilación de los nutrientes por parte las diatomeas en la margen de Magdalena durante la EIM-2 y el UGM.

Conclusiones

En conclusión, las TAs del BSi y el C_{org} que ocurrieron en la EIM-2, el UGM y el Holoceno tardío sugieren que la productividad primaria en el margen Magdalena, Baja California Sur, fueron similares. A pesar de que la EIM-2 y el UGM estuvieron mejor ventilados, la TA del C_{org} observada sugiere que el flujo de materia orgánica es el factor que controla la acumulación de carbono orgánico en la margen de Magdalena.

La razón C/N, con un promedio de 10, y la alta tasa de sepultamiento de BSi, sugieren que la fuente primaria de materia orgánica a la margen de Magdalena fue de origen marino. La razón BSi/C indicó que las condiciones de surgencia fueron prevalecientes e intensas durante el UGM y la EIM-2, como ocurrieron en el Holoceno tardío y sucede en la época reciente. Asimismo, la razón N/P sugiere que la proporción de N y P fue mantenida para los periodos EIM-2, UGM y Holoceno tardío. De esta forma, la fijación de N y el contenido de P no fueron limitantes, llevando a una similar productividad primaria. En la margen de Magdalena la productividad primaria registrada fue ocasionada por una mejor utilización y asimilación de los nutrientes por parte de las diatomeas durante la EIM-2 y UGM.

El desplazamiento hacia el sur de la celda de alta presión generó diferencias latitudinales en la circulación atmosférica y los vientos generadores de surgencias, lo cual causó un incremento en la productividad primaria al sur de la latitud 38°N y un consecuente decremento en la productividad primaria al norte de esta latitud.

La producción biológica del UGM es un mecanismo que puede explicar parte de la disminución de los niveles de CO_2 durante los periodos glaciares observados en los núcleos de hielo (Barnola *et al.* 1987, Petit *et al.* 1999). Así, un decremento en la concentración de CO_2 superficial del océano

productivity during glacial periods (Ganeshram *et al.* 2000). In fact, N fixation and primary productivity are favoured when the N/P ratio is low, since this tends to balance the loss of N due to denitrification (Haug *et al.* 1998). In effect, the N/P ratio for Magdalena margin was low during the MIS-2 and the LGM, with values very close to those of the Late Holocene (fig. 4c). This concurs with that proposed by Ganeshram *et al.* (2002) and Haug *et al.* (1998) regarding a better use of N at low N/P ratios. Hence, N fixation and P content were not limiting factors during the MIS-2 and the LGM, leading to a similar primary productivity along the Magdalena margin.

Goñi *et al.* (2003) analyzed biogenic fluxes in Cariaco Basin and found that the BSi/C ratio ranged from 0.2 to 1.2. The BSi/C ratio was maximum and synchronous with periods of intense upwelling and high primary productivity, dominated primarily by diatoms, whereas the BSi/C ratio decreased when the water column was well stratified and primary productivity was low. In the case of the Magdalena margin, the BSi/C ratio was very similar for the MIS-2, the LGM and the Late Holocene (fig. 4d). We therefore suggest that the upwelling conditions were as prevalent and intense during the MIS-2 and the LGM as during the Late Holocene and the Recent epoch. The planktonic community was dominated by diatoms, though other planktonic communities, such as coccolithophorids, may have prevailed during the periods when the BSi/C ratio was low. The excellent preservation of a layer of coccolithophorids at Soledad Basin between 13 and 12 kyr (van Geen *et al.* 2003), just before a maximum in the BSi/C ratio between 12 and 11 kyr (fig. 4d), confirms the alternation in the planktonic community, which has been widely observed along the California margin (Lyle *et al.* 1988, Thunell *et al.* 1995).

The comparison of the N/P and BSi/C ratios (fig. 5) shows that as the N/P ratio decreases, the response of the BSi/C ratio increases, and vice versa, which is observed between MIS-2 and the Middle and Late Holocene. In general, the inverse relationship between these two ratios concurs with that proposed regarding a better use and assimilation of nutrients by diatoms along the Magdalena margin during the MIS-2 and the LGM.

