

DENSIDAD

La densidad de un cuerpo es el cociente entre la masa y el volumen del mismo:

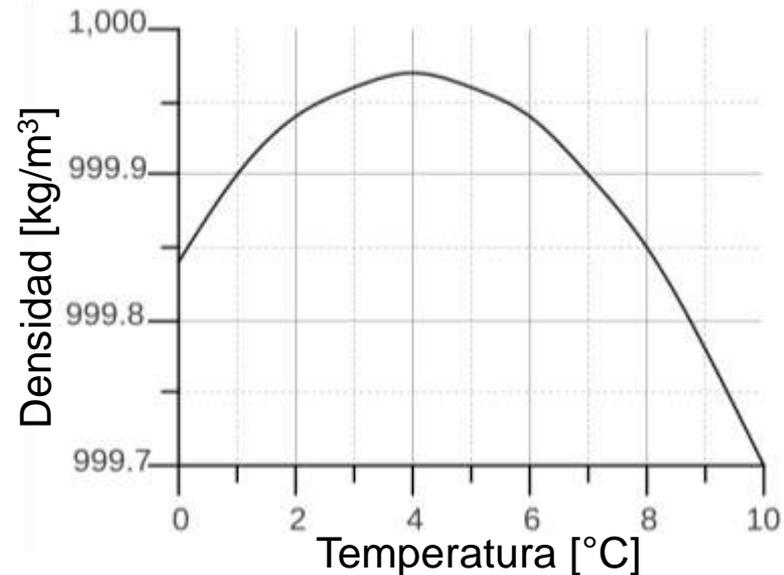
$$\rho = m/v$$

En unidades internacionales: [**kg/m³**]

A presión atmosférica y a 15°C la densidad del agua es **1000 kg/m³**.

Este valor varia en función de las variaciones de **temperatura** y de **presión**.

<u>TEMP [°C]</u>	<u>DENS [kg/m³]</u>
+30	995.6502
+25	997.0479
+22	997.7735
+20	998.2071
+15	999.1026
+10	999.7026
+4	999.9720
<u>0</u>	<u>999.8395</u>



El agua de mar tiene sales disueltas (un poco de paciencia, ya discutiremos que sales y porqué), que afectan su densidad.

Por lo tanto, la densidad del agua de mar depende de **la presión, la temperatura y la salinidad.**

A presión atmosférica, 15°C y con una concentración de sales de 35 gramos por Kg de agua de mar la densidad del agua de mar es 1025.97275 kg/m³

Densidad del agua de mar

$$\rho = \rho(p, T, S)$$

Compresibilidad

$$\kappa \Delta p = -\Delta V/V$$

$$\kappa = \kappa(p, T, S)$$

Expansión térmica

$$\alpha \Delta T = \Delta V/V$$

$$\alpha = \alpha(p, T, S)$$

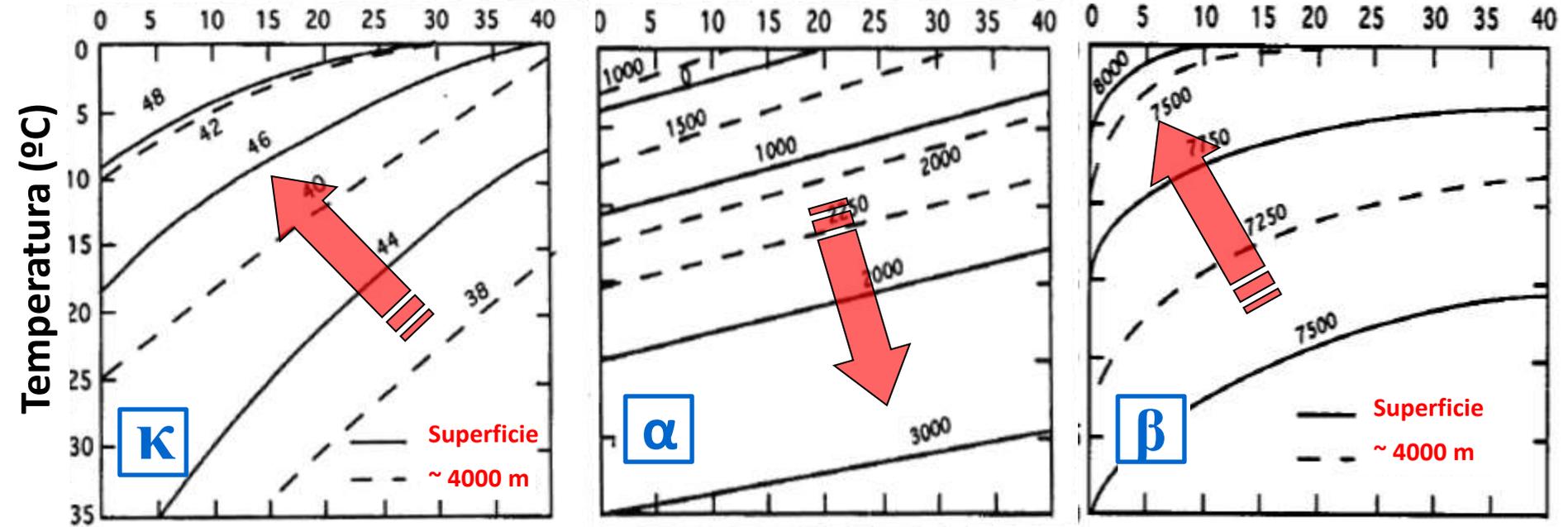
Contracción halina

$$\beta \Delta S = -\Delta V/V$$

$$\beta = \beta(p, T, S)$$

Densidad del agua de mar

Salinidad



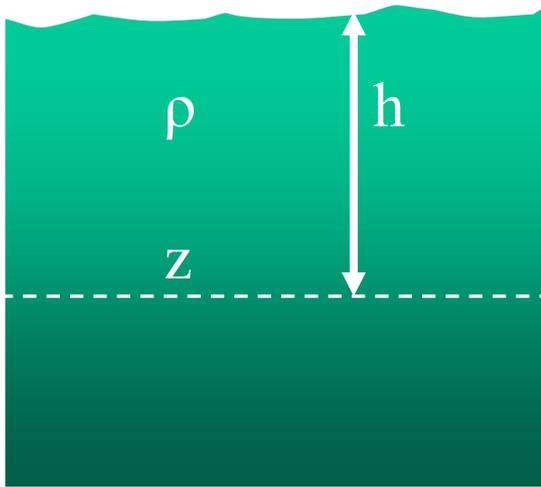
Variaciones de los coeficientes de compresibilidad (κ , 10^{-4} kg/m³/dbar), expansión térmica (α , 10^{-4} kg/m³/°C) y contracción halina (β , 10^{-4} kg/m³/psu) en función de T y S en la superficie y a 4000 m de profundidad

Densidad del agua de mar

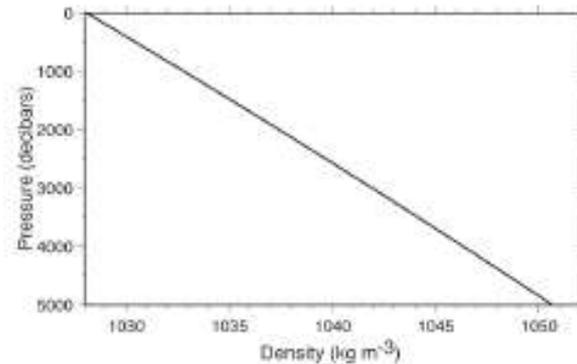
La no linealidad de la ecuación de estado del agua de mar produce varios fenómenos de importancia:

- 1) Los efectos de cambios de salinidad sobre la densidad a bajas temperaturas son relativamente más importantes que a temperaturas altas
- 2) A baja temperatura el agua de mar es más compresible que al alta temperatura (*thermobaricity*)
- 3) La mezcla de dos masas de agua de diferente temperatura y salinidad pero de la misma densidad es más densa que las aguas originales (*cabbeling*)

Presión hidrostática



$$p_z = \bar{\rho} g h \quad \bar{\rho} = 1/h \int \rho dz$$



$$\rho = \rho(p)$$

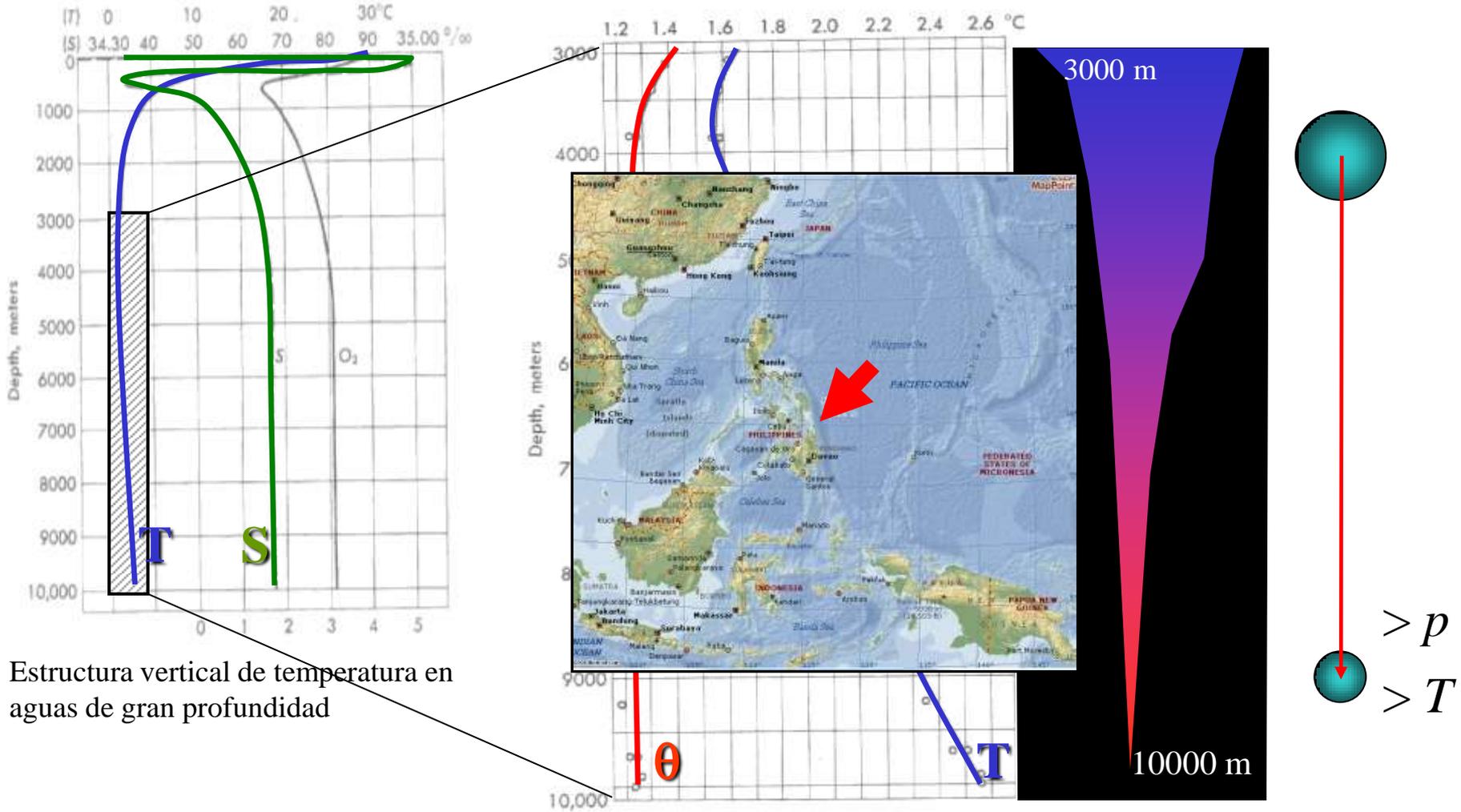
$$[p] = [\text{kg}/\text{m}^3] [\text{m}/\text{s}^2] [\text{m}] = \text{kg}/\text{m s}^2 = \text{Pascal}$$

$$\text{si } \bar{\rho} = 1025 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ y } h = 100 \text{ m}$$

$$p = 100.45 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$10^4 \text{ Pa} = 1 \text{ decibar}$$

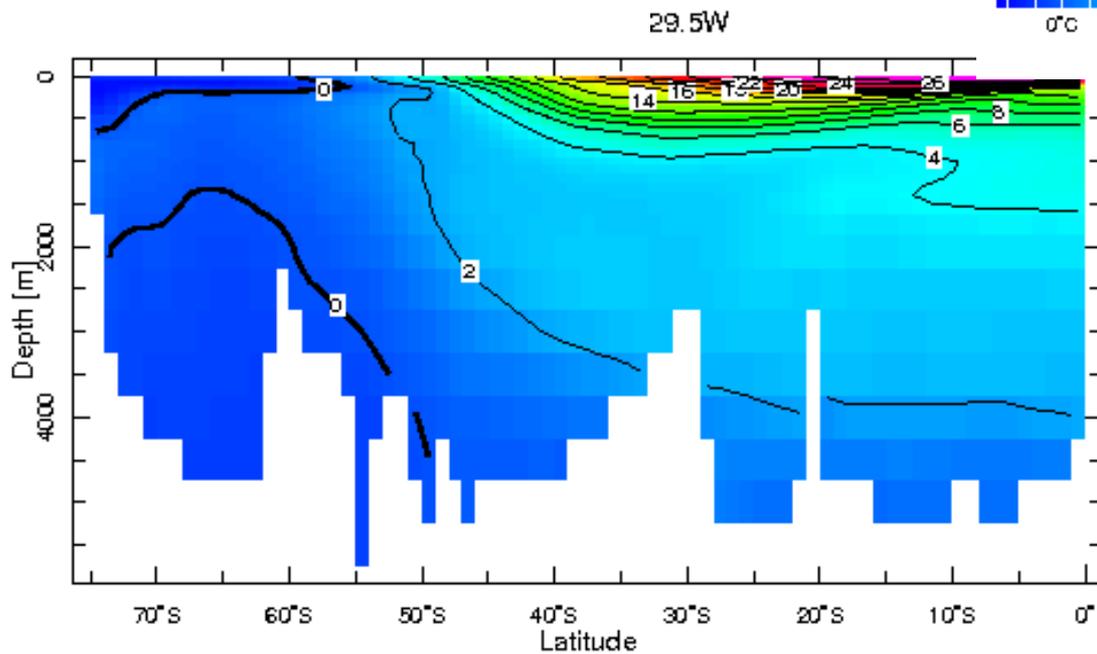
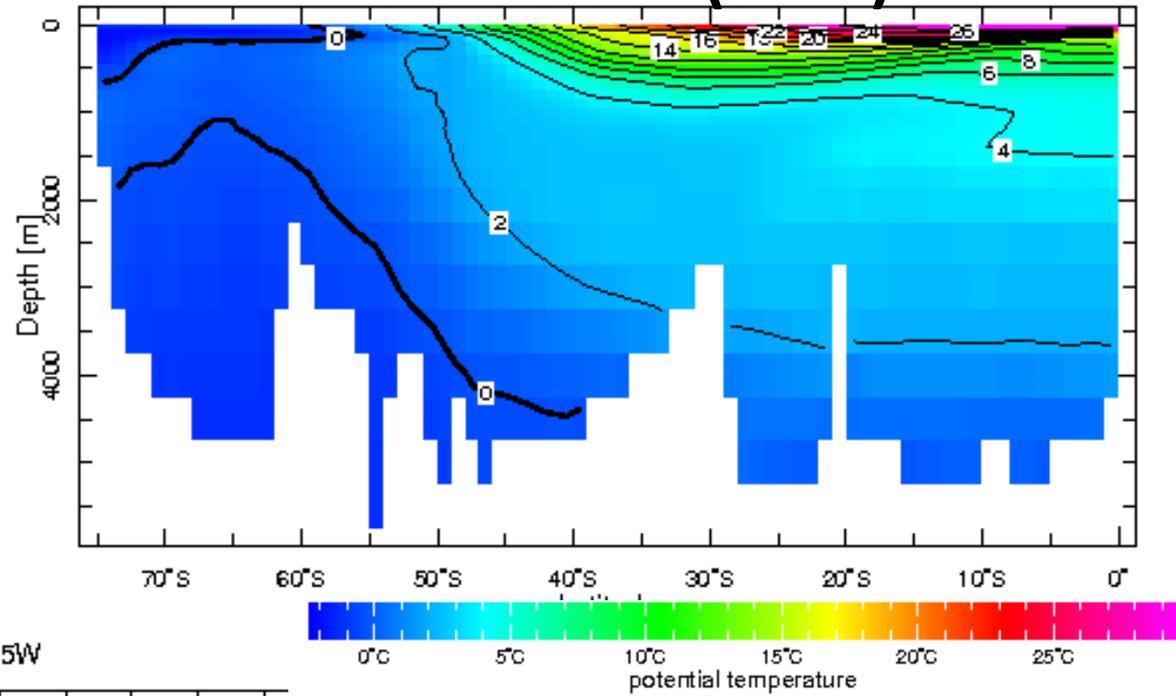
El efecto de la presión sobre la temperatura



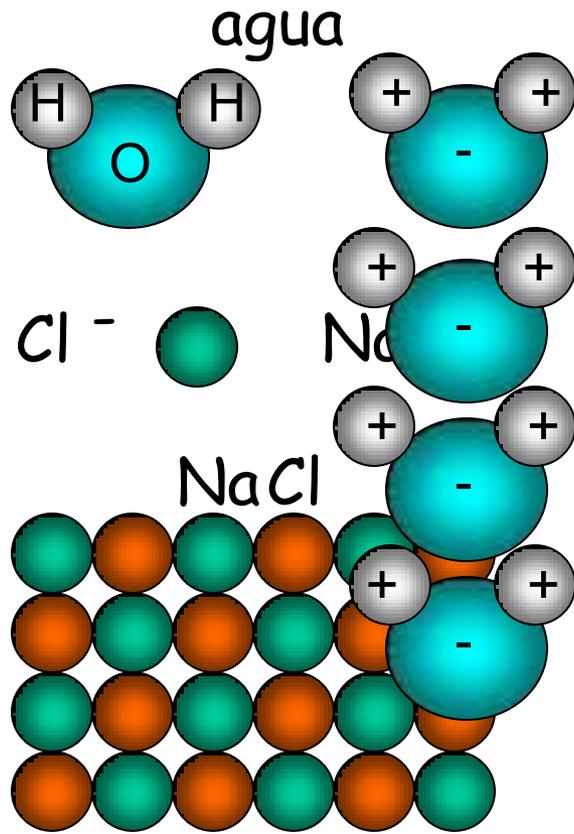
Estructura vertical de temperatura en aguas de gran profundidad

