

Chemical tracer transport in the eastern boundary current system of the North Atlantic

Transportes biogeoquímicos en el sistema de corrientes del Atlántico Noreste

M Álvarez¹, XA Álvarez-Salgado²

¹ CSIC-UIB, Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, Miquel Marqués 21, 07190, Esporles, Mallorca, Spain. E-mail: marta.alvarez@uib.es

² CSIC, Instituto de Investigaciones Marinas, Eduardo Cabello 6, 36208, Vigo, Spain.

Abstract

The “MedBox” region, comprising the Strait of Gibraltar to 22°W and from 24°N to 41°N, has been defined using thermohaline and chemical data from three WOCE cruises conducted in 1997/98. The water mass structure of the region was objectively solved by an extended optimum multiparameter (OMP) analysis. Volume transports were estimated from field data and an inverse box model that ensures volume conservation and no deep water formation within the region. The combination of the volume transports, the OMP water mass analysis, and the distributions of chemical parameters allowed for the assessment of the oxygen, inorganic carbon, nitrate, phosphate, and silicate transport mechanisms, their vertical and lateral variability, and the relative contribution of the different water masses in the mid-latitudes of the eastern North Atlantic to these transports.

Key words: dissolved oxygen, eastern North Atlantic, optimum multiparameter mixing analysis, nutrient salts, transport.

Resumen

La región “MedBox” comprende desde el Estrecho de Gibraltar hasta 22°W y entre 24°N y 41°N. Esta región se ha definido usando datos termohalinos y químicos de tres campañas WOCE llevadas a cabo en 1997/98. La estructura de las masas de agua en la zona se ha resuelto objetivamente utilizando un método multiparamétrico denominado análisis OMP extendido (extended Optimum Multi Parameter analysis). El transporte de volumen se estimó a partir de los datos de las correspondientes campañas y un modelo inverso de cajas que asegura la conservación de la masa y la no formación de aguas profundas en la región. La combinación de los transportes de masa, la distribución de las masas de agua según el OMP y la de propiedades químicas, permitió calcular los transportes de oxígeno, carbono inorgánico, nitrato, fosfato y silicato, además del estudio de los mecanismos que los controlan, su variabilidad vertical y lateral, y la contribución relativa de las distintas masas de agua a estos transportes en latitudes medias del Atlántico Noreste.

Palabras clave: análisis multiparamétrico óptimo de mezcla, Atlántico Noreste, oxígeno disuelto, sales nutrientes, transporte.

Introduction

The mid-latitudes of the eastern North Atlantic constitute a region of eastern boundary ventilation, where the transition from subtropical to subpolar central waters occurs. This region contains the subducting source region of the Mediterranean Water, as well as the western Iberian/northwestern African coastal upwelling region.

The term “eastern boundary ventilation” refers to the mechanism by which the surface water that has entered a surface boundary layer is vertically mixed and reinjected into the ocean interior at deeper levels (Arhan *et al.* 1994 and references therein). The entrainment of central waters to depth when Mediterranean Overflow Water (MOW) spills out of the Strait of Gibraltar is one of the main forms of eastern boundary ventilation. The surface current system off the Iberian Peninsula is often called the Portugal Current System (Peliz and Fiúza 1999). The Portugal Current flows southward year round between 45°N–50°N and 10°W–20°W in the sluggish circulation area between the North Atlantic Current and the Azores

Introducción

En las latitudes medias del Atlántico Noreste se da la transición de aguas centrales subtropicales a subpolares, constituyendo una región de ventilación del borde oriental. Además, allí se forma por subducción el agua mediterránea y ocurre el afloramiento costero de la Península Ibérica y el noroeste de África.

El término “ventilación del borde oriental” se refiere al mecanismo por el cual las aguas superficiales que han penetrado en un nivel superficial límite se mezclan verticalmente y se reinyectan al interior del océano hacia profundidades mayores (Arhan *et al.* 1994 y referencias incluidas). La incorporación de aguas centrales hacia capas profundas cuando el Agua Mediterránea de Desbordamiento o “overflow” (MOW) desciende desde el Estrecho de Gibraltar es uno de los principales mecanismos de “ventilación del borde oriental”. El sistema de corrientes superficiales de la Península Ibérica también se llama Sistema de Corrientes de Portugal (Peliz y Fiúza 1999). Aquí, la corriente de Portugal fluye hacia el sur durante todo el

Current (Krauss 1986). South of the discontinuity of the Strait of Gibraltar coastline, where the Portugal Current is interrupted, the northwestern African circulation is influenced by the eastern branch of the North Atlantic subtropical gyre, the southwestward flowing Canary Current. The current system at the ocean margin between the Portugal Current and the Iberian coast and the Canary Current and the African coast is dominated by seasonal wind fluctuations, especially in the Iberian basin. Here, during spring and summer, northeasterly winds predominate producing the Portugal Coastal Current, which flows southward at the surface, and the northward flowing Portugal Coastal Undercurrent at the slope (see review in Aristegui *et al.* 2006). During the rest of the year, southwesterly winds predominate, giving rise to the Portugal Coastal Countercurrent or Iberian Poleward Current, which flows northwards. A nearshore poleward current is also detected off northwestern Africa; however, a narrow equatorward flow develops in winter over the shelf when the trade-wind band migrates southward forcing upwelling in the area.

The distribution of nutrient salts, dissolved oxygen, inorganic carbon, alkalinity, etc., in the ocean results from the interplay of several physical (surface heat and freshwater fluxes, advection and diffusion) and biological processes (net uptake in the photic zone and net mineralization at depth). From a biogeochemical point of view, the eastern North Atlantic comprises two important areas of high primary production, the coastal upwelling systems off the western Iberian Peninsula and northwestern Africa (Aristegui *et al.* 2006), where filaments develop and transport offshore a considerable fraction of this primary production, either in dissolved or particulate form (Álvarez-Salgado *et al.* 2007).

The evaluation of the advective transport of chemical parameters in the ocean is critical to quantify the nutrient exchanges between different biogeographic provinces (Rintoul and Wunsch 1991, Álvarez *et al.* 2002), as well as to establish the corresponding budgets used to estimate the export production (Ganachaud and Wunsch 2002) and net community production (Hansell *et al.* 2004, Bates *et al.* 2006, Álvarez and Álvarez-Salgado 2007), or to evaluate the regional distribution of the uptake and storage of anthropogenic carbon (Holfort *et al.* 1998, Álvarez *et al.* 2003, Rosón *et al.* 2003).

Few studies have evaluated the mechanisms driving the transport of chemical tracers in the North Atlantic (Álvarez *et al.* 2002, 2003; Lavín *et al.* 2003), and only one quantified the role of water masses in those transports by a mixing analysis (Álvarez *et al.* 2004). In this study we evaluate the transport of nutrient salts, alkalinity, inorganic carbon, and dissolved oxygen in a box enclosing the boundary current system of the eastern North Atlantic in order to determine the transport mechanisms and the contribution of the different water masses to the regional transports. The results presented here complement the paper published by Álvarez *et al.* (2005, hereinafter APSB) on the transport and storage of anthropogenic carbon in the same region.

año entre 45°N–50°N y 10°O–20°O en el área de circulación lenta comprendida entre la Corriente del Atlántico Norte y la Corriente de las Azores (Krauss 1986). Al sur de la discontinuidad costera situada en el Estrecho de Gibraltar, donde se interrumpe la Corriente de Portugal, la circulación africana del noroeste se ve influenciada por la rama oriental del giro subtropical del Atlántico Norte, la Corriente de Canarias, que fluye hacia el suroeste. El sistema de corrientes en los márgenes oceánicos entre la Corriente de Portugal y la costa ibérica, y entre la Corriente de Canarias y la costa africana están dominados por las fluctuaciones estacionales del viento, especialmente en la cuenca ibérica. Aquí, durante la primavera y el verano predominan los vientos del noreste produciendo la Corriente Costera de Portugal, que fluye hacia el sur en la superficie, y la corriente Inferior Costera de Portugal que fluye hacia el norte sobre el talud (véase la revisión de Aristegui *et al.* 2006). Durante el resto del año, los vientos del suroeste predominan, dando lugar a la Contracorriente Costera de Portugal o a la Corriente Ibérica Hacia el Polo, que fluye hacia el norte. También se detecta una corriente hacia el polo en el noroeste de África; sin embargo, en invierno cuando la banda de alisios migra hacia el sur y provoca un afloramiento en el área se desarrolla un flujo hacia el ecuador constreñido en la plataforma.

Las distribuciones de sales nutrientes, oxígeno disuelto, carbono inorgánico, alcalinidad, etc. en el océano, son el resultado de la interacción de varios procesos físicos (flujos de calor y agua dulce en la superficie, procesos de advección y difusión) y biológicos (consumo neto en la zona fótica y mineralización neta en la profundidad). Desde el punto de vista biogeoquímico, el Atlántico Noreste abarca dos áreas importantes de alta producción primaria, el sistema de afloramiento costero de la península ibérica y el del noroeste africano (Aristegui *et al.* 2006), donde se desarrollan filamentos que transportan desde la costa hacia el océano una fracción considerable de esta producción primaria, tanto en forma disuelta como particulada (Álvarez-Salgado *et al.* 2007).

La evaluación del transporte advectivo de parámetros químicos en el océano es crítica para cuantificar los intercambios de nutrientes entre diversas provincias biogeográficas (Rintoul y Wunsch 1991, Álvarez *et al.* 2002); y para establecer los correspondientes balances, usados para estimar la producción exportada (Ganachaud y Wunsch 2002) y la producción neta de la comunidad (Hansell *et al.* 2004, Bates *et al.* 2006, Álvarez y Álvarez-Salgado 2007), o para evaluar la distribución regional de la captación y almacenaje del carbono antropogénico (Holfort *et al.* 1998, Álvarez *et al.* 2003, Rosón *et al.* 2003).

Pocos trabajos han estudiado los mecanismos que controlan el transporte de trazadores químicos en el Atlántico Norte (Álvarez *et al.* 2002, 2003; Lavín *et al.* 2003) y solamente uno cuantificó el papel de las masas del agua en esos transportes por medio de un análisis de mezcla (Álvarez *et al.* 2004). Aquí se evalúa el transporte de sales nutrientes, carbono inorgánico, alcalinidad y oxígeno disuelto en una caja que encierra el sistema de corrientes del borde oriental del Atlántico Norte, con

Material and methods

The data set and methods are those described in APSB. Therefore, only the most relevant and new aspects will be highlighted. We refer the reader to APSB for a thorough description of the water mass mixing analysis and the inverse method for the calculation of the velocity field.

Data set

A three-sided box was built around the Strait of Gibraltar (fig. 1). Hydrographic and chemical data from three WOCE (World Ocean Circulation Experiment; see table 1 in APSB) cruises undertaken in 1997 and 1998 were used to create the so-called “MedBox 98”. In this study, CTD temperature and salinity data along with dissolved oxygen, nutrient salt, and CO₂ bottle data have been used. Details regarding the analytical methods and the quality control procedures are given in the corresponding cruise reports and related works (see table 1 in APSB). The internal consistency of nutrients, oxygen, and CO₂ was carefully checked by studying the residuals from the water mass mixing analysis in deep waters below 3000 dbar. The MedBox was divided into four sections to describe the results: North, Northwest, Southwest, and South walls (fig. 1).