Concluding remarks

The ARs of C_{org} and BSi found for the MIS-2, the LGM and the Late Holocene suggest that primary productivity along the Magdalena margin (Baja California Sur, Mexico) were similar. Despite better ocean ventilation during the MIS-2 and the LGM, the AR of C_{org} indicates that organic matter flux is the factor controlling the accumulation of this biogenic component along the Magdalena margin.

The C/N ratio (mean of 10) and high burial rate of BSi suggest that the primary source of organic matter along the Magdalena margin was of marine origin. The BSi/C ratio indicated prevalent and intense upwelling conditions during the LGM and the MIS-2, as occurred during the Late Holocene and occurs in the Recent epoch. The N/P ratio shows that the

debido a la utilización por productores primarios (i.e., diatomeas) pudo resultar en un decremento en el CO₂ atmosférico (Falkowski 1997, Emmer y Thunell 2000, Thunell y Kepple 2004).

Agradecimientos

Al Capitán C Curl y su tripulación, a los miembros del personal técnico de Scripps Institution of Oceanography, Oregon State University y Lamont-Doherty Earth Observatory, por su apoyo en la expedición. A P Castro-Castro por su apoyo durante el análisis de las muestras. A W Dean por proporcionar amablemente los datos de densidad de sedimento seco de los núcleos estudiados. Este trabajo se realizó en parte por los proyectos de la NSF (OCE-9809026) y de CONACYT (3929T).

Referencias

- Anderson RY, Gardner JV, Hemphill-Haley E. 1989. Variability of the Late Pleistocene oxygen-minimum zone off northern California. In: Peterson DW (ed.), *Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas*. Geophysical Monograph 55, American Geophysical Union, Washington, pp. 75–92.
- Aspila KI, Agemian H, Chau ASY. 1976. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst* 101: 187–197.
- Bakun A. 1973. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–71. US Dept. Comm., NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-671, 103 pp.
- Barnola JM, Raynaud D, Korotkevich YS, Lorius C. 1987. Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature* 329: 408–414.
- Behl RJ, Kennett JP. 1996. Brief interstadial events in the Santa Barbara Basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature* 379: 243–246.
- Codispoti LA. 1995. Biogeochemical cycles—Is the ocean losing nitrate? *Nature* 376: 724.
- COHMAP Members. 1988. Climatic changes of the last 18,000 years: Observations and model simulations. *Science* 241: 1043–1052.
- Dean WE, Gardner JV, Piper DZ. 1997. Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61: 4507–4518.
- Delaney ML. 1998. Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle. *Global Biogeochem. Cycles* 12: 563–572.
- Deutsch C, Sigman DM, Thunell RC, Meckler AN, Haug GH. 2004. Isotopic constraints on glacial/interglacial changes in the oceanic nitrogen budget. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB4012, doi:10.1029/2003GB002189.
- Emmer E, Thunell R. 2000. Nitrogen isotope variations in Santa Barbara Basin sediments: Implications for denitrification in the eastern tropical North Pacific during the last 50,000 years. *Paleoceanography* 15: 377–387.
- Falkowski PG. 1997. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. *Nature* 327: 242–244.
- Ganeshram RS, Pedersen TF, Calvert SE, McNeill GW, Fontugne MR. 2000. Glacial-interglacial variability in denitrification in the world's oceans: Causes and consequences. *Paleoceanography* 15: 361–376.
- proportion of N and P was maintained during the MIS-2, the LGM and the Late Holocene; hence, N fixation and P content were not limiting factors, leading to a similar primary productivity. The primary productivity recorded along the Magdalena margin was the result of a better use and assimilation of nutrients by diatoms during the MIS-2 and the LGM.
- The southward shift of the high-pressure cell produced latitudinal differences in the atmospheric circulation and winds that generate upwelling, resulting in an increase in primary productivity to the south of 38°N and, consequently, a decrease in primary productivity to the north of this latitude.
- The biological production of LGM is a mechanism that can explain part of the decline in the levels of CO₂ during the glacial periods observed in ice cores (Barnola *et al.* 1987, Petit *et al.* 1999). Thus, a decrease in the concentration of CO₂ in surface waters due to utilization by primary producers (i.e., diatoms) could have resulted in a decrease of atmospheric CO₂ (Falkowski 1997, Emmer and Thunell 2000, Thunell and Kepple 2004).