Temperatura potencial (θ): la temperatura que una parcela de agua llevada sin intercambiar calor hasta la superficie (adiabaticamente)

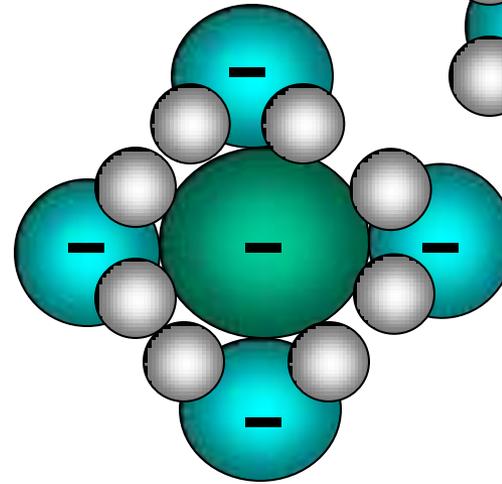
Temperatura potencial Atlántico Sur (30W)



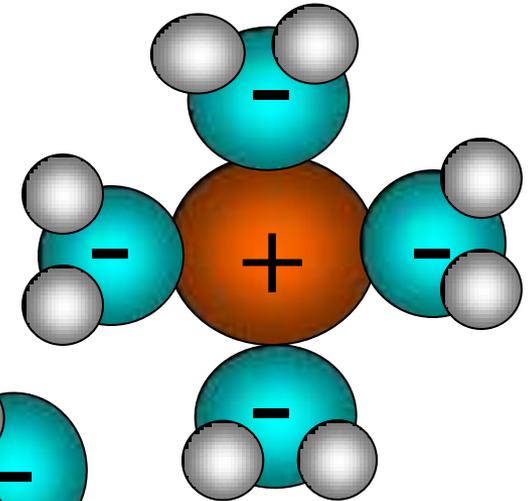
La molécula de agua y sales en solución



La característica dipolar del agua contribuye a la formación de cadenas de hasta ocho moléculas, parecidas a las que forman los polímeros



agua de mar



Punto de fusión	1074 K (801 °C)
Punto de ebullición	1738 K (1465 °C)
Densidad	$2,2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Solubilidad	35,9 g en 100g de agua
Excelente aislante	eléctrico

Buen conductor eléctrico

El agua puede disolver más sustancias que cualquier otro fluido

Salinidad

La salinidad se define como la masa de sales disueltas (en gramos) por kg de agua de mar. La salinidad es adimensional, aunque habitualmente nos referimos a Unidades Prácticas de Salinidad (ups)

Masa de sales disueltas (gr)

Masa de agua de mar (Kg)

Principales Constituyentes (35 ppm) por m³ (aprox. 1026 Kg) de agua de mar

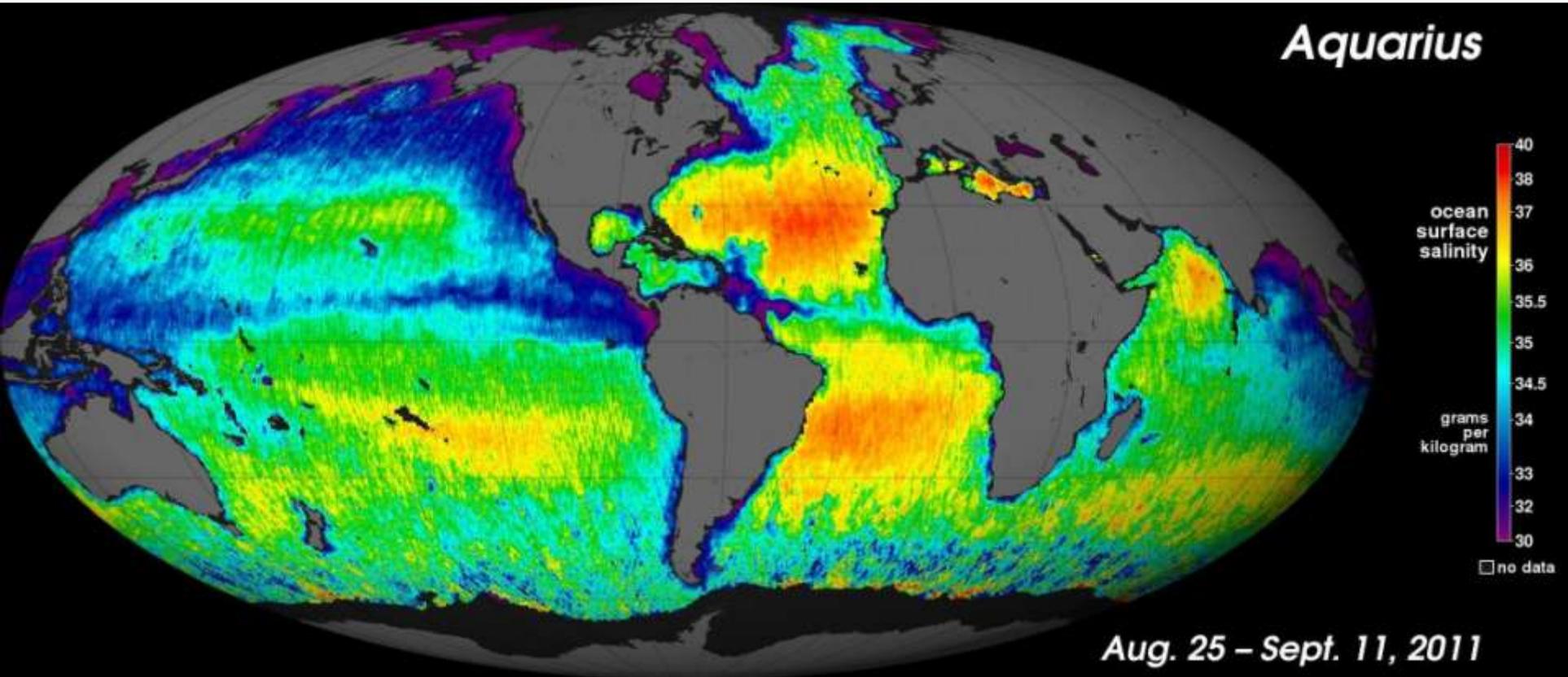
NaCl	28.014 Kg
MgCl ₂	3.812
MgSO ₄	1.752
CaSO ₄	1.283
K ₂ SO ₄	0.816
CaCO ₃	0.122
Kbr	0.101
SrSO ₄	0.028
H ₂ BO ₃	0.028
Total	35.956

Principal composición del agua de mar 35ppm

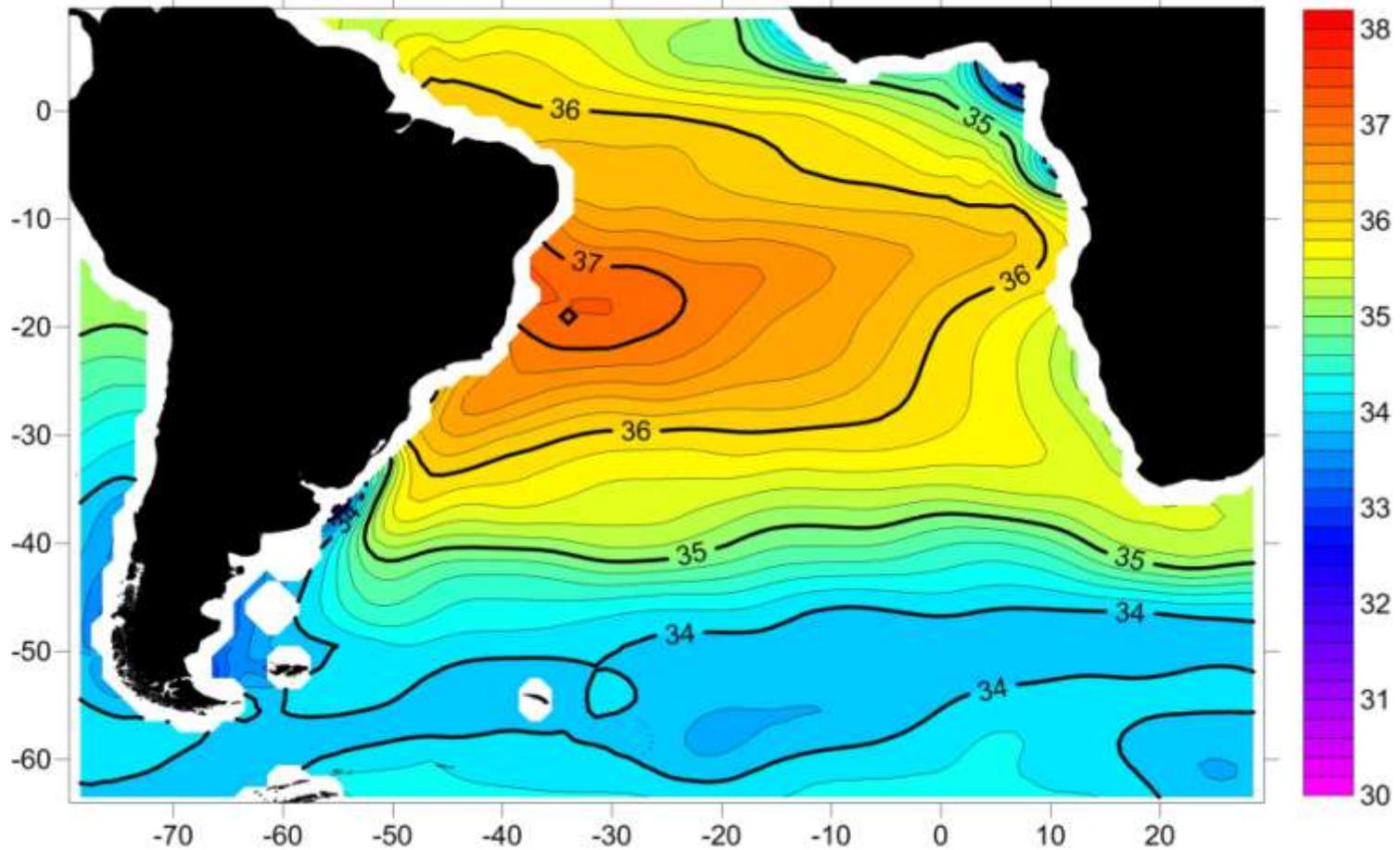
<i>Cationes</i>	<i>g/Kg</i>	<i>mEq/Kg</i>
Sodio	10.752	467.56
Potasio	0.39	9.98
Magnesio	1.295	106.50
Calcio	0.416	20.76
Sr	0.013	0.3
Total		605.1
<i>Aniones</i>		
Cloro	19.345	545.59
Bromo	0.066	0.83
Fluor	0.0013	0.07
Sulfato	2.701	56.23
Bicarbonato	0.145	2.3
Total		605.02

La naturaleza dipolar de la molécula de agua permite la efectiva disolución de otros compuestos y explica la abundancia de iones en el océano.

Salinidad superficial desde el espacio



Salinidad superficial en el Atlántico Sur



“Constancia” de las proporciones

Las sales disueltas se encuentran en concentraciones relativas casi constantes en todo el océano



Wyville
Thomson

**Sales disueltas en las
aguas de mar
(átomos):**



55.3 % Cloro

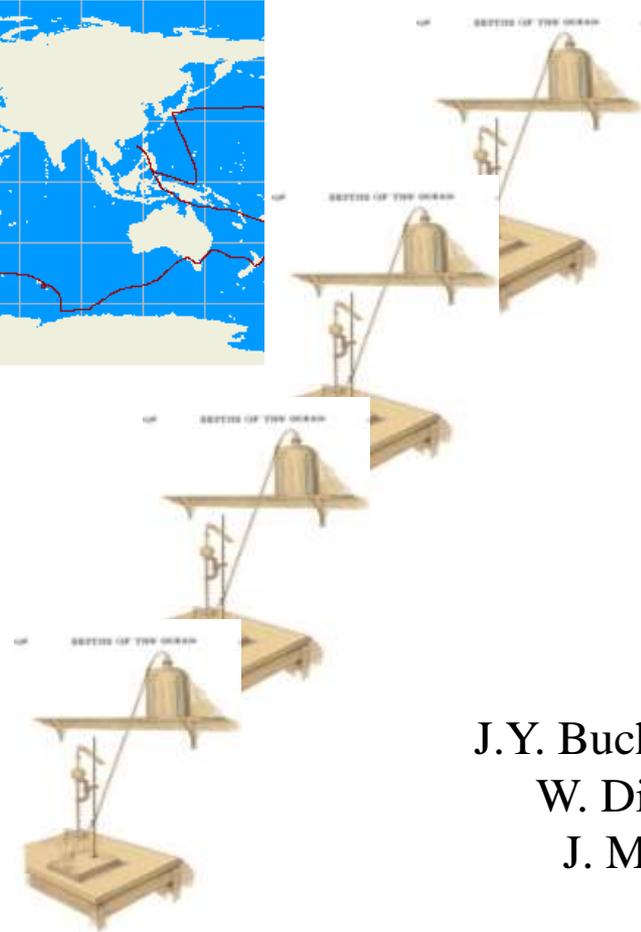
30.8 % Sodio

3.7 % Magnesio

2.6 % Sulfuro

1.2 % Calcio

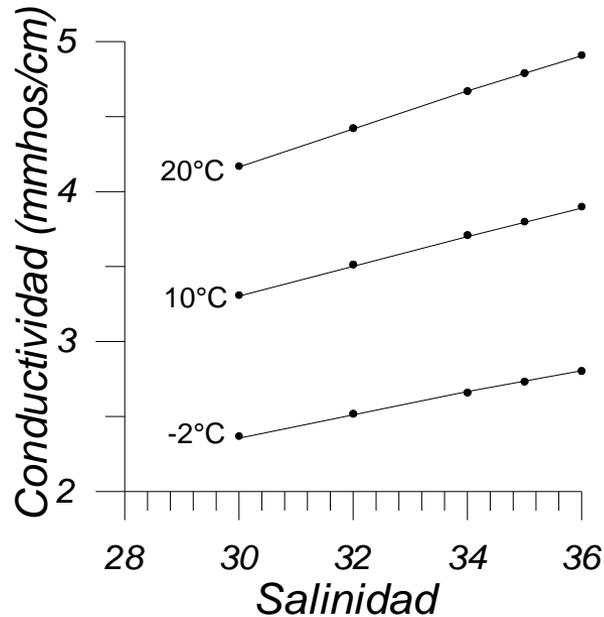
1.1 % Potasio



J.Y. Buchanan
W. Dittmar
J. Murray

Salinidad = $S = 0.03 + 1.805 \text{ Clorinidad}$ (Knudsen, 1889)
 $1.80655 \times \text{Cl}$ (UNESCO, 1966)

Conductividad eléctrica



La resistencia eléctrica de un conductor de longitud l y sección q :

$$R = r l/q \text{ [ohm]}$$

donde r es la resistencia específica.

La inversa de r es la conductividad que se mide en $(\text{ohms/cm})^{-1}$.

En oceanografía suele medirse la conductividad en $\text{mmho} / \text{cm} = \text{mS} / \text{cm}$.

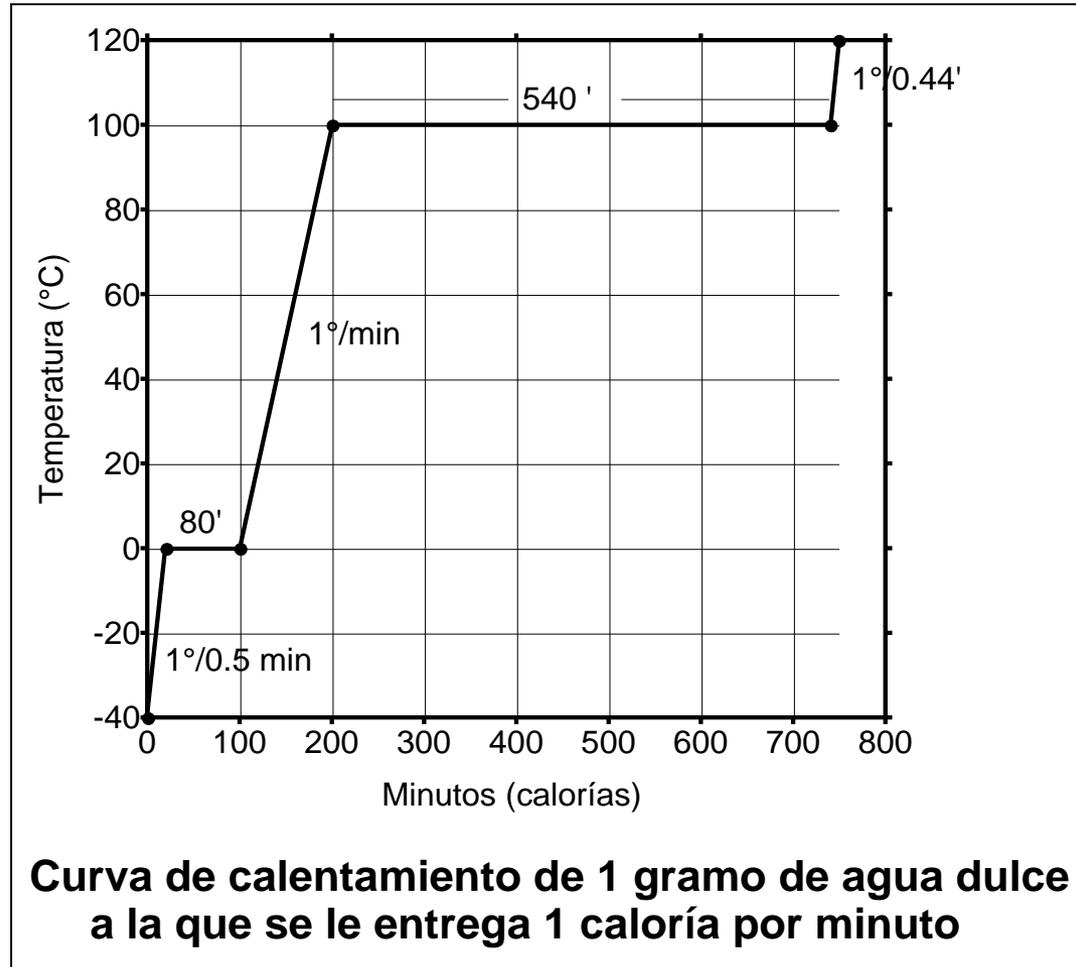
Conocida la temperatura de una muestra de agua de mar, la relación entre la conductividad y salinidad permite la determinación de esta última mediante mediciones eléctricas, rápidas y de muy alta precisión.

