

Nota Científica

**Partículas de carbón en sedimentos marinos de la bahía
Mejillones del Sur (23°S).
Implicancias ambientales en un contexto histórico**

Jorge Valdés^{1,3}, Abdel Sifeddine^{2,3}, Chester Mariano² & Luc Ortlieb³

¹Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Facultad de Recursos del Mar,
Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile

²Departamento de Geoquímica Ambiental, Universidad Federal Fluminense,
Outeiro de Sao Joao Batista s/n°, 5° andar 24020007, Centro, Niteroi, RJ, Brasil

³Institut de Recherche pour le Développement, UR 055 (Paleotropique),
Centre de Recherche Ile de France, 32 Avenue Henri Varagnat,
F-93143 Bondy Cedex, Francia

e-mail: jvaldes@uantof.cl; geosife@vm.uff.br; Luc.Ortlieb@bondy.ird.fr

RESUMEN. Se determina la presencia de partículas de carbón en sedimentos superficiales y en testigos sedimentarios de la bahía Mejillones del Sur (23°S). El análisis mediante técnica petrográfica y microscopía de luz transmitida y reflejada, de un testigo de sedimento de 44 cm de longitud muestra que las partículas de carbón están presentes en los 10 cm superiores de la columna sedimentaria. Muestras superficiales (0,5 cm de espesor) de sedimentos marinos al noreste de la ciudad de Mejillones también contienen abundantes partículas de carbón. Debido a la total ausencia de vegetación en la zona susceptible de ser quemada, se presumió un origen antrópico de este material. De hecho, se establece que estas partículas corresponden a “polvo de carbón” originado en el transporte y acopio de este material por parte de una maestranza ferroviaria que comenzó a operar en el puerto de Mejillones en 1910. Por su lado, los sedimentos superficiales reflejan el desarrollo reciente de diversas actividades industriales consumidoras de carbón en la zona costera. La circulación superficial marina es el principal factor que rige la distribución de estas partículas en los sedimentos del fondo de la bahía Mejillones. Así, en este caso, las partículas de carbón presentan un doble potencial de uso, como marcadores de impacto ambiental pasado y presente, y como una herramienta de datación útil para construir y validar modelos geocronológicos que permitan estudiar la evolución océano-climática de la zona durante el pasado reciente.

Palabras claves: partículas de carbón, sedimentos marinos, Mejillones, Chile.

**Carbonaceous particles in marine sediments from Mejillones del Sur bay (23°S).
Environmental implications in a historic context**

ABSTRACT. Carbonaceous particles are present in superficial sediments and in sedimentary cores of Mejillones del Sur bay (23°S). An analysis of a 44-cm long core based upon petrographical techniques as well as transmitted and reflected light microscopy show that these particles are only present in the upper 10 cm of the sequences. Superficial samples (0.5 cm thick) of marine sediments located northeast of the town of Mejillones also contain carbonaceous particles. Due to the total lack of vegetation, which could be burnt in the area, it was inferred that they were originated from industrial activities. Actually, we establish that these particles are related of the transport of carbon to a railway industry, which began to operate in Mejillones in 1910. The superficial sediments reflect the recent development of various industrial plants, which use carbon as source of energy in the bay. Marine superficial circulation is the principal factor that explains the distribution of the carbonaceous particles in the bottom sediments of the bay. Thus, carbonaceous particles present a double potential, as a record of past and present environmental impacts, and as a geochronological tool for sediment columns needed to reconstruct and validate geochronological models for studies on ocean-climate evolution of this zone, in the recent past.

Key words: carbonaceous particles, marine sediments, Mejillones, Chile.