Acknowledgements

The support provided during the campaign by Captain C Curl and his crew, and members of the technical staff of Scripps Institution of Oceanography, Oregon State University and Lamont-Doherty Earth Observatory is gratefully acknowledged. We thank P Castro-Castro for his help during the analysis of the samples. To W Dean for kindly providing bulk dry sediment density data of the cores studied. This work was partially supported by NSF project OCE-9809026 and CONACYT project 3929T.

English translation by Christine Harris.

- Ganeshram RS, Pedersen TF, Calvert SE, Francois R. 2002. Reduced nitrogen fixation in the glacial ocean inferred from changes in marine nitrogen and phosphorus inventories. *Nature* 415: 156–159.
- Gardner JV, Dean WE, Dartnell P. 1997. Biogenic sedimentation beneath the California Current System for the past 30 kyr and its paleoceanographic significance. *Paleoceanography* 12: 207–225.
- Goffi MA, Aceves HL, Thunell RC, Tappa E, Black D, Astor Y, Varela R, Muller-Karger F. 2003. Biogenic fluxes in the Cariaco Basin: A combined study of sinking particulates and underlying sediments. *Deep-Sea Res. I* 50: 781–807.
- Hartnett HE, Keil RG, Hedges JI, Devol AH. 1998. Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature* 391: 572–574.
- Haug GH, Pedersen TF, Sigman DM, Calvert SE, Nielsen B, Peterson LC. 1998. Glacial/interglacial variations in productivity and nitrogen fixation in the Cariaco Basin during the last 550 ka. *Paleoceanography* 13: 427–432.
- Hedges JI, Keil RG. 1995. Sedimentary organic matter preservation: An assessment and speculative synthesis. *Mar. Chem.* 49: 81–115.
- Hendy IL, Pedersen TF, Kennett JP, Tada R. 2004. Intermittent existence of a southern Californian upwelling cell during submillennial climate change of the last 60 kyr. *Paleoceanography* 19(3), doi: 10.1029/2003PA000965.