Calor específico

$$C_p = 1 \text{ cal gr}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\approx 4200 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p (\text{aire}) \approx 1003 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

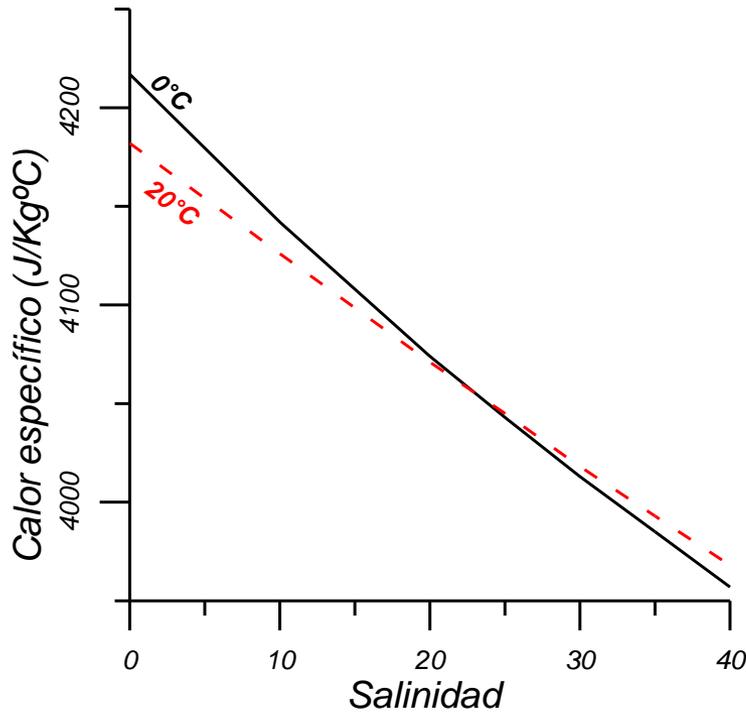


La naturaleza dipolar de la molécula de agua explica la alta capacidad de absorber y contener calor (la capacidad calorífica), que es redistribuido por las corrientes oceánicas.

Calor específico

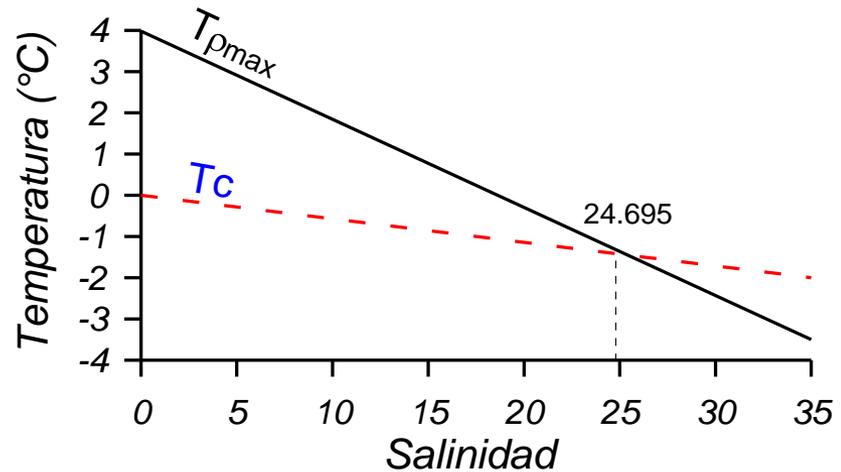
$$Q = \rho C_p T$$

$$\Delta Q = \rho C_p \Delta T$$



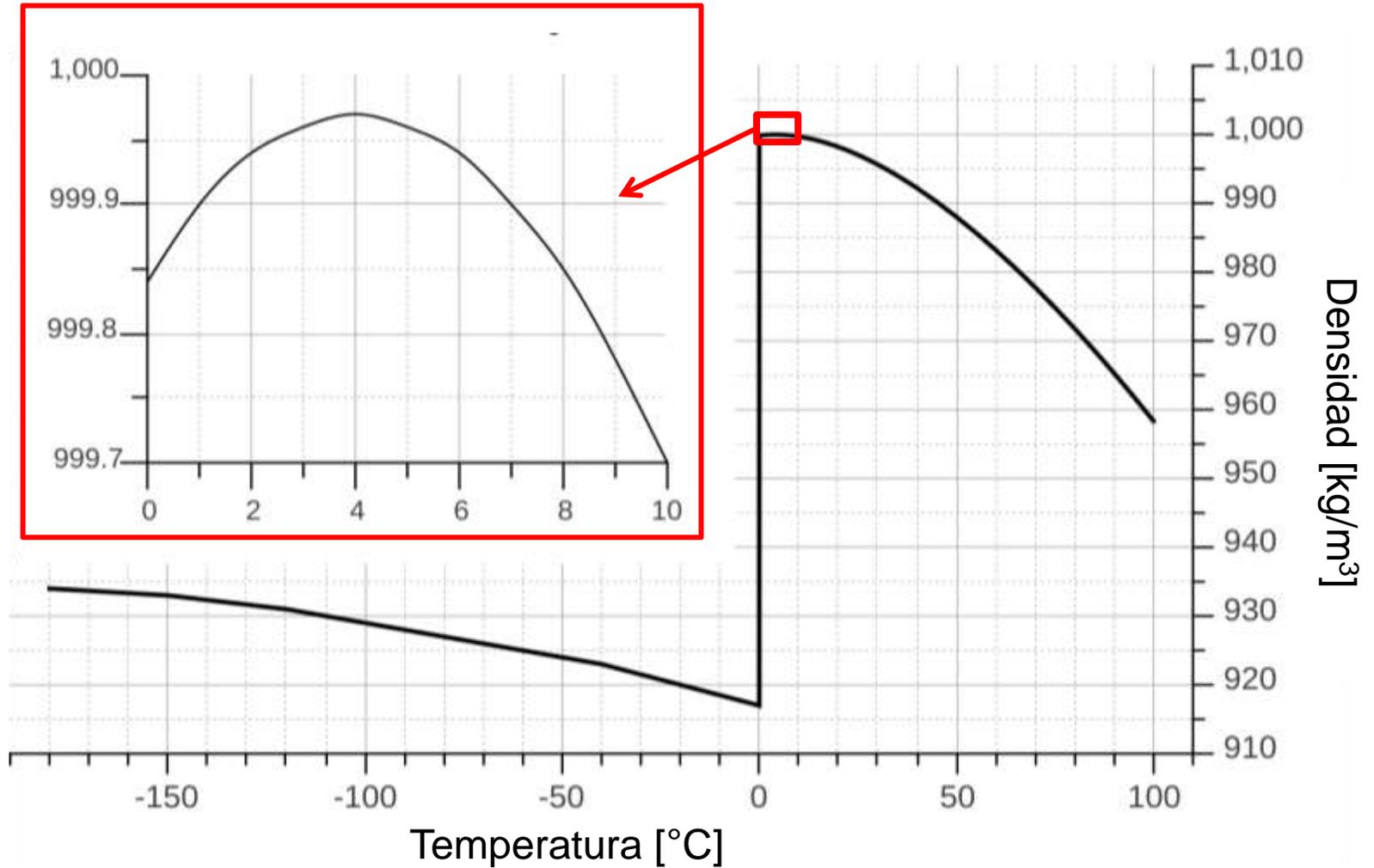
Variaciones del Calor Específico del agua de mar a presión constante, en función de la temperatura (°C) y la salinidad.

Temperatura de congelamiento y de máxima densidad



Temperatura de máxima densidad $T_{\rho\max}$ y temperatura del punto de congelamiento T_c , en función de la salinidad. La escala de temperatura en grados centígrados (°C). A salinidad = 24.695 ambas temperaturas coinciden.

Densidad del hielo y agua pura

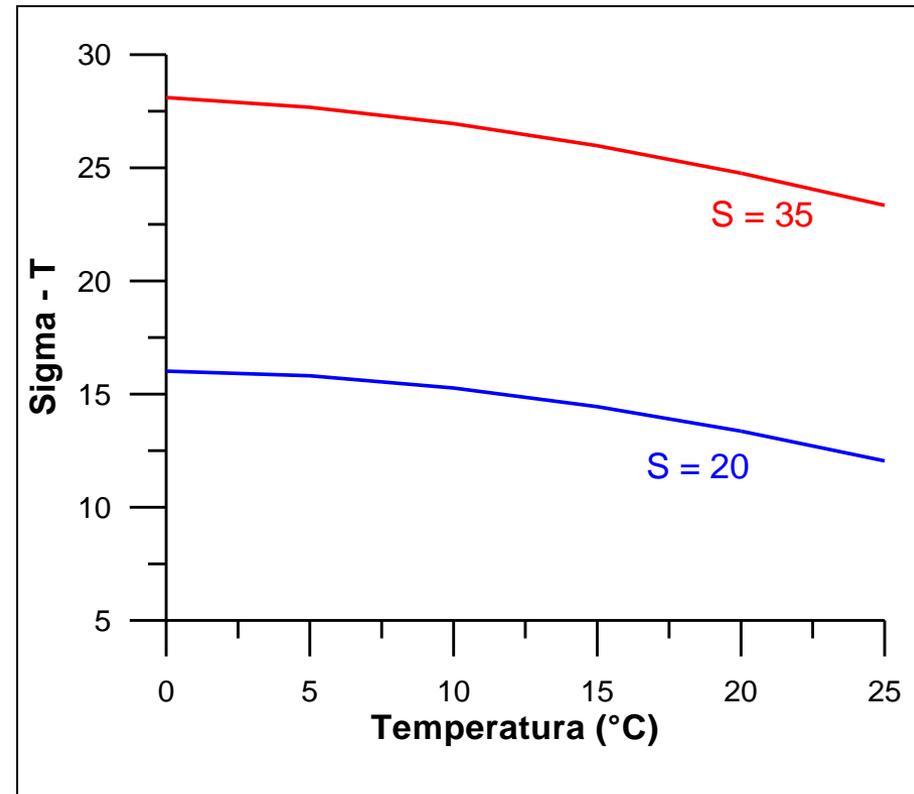
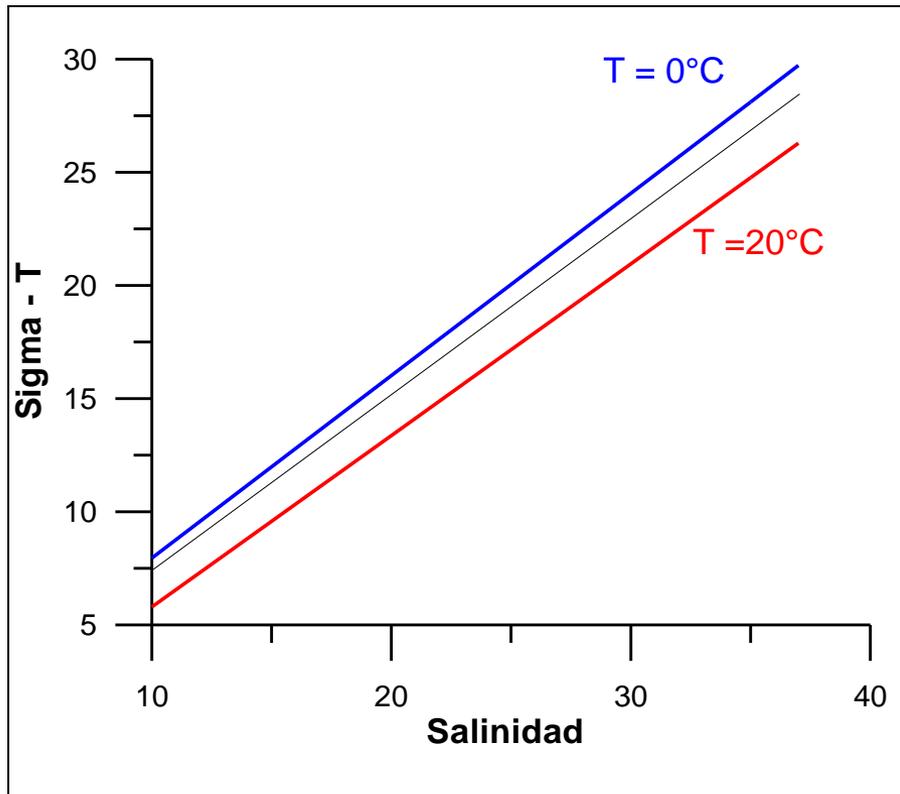


Densidad del agua de mar

$$\rho = \rho(p, T, S) \quad [\text{Kg/m}^3]$$

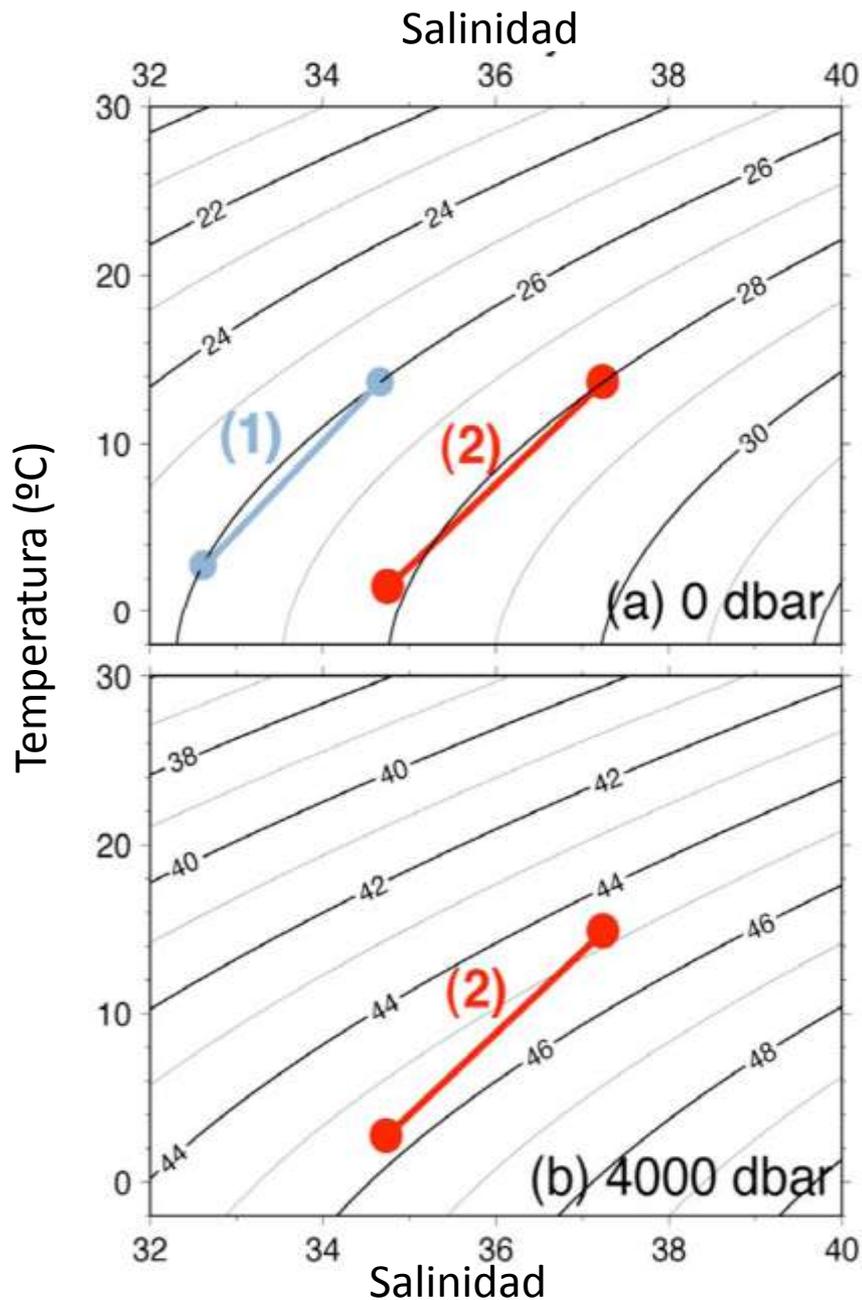
$$\text{sigma -T} = (\rho_{0,T,S} - 1000) \quad [\text{Kg/m}^3]$$

$$\rho = 1027 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow \text{sigma -T} = 27 \text{ kg/m}^3$$



La ecuación de estado del agua de mar es no lineal, dando lugar a algunos fenómenos importantes:

- 1) A baja temperatura el efecto de la salinidad sobre la densidad es relativamente más importante que el de la temperatura
- 2) A menor temperatura el agua de mar es más compresible que el agua cálida (termobaricidad)
- 3) *Cabbeling* – la mezcla de dos tipos de agua de la misma densidad **es de mayor densidad que las originales**



Nolinealidad

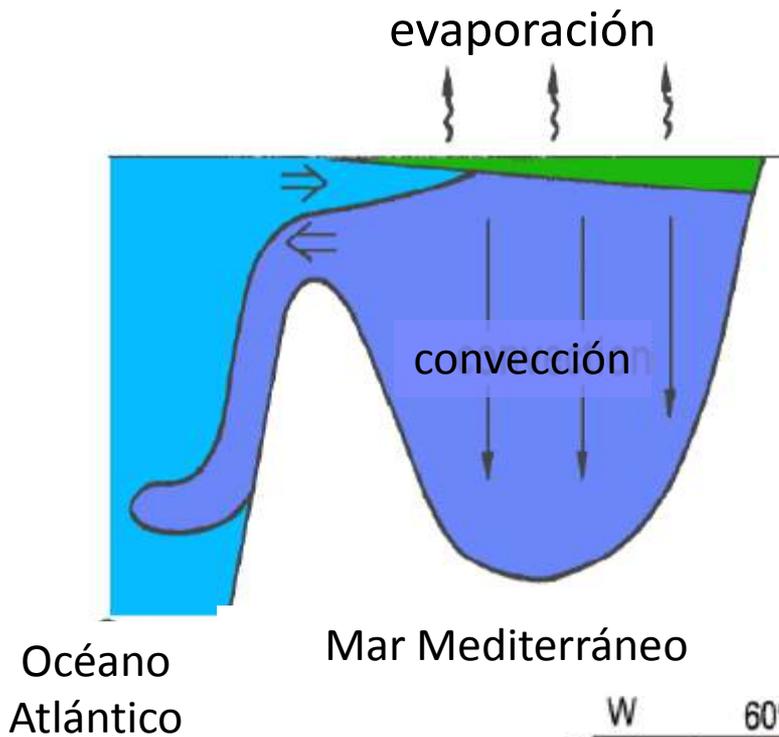
La densidad σ a una presión de 0 dbar (a) y de 4000 dbar (b) en función de T y S. Notar los cambios en la pendiente de las isopícnas entre (a) y (b)

El par gris (1) ilustra el *cabbeling*, o aumento de la densidad a partir de la mezcla de dos parcelas de agua de la misma densidad.