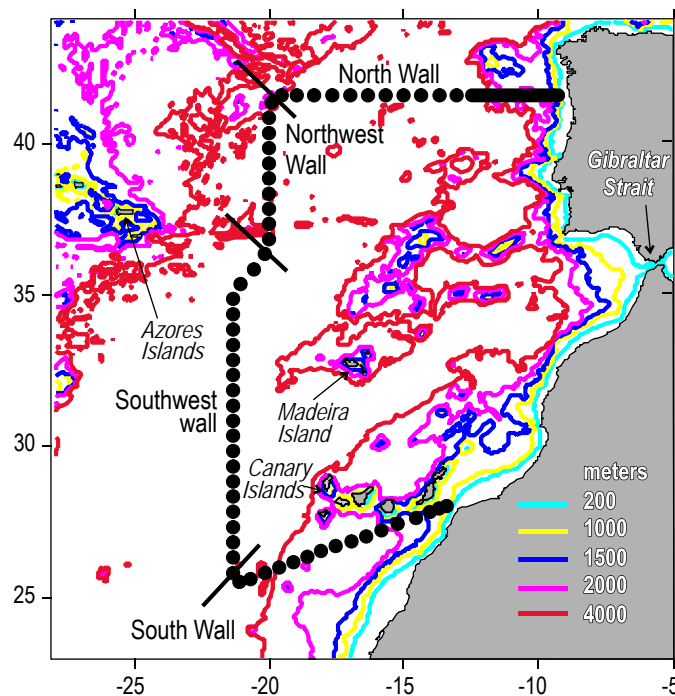


Figure 1. Location of the station pairs comprising the MedBox (●). The MedBox is separated into North, Northwest, Southwest, and South walls; the corresponding limits are indicated by thick black lines.

Figura 1. Localización de los pares de estaciones que definen la MedBox (●). La MedBox se divide en las paredes norte, noroeste, suroeste y sur, los límites correspondientes están indicados por las líneas negras gruesas.

el objetivo de estudiar los mecanismos de transporte y la contribución de las diversas masas de agua a los transportes regionales. Los resultados presentados aquí complementan el artículo de Álvarez *et al.* (2005, de aquí en adelante APSB) sobre el transporte y el almacenamiento de carbono antropogénico en la misma región.

Material y métodos

La base de datos empleada así como los métodos están descritos detalladamente en APSB; por lo tanto, solamente se destacarán los aspectos más relevantes y más nuevos. Referimos al lector a APSB para una descripción cuidadosa del análisis de mezcla de masas de agua y del método inverso usado en el cálculo del campo de velocidades.

Base de datos

Se definió una caja de tres lados alrededor del Estrecho de Gibraltar (fig. 1) usando los datos hidrográficos y químicos de tres campañas WOCE (World Ocean Circulation Experiment; véase la tabla 1 en APSB) emprendidas en 1997 y 1998, la cual se denominó “MedBox 98”. En este estudio, se utilizaron datos de CTD de temperatura y salinidad, junto con datos de botella de oxígeno disuelto, sales nutrientes y CO₂. Los detalles sobre los métodos analíticos y los procedimientos del control de calidad se dan en los informes correspondientes de las campañas y en los trabajos relacionados (véase la tabla 1 en APSB). La consistencia interna de los nutrientes, oxígeno y CO₂ fue comprobada cuidadosamente estudiando los residuos del análisis de mezcla de masas de agua profundidades por debajo de 3000 dbar. La MedBox se dividió en cuatro secciones para describir los resultados: pared norte, noroeste, sudoeste y sur (fig. 1).

Análisis de mezcla

Cada muestra de agua se dividió objetivamente en sus contribuciones de tipos de agua, de acuerdo a su origen, presentes en el Atlántico Noreste. El problema de la mezcla se solucionó utilizando un método óptimo multiparamétrico extendido (OMP) (e.g., Karstensen y Tomczak 1998, Álvarez *et al.* 2004) que minimiza los residuales de un sistema lineal de ecuaciones para variables conservativas y no conservativas usando una aproximación de mínimos cuadrados no negativos, donde la masa se conserva rigurosamente y las contribuciones de todas las masas de agua deben ser positivas.

Las variables conservativas usadas fueron la temperatura potencial (θ) y la salinidad, y se supuso un comportamiento conservativo del silicato (SiO₂). Los trazadores no conservativos fueron el nitrato (NO₃), el fosfato (PO₄) y el oxígeno disuelto (O₂). Los procesos biológicos se modelaron en unidades de oxígeno. El consumo de O₂ desde las condiciones iniciales cercanas a la saturación se convirtió en unidades de NO₃ y PO₄ usando los cocientes estequiométricos de Fraga *et al.* (1998). La ecuación lineal de mezcla para cada trazador se

Mixing analysis

Each water sample was objectively decomposed into the contribution of the source water types present in the eastern North Atlantic. The mixing problem was solved using an extended optimum multiparameter (OMP) approach (e.g., Karstensen and Tomczak 1998, Álvarez *et al.* 2004), which minimizes the residuals of a set of linear mixing equations for conservative and non-conservative variables in a non-negative least squares sense, where mass is stringently conserved and the contributions of all water masses must be positive.

Potential temperature (θ) and salinity were used as conservative parameters, and silicate (SiO_2) was also assumed to be conservative. The non-conservative tracers were nitrate (NO_3), phosphate (PO_4), and dissolved oxygen (O_2). Biological processes were modelled in oxygen units. The consumption of O_2 from the initial close-to-saturation conditions was converted into NO_3 and PO_4 units using the stoichiometric ratios of Fraga *et al.* (1998). The linear mixing equation for each tracer was properly weighted according to the analytical error of the measurement and the variability of its concentration in the source water type regions (table 1).

Following the nomenclature of APSB, hereinafter we will refer to Central Waters as the sum of the contributions of the Madeira Mode Water (MMW) and the subtropical and subpolar Eastern North Atlantic Central Waters (ENACWs). In the intermediate water domain, we will distinguish among diluted Antarctic Intermediate Water (AA), Labrador Sea Water (LSW), and Mediterranean Water (MW). In the deep water

ponderó según el error analítico de la medida y de la variabilidad de su concentración en la zona de origen del tipo de agua (tabla 1).

Siguiendo la nomenclatura de APSB, en este trabajo nos referiremos a Aguas Centrales como la suma de las contribuciones de Agua Modal de Madeira (MMW), y de agua central del Atlántico Noreste (ENACW) subtropical y subpolar. Como aguas intermedias distinguiremos entre el Agua Intermedia Antártica Diluida (AA), el Agua del Mar de Labrador (LSW) y el Agua Mediterránea (MW). En el dominio de las aguas profundas distinguimos entre el Agua de Desbordamiento de Islandia-Escocia (ISOW) y el Agua Profunda (LDW), que junto con la LSW explican la variabilidad de las aguas profundas del Atlántico Noreste (tabla 1). Véase APSB para más detalles.

Campo de velocidades, mecanismos de transporte y contribuciones de las masas de agua

La estimación del campo de velocidades es un paso crucial para calcular valores fiables de transporte de volumen y de variables químicas (e.g., Álvarez *et al.* 2002). Nos referimos otra vez a APSB para una explicación más detallada. Brevemente, el campo de velocidades geostroficadas se estima utilizando como nivel de referencia $\sigma_3 = 41.49$, prácticamente equivalente a 3200 dbar. A partir de este campo inicial de velocidad se establece un modelo inverso, el cual consiste en resolver una serie de ecuaciones lineales indeterminadas que satisfagan una serie de constricciones físicas. Este sistema se

Table 1. Characteristics (TA = total alkalinity, TIC = total inorganic carbon), errors, and weights (W) of the source water types: Madeira Mode Water (MMW), subtropical Eastern North Atlantic Central Water (ENACW_T), subpolar ENACW (ENACW_P), lower limit of ENACW_T and upper limit of ENACW_P (H), influenced Antarctic Intermediate Water (AA), Mediterranean Water (MW), Labrador Sea Water (LSW), Lower Deep Water (LDW), and Iceland-Scotland Overflow Water (ISOW). Correlation coefficient (r^2) and standard error (SE) of the regression between the measured and predicted variable. Adapted from APSB.

Tabla 1. Características (TA = alcalinidad total, TIC = carbono inorgánico total), errores y pesos (W) de los tipos de agua de origen: Agua Modal de Madeira (MMW), Agua Central del Este del Atlántico Norte subtropical (ENACW_T) y subpolar (ENACW_P), límite inferior de ENACW_T y superior de ENACW_P (H), Agua Intermedia Antártica diluida (AA), Agua Mediterránea (MW), Agua del Mar de Labrador (LSW), Agua Profunda (LDW) y Agua del Desbordamiento de Islandia-Escocia (ISOW). Coeficiente de correlación (r^2) y error estándar (SE) de la regresión entre las variables medidas y las predichas. Tabla adaptada de APSB.

| Source water | θ (°C) | Salinity (psu) | SiO_2 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) | NO_3 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) | PO_4 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) | TA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) | O_2 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) | TIC ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) |
|--------------------|---------------|----------------|--|---|---|--------------------------------|--|---------------------------------|
| MMW | 20.00 ± 0.5 | 37.00 ± 0.04 | 0.39 ± 0.3 | 0.23 ± 0.01 | 0.01 ± 0.06 | 2418 ± 13 | 223 ± 9 | 2103 ± 3 |
| ENACW _T | 15.30 ± 0.4 | 36.10 ± 0.02 | 2.24 ± 1.7 | 2.12 ± 1.2 | 0.15 ± 0.05 | 2363 ± 10 | 244 ± 3 | 2096 ± 6 |
| H | 12.20 ± 0.4 | 35.66 ± 0.02 | 3.98 ± 1.8 | 6.28 ± 0.8 | 0.39 ± 0.01 | 2338 ± 15 | 261 ± 1 | 2107 ± 7 |
| ENACW _P | 8.30 ± 0.3 | 35.23 ± 0.01 | 10.33 ± 0.6 | 9.58 ± 1.3 | 0.73 ± 0.08 | 2320 ± 7 | 285 ± 2 | 2112 ± 12 |
| AA | 7.50 ± 0.1 | 35.00 ± 0.02 | 24.90 ± 0.8 | 12.40 ± 3.3 | 0.96 ± 0.3 | 2320 ± 1 | 290 ± 2 | 2092 ± 4 |
| MW | 11.74 ± 0.1 | 36.50 ± 0.01 | 8.62 ± 0.8 | 5.16 ± 0.8 | 0.31 ± 0.1 | 2411 ± 1 | 262 ± 5 | 2151 ± 4 |
| LSW | 3.40 ± 0.2 | 34.89 ± 0.12 | 9.85 ± 2.5 | 12.03 ± 0.7 | 0.91 ± 0.02 | 2301 ± 7 | 320 ± 2 | 2118 ± 19 |
| LDW | 1.92 ± 0.003 | 34.88 ± 0.002 | 49.85 ± 5 | 12.94 ± 0.4 | 1.02 ± 0.03 | 2360 ± 2 | 332 ± 3 | 2147 ± 10 |
| ISOW | 1.93 ± 0.08 | 34.96 ± 0.02 | 11.12 ± 5 | 9.26 ± 2.7 | 0.85 ± 0.13 | 2290 ± 3 | 331 ± 3 | 2099 ± 4 |
| W | 15 | 10 | 2 | 2 | 0.8 | 0.5 | 3.2 | 0.5 |
| r^2 | 0.9998 | 0.9993 | 0.998 | 0.996 | 0.991 | 0.98 | 0.998 | 0.98 |
| SE | 0.06 | 0.01 | 0.67 | 0.4 | 0.05 | 3.0 | 1.6 | 4.2 |

domain, we distinguish between Iceland-Scotland Overflow Water (ISOW) and Lower Deep Water (LDW), which along with LSW explain the variability of the Northeast Atlantic Deep Water (table 1). See APSB for further details.

Velocity field, transport mechanisms, and water mass contributions

Estimating the velocity field is a crucial step to obtain reliable volume and chemical transports (e.g., Álvarez *et al.* 2002). We refer again to APSB for a thorough explanation. Briefly, the velocity field is approximated geostrophically using a reference level at $\sigma_3 = 41.49$, nearly equivalent to 3200 dbar. From this initial velocity field, an inverse model is run: an underdetermined system of linear equations is solved to satisfy certain constraints and resolved by singular value decomposition. The model constraints are: (i) volume conservation for the whole water column; (ii) mass, salt, and heat conservation for six deep layers below 2500 dbar; and (iii) no deep water formation within the MedBox (APSB, Slater 2003).

To understand the mechanisms leading to the volume and property transport, the geostrophic fluxes were separated into three components: (i) a barotropic term, due to the net transport through the box boundaries; (ii) a baroclinic term, due to the horizontally averaged vertical structure; and (iii) a horizontal term, due to the residual flow after the barotropic and baroclinic components have been subtracted, which is associated with the lateral variations about the baroclinic profile. The contribution of the cross terms is negligible and can be disregarded.