Las partículas de carbón son transportadas por el viento desde focos de incendios forestales e industrias que utilizan combustibles fósiles en sus procesos y que emiten a la atmósfera ceniza de diferentes tamaños ($< 1 \mu\text{m}$ a $>50 \mu\text{m}$) (Rose *et al.*, 1994). Estas partículas son generadas durante la combustión incompleta de carbón y petróleo a altas temperaturas, y una vez en la atmósfera pueden ser transportadas a grandes distancias dependiendo de sus propiedades aerodinámicas y de las condiciones meteorológicas locales. Debido a que están compuestas de carbono elemental, son muy resistentes a la degradación, de manera que están ampliamente distribuidas en el ambiente y suelen ser encontradas en lagos, suelo, y ambientes marinos costeros (Rose & Juggins, 1994; Rose *et al.*, 1994, 1995; Lan & Breslin, 1999).

Los sedimentos de ambientes acuáticos que contienen partículas de carbón, constituyen una importante evidencia de eventos naturales y antrópicos que han ocurrido en diferentes épocas y áreas geográficas (Clark, 1988a, 1988b; Verardo & Ruddiman, 1996; Bird & Cali, 1998). El estudio de estas partículas en testigos de sedimento provee importante información paleoambiental, mientras que estudiadas en sedimentos superficiales (con una perspectiva de distribución espacial) entregan información sobre actividades industriales que eventualmente pueden estar afectando las condiciones naturales del entorno.

Mejillones del Sur (Fig. 1) es una bahía orientada hacia el norte y ubicada a orillas del desierto más seco del planeta (Atacama). Se caracteriza por la alta productividad biológica (Rodríguez *et al.*, 1986, 1991; Marín *et al.*, 1993; Marín & Olivares, 1999), y la presencia permanente de la Zona de Mínimo Oxígeno del Pacífico sur oriental, a partir de los 50 m de profundidad (Valdés & Ortlieb, 2001). Estas particulares condiciones han favorecido la preservación de la estructura primaria de los sedimentos de fondo, lo que ha permitido su utilización en el estudio de la evolución oceanografía y climática local de los últimos dos milenios (Ortlieb *et al.*, 1994, 2000; Valdés *et al.*, 2000; Valdés & Ortlieb, 2001; Vargas, 2002). El desarrollo socioeconómico de esta bahía está sustentado en la actividad pesquera artesanal e industrial y, principalmente, en la generación de energía termoeléctrica.

Un estudio rutinario sobre la estructura y composición de la materia orgánica de los sedimentos marinos de Mejillones evidenció la presencia de

partículas de carbón. De allí que en el presente trabajo se busca explicar el origen de estas partículas, y discutir su utilidad como marcadores de impacto ambiental y como herramienta geocronológica para estudios paleoambientales.

Este estudio se realizó en una columna de sedimento de 44 cm de longitud, recuperada con un sacatestigos de gravedad tipo Phleger y submuestreado cada 0,5 cm y en 36 muestras de sedimento superficial (0,5 cm) recuperadas con un mini boxcore tipo Ekman-Birge, provenientes de la bahía Mejillones del Sur (Fig. 1). Las fases carbonato y silicato de cada una de las muestras de sedimento fueron eliminadas mediante un tratamiento de digestión con ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. La materia orgánica resultante, se analizó mediante microscopía de luz transmitida y reflejada, lo cual permitió la identificación y cuantificación de las partículas de carbón, expresándose el resultado como número de partículas por campo ocular. Para ello, se observó un mínimo de 30 campos visuales en cada una de las muestras y se obtuvo una media para cada muestra de sedimento. El mapa de distribución espacial fue construido en el programa computacional Surfer 8, usando el método de interpolación de datos espaciales de Kriging (Cressie, 1991).

Las partículas de carbón se caracterizaron por presentar contornos bien definidos y un color negro, observados con luz transmitida, y blanco brillante, con luz reflejada (Fig. 2). Los resultados del testigo evidenciaron su aparición a partir de los 103 mm de profundidad de sedimento, alcanzando un máximo a los 40 mm para luego decaer hacia el sedimento superficial (más reciente) (Fig. 3). La cuantificación de partículas de carbón en las muestras superficiales mostró una mayor abundancia en la zona costera al noreste de la ciudad de Mejillones, con una fuerte disminución hacia el centro de la bahía (Fig. 4).