El agua fría es más compresible

El par rojo (2) en ambos paneles indica la comparación de agua cálida y salina y fría y de baja salinidad. Si estas aguas se mueven de la superficie a 4000m la diferencia de densidad cambia de signo!

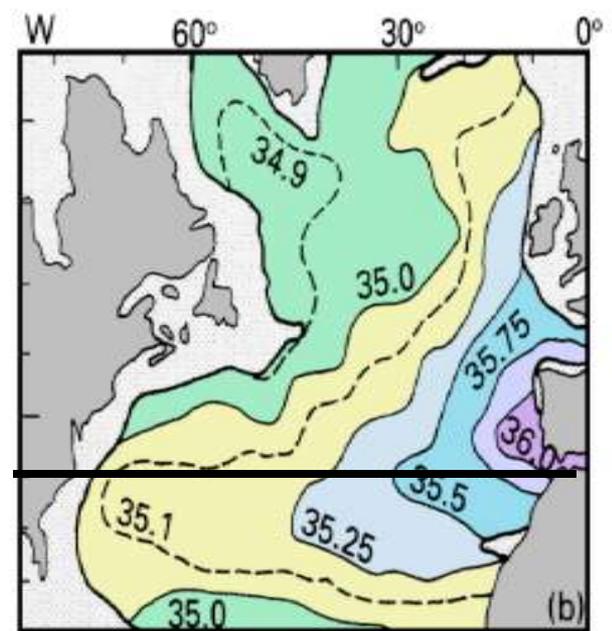
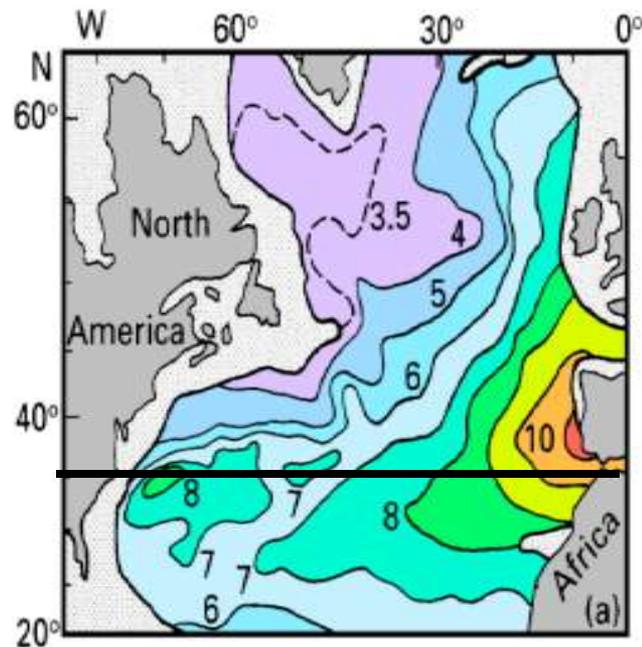
Efectos de la no linealidad de la ecuación de estado: el caso del Mediterráneo



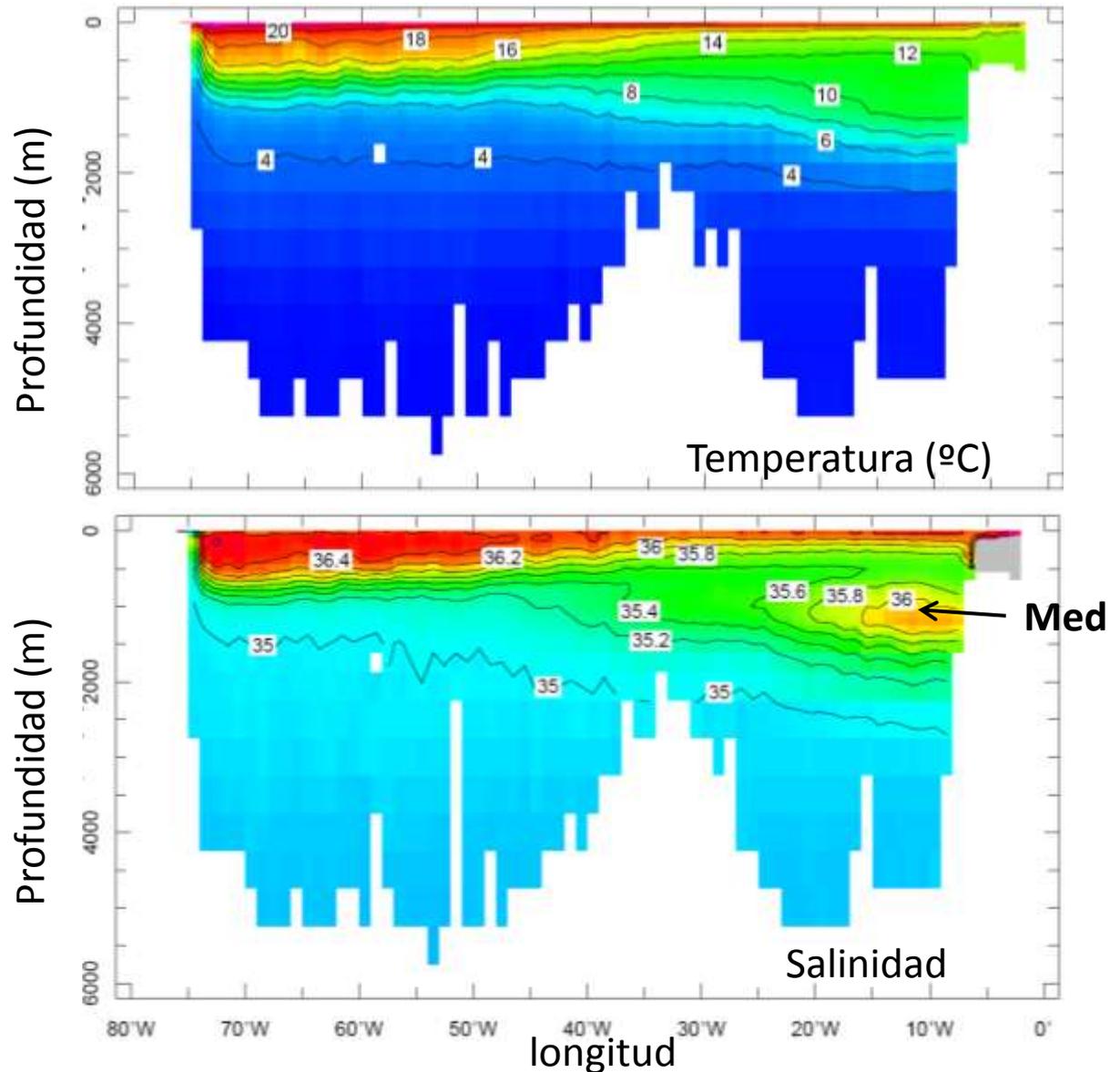
Océano Atlántico

Mar Mediterráneo

Distribuciones de T y S a 1000 m de profundidad en el Atlántico Norte

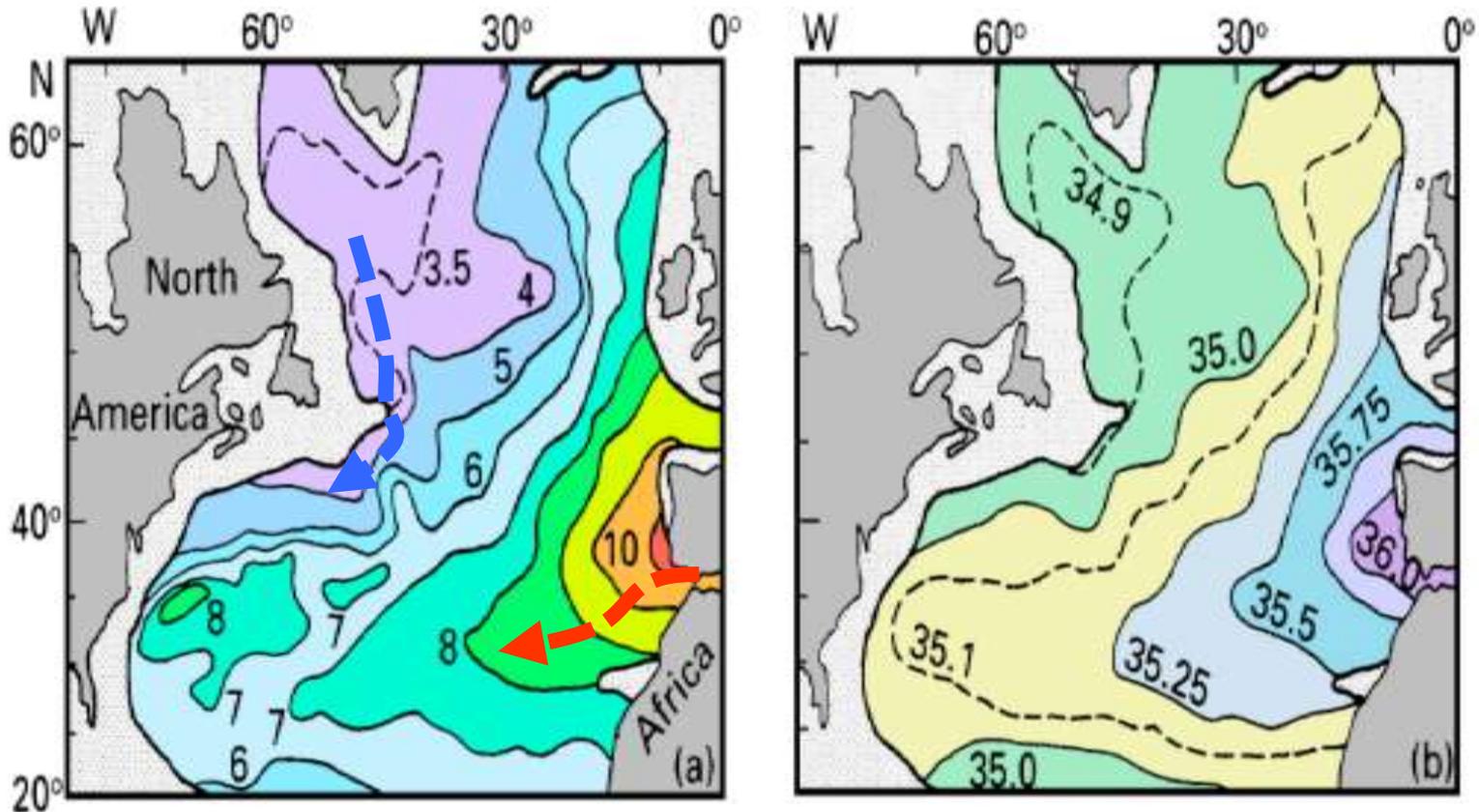


Efectos de la no linealidad de la ecuación de estado: el caso del Mediterráneo



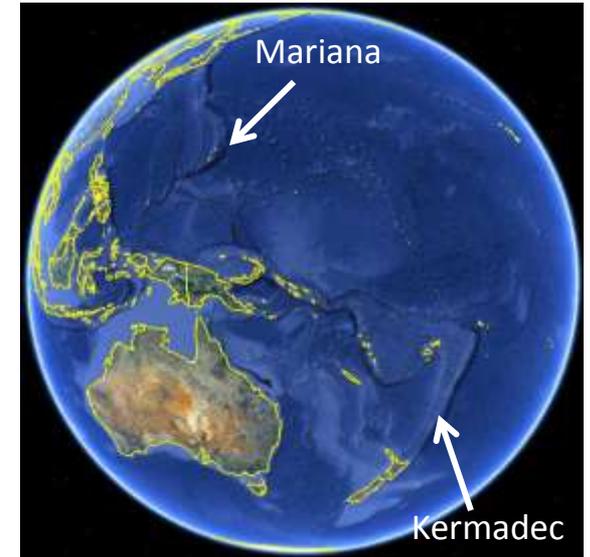
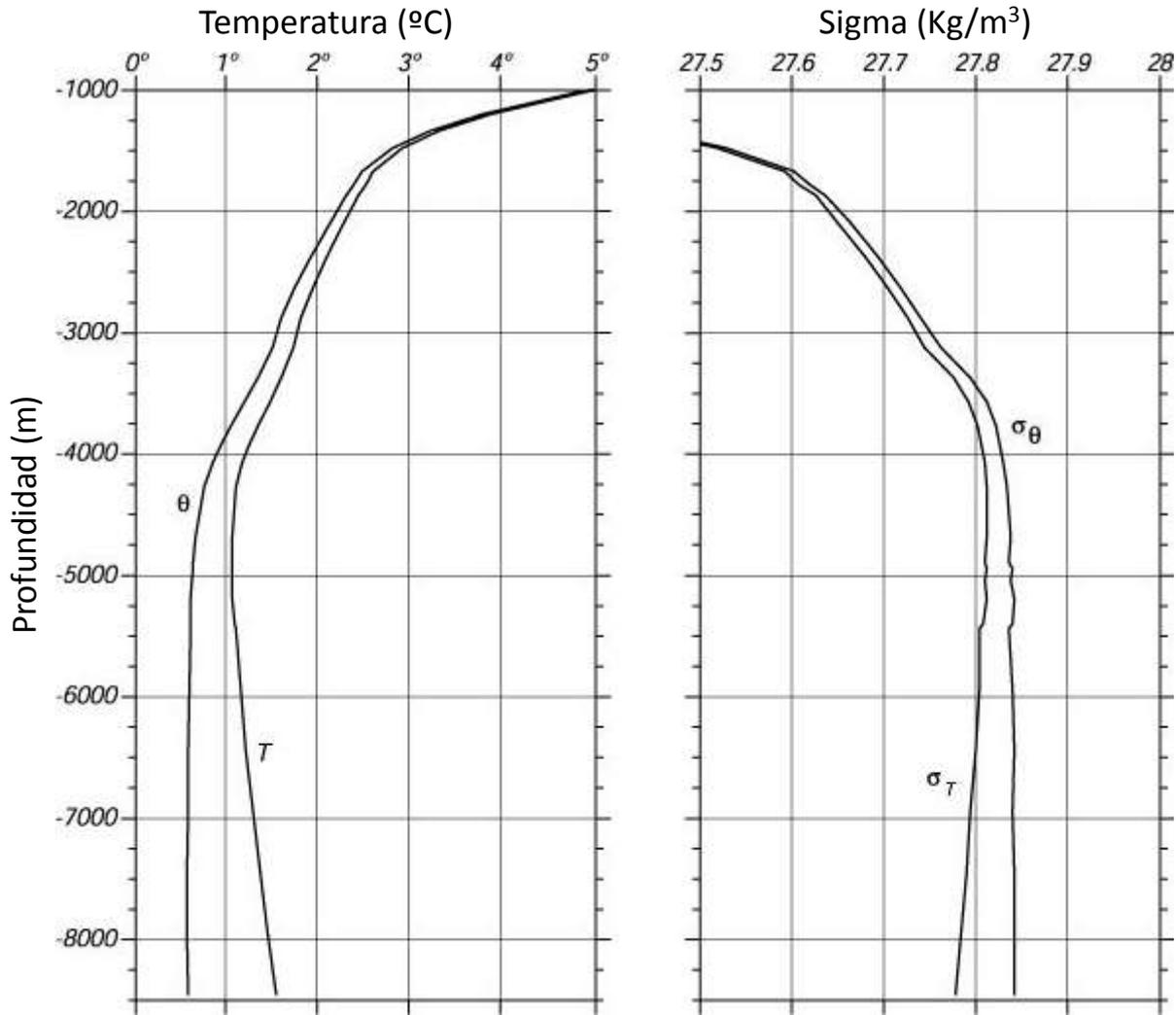
Secciones de temperatura
(panel superior) y salinidad
(panel inferior) en el
Atlántico a 35°N

Efectos de la no linealidad de la ecuación de estado: el caso del Mediterráneo



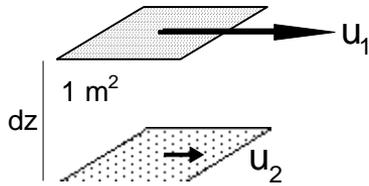
El agua que fluye del Mediterráneo al Atlántico Norte (flecha roja) es salina y cálida comparada con el agua que se hunde en el extremo norte del Atlántico Norte (flecha azul). Al ser más salina que esta última, ambas tienen aproximadamente la misma densidad. Sin embargo, el agua fría de los mares del norte es más compresible y se hunde hasta el fondo, mientras que la del Mediterráneo alcanza los 1000 m de profundidad solamente.