The baroclinic and horizontal components have no net volume flow and, in this particular case, neither does the barotropic one. The barotropic transport includes the Ekman layer, the net barotropic water column transport across the box, and the bottom triangles. The baroclinic and horizontal transports are associated with the meridional overturning circulation and the large-scale gyre circulation, including mesoscale eddies, respectively. To quantify these components for the volume and property transport, the orthogonal velocity (v) and corresponding property ($Prop$) are separated into (i) a section-averaged value ($\langle v \rangle$ and $\langle Prop \rangle$, respectively); (ii) a baroclinic profile of laterally averaged values at each depth ($\langle v \rangle(z)$ and $\langle Prop \rangle(z)$); and (iii) the deviations from lateral averages (anomalies) for each pair of stations and depth ($v'(x, z)$ and $Prop'(x, z)$). Hence,

$$v = \langle v \rangle + \langle v \rangle(z) + v'(x, z)$$

$$Prop = \langle Prop \rangle + \langle Prop \rangle(z) + Prop'(x, z) \quad (1)$$

The corresponding transports are calculated as:

1. Barotropic component:

$$\rho_{S, T, P} \cdot \langle v \rangle \cdot \langle Prop \rangle \cdot \int L(z) dz \quad (2a)$$

resuelve mediante su descomposición en valores singulares (SVD, por sus siglas en inglés). Las constricciones del modelo son: (i) conservación del volumen en toda la columna de agua; (ii) conservación del volumen, la sal y el calor en seis capas profundas por debajo de 2500 dbar; y (iii) que no se forme agua profunda dentro de la MedBox (APSB, Slater 2003).

Para dilucidar los mecanismos que controlan el transporte de volúmenes y de variables químicas, los flujos geostroficados se separaron en tres componentes: (i) un término barotrópico, debido al transporte neto a través de los límites de la caja; (ii) un término baroclínico, debido a la estructura vertical horizontalmente promediada; y (iii) un término horizontal, debido al flujo residual una vez restados los componentes barotrópico y baroclínico, el cual se asocia a las variaciones laterales sobre el perfil baroclínico. La contribución de los términos cruzados es insignificante y puede ser despreciada.

Los componentes baroclínico y horizontal no tienen asociado un flujo neto de volumen y, en este caso particular, el barotrópico tampoco. El transporte barotrópico incluye la capa de Ekman, el transporte barotrópico neto en la columna del agua a través de los límites de la caja, y el transporte en los triángulos de fondo. El transporte baroclínico se asocia a la circulación meridional de renovación vertical en la zona y el horizontal a la circulación de giro, incluyendo remolinos de mesoscala. Para cuantificar estos componentes para el transporte de volúmenes y de los trazadores químicos, la velocidad ortogonal (v) y la variable química correspondiente ($Prop$), se separan en (i) un valor medio para toda la sección ($\langle v \rangle$ y $\langle Prop \rangle$, respectivamente), (ii) un perfil baroclínico de valores lateralmente promediados en cada profundidad ($\langle v \rangle(z)$ y $\langle Prop \rangle(z)$), y (iii) las desviaciones laterales (anomalías) para cada par de estaciones y profundidad ($v'(x, z)$ y $Prop'(x, z)$). Por lo tanto,

$$v = \langle v \rangle + \langle v \rangle(z) + v'(x, z)$$

$$Prop = \langle Prop \rangle + \langle Prop \rangle(z) + Prop'(x, z) \quad (1)$$

Los transportes correspondientes se calculan como:

1. Componente barotrópico:

$$\rho_{S, T, P} \cdot \langle v \rangle \cdot \langle Prop \rangle \cdot \int L(z) dz \quad (2a)$$

2. Componente baroclínico:

$$\int \rho_{S, T, P} \cdot \langle v \rangle(z) \cdot \langle Prop \rangle(z) \cdot L(z) dz \quad (2b)$$

3. Componente horizontal:

$$\int \rho_{S, T, P} \cdot v'(x, z) \cdot Prop'(x, z) \cdot dz \cdot dx \quad (2c)$$

donde $L(z)$ es el ancho de la sección en cada profundidad y $\int L(z) dz$ es el área de la sección. El transporte de volumen se

2. Baroclinic component:

$$\int \rho_{S,T,P} \cdot \langle v \rangle(z) \cdot \langle Prop \rangle(z) \cdot L(z) dz \quad (2b)$$

3. Horizontal component:

$$\int \rho_{S,T,P} \cdot v'(x,z) \cdot Prop'(x,z) \cdot dz \cdot dx \quad (2c)$$

where $L(z)$ is the width of the section at each depth and $\int L(z) dz$ is the area of the section. Volume transport is expressed in Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), so density is not introduced in the calculations. The biogeochemical transports are given in kmol s^{-1} (10^3 mol s^{-1}).

Transports associated with each water mass are calculated as in Álvarez *et al.* (2004). The proportion of each water mass is multiplied by the geostrophic transport of each biogeochemical property. Positive values indicate an import into the MedBox and negative values an export out of it.

Sensitivity analysis

As described in section 3.3 of APSB, a sensitivity analysis was performed to assess the effect on the water mass distributions of the variability in the thermohaline and chemical properties of the source water types, as well as the effect of these changes on the transport estimations. One hundred perturbations were performed to assess the variability in the water mass and transports, and they revealed that the water mass distributions vary slightly when modifying their source characteristics. The results presented in the following sections regarding volume and biogeochemical transports correspond to the mean after 100 perturbations. The standard deviation of the solutions obtained after the 100 perturbations is taken as an estimation of the robustness of the calculations.

Results

Transport mechanisms

To properly assess and discuss the transport mechanisms (table 2) and the contribution of the different water masses (table 3) to the fluxes of non-conservative tracers, it is necessary to know about the structure of the volume transport (detailed description in section 5 of APSB). Figure 2 shows the components of the volume transport and highlights the most important features of the circulation. The formation of MW by entrainment of ENACWs into the high salinity core of MOW, its stabilization at intermediate depths, and its subsequent spreading into the North Atlantic are all reflected in the overturning circulation profile shown in figure 2a. Hence, the transports will be divided into an upper layer corresponding to the upper 500 dbar, an intermediate layer between 500 and 2000 dbar, and a deep layer below this depth. The water volume budget of the MedBox (table 3) shows that MW is produced at a

expresa en Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), de manera que la densidad no se introduce en los cálculos. Los transportes biogeoquímicos se expresan en kmol s^{-1} (10^3 mol s^{-1}).

Los transportes asociados a cada masa de agua se calculan igual que en Álvarez *et al.* (2004). La proporción de cada masa de agua se multiplica por el transporte geostrofico de cada variable biogeoquímica. Los valores positivos indican una importación hacia la MedBox y los negativos una exportación hacia fuera de ella.

Análisis de sensibilidad

Siguiendo la sección 3.3 de APSB, se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el efecto sobre las distribuciones de masas de agua de la variabilidad en las características termohalinas y químicas en la zona de origen de cada una de ellas y, finalmente, el efecto de estos cambios sobre los valores de transporte. Se realizaron 100 perturbaciones para determinar la variabilidad en las masas de agua y el transporte, y se vio que las distribuciones de masas de agua varían levemente al modificar sus características en la zona de origen. Los resultados que se presentan en las siguientes secciones sobre los transportes de volúmenes y biogeoquímicos corresponden al promedio obtenido después de 100 perturbaciones. La desviación estándar de las soluciones obtenidas después de las 100 perturbaciones se toma como un indicador de la robustez de los cálculos.

Resultados

Mecanismos de transporte

Para determinar y discutir correctamente los mecanismos de transporte (tabla 2) y la contribución de las diversas masas de agua (tabla 3) a los flujos biogeoquímicos no conservativos, es necesario conocer la estructura del transporte de volúmenes en la zona, la cual ha sido descrita a fondo en la sección 5 de APSB. La figura 2 muestra las componentes del transporte de volúmenes y destaca las características más importantes de la circulación en la región. La MW se forma como la mezcla de MOW de alta salinidad que sale por el Estrecho de Gibraltar y al hundirse arrastra ENACWs menos salinas hacia la profundidad, posteriormente se estabiliza a profundidades intermedias, y se dispersa en el Atlántico Norte. Estos procesos se reflejan en el perfil baroclínico de la circulación de renovación mostrado en la figura 2a; por consiguiente, los transportes serán divididos en los adscritos a la capa superior que corresponde a los primeros 500 dbar, una capa intermedia entre 500 y 2000 dbar y una capa profunda por debajo de esta profundidad. El balance total de volumen en la MedBox (tabla 3) muestra que el MW se produce con una tasa de $2.7 \pm 0.2 \text{ Sv}$, que provienen de la transformación de $2.5 \pm 0.2 \text{ Sv}$ de ENACWs y de $0.2 \pm 0.2 \text{ Sv}$ de AA.

La circulación horizontal a través de las paredes de la MedBox (fig. 2b) muestra la circulación anticiclónica característica de las latitudes medias del borde oriental del Atlántico Norte,

rate of 2.7 ± 0.2 Sv from the transformation of 2.5 ± 0.2 Sv of ENACWs and 0.2 ± 0.2 Sv of AA.

The horizontal circulation across the MedBox walls (fig. 2b) shows the expected anticyclonic circulation of the eastern boundary of the North Atlantic at mid-latitudes, with waters entering the MedBox across the West wall and leaving across the North and South walls. Figure 2b also shows the high eddy activity of the region and clearly marks the entry of the Azores Current through the Southwest wall at about $31.7\text{--}33.2^\circ\text{N}$ and its Countercurrent to the north.

As the MedBox region is open at the Strait of Gibraltar, the transports across the MedBox relate to the portion of the North Atlantic enclosed by the MedBox boundaries plus the Mediterranean Sea. The total transports calculated across the MedBox are shown in table 2. Nutrient salts, total alkalinity (TA), and total inorganic carbon (TIC) are exported to the North Atlantic, while O_2 is imported from the ocean interior. The main mechanism responsible for the nutrient export is the overturning circulation (table 2), since the barotropic export is small and the horizontal component implies import (table 2). The laterally averaged mean profiles of NO_3 and PO_4 (fig. 3a, c) show an upper layer depleted in nutrients (i.e., less nutrients than the section mean), whereas in the intermediate layer the difference with the section mean is very low. These

con aguas que entran en la MedBox a través de la pared occidental y salen de la MedBox a través de las paredes norte y sur. La figura 2b también muestra la gran actividad de mesoescala en la región y marca claramente la entrada de la Corriente de Azores, aproximadamente a $31.7\text{--}33.2^\circ\text{N}$ en la pared del sudoeste, y su Contracorriente en sentido contrario.

Los transportes a través de la MedBox se corresponden con la porción del Atlántico Norte enmarcado por los límites de la MedBox más el Mar Mediterráneo, ya que la caja MedBox está abierta en el Estrecho de Gibraltar. Los transportes totales a través de la MedBox se muestran en la tabla 2. Las sales nutrientes, la alcalinidad total (TA) y el carbono inorgánico total (TIC) se exportan hacia el Atlántico Norte, mientras que el O_2 se importa desde el interior del océano. El mecanismo principal responsable de la exportación de nutrientes es la circulación de renovación (tabla 2), ya que la contribución barotrópica a la exportación es pequeña, y el componente horizontal implica una importación (tabla 2). Los perfiles lateralmente promediados a lo largo de la MedBox de NO_3 y PO_4 (fig. 3a, c) muestran una capa superior agotada en nutrientes (es decir, valores más pequeños que la media de toda la MedBox), mientras que en la capa intermedia la diferencia con esta media es pequeña. Estos perfiles baroclínicos de propiedades químicas, combinados con sus correspondientes transportes

Table 2. Biogeochemical transport mechanisms across the MedBox. Plus/minus signs indicate error estimates. Positive values indicate a transport into the box. $1 \text{ kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$. Total alkalinity (TA) and inorganic carbon (TIC) transports are salinity corrected.