En general, se asume que las partículas de carbón son química y biológicamente inertes en ambientes marinos, aun cuando se han reportado algunos procesos de degradación física microbiológica en experimentos de laboratorio, las evidencias de procesos degradativos en sedimentos marinos, aún son insuficientes (Shneour, 1966; Herring, 1985). Sin embargo, Middelburg *et al.* (1999) demostraron que las partículas de carbón sí son degradadas, aunque más lentamente que la materia orgánica, en ambientes marinos aeróbicos. No obstante, estas partí-

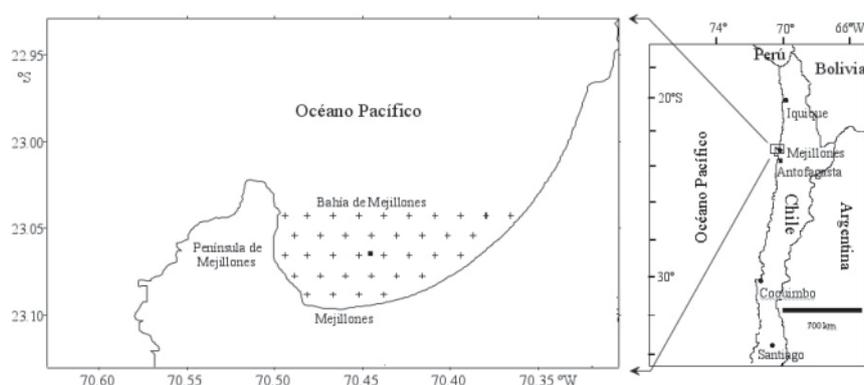


Figura 1. Bahía Mejillones del Sur. Las cruces corresponden a las muestras superficiales y el cuadrado negro al testigo.

Figure 1. Mejillones del Sur bay. Crosses correspond to surface samples, and the filled square represents the sediment core.

culas han sido reportadas tanto en sedimentos de ambientes anaeróbicos como aeróbicos. En este contexto, todo el piso marino de la bahía Mejillones, especialmente a partir de los 50 m de profundidad (inicio de la capa de mínimo oxígeno), constituye un ambiente propicio para la acumulación y preservación de este tipo de partículas.

Estructuralmente, es posible distinguir entre partículas derivadas de la quema de carbón de aquellas derivadas de la quema de petróleo y vegetación (Rose *et al.*, 1994). Esta diferenciación adquiere importancia en sectores donde se mezcla abundante vegetación, con la presencia de industrias emisoras de desechos hacia la atmósfera. Sin embargo, debido a la característica desértica del entorno de Mejillones, se descarta completamente la quema de vegetación como fuente de aporte de partículas de carbón al ambiente marino, de manera que su origen se debe buscar en la utilización de combustible fósil por parte de algunas industrias de la zona. En este caso, también es posible identificar dos tipos de partículas; aquellas originadas previas a la combustión del carbón (“polvo de carbón”) y aquellas partículas originadas en la combustión incompleta de este material, que se observan como pequeñas esferas (spheroidal carbonaceous particles = SCP) (Rose *et al.*, 1995).

Las características morfológicas de las partículas de carbón identificadas en los sedimentos de Mejillones, así como su tamaño ($< 100 \mu\text{m}$) (Fig. 2), permiten precisar que corresponden a “polvo de carbón” originado en procesos de transporte y aco-

pio de este material, no descartándose la presencia de SCP debido a la emisión de gases a la atmósfera, provenientes de la combustión de este material por parte de las industrias de la zona. Actualmente, las empresas termoeléctricas que operan en la bahía Mejillones utilizan una mezcla de carbón con petcoke para la generación de energía. Inspecciones visuales han mostrado que durante la etapa de descarga de este material desde buques de transporte, se produce una pérdida considerable de carbón directamente en la zona costera. A este aporte directo se debe sumar el material resultante del acopio de este material previo a su utilización, lo que produce un desprendimiento de “polvo de carbón” no combustionado, que puede ser transportado a través de la atmósfera, según la dirección predominante del viento.