Densidad potencial



Perfiles en la fosa de Kermadec, en el Pacífico Sur

Viscosidad molecular



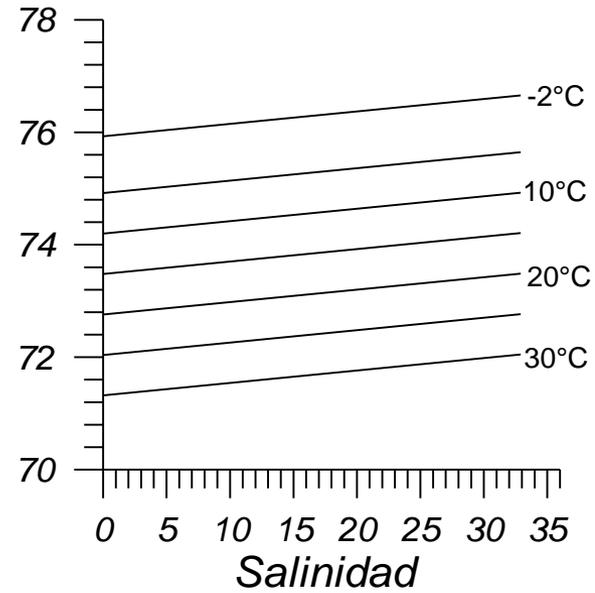
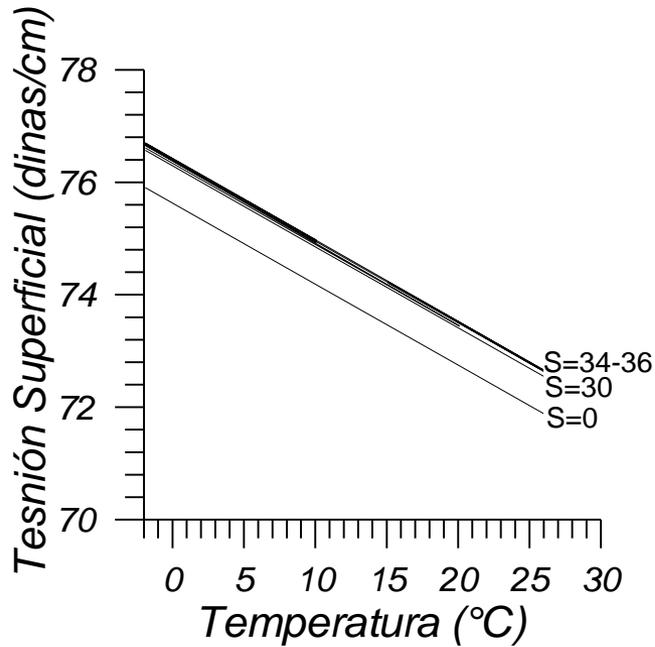
Cuando el fluido está en movimiento y el flujo es "laminar" (es decir en láminas o capas, sin movimientos turbulentos), si existen diferencias de velocidad entre las láminas, existe una fuerza tangencial que, de acuerdo a Newton, es proporcional a la variación de velocidad con la distancia. En este caso se dice que el fluido es "Newtoniano".

$$F = \mu \, du / dz$$

μ es el coeficiente dinámico de viscosidad molecular. En el agua de mar μ depende (débilmente) de la temperatura y la salinidad. El valor de μ es del orden de 10^3 Kg /m s .

El coeficiente cinemático es $\nu = \mu / \rho = 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$

Tensión superficial



$$t \text{ (dynas / cm)} = 75.64 - 0.144 T + 0.0399 \left[\frac{(S - 0.03)}{1.8050} \right]$$

Nueva Ecuación Termodinámica del agua de Mar

En 2010 varios organismos internacionales (COI, SCOR, IAPSO) **adoptaron conjuntamente un nuevo estándar para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua de mar**. Este nuevo estándar, conocido como **TEOS-10** (por sus siglas en inglés), reemplaza la **viejo** estándar o **Ecuación de Estado** (EOS80) y debe ser la forma de calcular las propiedades termodinámicas del agua de mar.

El TEOS-10 ha construido la **función de Gibbs** del agua de mar, a partir de la cual es posible calcular la **densidad, velocidad del sonido, calor específico, entalpía específica, y entropía específica**.

S_P (Salinidad Práctica)

Lo que medimos con un salinómetro y se usaba hasta ahora para el cálculo de las variables derivadas, como la densidad

S_R (Salinidad de Referencia)

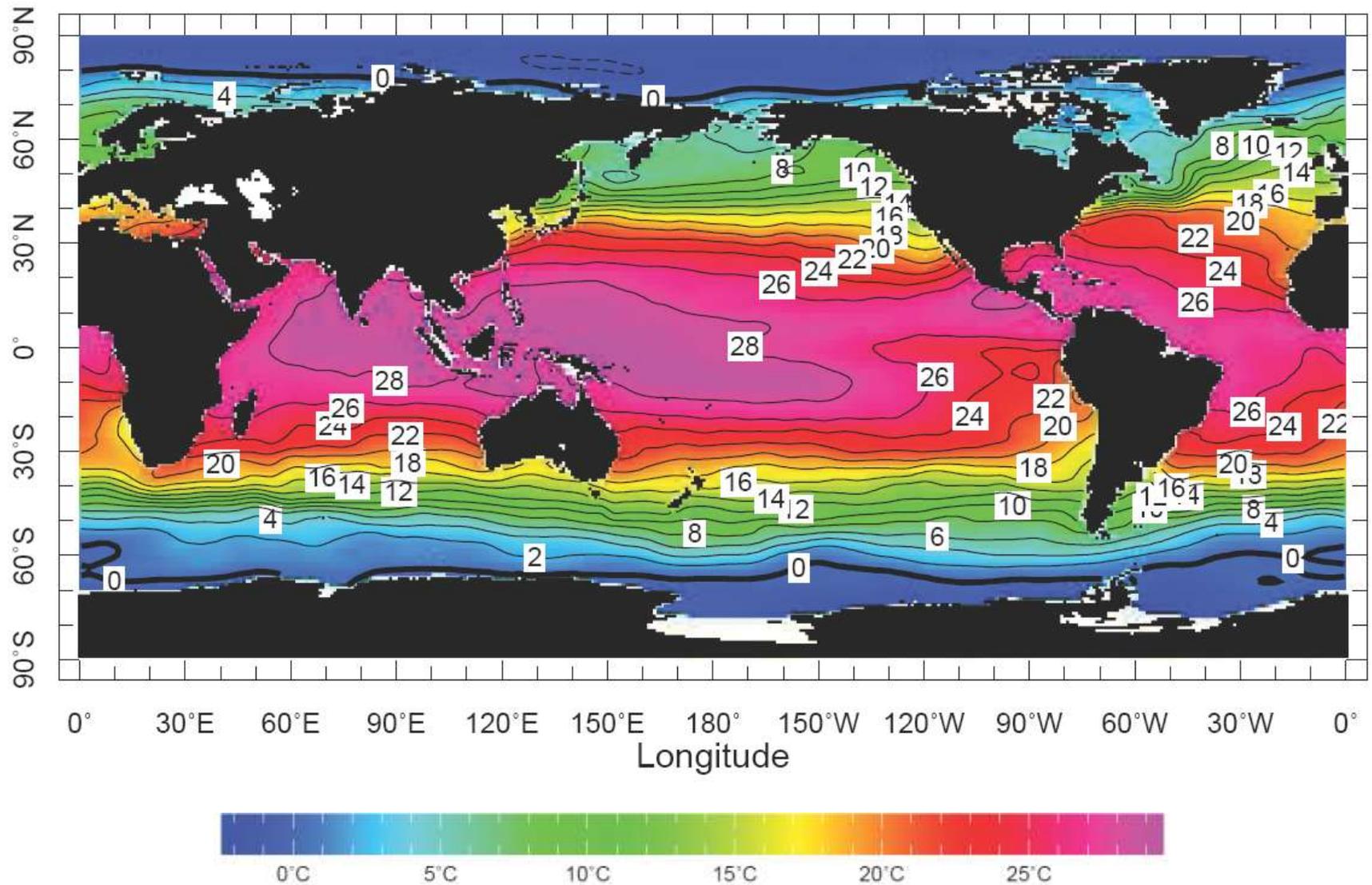
Fracción de masa de soluto en Agua Estándar

S_A (Salinidad Absoluta)

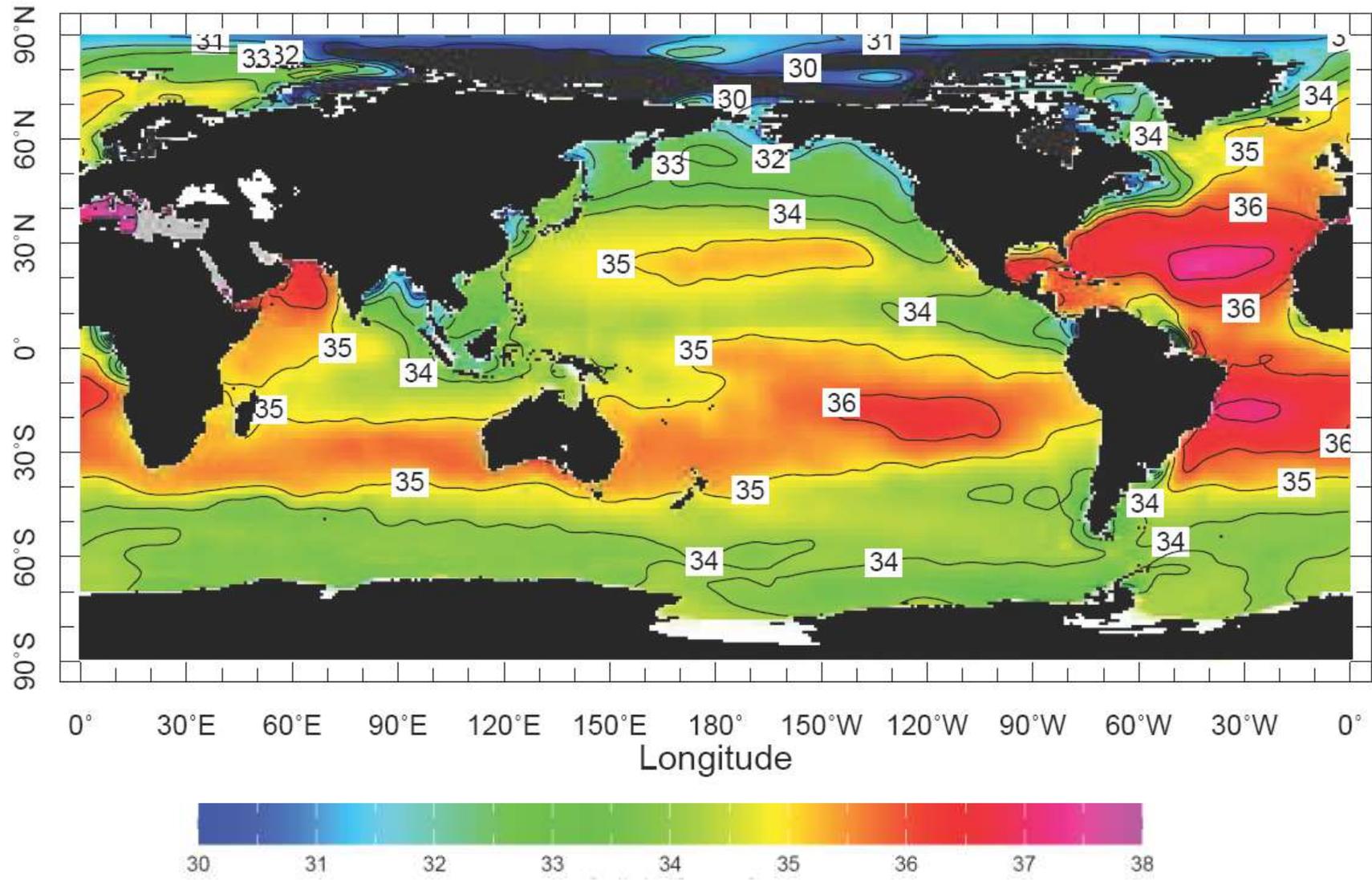
Fracción de masa de soluto en la muestra, lo que interesa para el cálculo de la densidad