Tabla 2. Mecanismos de los transportes biogeoquímicos a través de la MedBox. Los símbolos más/menos indican el error de las estimaciones. Valores positivos indican un transporte hacia el interior de la caja. $1 \text{ kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$. Los transportes de alcalinidad (TA) y carbono inorgánico total (TIC) son independientes del transporte neto de sal.

| Transport (kmol s^{-1}) | NO_3 | PO_4 | SiO_2 | O_2 | TA | TIC |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------|
| Barotropic | -5 ± 1 | -0.3 ± 0.1 | -4 ± 2 | 11 ± 3 | 203 ± 5 | 152 ± 6 |
| Overturning/baroclinic | -43 ± 1 | -2.8 ± 0.1 | -23 ± 2 | 130 ± 7 | 73 ± 6 | -227 ± 5 |
| Horizontal | 18 ± 3 | 2.2 ± 0.2 | 12 ± 7 | 49 ± 25 | -307 ± 13 | -55 ± 12 |
| Total | -30 ± 3 | -1.0 ± 0.3 | -15 ± 7 | 189 ± 29 | -31 ± 16 | -130 ± 13 |

Table 3. Biogeochemical transports by water masses across the MedBox. Plus/minus signs indicate error estimates. Positive values indicate a transport into the box. $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $1 \text{ kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$. Total alkalinity (TA) and inorganic carbon (TIC) transports are salinity corrected.

Tabla 3. Transportes biogeoquímicos a través de la MedBox por masa de agua. Los símbolos más/menos indican el error de las estimaciones. Valores positivos indican un transporte hacia el interior de la caja. $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1 \text{ kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$. Los transportes de alcalinidad total (TA) y carbono inorgánico total (TIC) son independientes del transporte neto de sal.

| Water mass* | Volume (Sv) | NO_3 (kmol s^{-1}) | PO_4 (kmol s^{-1}) | SiO_2 (kmol s^{-1}) | O_2 (kmol s^{-1}) | TA (kmol s^{-1}) | TIC (kmol s^{-1}) |
|----------------|------------------|--|--|---|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Central Waters | 2.5 ± 0.2 | 8 ± 4 | 1.2 ± 0.3 | 7 ± 3 | 670 ± 47 | 6065 ± 567 | 5463 ± 530 |
| AA | 0.2 ± 0.2 | 7 ± 4 | 0.5 ± 0.3 | 4 ± 3 | 15 ± 35 | 249 ± 442 | 245 ± 416 |
| MW | -2.7 ± 0.2 | -45 ± 3 | -2.7 ± 0.3 | -26 ± 1 | -516 ± 45 | -6519 ± 544 | -6016 ± 499 |
| LSW | -0.02 ± 0.03 | 0 ± 1 | 0.0 ± 0.1 | 0 ± 2 | 9 ± 13 | 87 ± 71 | 93 ± 68 |
| LDW | -0.002 ± 0.1 | 0 ± 3 | -0.1 ± 0.2 | 1 ± 4 | 10 ± 33 | 118 ± 310 | 114 ± 290 |
| ISOW | 0.001 ± 0.01 | 0 ± 1 | 0.0 ± 0.1 | 0 ± 1 | 1 ± 3 | -31 ± 32 | -29 ± 30 |

* AA = Antarctic Intermediate Water, MW = Mediterranean Water, LSW = Labrador Sea Water, LDW = Lower Deep Water, and ISOW = Iceland-Scotland Overflow Water.

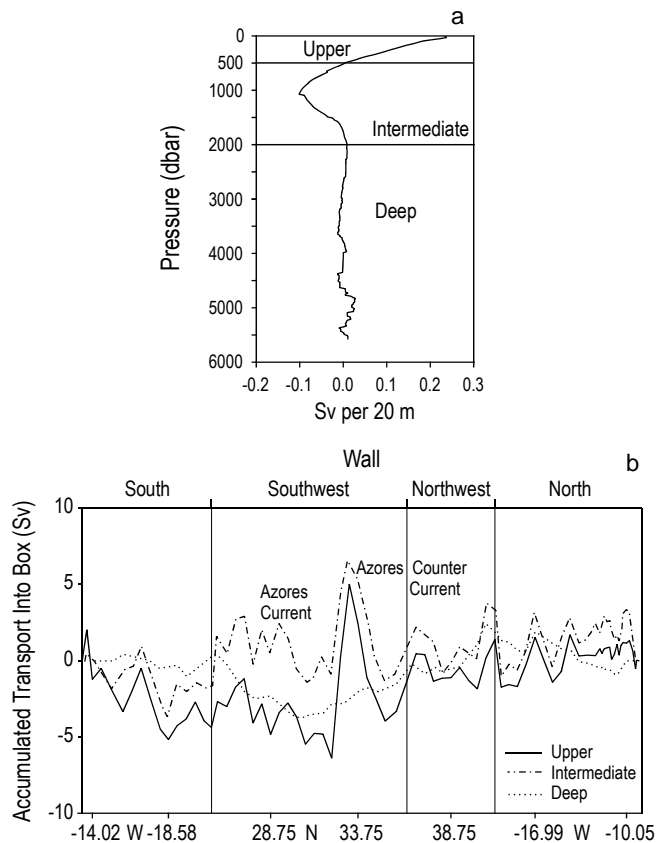


Figure 2. (a) Baroclinic and (b) horizontal volume transport for the MedBox. The horizontal transport is divided into three vertical layers shown in (a) and accumulated from zero at the African margin ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Positive (negative) values indicate a transport into (out of) the MedBox. Adapted from APSB.

Figura 2. Transporte de volumen baroclínico (a) y horizontal (b) en la MedBox. El transporte horizontal se divide en tres capas verticales mostradas en (a) que se acumulan a partir de cero en el margen africano ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Los valores positivos (negativos) indican transporte hacia dentro (fuera) de la MedBox. Figura adaptada de APSB.

profiles, when combined with the baroclinic volume transport (fig. 2a), yield the corresponding overturning transports. A large percentage of these transports occurs in the upper layer (fig. 4a, c). SiO_2 presents a different mean profile (fig. 3e): the upper 2300 dbar is depleted in SiO_2 compared with the section mean, while at deeper levels SiO_2 increases greatly due to the higher influence of deep waters with an Antarctic origin in the lower water column. The SiO_2 baroclinic transport profile (fig. 4e) shows an upper layer where SiO_2 is exported from the box in spite of depletion, and an intermediate layer where it is imported (figs. 2a, 3e, 4e). The overturning circulation at intermediate depths transports a relatively impoverished SiO_2 water out of the box, so it translates into an import of SiO_2 towards the MedBox.

Zonal anomalies in the chemical variables (fig. 3b, d, f, h, j, l) reflect horizontal differences around the corresponding mean profiles (fig. 3a, c, e, g, i, k). In the case of NO_3 and PO_4 , the lateral deviations in the upper layer (fig. 3b, d) reflect the

baroclinic volume transport (fig. 2a) proporcionan los transportes de renovación. Un porcentaje alto de estos transportes ocurre en la capa superior (fig. 4a, c). El SiO_2 presenta un perfil medio distinto al de NO_3 y PO_4 (fig. 3e): en los primeros 2300 dbar superiores el SiO_2 es menor que la media de toda la sección, mientras que en la capa más profunda el SiO_2 aumenta considerablemente debido a la mayor influencia de aguas profundas de origen antártico. El transporte de renovación o baroclínico de SiO_2 (fig. 4e) muestra una capa superior donde éste se exporta hacia el océano a pesar de presentar valores más bajos que la media de la sección, mientras que en la capa intermedia se importa (figs. 2a, 3e, 4e). La circulación de renovación a profundidades intermedias transporta aguas relativamente empobrecidas en SiO_2 hacia fuera de la caja, lo que se traduce en una importación de SiO_2 hacia la MedBox.

La distribución de las anomalías zonales de las variables químicas (fig. 3b, d, f, h, j, l) refleja diferencias horizontales en torno a los perfiles medios correspondientes (fig. 3a, c, e, g, i, k). Para el caso del NO_3 y PO_4 , las desviaciones laterales en la capa superior (fig. 3b, d) reflejan el contraste entre la MMW, empobrecida en nutrientes, y la ENACW subtropical, enriquecida en nutrientes, situadas hacia el sur y norte, respectivamente (ver fig. 7 en APSB). El mayor contraste ocurre en la capa intermedia, donde se encuentran la AA (al sur), rica en nutrientes, y la MW (al norte), pobre en los mismos. En el caso del SiO_2 , las diferencias mayores se encuentran en las capas intermedia y profunda (fig. 3f) debido al enriquecimiento en SiO_2 de la AA en comparación con la MW, y más abajo en las capas de LSW y LDW (fig. 7 en APSB) el bajo contenido de SiO_2 en la LSW predomina hacia el norte.

Combinando los transportes horizontales de volúmenes (fig. 2b) y las anomalías de nutrientes (fig. 3b, d, f) se pueden explicar los transportes horizontales correspondientes (fig. 4b, d, f). Según lo esperado, las contribuciones más grandes al transporte horizontal de NO_3 y PO_4 ocurren en la capa intermedia (fig. 4b, d). Los picos y los valles marcados en las capas superior e intermedia reflejan la presencia de remolinos y de la Corriente de Azores y su Contracorriente cerca de 33.75°N (fig. 2b y paneles de la derecha en fig. 4). La figura 4(a, c, e) muestra la integral de los transportes horizontales en la vertical, que se compara con la contribución baroclínica. En los casos del NO_3 y el PO_4 (fig. 4a, c), la circulación baroclínica en las capas superiores produce una exportación hacia fuera de la caja, mientras que en la capa intermedia, la circulación horizontal es la principal contribuyente a la importación de NO_3 y PO_4 . Para el SiO_2 (fig. 4e), la circulación de renovación es la principal contribuyente a su importación en la capa intermedia incluso sobrepasando la contribución horizontal. El transporte horizontal de SiO_2 en la capa profunda es significativo y negativo mientras que para el NO_3 y PO_4 el transporte es muy pequeño.

El O_2 es la única variable química importada hacia la Med-Box desde el Atlántico Noreste, con una tasa de $189 \pm 29 \text{ kmol s}^{-1}$. Todas las componentes de los transportes importan O_2 .

contrast between the nutrient-poor MMW and the nutrient-rich subtropical ENACW to the south and to the north, respectively (check fig. 7 in APSB). The largest contrast occurs in the intermediate layer, where AA (to the south) is nutrient-rich, whereas MW (to the north) is nutrient-poor. In the case of SiO_2 , large differences are found in the intermediate and deep layers (fig. 3f), showing the relative SiO_2 enrichment of AA compared with MW, and deeper in the LSW and LDW layer (fig. 7 in APSB) the low SiO_2 content in LSW predominates to the north.

The horizontal transports (fig. 4b, d, f) result from multiplying the horizontal volume transport (fig. 2b) by the nutrient anomalies (fig. 3b, d, f). As expected, the largest contributions to the NO_3 and PO_4 horizontal transport occur in the intermediate layer (fig. 4b, d). The marked peaks and troughs in the upper and intermediate layer reflect the presence of eddies and the Azores Current and Countercurrent near 33.75°N (fig. 2b, right panels in fig. 4). Figure 4(a, c, e) presents the integrated horizontal transports compared with the baroclinic contribution. In the case of NO_3 and PO_4 (fig. 4a, c), the baroclinic circulation in the upper layers drives the export out of the box, whereas in the intermediate layer, the horizontal circulation is the main contributor to the import of NO_3 and PO_4 into the box. For SiO_2 (fig. 4e), the overturning circulation greatly contributes to the import in the intermediate layer, even surpassing the horizontal contribution. The SiO_2 horizontal transport in the deep layer is significant and negative, while for NO_3 and PO_4 the transport is very small.

The only chemical parameter imported into the MedBox from the eastern North Atlantic is O_2 ($189 \pm 29 \text{ kmol s}^{-1}$). All the components import O_2 (table 2), but the overturning circulation is the main mechanism driving the flux towards the MedBox. The mean O_2 profile shows a layer centred around 1000 dbar, impoverished in O_2 compared with the section mean (fig. 3g) due to the low O_2 content of both AA and MW. The O_2 horizontal anomalies (fig. 3h) show the contrasting O_2 content at 1000 dbar, indicating that MW is richer in O_2 than AA. The baroclinic and horizontal transport profiles are practically mirror images (fig. 4g). The highest O_2 import is due to the overturning circulation in the intermediate layer, whereas in the upper layer the overturning circulation drives an export.