En Mejillones, las evidencias sedimentológicas indican que el viento dominante, proveniente del sur, es capaz de transportar cantidades importantes de partículas tipo granos de calcita, desde la pampa hacia la bahía (Vargas, 1998, 2002). Este transporte se ve favorecido por la condición de escasa humedad atmosférica y la velocidad del viento. Este mecanismo de transporte actúa con la misma eficiencia sobre las partículas emitidas a la atmósfera por las empresas termoeléctricas, de manera que, por la orientación de la bahía son llevadas directamente hacia el mar, pudiéndose depositar dentro o fuera de éste. De esta manera, se pueden identificar dos zonas según la distribución de residuos de carbón en el fondo marino: una zona costera donde se acu-

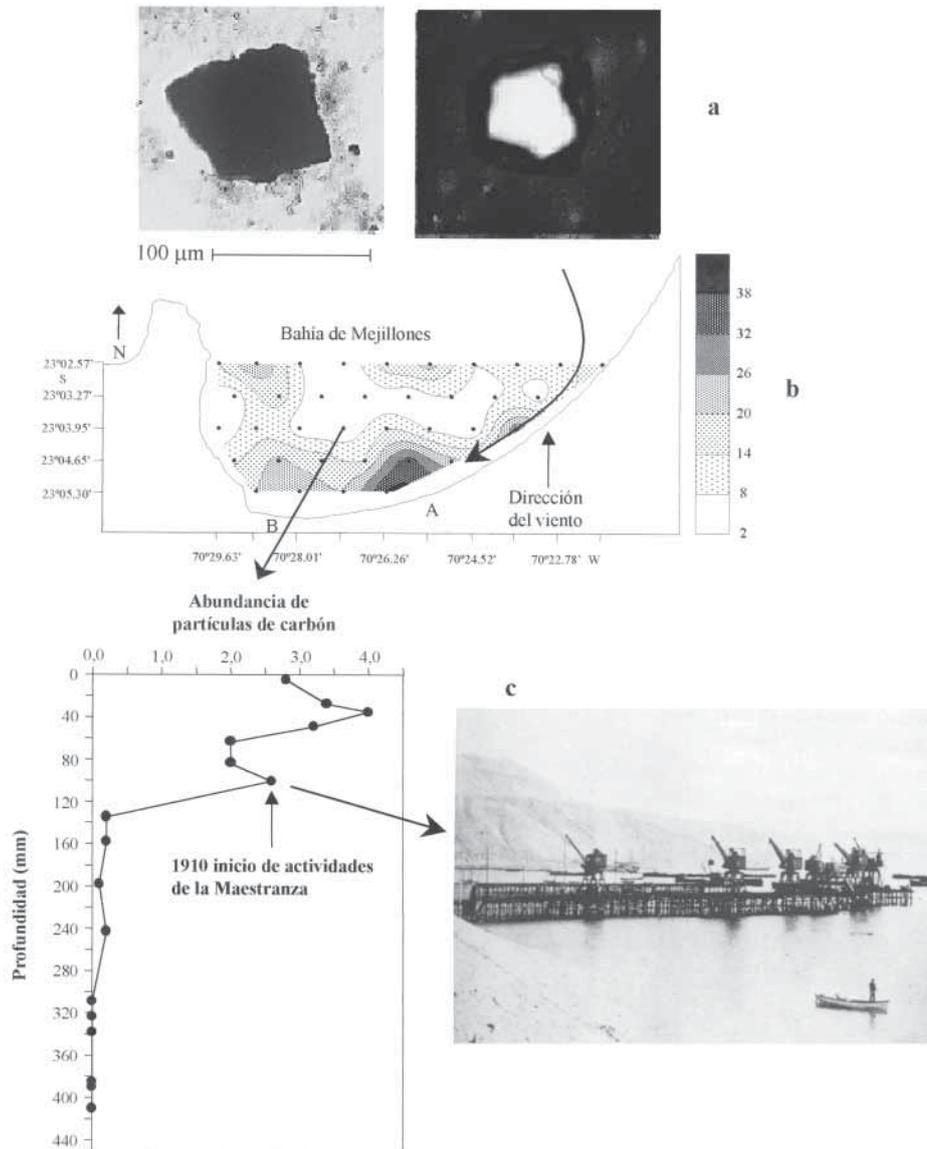


Figura 2. a) Partículas de carbón observadas con luz transmitida (izquierda) y luz reflejada (derecha) en el testigo 32B, b) distribución espacial de partículas de carbón en sedimentos de la bahía Mejillones del Sur. La escala corresponde al número de partículas promedio en cada muestra (ver metodología para más detalles). “A” corresponde a la localización de las termoeléctricas, y “B” corresponde a la localización de la antigua maestranza. Se indica la dirección principal de la corriente superficial, c) perfil de abundancia de partículas de carbón según una escala empírica, en el testigo 32B. Se observan las antiguas dependencias de la maestranza de Mejillones.

Figure 2. a) Carbonaceous particles observed in transmitted light microscope (left) and reflected light microscope (right) in 32B core, b) spatial distribution of carbonaceous particles in Mejillones bay sediments. The scale corresponds to the mean number of particles in each sample (see text, in the Methodology). “A” show thermoelectric engine location, and “B” show ancient railroad factory location, c) abundance variation of carbonaceous particles, according an empiric scales, in 32B core. It is showed ancient image of railroad factory location.