Los oceanógrafos no entren en pánico visiten <http://www.teos-10.org/>

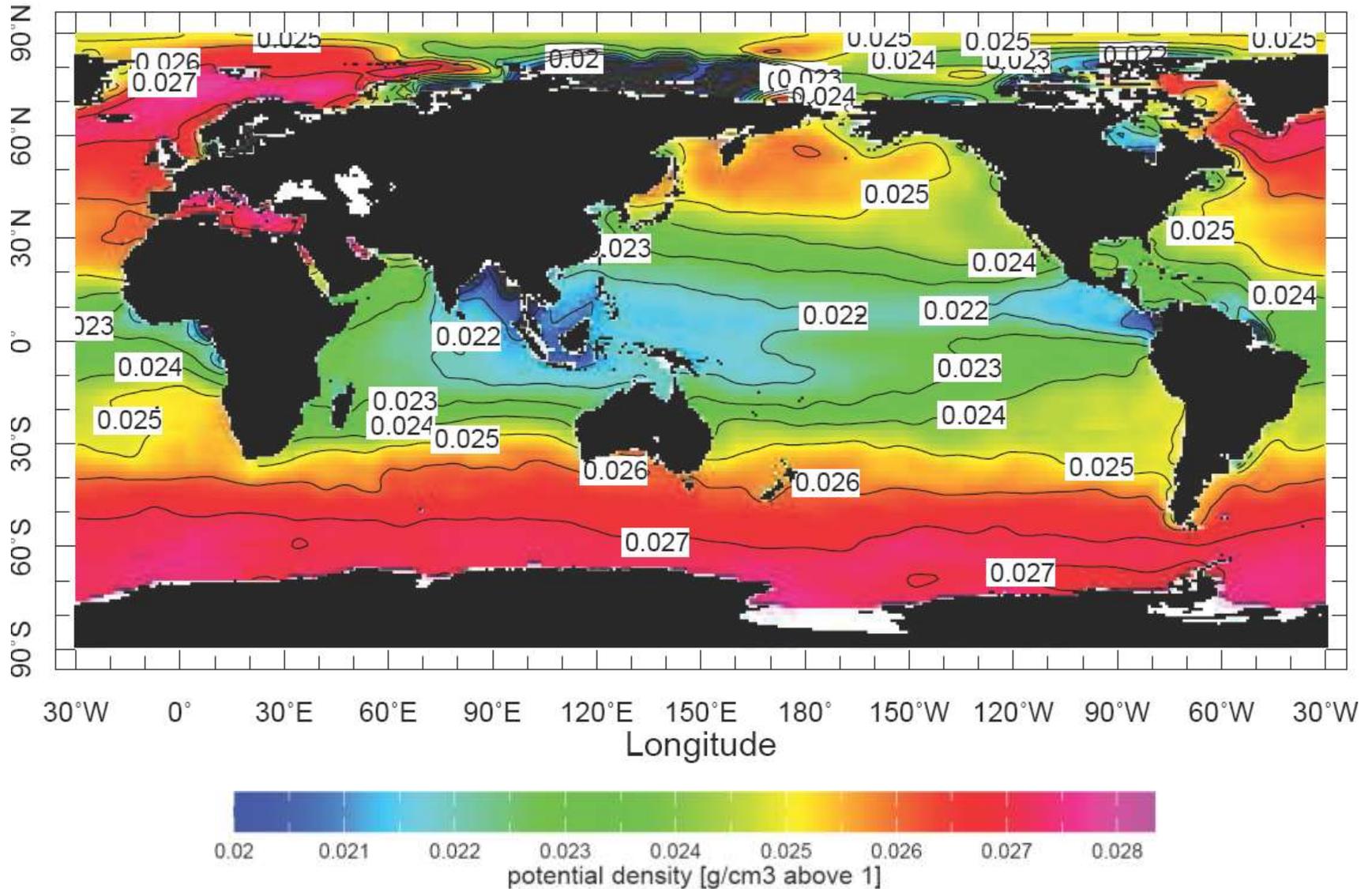
Temperatura superficial



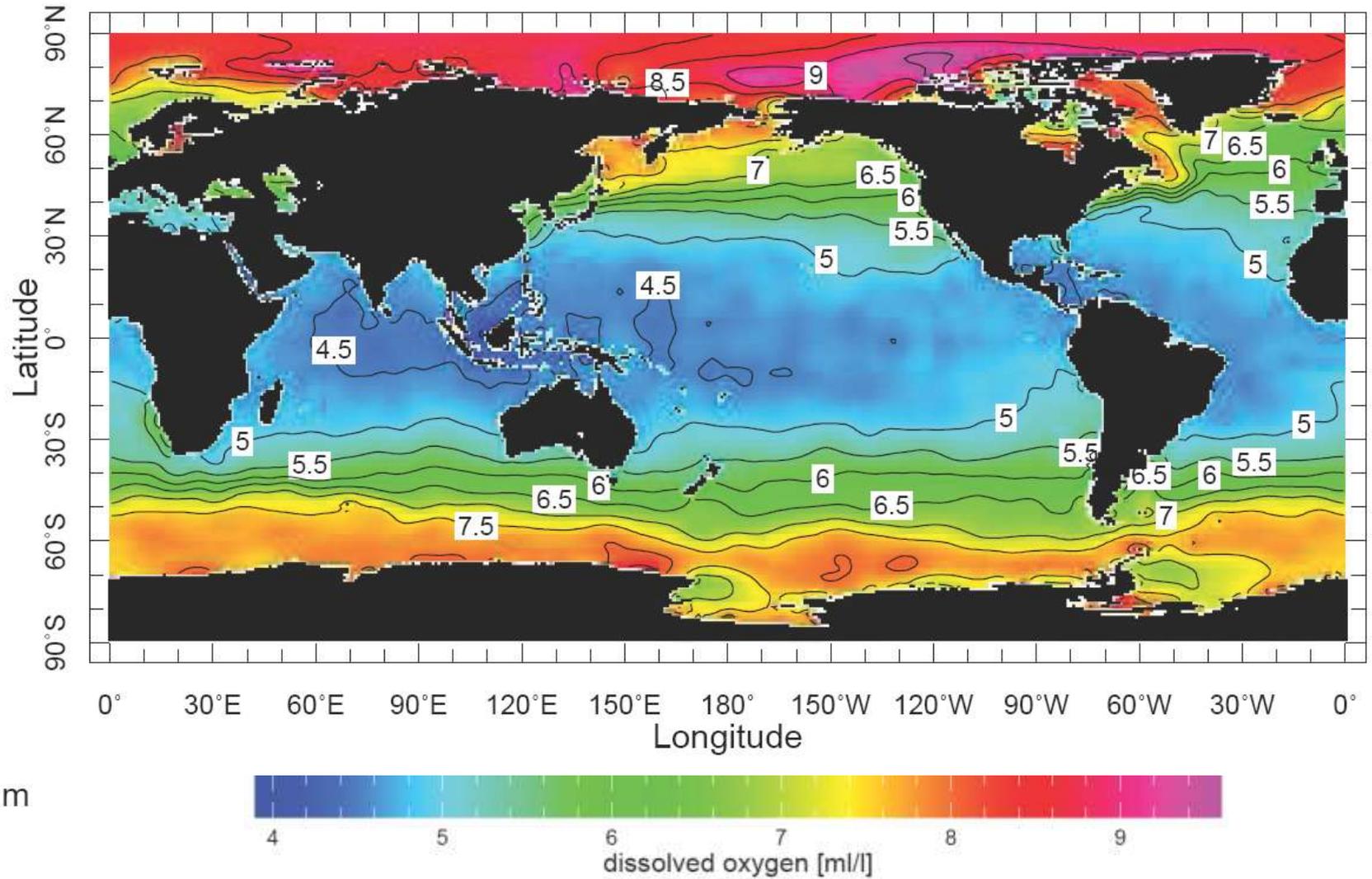
Salinidad superficial



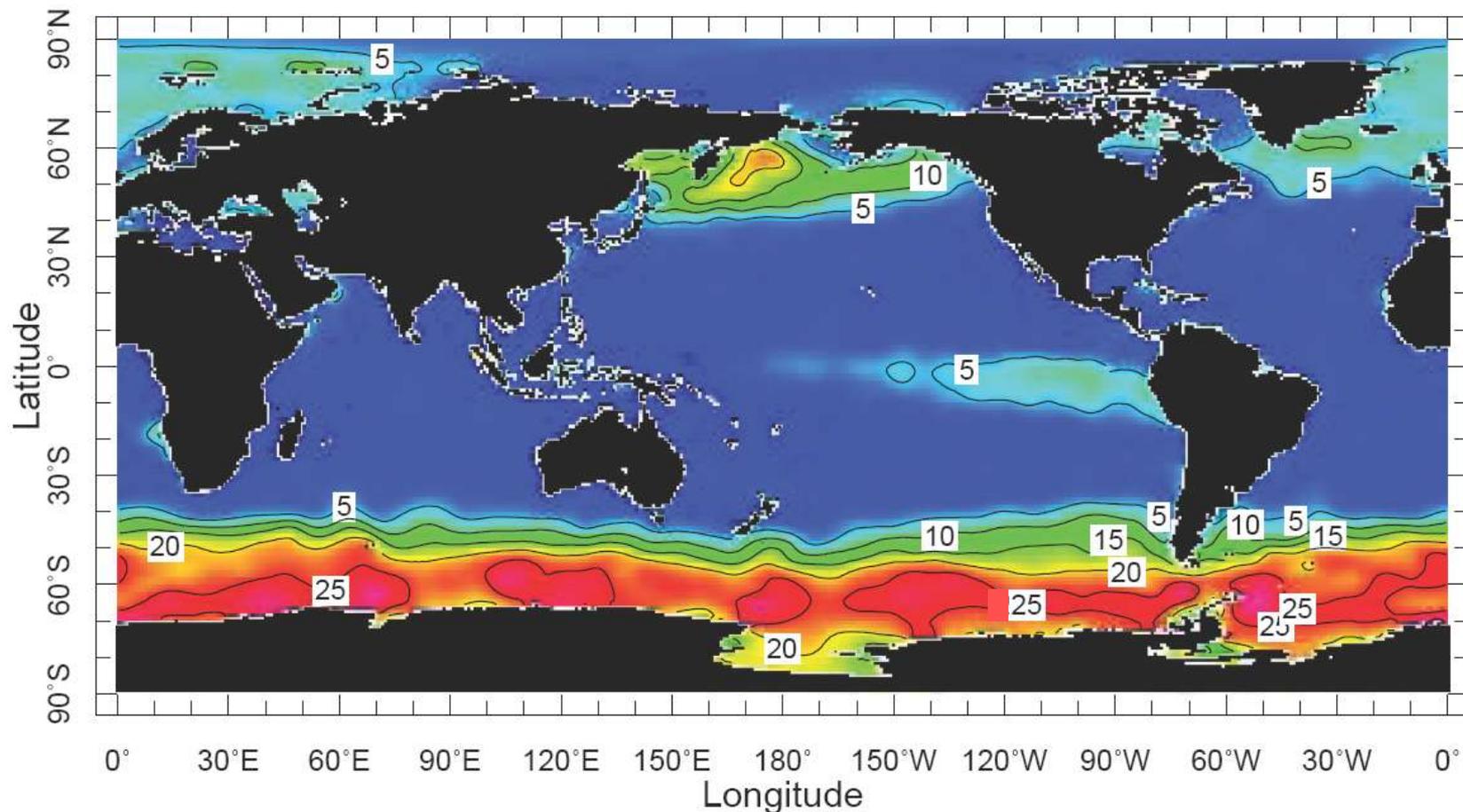
Densidad superficial



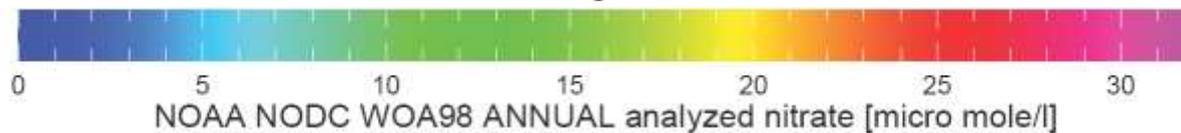
Oxígeno disuelto superficial



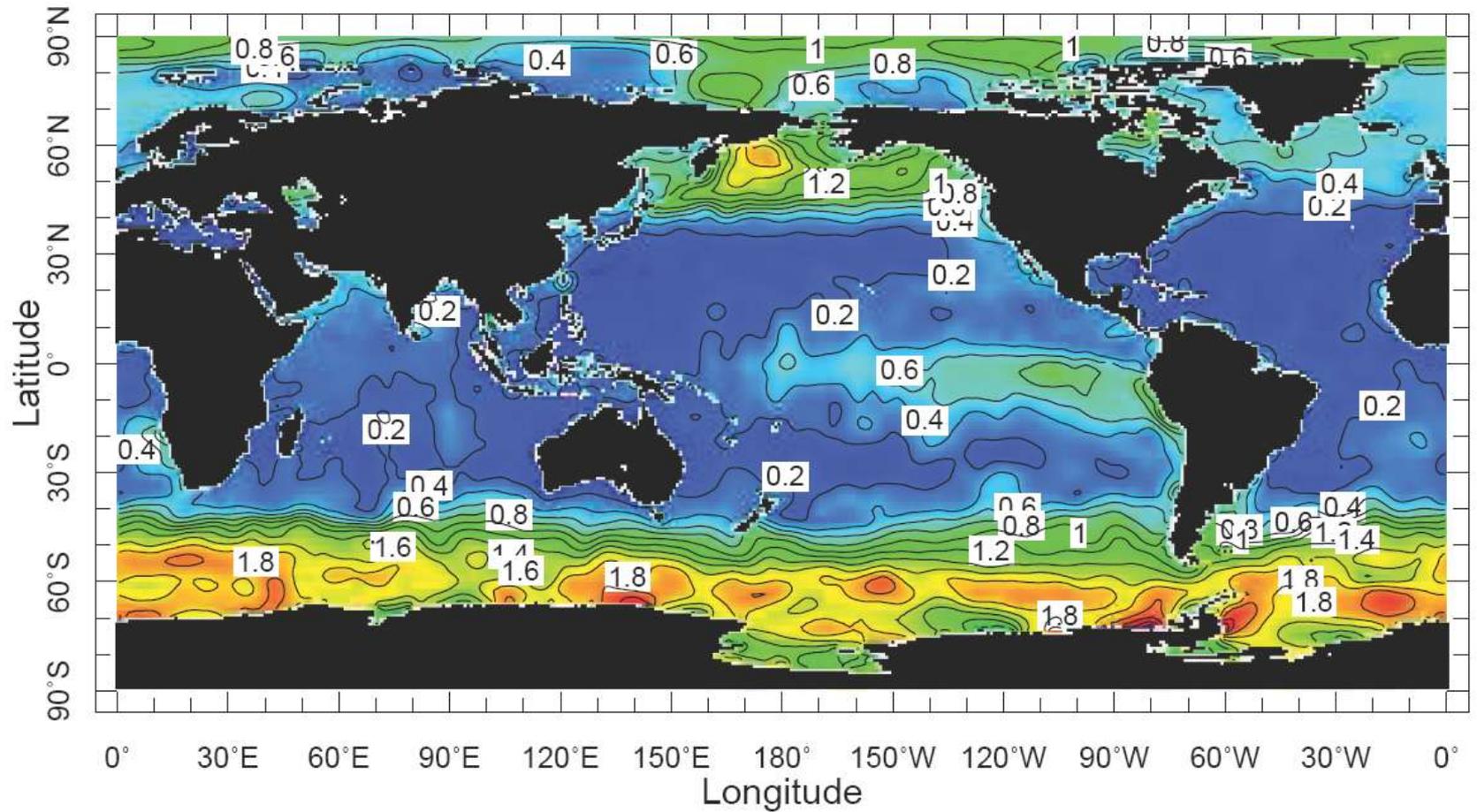
Nitrato superficial



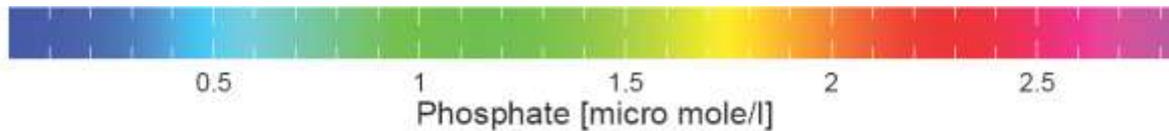
0.0 m



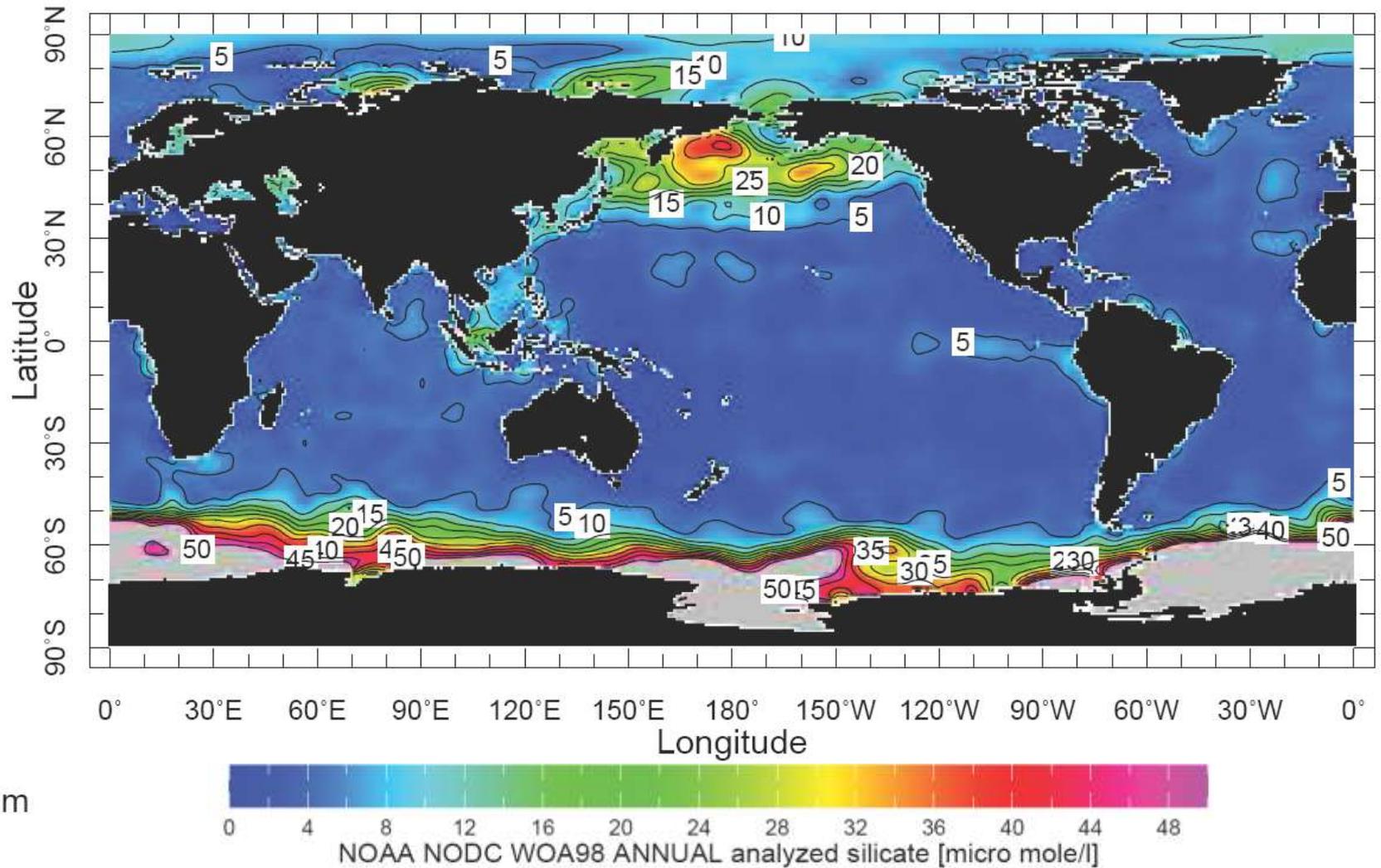
Fosfato superficial



0.0 m



Silicato superficial



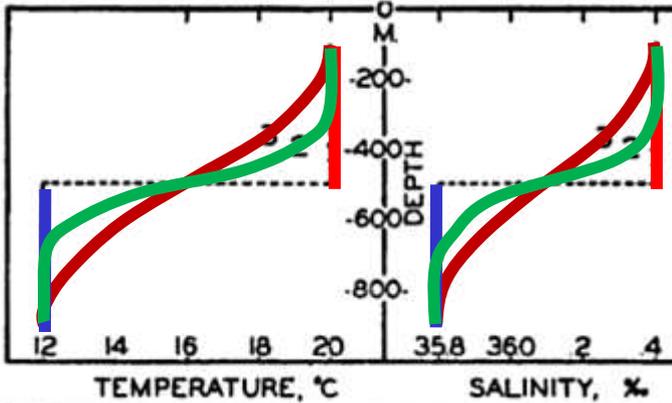
Espacio temperatura – salinidad 1

Perfiles verticales

Temperatura

Salinidad

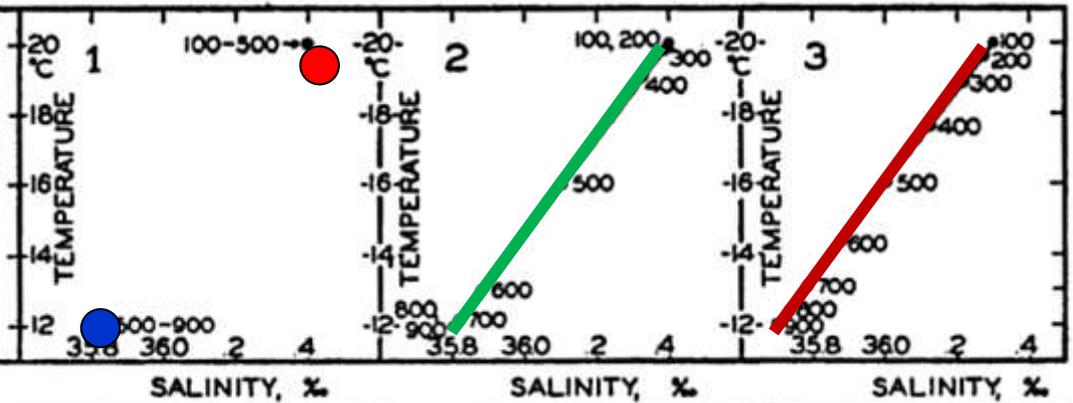
Profundidad



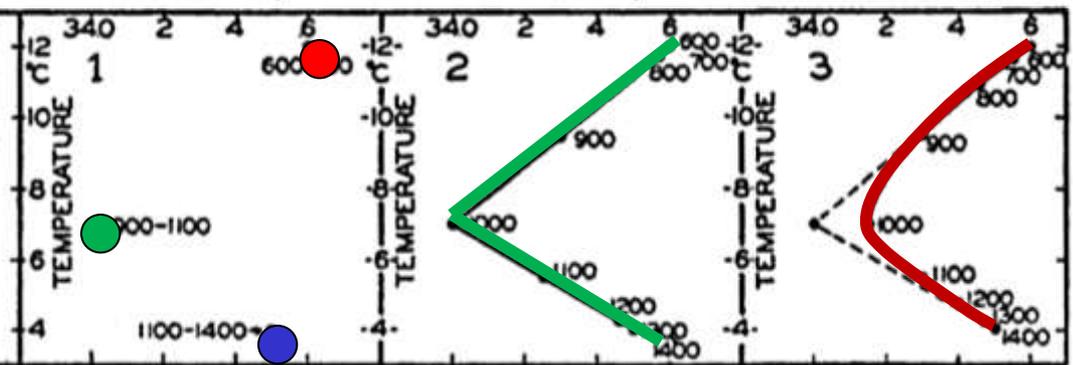
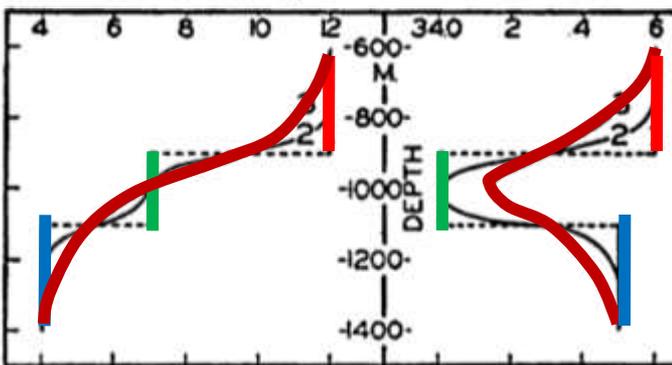
Espacio T-S