The volume transport across the MedBox was constrained to zero, translating into an outward salinity transport of $-2.98 \pm 0.3 \text{ Sv psu}$ and a freshwater input of $0.085 \pm 0.009 \text{ Sv}$ (table 3 in APSB). Since TA and TIC are chemical properties directly correlated with salinity, the salinity imbalance translates into a TA and TIC export. Therefore, a constant barotropic correction is applied to constrain the salinity transport to zero. Here we present the results for TA and TIC after this correction, representing salinity-independent transports for these variables. This correction is important for the TA and TIC budgets to separate the imbalances due to the salinity budget from those due to the biogeochemical processes.

The mean profiles of TA and TIC integrated along the MedBox walls (fig. 3i, k) show an upper layer with more TA

hacia la MedBox (tabla 2), aunque la circulación de renovación es el mecanismo principal que conduce el flujo hacia la MedBox. El perfil medio de O_2 muestra una capa centrada alrededor de 1000 dbar empobrecida en O_2 en comparación con la media de toda la sección (fig. 3g) debido al bajo contenido de O_2 en AA y MW. Las anomalías horizontales de O_2 (fig. 3h) muestran un contraste fuerte en el contenido en O_2 en torno a los 1000 dbar, indicando que MW es más rica en O_2 que AA. Los perfiles del transporte baroclínico y horizontal son prácticamente imágenes especulares (fig. 4g). La mayor importación de O_2 se debe a la circulación de renovación en la capa intermedia, mientras que en la capa superior la circulación de renovación provoca una exportación.

El transporte de volumen a través de la MedBox se forzó a cero lo cual se traduce en una exportación de sal de $-2.98 \pm 0.3 \text{ Sv psu}$ y una entrada de agua dulce de $0.085 \pm 0.009 \text{ Sv}$ (tabla 3 en APSB). Debido a que TA y TIC son variables químicas correlacionadas directamente con la salinidad, el desbalance en ésta se traduce en una exportación de TA y TIC. Por lo tanto, se aplica una corrección barotrópica constante para forzar el transporte de salinidad a cero en toda la MedBox. En este trabajo presentamos los resultados del transporte de TA y TIC con esta corrección, representando el transporte de estas variables de manera independiente de la salinidad. Esta corrección es importante para separar los desbalances de TA y de TIC debidos a la sal y los debidos a procesos biogeoquímicos.

Los perfiles medios de TA y de TIC (fig. 3i, k) a lo largo de la MedBox muestran una capa superior con más TA y menos TIC que la media de la sección debido a la actividad biogeoquímica; también se ve un máximo en ambos a 1000 dbar debido a la influencia de MW y un mínimo alrededor de 2000 dbar asociado a LSW, y finalmente un aumento por debajo de 3000 dbar. La figura 4(i) muestra claramente como la contribución principal a la exportación de TA hacia el Atlántico se debe al transporte horizontal de TA en las capas superiores e intermedias (fig. 4j), mientras que la circulación baroclínica introduce TA en la caja, principalmente en la capa superior. En el caso del TIC, el principal mecanismo responsable de la exportación es la circulación de renovación (tabla 2, fig. 4k). Esto se debe a que la capa superior empobrecida en TIC (fig. 3k) se introduce en la MedBox, lo cual se traduce en una exportación de TIC (fig. 4k).

Masas de agua y distribución regional de transportes

La tabla 3 muestra la contribución de cada masa de agua a los transportes de volumen y biogeoquímicos. El transporte de volumen atribuido a las aguas profundas es insignificante según las imposiciones del modelo inverso; por lo tanto, su contribución al transporte de nutrientes, O_2 , TA y TIC son pequeños y con una gran incertidumbre debido a los ajustes del modelo inverso. La formación de MW con una tasa de $2.7 \pm 0.2 \text{ Sv}$ y su transporte hacia el Atlántico Norte explica la exportación de nutrientes, TA y de TIC desde la MedBox hacia el Atlántico Norte. Como es de esperarse, el O_2 se comporta de

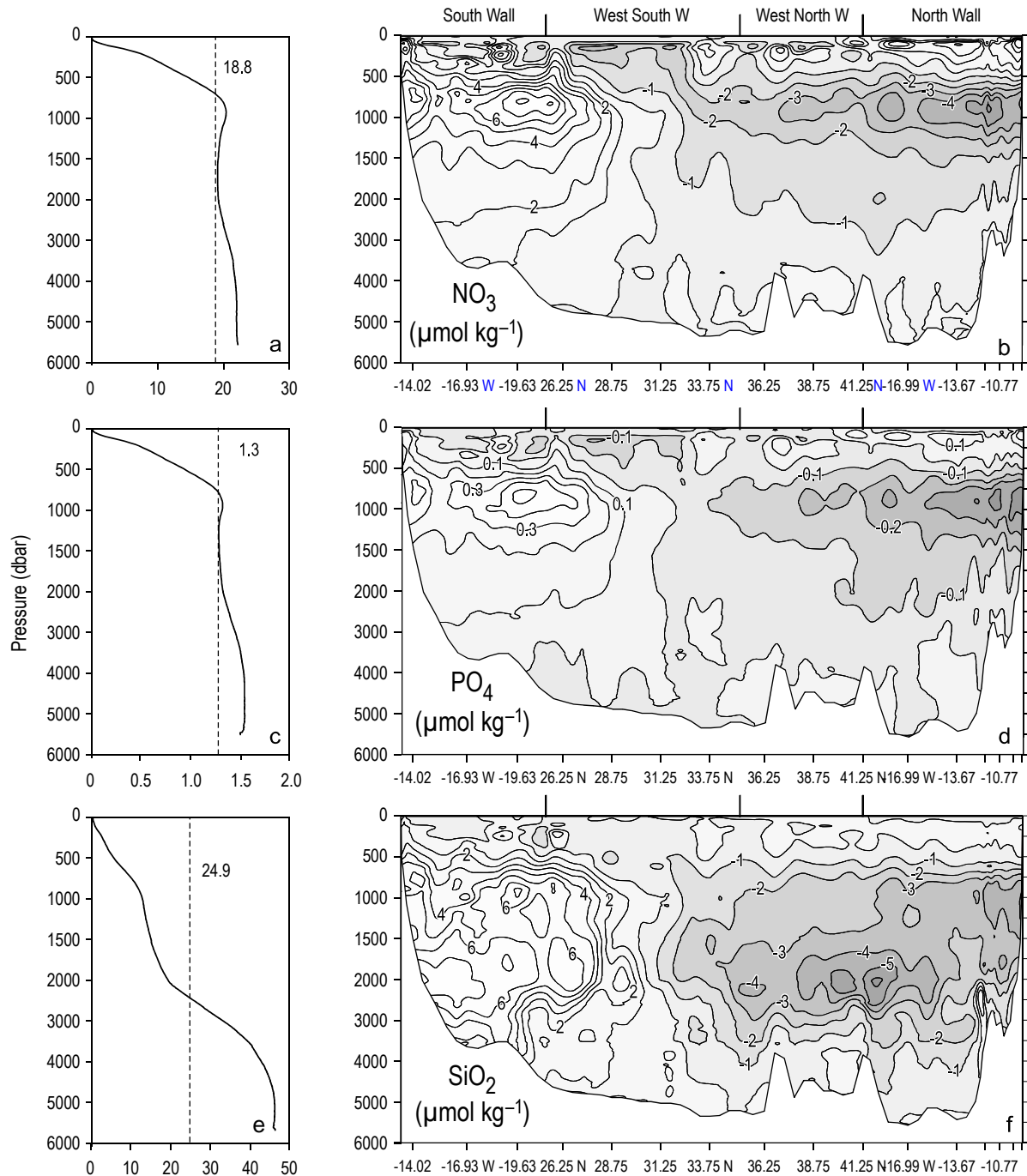


Figure 3. Transport components of (a, b) nitrate (NO_3), (c, d) phosphate (PO_4), (e, f) silicate (SiO_2), (g, h) dissolved oxygen (O_2), (i, j) total alkalinity (TA), and (k, l) total inorganic carbon (TIC), according to the equation $Prop = \langle \overline{Prop} \rangle + \langle Prop \rangle(z) + Prop'(x, z)$. The left panels (a, c, e, g, i, and h) show the zonally averaged profiles along with the corresponding section mean values ($\langle \overline{Prop} \rangle$); the baroclinic profile ($\langle Prop \rangle(z)$) is the deviation from the mean value as a function of pressure. The right panels (b, d, f, h, j, and l) show the vertical distribution of anomalies ($Prop'(x, z)$). The units are $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Note the different scale for the upper 2000 dbar.

Figura 3. Componentes de los transportes de nitrato (NO_3) (a, b), fosfato (PO_4) (c, d), silicato (SiO_2) (e, f), oxígeno (O_2) (g, h), alcalinidad total (TA) (i, j) y carbono inorgánico total (TIC) (k, l), según la ecuación $Prop = \langle \overline{Prop} \rangle + \langle Prop \rangle(z) + Prop'(x, z)$. En los paneles izquierdos (a, c, e, g, i y h), se muestran los perfiles promediados zonalmente a lo largo de la sección, junto con la correspondiente media total de la sección ($\langle \overline{Prop} \rangle(z)$); el perfil baroclínico ($\langle Prop \rangle(z)$) es la diferencia entre la media de la sección y el perfil vertical medio. En los paneles derechos (b, d, f, h, j y l) se muestra la distribución vertical de las anomalías ($Prop'(x, z)$). Las unidades son $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Observen la diferente escala en los primeros 2000 dbar.

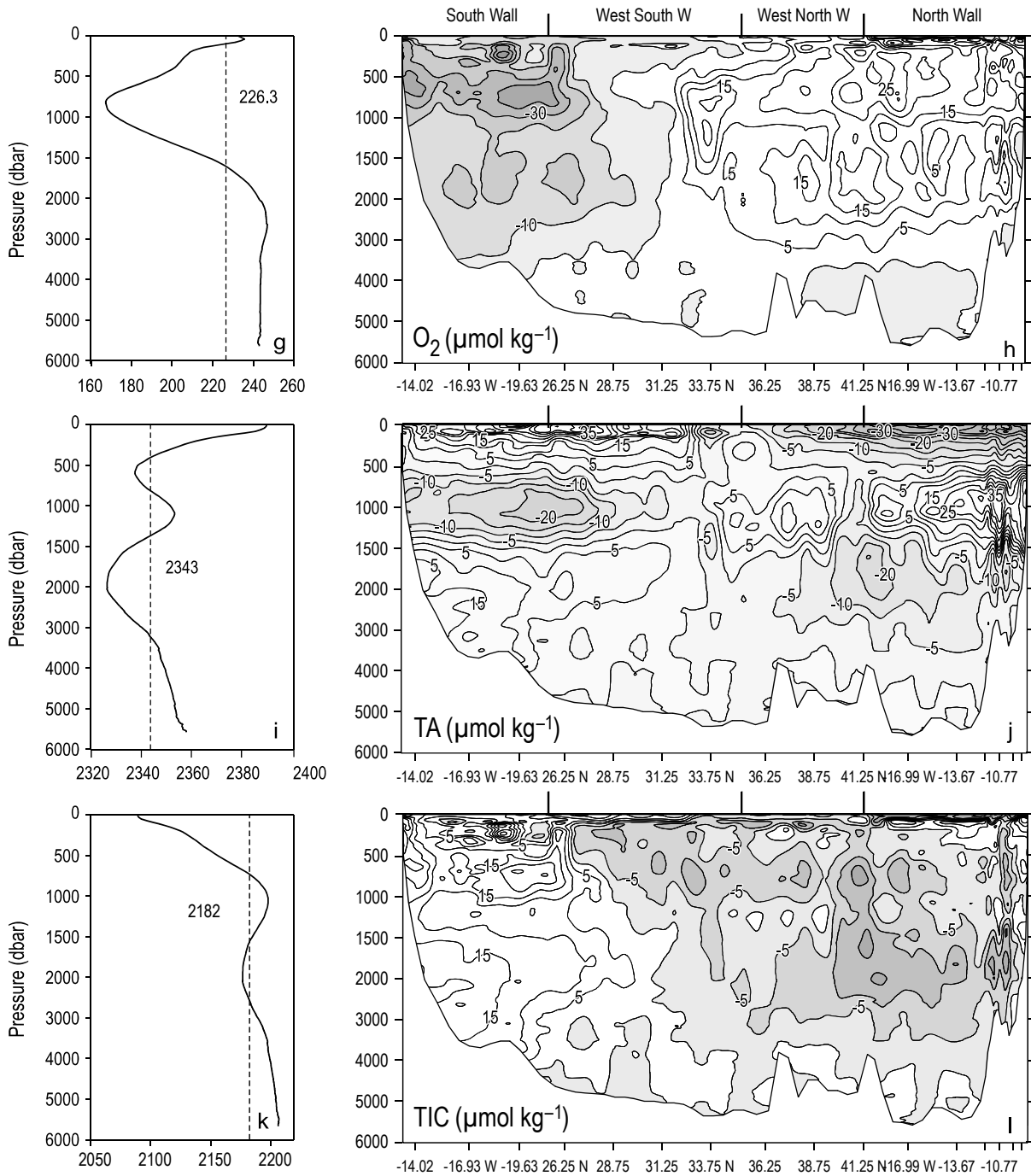


Figure 3 (Cont.)