mulan restos de carbón no combustionados que se originan en la descarga de este material en los muelles de las empresas y una segunda zona, donde se acumulan partículas de carbón transportadas por el viento desde los sectores de acopio. En el primer caso, la zona de impacto está localizada alrededor de los muelles de desembarque, coincidiendo con la mayor concentración de partículas de carbón (Fig. 4). En el segundo caso, una vez que las partículas son depositadas en el mar, las corrientes superficiales influyen en su distribución y en su depositación final en los sedimentos.

Estudios recientes sobre circulación superficial en la bahía de Mejillones mediante el método lagrangiano (Vargas, 2002), muestran que el sistema de circulación se caracteriza por un giro de velocidad muy baja, de una masa de agua que ingresa por el noreste de la bahía, recorre toda la costa hasta Punta Angamos, generando un giro horario en el centro de la bahía. Este patrón de circulación concuerda con el mapa de distribución superficial de partículas de carbón (Fig. 4).

La distribución de partículas de carbón en los sedimentos superficiales de toda la bahía constituye una evidencia concreta del impacto de la actividad industrial sobre su entorno, aun cuando en sí ellas no constituyan un riesgo ambiental para la salud del ecosistema. Diferente es la situación de la pérdida de carbón que se produce en las maniobras de desembarque, ya que al ser depositado en grandes cantidades en una zona de abundante fauna bentónica puede llegar a cambiar las condiciones naturales afectando la supervivencia y desarrollo de dichas poblaciones.

Desde un punto de vista temporal, la presencia de partículas de carbón en secuencias sedimentarias puede relacionarse, por ejemplo, con el inicio de actividades industriales que utilizan combustible fósil en sus procesos (Rose *et al.*, 1995). En general, el inicio de dichas actividades industriales queda registrado, dentro de las columnas de sedimento, como un aumento notorio en la abundancia de partículas de carbón, principal fuente de energía utilizada a partir de la revolución industrial.