Salinidad

Temperatura



Profundidad



Temperatura

Espacio temperatura – salinidad 2

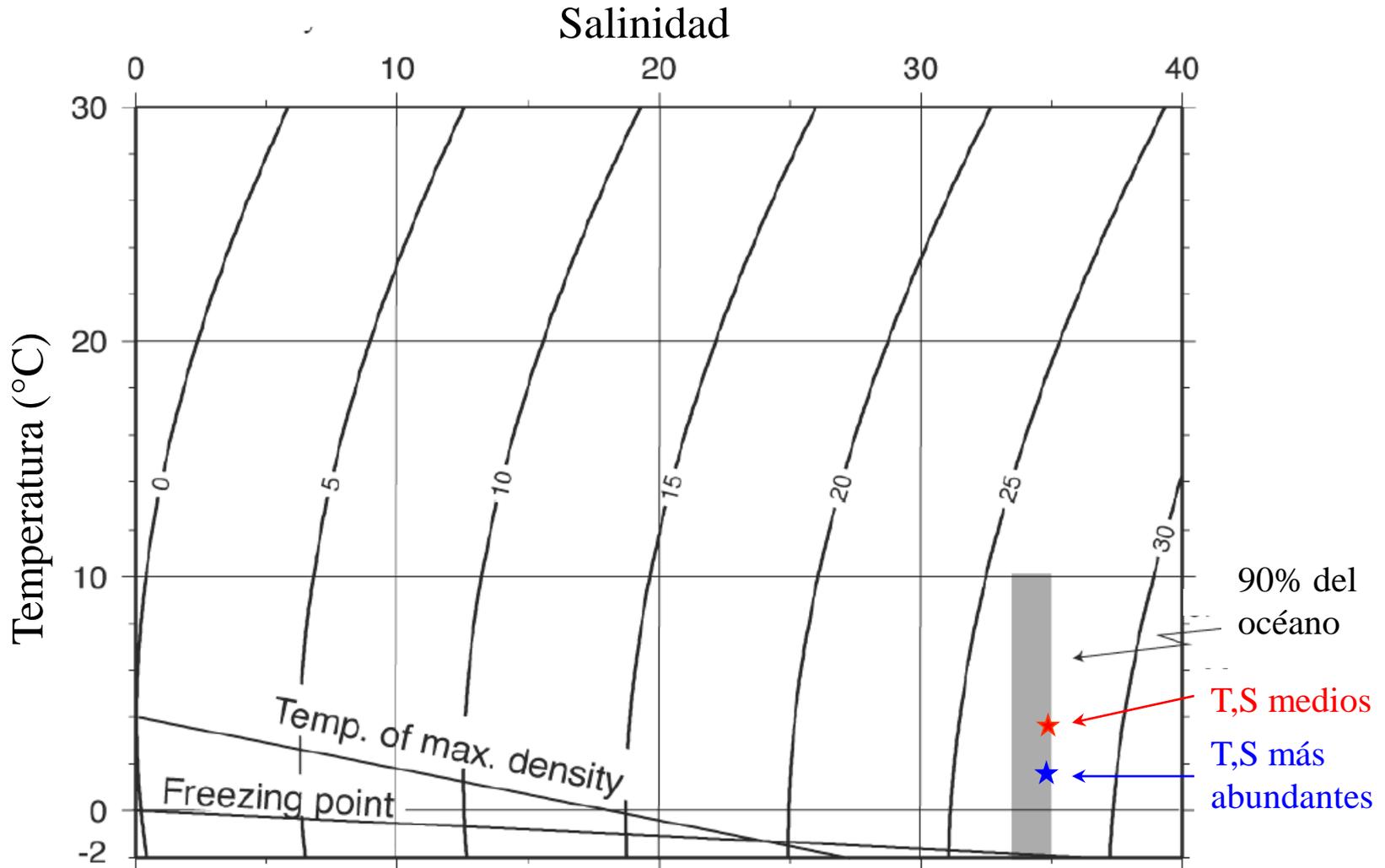


Fig. 3.1 Values of density (σ_t ; curved lines) and the loci of maximum density and freezing point (at atmospheric pressure) for seawater as functions of temperature and salinity. The full density ρ is $1,000 + \sigma_t$ with units of kg/m^3 .

Espacio temperatura – salinidad 3

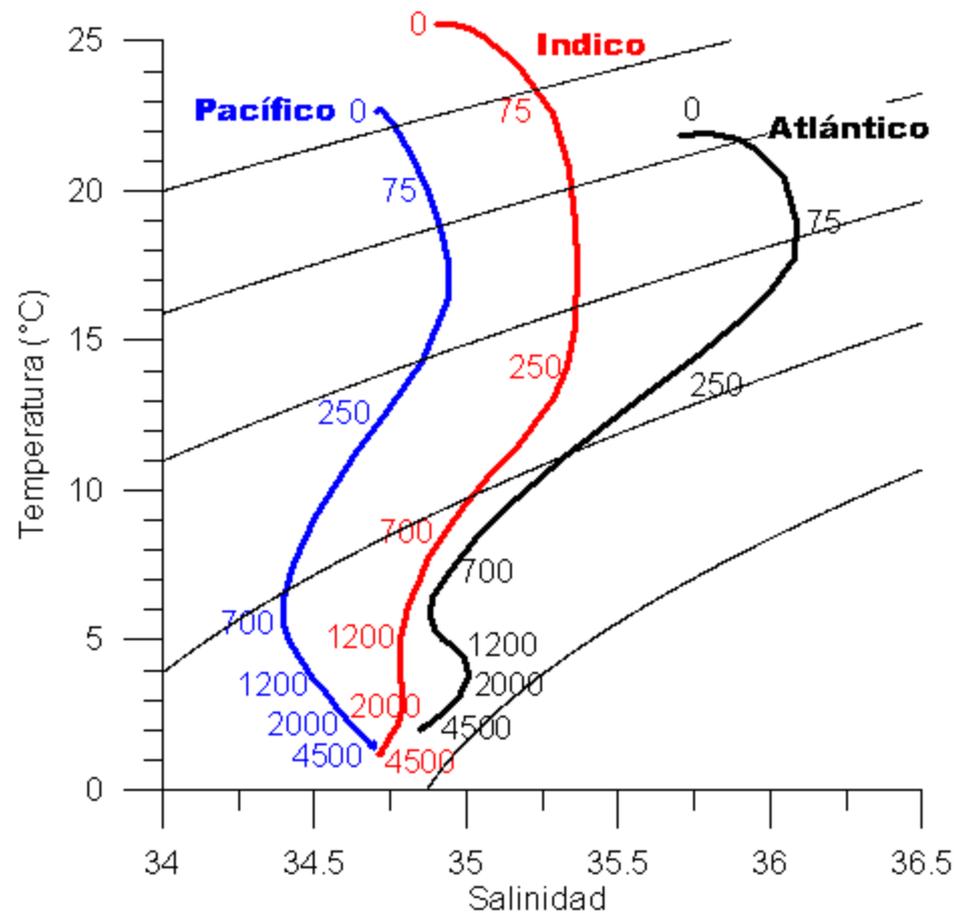


Diagrama T-S de los tres océanos obtenidos mediante el promedio de las temperaturas (°C) y salinidades sobre niveles horizontales. Las líneas negras finas representan isopícnas ($\sigma\text{-T}$) entre 24 y 28 kg/m^3). Nótese las diferencias entre las cuencas que son producidas por las diferencias de los balances de calor y agua a través de la superficie del mar. Los datos empleados son los de "Levitus", disponibles, por ejemplo en:

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NODC/WOA98/ANNUAL/>

Análisis volumétrico temperatura – salinidad

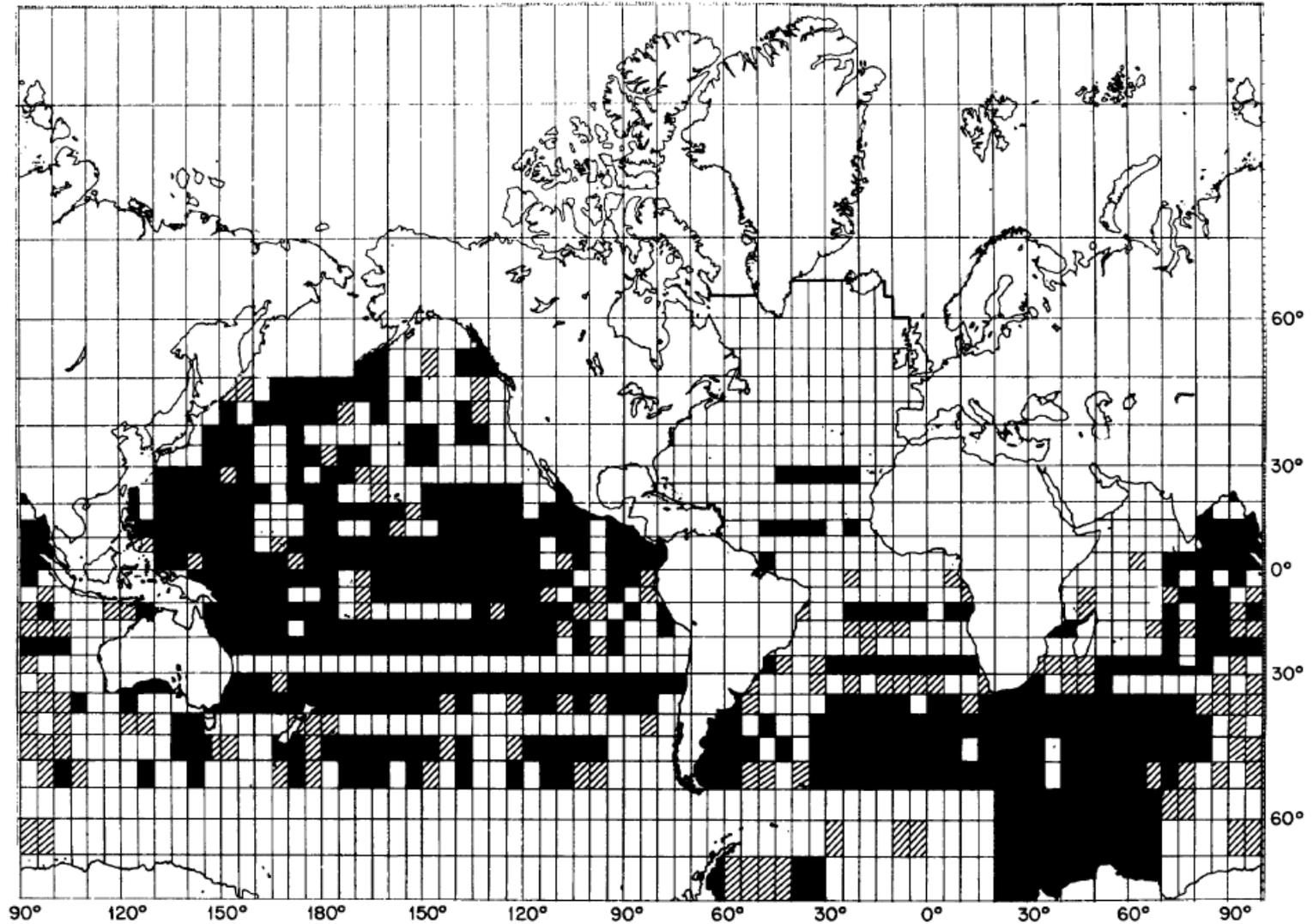


Figure 2.1 Coverage chart showing where high-quality deep stations are available (up to June 1977) in the world ocean. Unshaded 5°-squares contain at least one high-quality deep

station. Crosshatched 5°-squares contain at least one high-quality station but in a shallow area of the square. Black 5°-squares contain no high-quality deep stations.

Análisis volumétrico temperatura – salinidad

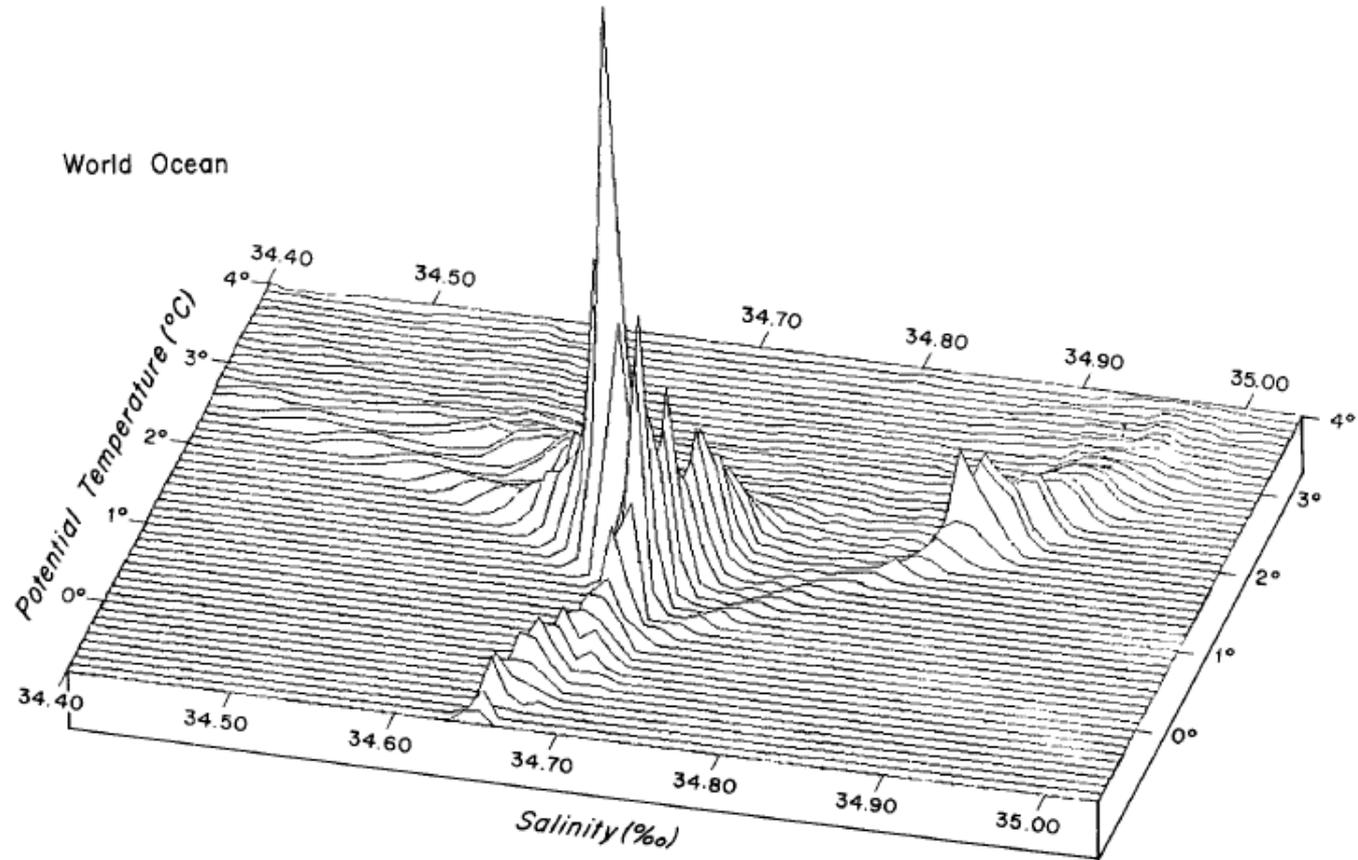
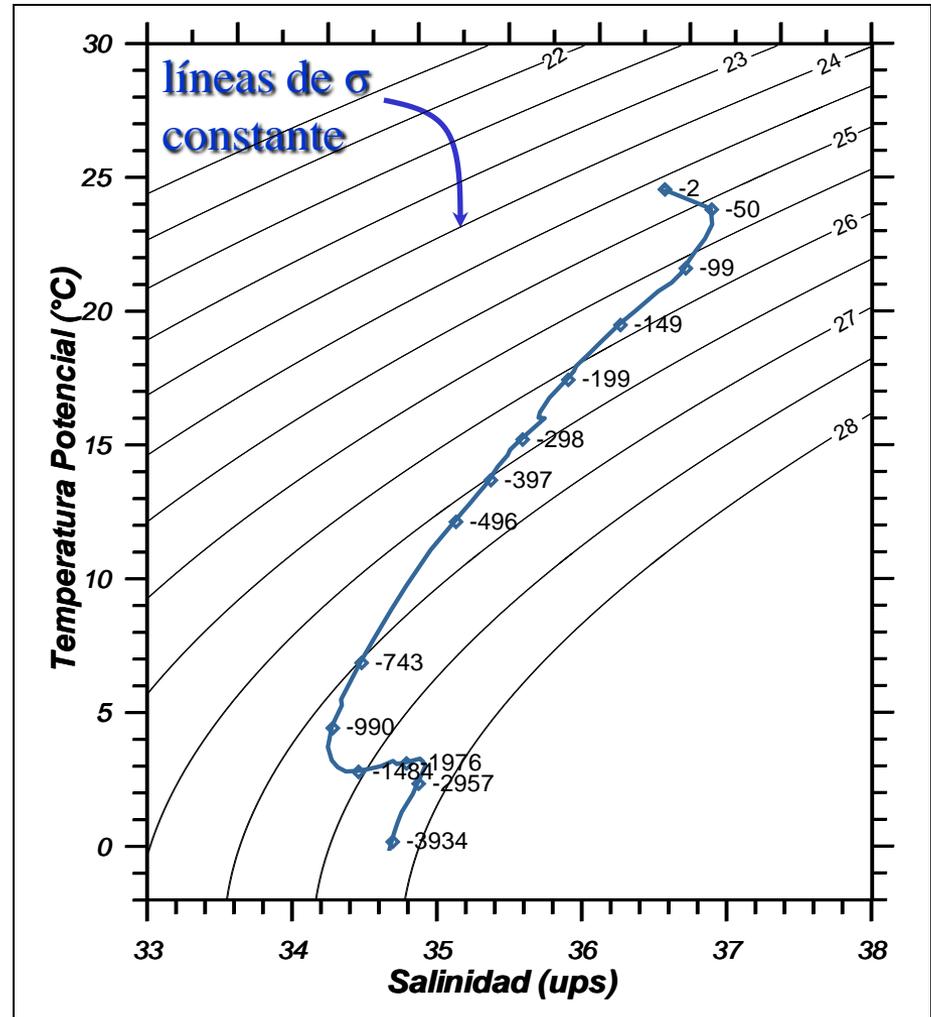
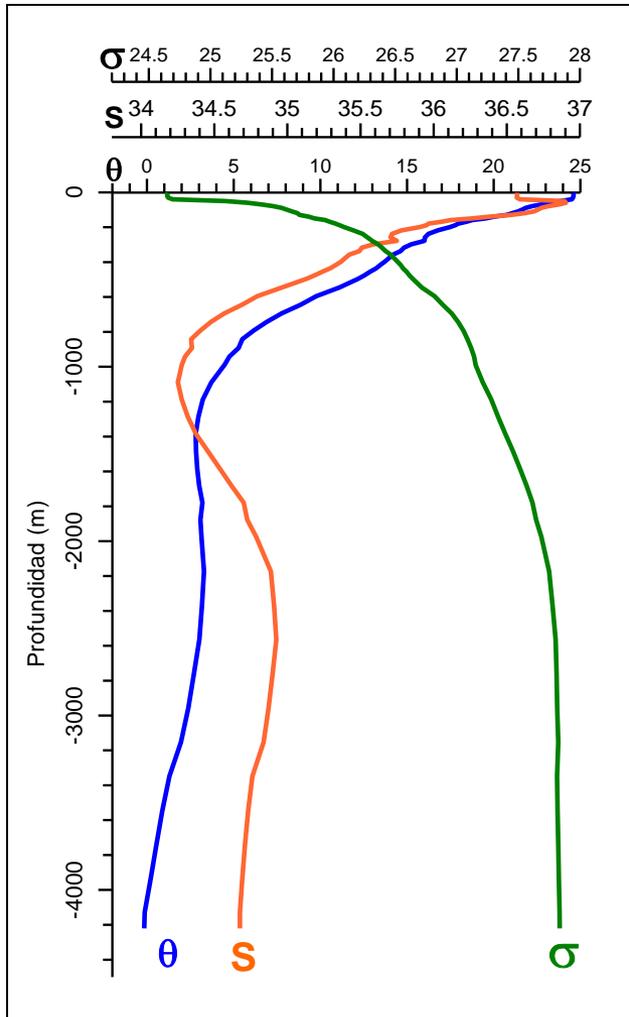