and less TIC than the section mean due to biogeochemical activity, a maximum for both at 1000 dbar due to the influence of MW, a minimum around 2000 dbar associated with LSW, and an increase below 3000 dbar. Figure 4(i) clearly shows the main contributions of the horizontal circulation in the upper and intermediate layers (fig. 4j) to the export of TA from the MedBox, while the baroclinic circulation introduces TA within the box, mainly through the upper layer. In the case of TIC, the overturning circulation is the main mechanism responsible for export (table 2, fig. 4k): TIC-poor waters of the upper layer

manera opuesta: la importación de ENACWs y AA contribuye a la ventilación de la MedBox.

Las distribuciones laterales y verticales de los transportes de parámetros químicos están moduladas por el correspondiente transporte de volumen en cada capa y a través de cada pared (fig. 5). Por lo tanto, es útil describir brevemente la circulación de cada masa de agua por capas y paredes. En la capa superior solamente se transportan ENACWs (fig. 5a), entrando en la caja a través de la pared occidental. La circulación en la capa intermedia (fig. 5b) demuestra que 85% del MW formada

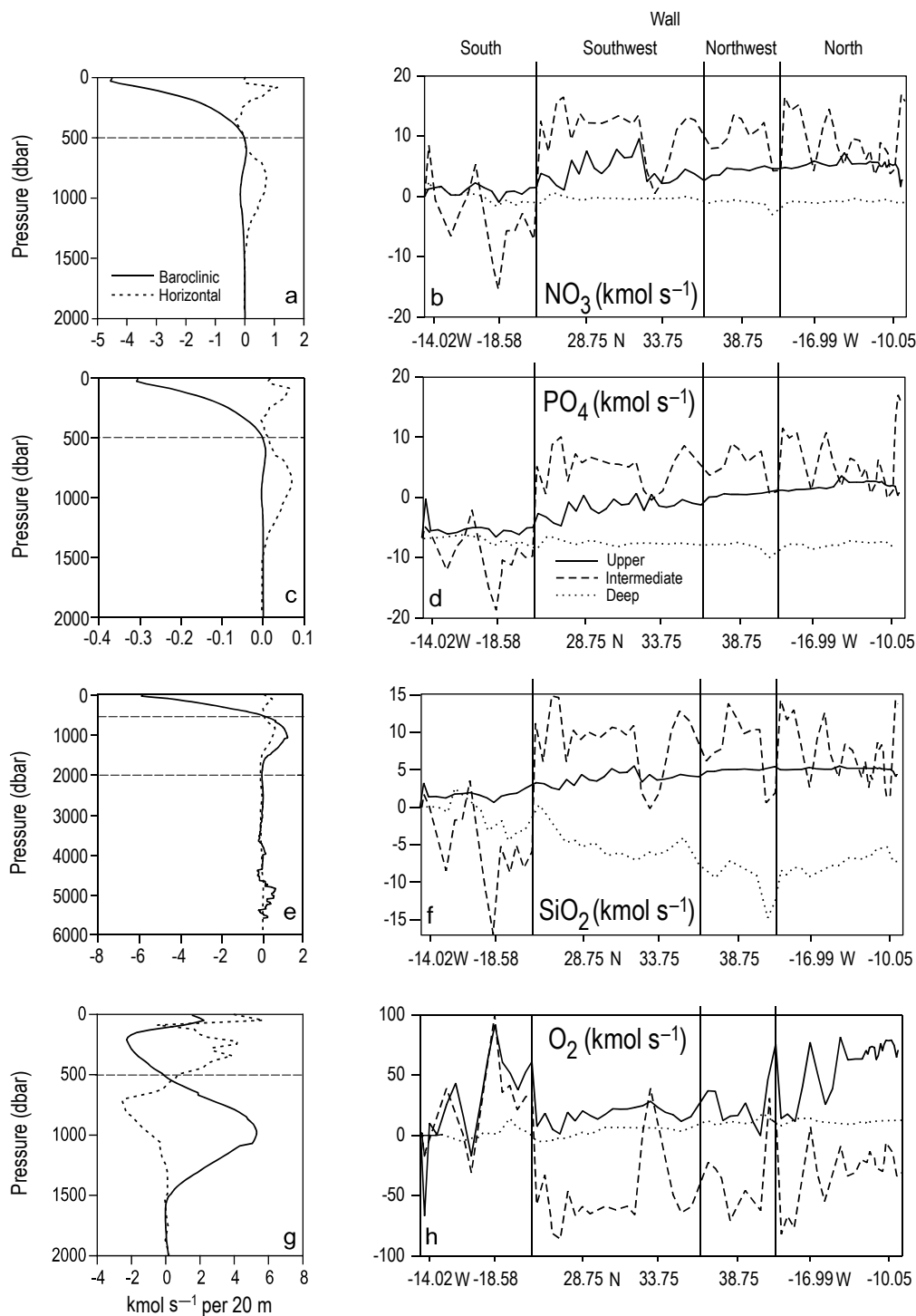


Figure 4. The left panels (a, c, e, g, i, and k) show the baroclinic and zonally integrated horizontal transport, and the right panels (b, d, f, h, j, and l) show the horizontal transport across the MedBox for (a, b) nitrate (NO_3), (c, d) phosphate (PO_4), (e, f) silicate (SiO_2), (g, h) dissolved oxygen (O_2), (i, j) total alkalinity (TA), and (k, l) total inorganic carbon (TIC). The horizontal transport is divided into three vertical layers as in figure 2a and accumulated from zero at the African margin ($\text{kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$). Positive (negative) values indicate a transport into (out of) the MedBox. Note the different vertical scale for (e).

Figura 4. Los paneles izquierdos (a, c, e, g, i y k) muestran el transporte baroclinico y el transporte horizontal zonalmente integrado, y los paneles derechos (b, d, f, h, j y l) muestran el transporte horizontal a través de MedBox de (a, b) nitrato (NO_3), (c, d) fosfato (PO_4), (e, f) silicato (SiO_2), (g, h) oxígeno disuelto (O_2), (i, j) alcalinidad total (TA), y (k, l) carbono inorgánico total (TIC). El transporte horizontal se divide en tres capas verticales como en la figura 2a y se acumula a partir de cero en el margen africano ($\text{kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$). Los valores positivos (negativos) indican transporte hacia dentro (fuera) de la MedBox. Observe la escala vertical distinta en el panel (e).

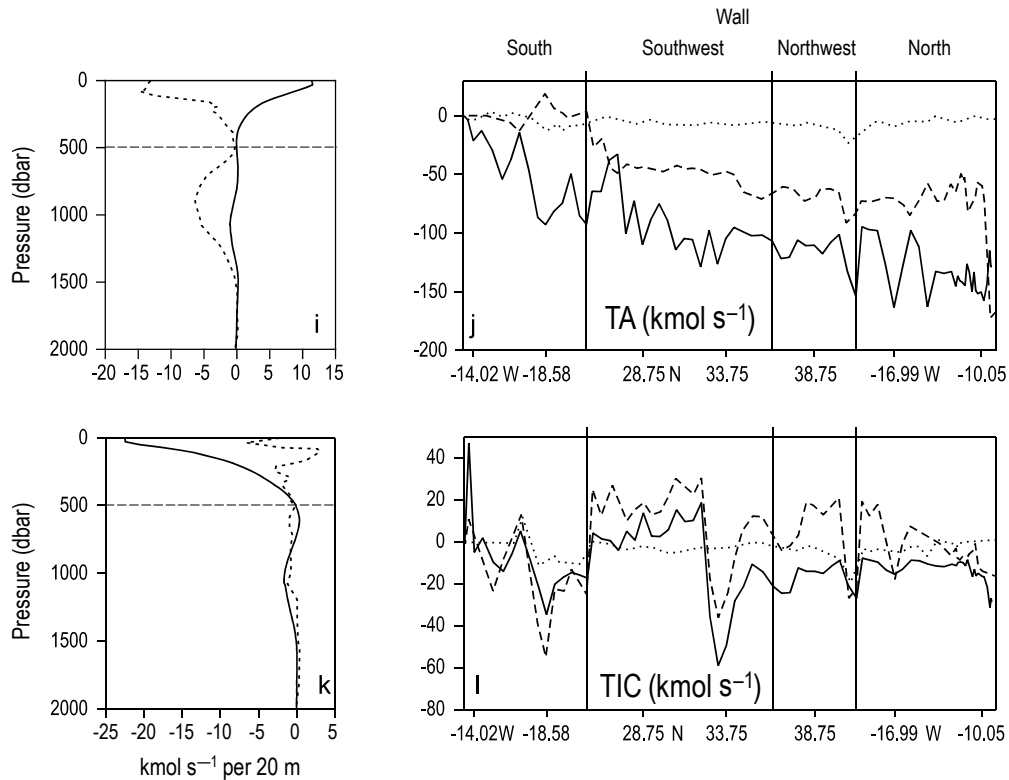


Figure 4 (Cont.)

(fig. 3k) are imported into MedBox, which translates into an export of TIC (fig. 4k).

Water masses and regional distribution of transports

Table 3 shows the water mass contribution to the volume and chemical transports. Deep waters have a negligible volume transport as imposed by the inverse model. Therefore, their contributions to the nutrient, O_2 , TA, and TIC transports are small but with large uncertainties mainly due to the inverse analysis setting. The formation of MW at a rate of 2.7 ± 0.2 Sv and its transport into the North Atlantic account for an export of nutrients, TA, and TIC from the MedBox into the North Atlantic. As expected, O_2 shows an opposite behaviour: the import flux of ENACWs and AA contributes to the ventilation of the MedBox.

The lateral and vertical distributions of the transports of chemical parameters are modulated by the corresponding volume transport in each layer and across each wall (fig. 5). It is thus useful to describe briefly the water mass circulation by layers and walls. In the upper layer only ENACWs are transported (fig. 5a), entering the box across the West wall. The circulation in the intermediate layer (fig. 5b) shows that 85% of the MW formed within the box flows northwards near the Iberian margin; small amounts flow out of the box across the Southwest and South walls. Regarding AA, 1 Sv enters the box in the intermediate layer across the Southwest wall (fig. 5b),

dentro de la MedBox fluye fuera de la zona hacia el norte cerca del margen ibérico; el resto atraviesa la caja a través de la pared sudoeste y sur. Con respecto al AA, 1 Sv entra en la caja en la capa intermedia a través de la pared del sudoeste (fig. 5b), mientras que -0.7 Sv salen de la caja por la pared del sur. Tal y como ya se comentó, 0.2 Sv de AA se transforman en MW (tabla 3). La figura 5c muestra la circulación ciclónica profunda en la cuenca ibérica, con aguas que entran en el área por el sudoeste y fluyen hacia fuera en el norte: 0.3 Sv atraviesan la pared del sur y continúan hacia el norte incorporando 1.9 Sv que cruzan la pared oeste. Finalmente -1.9 Sv fluyen hacia fuera de la caja hacia el norte.