En el caso de Mejillones, la historia reciente registra en 1910 el inicio de actividades de la Maestranza de Mejillones, propiedad de "The Antofagasta (Chili) and Bolivia Railway Co.", destinada a la fabricación de piezas y partes de ferrocarriles, que utilizaba carbón como fuente de energía (Panadés *et al.*, 1995). Junto con esto, se inicia el

transporte de este mineral para abastecer a esta industria. Ambas situaciones constituyen el punto de partida cronológico para el ingreso de residuos de carbón a la bahía, entonces se puede suponer que la aparición de estas partículas a 103 mm de profundidad en la columna de sedimento estudiada, corresponde a un registro de la utilización y transporte de combustible fósil iniciado a comienzos del siglo pasado. Este argumento es soportado por mediciones de ^{210}Pb realizadas en un testigo próximo al reportado en este trabajo, que muestran un decaimiento significativo en la actividad isotópica, por debajo de los 100 mm, lo que sugiere una edad de alrededor de 100 años para este sector del testigo (Vargas, 2002). Así, tanto las partículas de carbón como las mediciones con ^{210}Pb sugieren que los primeros 10 cm de la columna sedimentaria representan unos 100 años de sedimentación. El decaimiento en el número de partículas hacia el sedimento superficial correspondería al cierre de las faenas de esta industria. Sin embargo, esta fase se superpone con el inicio de las actividades de las termoeléctricas, dando como resultado que el registro no desaparezca del todo.

Una doble importancia puede atribuirse a este descubrimiento. Por una parte, constituye un registro del impacto ambiental que produjo una actividad económica sobre su entorno, y por otra, ofrece una excelente oportunidad para utilizar este antecedente como un horizonte temporal para datar sedimentos de la bahía, de una antigüedad aproximada de hasta 100 años.

La posibilidad de comparar los datos derivados de un análisis de registros sedimentarios con registros históricos documentados en Mejillones (siglo XX), es una importante fuente de información que permitiría calibrar hacia el pasado los antecedentes derivados del estudio de testigos de sedimento que abarquen un mayor intervalo de tiempo. En este contexto, una nueva herramienta de datación como es el caso de la evidencia antrópica detectada en este estudio y representada por la presencia de partículas de carbón, constituye un importante aporte al esfuerzo por entender el funcionamiento y la interacción océano-climática de la zona de Mejillones durante el final del Holoceno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dra. Elizabeth Vergès de la Universidad de Orléans, por el apoyo

en el reconocimiento de las partículas de carbón. El primer autor fue beneficiado por una beca del IRD, para realizar una estadía en Francia, y por el Proyecto MECESUP ANT 003 de la Universidad de Antofagasta, para realizar una estadía en Brasil, durante las cuales se realizó este trabajo. Los resultados son parte de los Proyectos 1328 PALEOBAME (Paleoceanografía de la bahía Mejillones del Sur) IRD-Universidad de Antofagasta y del proyecto "Geoquímica y petrografía de sedimentos anóxicos de la bahía Mejillones del Sur (23°S). Implicancias pasadas y futuras" de Fundación Andes.