- Herbert TD, Schuffert JD, Andreasen D, Heusser L, Lyle M, Mix A, Ravelo AC, Stott LD, Herguera JC. 2001. Collapse of the California Current during glacial maxima linked to climate change on land. *Science* 293: 71–76.
- Herguera JC, Jansen E, Berger WH. 1992. Evidence for a bathyal front at 2000 m in the glacial Pacific, based on a depth transect on Ontong Java Plateau. *Paleoceanography* 7: 79–117.
- Hickey BM. 1979. The California Current System: Hypotheses and facts. *Prog. Oceanogr.* 8: 191–279.
- Huyer A. 1983. Coastal upwelling in the California Current System. *Prog. Oceanogr.* 12: 259–284.
- Jahnke RA, Reimers CE, Craven DB. 1990. Intensification of recycling of organic matter at the sea floor near ocean margins. *Nature* 348: 50–54.
- Keigwin LD. 1998. Glacial-age hydrography of the far northwest Pacific Ocean. *Paleoceanography* 13: 323–339.
- Keigwin LD, Jones GA. 1990. Deglacial climatic oscillations in the Gulf of California. *Paleoceanography* 5: 1009–1023.
- Kienast SS, Hendy IL, Crusius J, Pedersen TF, Calvert SE. 2004. Export production in the subarctic North Pacific over the last 800 kyrs: No evidence for iron fertilization? *J. Oceanogr.* 60: 189–203.
- Kutzbach JE. 1987. Model simulations of the climatic patterns during the deglaciation of North America. Chapter 19. In: Ruddiman WF, Wright HE Jr. (eds.), *North America and Adjacent Oceans during the Last Deglaciations. The Geology of North America Vol. K-3*, Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 425–446.
- Leinen M, Cwienk, Heath GR, Biscaye PE, Kolla V, Thiede J, Dauphin JP. 1986. Distribution of biogenic silica and quartz in recent deep-sea sediments. *Geology* 14: 199–203.
- Lyle M, Murray D, Finney B, Dymond J, Robbins J, Brooksforce K. 1988. The record of Late Pleistocene biogenic sedimentation in the eastern tropical Pacific Ocean. *Paleoceanography* 3: 39–59.
- Lyle M, Zahn R, Prah F, Dymond J, Collier R, Pisias N, Suess F. 1992. Paleoproductivity and carbon burial across the California Current: The Multitracers Transect, 42°N. *Paleoceanography* 7: 251–272.
- Lui KK, Atkinson L, Chen TA, Gao S, Hall J, Macdonald RW, McManus LT, Quinones R. 2000. Exploring continental margin carbon fluxes on a global scale. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 81: 641–644.
- Martin JH. 1990. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography* 5: 1–13.
- Matsumoto K, Oba T, Lynch-Stieglitz J, Yamamoto H. 2002. Interior hydrography and circulation on the glacial Pacific Ocean. *Quat. Res.* 21: 1693–1704.
- Mortlock RA, Froelich PN. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Res. Part A* 36: 415–426.
- Mortyn PG, Thunell RC. 1997. Biogenic sedimentation and surface productivity changes in the Southern California Borderlands during the last glacial-interglacial cycle. *Mar. Geol.* 138: 171–192.
- Muller-Karger FE, Varela R, Thunell R, Luerssen R, Hu C, Walsh JJ. 2005. The importance of continental margins in the global carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.* 32, L01602, doi: 10.1029/2004GL021346.
- Ortiz J, Mix A, Hostetler S, Kashgarian M. 1997. The California Current of the last glacial maximum: Reconstruction at 42°N based on planktonic foraminifera. *Paleoceanography* 12: 191–205.
- Pedersen T. 1983. Increased productivity in the eastern equatorial Pacific during the last glacial maximum (19000 to 14000 Y.B.P.). *Geology* 11: 16–19.
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delayque G, Delmotte M, Kotlyakov VM, Legrand M, Lipenkov VY, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429–436.
- Ruttenberg KC, Goñi MA. 1997. Depth trends in phosphorus and C:N:P ratios of organic matter in Amazon Fan sediments: Indices of organic matter source and burial history. In Flood RD, Piper DJW, Klaus A, Peterson LC (eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, 155: College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp. 505–517.
- Sancetta C, Lyle M, Heusser L, Zahn R, Bradbury JP. 1992. Late-glacial to Holocene changes in winds, upwelling, and seasonal production of the northern California Current System. *Quat. Res.* 38: 359–370.
- Schneider B, Schlitzer R, Fischer G, Nothig EM. 2003. Depth-dependent elemental compositions of particulate organic matter (POM) in the ocean. *Global Biogeochem. Cycles* 17, 1032, doi: 10.1029/2002GB001871.
- Stott LD, Nuemann M, Hammond D. 1999. Intermediate water ventilation on the northeastern Pacific margin during the Late Pleistocene inferred from benthic foraminiferal δ¹³C. *Paleoceanography* 15: 161–169.
- Thunell RC, Kepple AB. 2004. Glacial-Holocene d15N record from the Gulf of Tehuantepec, Mexico: Implications for denitrification in the eastern equatorial Pacific and changes in atmospheric N₂O. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB1001, doi: 10.1029/2002GB002028.
- Thunell RC, Tappa E, Anderson DM. 1995. Sediment fluxes and varve formation in Santa Barbara Basin, offshore California. *Geology* 23: 1083–1086.
- Thunell RC, Sigman DM, Muller-Karger F, Astor Y, Varela R. 2004. Nitrogen isotope dynamics of the Cariaco Basin, Venezuela, *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB3001, doi: 10.1029/2003GB002185.
- Tyrell T. 1999. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature* 400: 525–531.
- Van Geen A, Zheng Y, Bernhard JM, Cannariato KG, Carriquiry J, Dean WE, Eakins BW, Ortiz JD, Pike J. 2003. On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography* 18, 1098, doi: 10.1029/2003PA000911.
- Walsh JJ. 1991. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature* 350: 53–55.

*Recibido en mayo de 2006;
aceptado en noviembre de 2006*