La importación de nutrientes en la capa superior a través de la pared occidental sobrepasa la pérdida de nutrientes en esta capa a través de las paredes de norte y sur (fig. 5d, g, j). En la capa profunda se importan nutrientes (fig. 5f, i, l), principalmente debido a LDW. La suma de ambas contribuciones es superada por la exportación en la capa intermedia (fig. 5e, h, k), donde la salida de MW a través de las paredes norte y oeste es la principal responsable de la exportación de nutrientes hacia el Atlántico Norte. El oxígeno se importa hacia la MedBox desde el Atlántico Norte (tabla 2), principalmente debido al transporte de ENACWs en la capa superior (fig. 5m, tabla 3). Las aguas profundas también contribuyen a la importación de O_2 (fig. 5o, tabla 3), mientras que la circulación en la capa intermedia lo exporta principalmente con MW (fig. 5n, tabla 3).

while -0.7 Sv leaves the box through the South wall. As previously noted, 0.2 Sv is transformed into MW (table 3). Figure 5c shows the deep cyclonic circulation in the Iberian basin, with waters entering the area from the southwest and flowing out to the north: 0.3 Sv flows across the South wall into the box and continues northwards incorporating 1.9 Sv crossing the West wall. Finally, -1.9 Sv flows out of the box northwards.

The import of nutrients in the upper layer across the West walls surpasses the loss of nutrients in this layer across the North and South walls (fig. 5d, g, j). In the deep layer, nutrients are imported (fig. 5f, i, l), mainly by LDW. The sum of both import values is overcome by the export in the intermediate layer (fig. 5e, h, k), where the export of MW across the North and West walls is mainly responsible for the export of nutrients into the North Atlantic. Oxygen is imported into the MedBox from the North Atlantic (table 2), mainly due to the upper layer transport of ENACWs (fig. 5m, table 3). Deep waters also contribute to O_2 import (fig. 5o, table 3), whereas the circulation in the intermediate layer exports O_2 mainly with MW (fig. 5n, table 3).

Each water mass has a different salinity according to the air-sea forcing at its formation area. Salinity, along with other physical and biological factors, determines the final TA and TIC of the source water types (table 1). Although the total salinity transport across the MedBox is constrained to zero, there are volume and salinity transports across the MedBox associated with each water mass and, accordingly, a TA and TIC transport subject to large uncertainties (table 3). As expected, MW is the main water mass responsible for the TA and TIC export, not balanced by the import of ENACWs.

The lateral TA and TIC transports of the different water masses through the different layers and walls (fig. 5p-r, s-u) also resemble the corresponding volume transport (fig. 5a-c). The main transport of TA and TIC out of the box occurs in the intermediate layer (fig. 5q, t) across the North and South walls; the transport across the North wall is ascribed to the transport of MW and ENACWs, and across the South wall to ENACWs and AA, with minor contributions from MW, LSW, and LDW. This intermediate export is not exceeded by the import in the upper and deep layers.

Discussion

Nutrient, O_2 , TA, and TIC transports were evaluated across the MedBox in the eastern North Atlantic. The velocity field was estimated using an inverse method and the water mass structure was studied by an OMP mixing analysis (APSB).

The MedBox region (oceanic region between the MedBox boundaries and the Strait of Gibraltar) plus the Mediterranean Sea export nutrients into the adjacent North Atlantic at rates of -30 ± 3 , -1.0 ± 0.3 , and -15 ± 7 kmol s^{-1} for NO_3 , PO_4 , and SiO_2 , respectively. The TA and TIC transports were corrected for salinity transport; they are exported into the North Atlantic at rates of -31 ± 16 and -130 ± 13 kmol s^{-1} , respectively. However, O_2 is imported into the MedBox region from the

Cada masa de agua tiene una salinidad característica según el forzamiento aire-océano en su momento y área de formación. La salinidad, junto con otros factores físicos y biológicos, determina el contenido final de TA y TIC de los tipos de agua de origen (tabla 1). Aunque el transporte total de salinidad a través de la MedBox se fuerza a cero, existen un transporte de volumen y uno de salinidad asociados a cada masa de agua y, por consiguiente, un transporte de TA y TIC que lleva asociada una gran incertidumbre (tabla 3). Según lo esperado, MW es la masa principal de agua responsable de la exportación de TA y TIC, la cual no es compensada por la importación asociada a las ENACWs.

La distribución del transporte de TA y TIC asociado a las diversas masas de agua por pared y capa de agua (fig. 5p-r, s-u) se asemeja su transporte de volumen correspondiente (fig. 5a-c). La exportación más importante de TA y TIC hacia fuera de la caja ocurre en la capa intermedia (fig. 5q, t) a través de las paredes norte y sur, a través de la pared norte se atribuye al transporte de MW y ENACWs, y a través de la pared sur a ENACWs y AA con contribuciones de menor importancia de MW, LSW y LDW. La exportación en el nivel intermedio no es excedida por la importación en las capas superior y profunda.

Discusión

En este trabajo se evaluaron los transportes de nutrientes, oxígeno disuelto, carbono inorgánico total y alcalinidad a través de la MedBox en el Atlántico Norte. El campo de velocidades fue estimado usando un método inverso y la estructura de masas de agua se estudió mediante un análisis de mezcla OMP (APSB).

La región de MedBox (región oceánica entre las paredes de la MedBox y el Estrecho de Gibraltar), junto con el Mar Mediterráneo, exportan nutrientes hacia el Atlántico Norte adyacente, con tasas de -30 ± 3 , -1.0 ± 0.3 y -15 ± 7 del kmol s^{-1} para el nitrato, fosfato y silicato, respectivamente. Los transportes de TA y de TIC son independientes del transporte neto de salinidad, se exportan hacia el Atlántico Norte con tasas de -31 ± 16 y -130 ± 13 kmol s^{-1} para TA y TIC, respectivamente. Sin embargo, el O_2 se importa hacia la MedBox desde el Atlántico Norte a una tasa de 189 ± 29 kmol s^{-1} . Estos valores señalan un comportamiento heterotrófico de la región según lo evaluado en el balance de carbono y nitrógeno orgánico e inorgánico en la región MedBox (Álvarez y Álvarez-Salgado 2007).

Las ENACWs, con niveles bajos de nutrientes y TIC pero alto contenido de O_2 , se transportan en la capa superior de la región y son arrastradas por la MOW hacia profundidades intermedias para formar MW, que es finalmente exportada hacia el Atlántico Norte, con niveles de nutrientes y TIC más altos pero una menor concentración de O_2 . La circulación de renovación debida a la formación de MW dentro de la región MedBox es el principal mecanismo responsable de la exportación de carbono antropogénico (APSB). En este trabajo, también se ha determinado que ésta es el principal mecanismo controlador de la exportación de nutrientes y TIC y

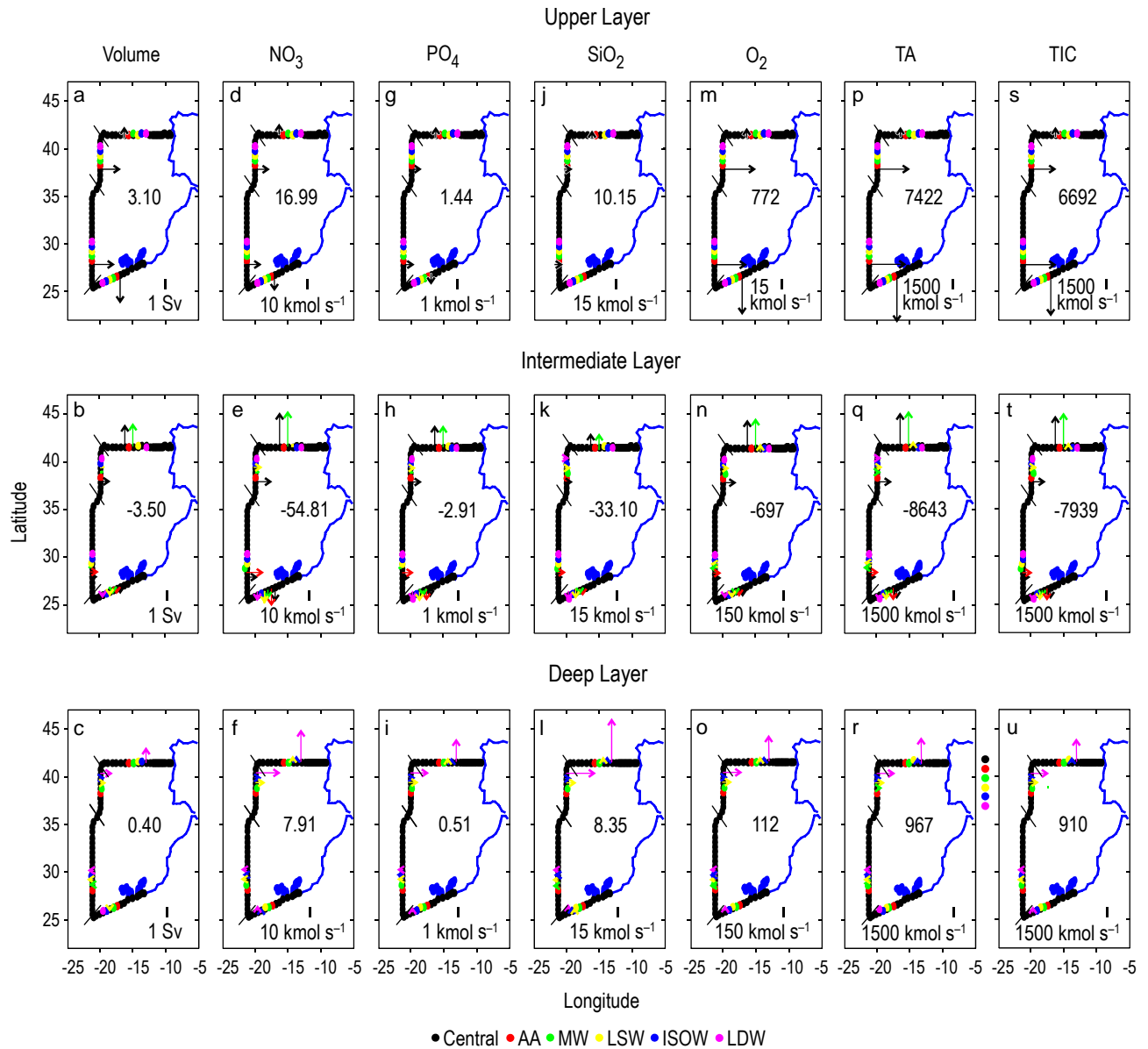


Figure 5. From left to right, water mass contributions to the transport of (a, b, c) volume, (d, e, f) nitrate (NO_3), (g, h, i) phosphate (PO_4), (j, k, l) silicate (SiO_2), (m, n, o) dissolved oxygen (O_2), (p, q, r) total alkalinity (TA), and (s, t, u) total inorganic carbon (TIC) across the North, Northwest, Southwest, and South walls of the MedBox (see fig. 1), divided into three vertical layers shown in figure 2a: upper layer, less than 500 dbar; intermediate layer, between 500 and 2000 dbar; and deep layer, below 2000 dbar ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $\text{kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$). Water mass acronyms are AA for diluted Antarctic Intermediate Water, MW for Mediterranean Water, LSW for Labrador Sea Water, ISOW for Iceland-Scotland Overflow Water, and LDW for Lower Deep Water. The total transport for each layer across the MedBox is given in the centre of the corresponding property plot.

Figura 5. De izquierda a derecha, contribuciones de las masas de agua al transporte de (a, b, c) volumen, (d, e, f) nitrato (NO_3), (g, h, i) fosfato (PO_4), (j, k, l) silicato (SiO_2), (m, n, o) oxígeno disuelto (O_2), (p, q, r) alcalinidad total (TA) y (s, t, u) carbono inorgánico total (TIC) a través de las paredes norte, noroeste, sudoeste y sur de la MedBox (ver fig. 1), divididas en las tres capas verticales mostradas en la figura 2a: nivel superior, menos de 500 dbar; nivel intermedio, entre 500 y 2000 dbar; y nivel profundo, por debajo de 2000 dbar ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $\text{kmol s}^{-1} = 1000 \text{ mol s}^{-1}$). Los acrónimos de las masas de agua son AA para el Agua Intermedia Antártica diluida, MW para el Agua Mediterránea, LSW para el Agua del Mar de Labrador, ISOW para el Agua del Desbordamiento de los Mares de Islandia-Escocia y LDW para el Agua Profunda. El transporte total en cada capa a través de la MedBox se da en el centro del panel correspondiente.