REFERENCIAS

- Bird, M. & J. Cali. 1998.** A million-year record of fire in sub-saharan Africa. *Nature*, 394: 767-769.
- Clark, J. 1988a.** Stratigraphic charcoal analysis on petrographic thin sections: application to fire history in northwestern Minnesota. *Quaternary Res.*, 30: 81-91.
- Clark, J. 1988b.** Particle motion and theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Res.*, 30: 67-80.
- Cressie, N. 1991.** *Statistic for spatial data.* John Wiley & Sons, New York, 900 pp.
- Herring, J. 1985.** Charcoal fluxes into sediments of North Pacific Ocean: the Cenozoic record of burning. En: E. Sundquist & W. Broecker (eds.). *The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variations Archean to Present.* AGU, Washington DC, pp. 419-442.
- Lan, Y. & V. Breslin. 1999.** Sedymentary records of epheroidal carbonaceous particles from fossil-fuel combustion in western lake Ontario. *J. Great Lake Res.*, 25(3): 443-454.
- Marín, V., L. Rodríguez, L. Vallejo, J. Fuenteseca & E. Oyarce. 1993.** Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de la bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 66: 47-491.
- Marín, V. & G. Olivares. 1999.** Estacionalidad de la productividad primaria en bahía Mejillones del Sur (Chile): una aproximación proceso-funcional. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 72: 629-641.
- Middelburg, J., J. Nieuwenhuize & P. van Breugel. 1999.** Black carbon in marine sediments. *Mar. Chem.*, 65: 245-252.
- Ortlieb, L., O. Zúñiga, R. Follegati, R. Escribano, I. Kong, L. Rodríguez, Ph. Mourguiart, J. Valdés & P. Iratchet. 1994.** Paleoceanografía de la bahía de Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile): resultados preliminares para el último milenio. *Estud. Oceanol.*, 13: 45-55.
- Ortlieb, L., R. Escribano, R. Follegati, O. Zúñiga, I. Kong, L. Rodríguez, J. Valdés, N. Guzmán & P. Iratchet. 2000.** Ocean-climatic changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment of northern Chile (23°S). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 73: 221-242.
- Panadés, J., O. Ovalle & P. Rojas. 1995.** *Mejillones, un pueblo con historia.* Editorial Universidad de Antofagasta, Antofagasta, 156 pp.
- Rodríguez, L., O. Zarate & E. Oyarce. 1986.** Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur. *Rev. Biol. Mar.*, 22(1): 75-96.
- Rodríguez, L., V. Marín, M. Farías & E. Oyarce. 1991.** Identification of an upwelling zone by remote sensing and *in situ* measurement. *Mejillones del Sur Bay (Antofagasta-Chile).* *Sci. Mar.*, 55(3): 467-473.
- Rose, N., S. Juggins, J. Watt & R. Battarbee. 1994.** Fuel-type characterization of spheroidal carbonaceous particles using surface chemistry. *Ambio*, 23(4-5): 296-299.
- Rose, N. & S. Juggins. 1994.** A spatial relationship between carbonaceous particles in lake sediments and sulphur deposition. *Atmos. Environ.*, 28(2): 177-183.
- Rose, N., S. Harlock, P. Appleby & R. Batterbee. 1995.** Dating of recent lake sediments in the United Kingdom and Ireland using spheroidal carbonaceous particles (SCP) concentration profiles. *The Holocene*, 5(3): 328-335.
- Shneour, E. 1966.** Oxidation of graphitic carbon in certain soils. *Science*, 151: 991-992.
- Valdés, J., L. López, S. Lomónaco & L. Ortlieb. 2000.** Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de materia orgánica en bahía Mejillones del Sur (23°S), Chile. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 35(2): 169-180.

- Valdés, J. & L. Ortlieb. 2001.** Paleoxygenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía Mejillones del Sur (23°S): indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino. *Invest. Mar., Valparaíso*, 29(1): 25-35.
- Vargas, G. 1998.** Approches méthodologiques en paléo-océanographie réalisées à partir de carottes de la Baie de Mejillones, Chile (23°S). Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Bordeaux I, 32 pp.
- Vargas, G. 2002.** Interactions océan-atmosphère au cours des derniers siècles sur la côte du Désert d'Atacama: Analyse multi-proxies des sédiments laminés de la Baie de Mejillones (23°S). Tesis doctoral, Univ. Bordeaux I, Francia, 174 pp.
- Verardo, D. & W. Ruddiman. 1996.** Late Pleistocene charcoal in Tropical Atlantic deep-sea sediments: climate and geochemical significance. *Geology*, 24: 855-857.

Recibido: 7 enero 2003; Aceptado: 22 marzo 2004