North Atlantic at a rate of $189 \pm 29 \text{ kmol s}^{-1}$. These values indicate a heterotrophic behaviour of the region as confirmed by the organic and inorganic carbon and nitrogen budgets for the MedBox region (Álvarez and Álvarez-Salgado 2007).

ENACWs, with a low nutrient and TIC content but a high O_2 concentration, are transported into the upper layer of the

de la importación de O_2 desde el Atlántico Norte adyacente. Por otro lado, el transporte de TA está controlado por la circulación horizontal de gran escala dentro de la región, debido a las altas diferencias horizontales en TA, por un lado cerca del margen ibérico MW con alta TA y, cerca de Canarias, AA con baja TA.

region and entrained by MOW to intermediate depths to form MW and finally exported into the North Atlantic, with a higher nutrient and TIC content but lower O₂ concentration. The overturn circulation due to MW formation within the MedBox region was found to be the major mechanism responsible for the export of anthropogenic carbon (APSB). Here, it was also found to be the dominant mechanism behind the nutrient and TIC export and the O₂ import from the adjacent North Atlantic. On the other hand, the TA transport was controlled by the large-scale horizontal circulation within the region due to the contrasting TA horizontal differences between the high TA of MW, detected mainly near the Iberian margin, and the low TA of AA, detected near the Canary Islands.

The vertical and lateral contribution of water masses to the chemical transports was also assessed. As expected, the regional distribution of the chemical transports is modulated by the corresponding volume transports. The contribution of deep waters to the transports is negligible as the circulation was constrained to have no deep water (LSW, LDW, or ISOW) formation within the MedBox (APSB). The main contribution to the import transport of nutrients, TA, TIC, and O₂ is ascribed to the ENACWs through the upper layer of the MedBox West wall, whereas in the intermediate layer of the Iberian margin the export of MW is the main contributor to the chemical transports out of the MedBox region.

The MW spreading in the North Atlantic has important implications for the heat and salinity budgets in this basin (Daniault *et al.* 1994, Pollard *et al.* 1996), and for the warm-to-cold water transformation in the Nordic Seas (McCartney and Mauritzen 2001). Ocean circulation models attempt to study and model the complicated formation and spreading mechanism of MW (e.g., New *et al.* 2001, Papadakis *et al.* 2003). The underlying physics in any biogeochemical model is crucial to reproduce the current carbon cycle or predict changes due to global change (Doney 1999, Doney *et al.* 2004). Unfortunately, marginal seas such as the Mediterranean are poorly considered in global carbon models due to their small relevance in comparison to the ventilation of the deep ocean, where most of the models differ and diverge from the real ocean (e.g., Doney *et al.* 2004). The series of works published by the authors (APSB, Álvarez and Álvarez-Salgado 2007) and the current manuscript point to the relevance of MW formation in biogeochemical cycles and constitute a benchmark for any global carbon model trying to reproduce the biogeochemical implications of MW formation and spreading in the eastern North Atlantic.

Acknowledgements

The first author was funded by a postdoctoral fellowship from the European Social Fund CSIC I3P program. Financial support was provided by the Spanish Ministry for Science and Technology (grant ORCASEX, RYC-2006-001836, Ramón y Cajal program). This work is a contribution to CAIBEX (MEC, CTM2007-66408-C02-01/MAR).

También se determinó la contribución vertical y lateral de las masas de agua a los transportes químicos. Según lo esperado, la distribución regional de los transportes químicos está modulada por los correspondientes transportes de volumen. La contribución de aguas profundas a los transportes netos es insignificante, ya que se forzó la circulación dentro de la Med-Box para que no hubiera formación de aguas profundas (LSW, LDW o ISOW) (APSB). La contribución principal al transporte de importación de nutrientes, TA, TIC y O₂ se atribuye a las ENACWs en la capa superior de la pared occidental de MedBox, mientras que en la capa intermedia del margen ibérico la exportación de MW es el principal contribuyente a los transportes químicos hacia fuera de la región de MedBox.

La propagación de MW en el Atlántico Norte tiene implicaciones importantes en los balances de calor y salinidad a nivel de cuenca (Daniault *et al.* 1994, Pollard *et al.* 1996), y en la transformación de aguas calientes a frías que ocurre en los mares nórdicos (McCartney y Mauritzen 2001). Los modelos generales de circulación del océano intentan estudiar y modelar el complicado mecanismo de formación y propagación de la MW (e.g., New *et al.* 2001, Papadakis *et al.* 2003). El modelo físico subyacente en cualquier modelo biogeoquímico es crucial para reproducir el ciclo del carbono actual y predecir sus cambios debidos al cambio global (Doney 1999, Doney *et al.* 2004). Desafortunadamente, los mares marginales como el Mediterráneo no se consideran en los modelos globales de carbono, debido a su poca relevancia en comparación con la ventilación del océano profundo, en donde la mayor parte de los modelos divergen del comportamiento verdadero del océano (e.g., Doney *et al.* 2004). La serie de trabajos publicados por los autores (APSB, Álvarez y Álvarez-Salgado 2007), incluyendo el presente, señalan la importancia de la formación de MW para los ciclos biogeoquímicos y pueden servir como patrón en cualquier intento de modelado global del carbono que intente reproducir las implicaciones biogeoquímicas de la formación y extensión de MW en el Atlántico Noreste.

Agradecimientos

M Álvarez fue financiada con un contrato posdoctoral del programa social europeo CSIC I3P. El contrato ORCASEX (RYC-2006-001836), programa Ramón y Cajal del Ministerio de Ciencia y Tecnología español, financió este trabajo. Este trabajo es una contribución a CAIBEX (MEC, CTM2007-66408-C02-01/MAR).

References

- Álvarez M, Álvarez-Salgado XA. 2007. Biogeochemical budgets in the eastern boundary current system of the North Atlantic: Evidence of net heterotrophy and nitrogen fixation. *Limnol. Oceanogr.* 52(4): 1328–1335.
- Álvarez M, Bryden HL, Pérez FF, Ríos AF, Rosón G. 2002. Physical and biogeochemical fluxes and net budgets in the subpolar and temperate North Atlantic. *J. Mar. Res.* 60: 191–226.

- Álvarez M, Ríos AF, Pérez FF, Bryden HL, Rosón G. 2003. Transports and budgets of total inorganic carbon in the subpolar and temperate North Atlantic. *Global Biogeochem. Cycles* 17: 10.1029/2002GB001881.
- Álvarez M, Pérez FF, Bryden HL, Ríos AF. 2004. Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre. *J. Geophys. Res.* 109: 10.1029/2003JC002015.
- Álvarez M, Pérez FF, Shoosmith DR, Bryden HL. 2005. Unaccounted role of Mediterranean Water in the drawdown of anthropogenic carbon. *J. Geophys. Res.* 110: 10.1029/2004JC002633.
- Álvarez-Salgado XA, Beloso S, Joint I, Nogueira E, Chou L, Pérez FF, Groom S, Cabanas JM, Rees AP, Elskens M. 2002. New production of the NW Iberian shelf during the upwelling season over the period 1982–1999. *Deep-Sea Res.* 49: 1725–1739.
- Álvarez-Salgado XA, Aristegui J, Barton ED, Hansell DA. 2007. Contribution of upwelling filaments to offshore carbon export in the subtropical Northeast Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 52: 1287–1292.
- Arhan M, Colin de Verdière A, Memery L. 1994. The eastern boundary of the subtropical North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.* 24: 1295–1316.
- Aristegui J, Álvarez-Salgado XA, Barton ED, Figueiras FG, Hernández-León S, Roy C, Santos AMP. 2006. Oceanography and fisheries of the Canary Current Iberian region of the eastern North Atlantic. In: Robinson AR, Brink K (eds.), *The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea, Vol. 14)*. Chapter 23. Harvard Univ. Press, pp. 877–931.
- Bates N, Pequignet AC, Sabine CL. 2006. Ocean carbon cycling in the Indian Ocean. *Global Biogeochem. Cycles* 20: 10.1029/2005GB002492.
- Daniault N, Mazé JP, Arhan M. 1994. Circulation and mixing of Mediterranean water west of the Iberian Peninsula. *Deep-Sea Res.* 41(11–12): 1685–1714.
- Doney SC. 1999. Major challenges confronting marine biogeochemical modeling. *Global Biogeochem. Cycles* 13(3): 705–714.
- Doney SC *et al.* 2004. Evaluating global ocean carbon models: The importance of realistic physics. *Global Biogeochem. Cycles* 18: GB3017, doi:10.1029/2003GB002150.
- Fraga F, Ríos AF, Pérez FF, Figueiras FG. 1998. Theoretical limits of oxygen:carbon and oxygen:nitrogen ratios during photosynthesis and mineralisation of organic matter in the sea. *Sci. Mar.* 62: 161–168.
- Ganachaud A, Wunsch C. 2002. Oceanic nutrient and oxygen transports and bounds on export production during the World Ocean Circulation Experiment. *Global Biogeochem. Cycles* 16: 10.1029/2000GB001333.
- Hansell DA, Ducklow HW, Macdonald AM, O’Neil Baringer M. 2004. Metabolic poise in the North Atlantic Ocean diagnosed from organic matter transports. *Limnol. Oceanogr.* 49: 1084–1094.
- Holfort J, Johnson KM, Scheider B, Siedler G, Wallace DWR. 1998. Meridional transport of dissolved inorganic carbon in the South Atlantic Ocean. *Global Biogeochem. Cycles* 12: 479–499.
- Karstensen J, Tomczak M. 1998. Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *J. Geophys. Res.* 103: 18599–18610.
- Krauss W. 1986. The North Atlantic Current. *J. Geophys. Res.* 91: 5061–5074.
- Lavín A, Bryden HL, Parrilla G. 2003. Mechanisms of heat, freshwater, oxygen and nutrient transports and budgets at 24.5°N in the subtropical North Atlantic. *Deep-Sea Res.* 50: 1099–1128.
- McCartney MS, Mauritzen C. 2001. On the origin of the warm inflow to the Nordic Seas. *Prog. Oceanogr.* 51(1): 125–214.
- New AL, Barnard S, Herrmann P, Molines JM. 2001. On the origin and pathway of the saline inflow to the Nordic Seas: Insights from models. *Prog. Oceanogr.* 48(2–3): 255–287.
- Papadakis MP, Chassignet EP, Hallberg RW. 2003. Numerical simulations of the Mediterranean Sea outflow: Impact of the entrainment parameterization in an isopycnic coordinate ocean model. *Ocean Model.* 5: 325–356.
- Pelíz AJ, Fiúza AFG. 1999. Temporal and spatial variability of CZCS-derived phytoplankton pigment concentrations off the western Iberian Peninsula. *Int. J. Remote Sens.* 20: 1363–1403.
- Pollard RT, Griffiths MJ, Cunningham SA, Read JF, Pérez FF, Ríos AF. 1996. Vivaldi 1991: A study of the formation, circulation and ventilation of Eastern North Atlantic Central Water. *Prog. Oceanogr.* 37(2): 167–172.
- Rintoul SR, Wunsch C. 1991. Mass, heat, oxygen and nutrient fluxes and budgets in the North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* 38: 355–377.
- Rosón G, Ríos AF, Lavín A, Pérez FF, Bryden HL. 2003. Carbon distribution, fluxes and budgets in the subtropical North Atlantic Ocean (24.5°N). *J. Geophys. Res.* 108: 10.1029/1999JC000047.
- Slater DR. 2003. The transport of Mediterranean Water in the North Atlantic Ocean. Ph.D. thesis, University of Southampton, UK, 155 pp.

*Recibido en junio de 2008;
aceptado en marzo de 2009.*