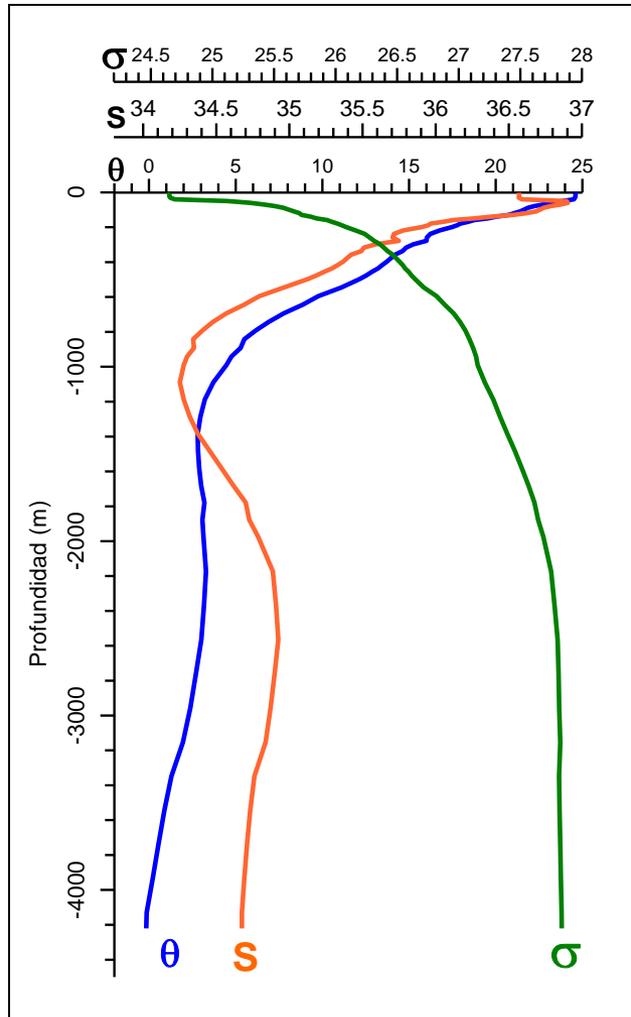
Figure 2.2 Simulated three-dimensional T-S diagram of the water masses of the world ocean. Apparent elevation is pro-

portional to volume. Elevation of highest peak corresponds to $26.0 \times 10^6 \text{ km}^3$ per bivariate class $0.1^\circ\text{C} \times 0.01\text{‰}$.

Espacio temperatura – salinidad 4



Estabilidad vertical



$$E = -(1/\rho) (\partial\rho / \partial z)$$

Una buena aproximación para desplazamientos verticales grandes (decenas de m):

$$E = -(1/\rho) (\partial\sigma_n / \partial z)$$

Donde σ_n es la anomalía de densidad calculada a la presión media del intervalo de desplazamiento vertical.

Origen de las sales disueltas

Composición de agua de río y de agua de mar concentraciones en mEq/l

	<i>Ríos</i>	<i>Mar</i> <i>35ppm</i>	<i>Sales</i> <i>cíclicas</i>	<i>Ríos-</i> <i>s.c.</i>
<i>Iones Positivos (cationes)</i>				
Sodio Na ⁺	0.27	468	0.19	0.08
Potasio K ⁺	0.06	10	0.00	0.06
Magnesio Mg ⁺⁺	0.34	107	0.04	0.30
Calcio Ca ⁺⁺	0.75	20	0.01	0.74
<i>Total Cationes</i>	1.42	605	0.24	1.18
<i>Iones negativos (aniones)</i>				
Cloro Cl ⁻	0.22	546.5	0.22	0.00
Bicarbonato HCO ₃ ⁻	0.96	2.3	0.00	0.96
Sulfato SO ₄ ⁻⁻	0.24	56.2	0.02	0.22
<i>Total Aniones</i>	1.42	605.0	0.24	1.18

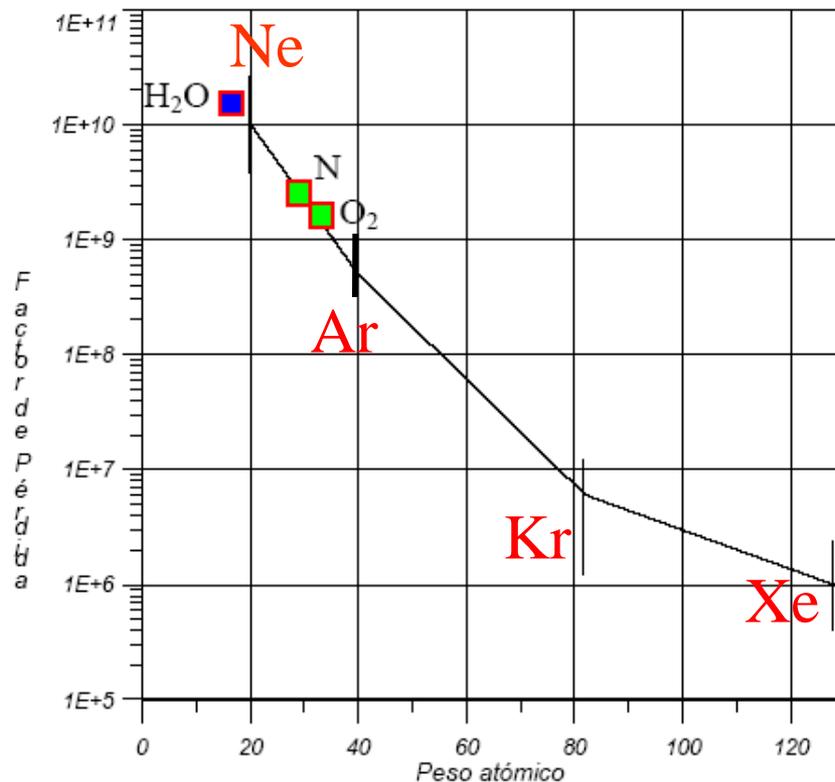
Tiempos de residencia

los principales constituyentes del agua de mar

<i>Constituyente</i>	<i>Tasa agua mar/ agua río - s.c.</i>	<i>Tiempo de residencia 10⁶ años</i>
Agua	0.965	0.044
Sales totales	500.0	22.0
HCO ₃ ⁻	2.4	0.11
Ca ⁺⁺	27.0	1.2
K ⁺	170.0	7.5
SO ₄ ⁻⁻	250.0	11.0
Na ⁺	5900.0	260.0
Cl ⁻	infinito	infinito

La concentración de gases nobles

El factor de pérdida es la tasa entre la concentración relativa de un gas noble en el sol sobre la concentración relativa en meteoritos supuestamente similares a material del manto.



La concentración relativa de gases nobles presentes en el sol es seguramente similar a la de la tierra durante su formación. Sin embargo la concentración relativa hallada en meteoritos de configuración química similar al manto terrestre es muy inferior. El factor de pérdida aumenta para pesos atómicos bajos lo que sugiere que estos elementos, más volátiles se perdieron de la tierra a altas temperaturas. El agua, de peso atómico 18, así como el N y oxígeno, de pesos atómicos 28 y 32 también deben haberse perdido mayormente en la Tierra original.

$$KE = \frac{1}{2} m v^2 \sim T \text{ (}^\circ\text{K)}, \text{ por lo tanto: } v \sim (T/m)^{1/2}$$

Balance geoquímico

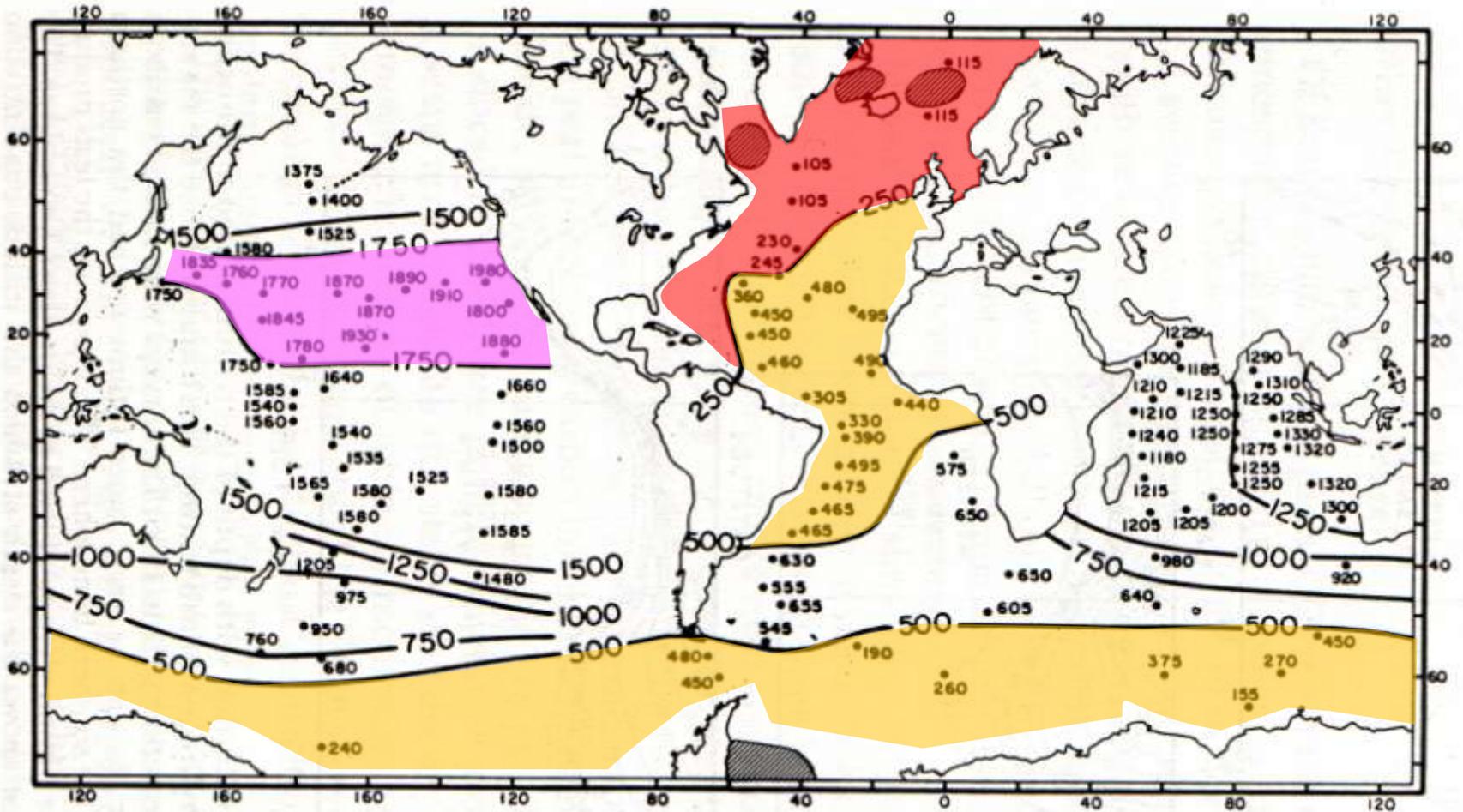
Los elementos volátiles en exceso

$$M_{\text{rocas crist erosionada}} \times C_{\text{rocas crist erosionada}} = M_{\text{sedimentos}} \times C + M_{\text{atmósfera}} \times C_{\text{atmósfera}} + M_{\text{océano}} \times C_{\text{océano}}$$

	Elemento o componente en 10 ¹⁷ Kg				
	H ₂ O	C CO ₂	Cl	N	S
Atmósfera y océano	14600	1.5	276	39	13
Rocas sedimentarias	2100	920	30	4	15
Total	16700	921	306	43	28
Erosión Rocas cristalinas	130	11	5	0.6	6
Excesos	16600	910	300	42	32

Edad del océano profundo

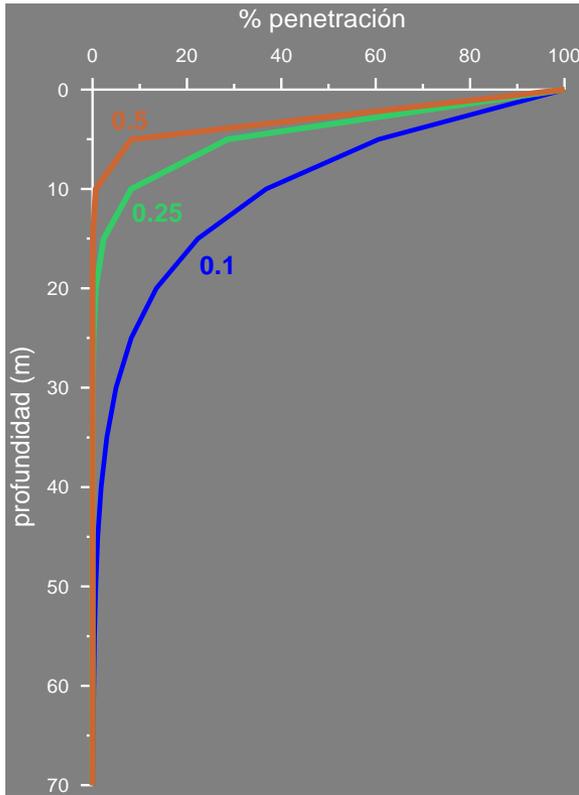
Determinación empleando ^{14}C



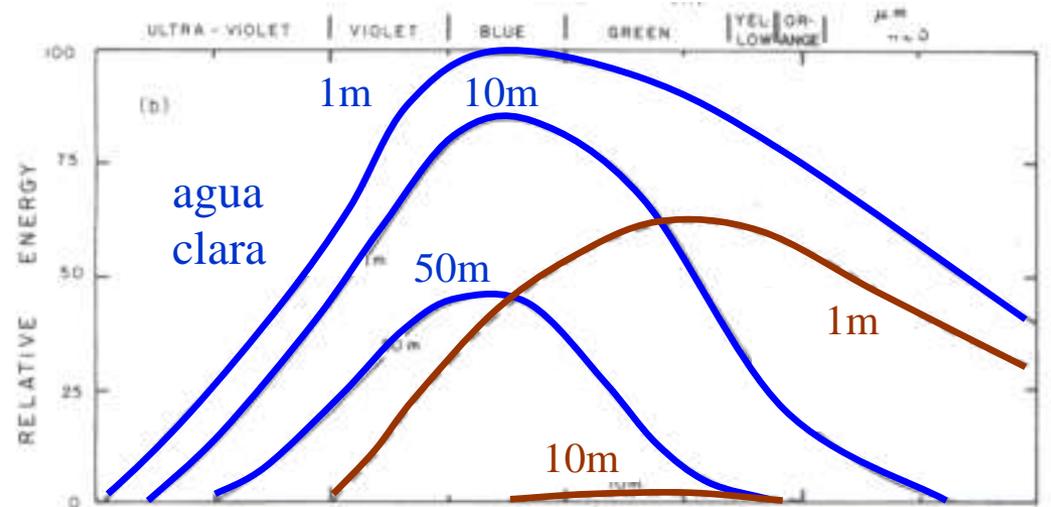
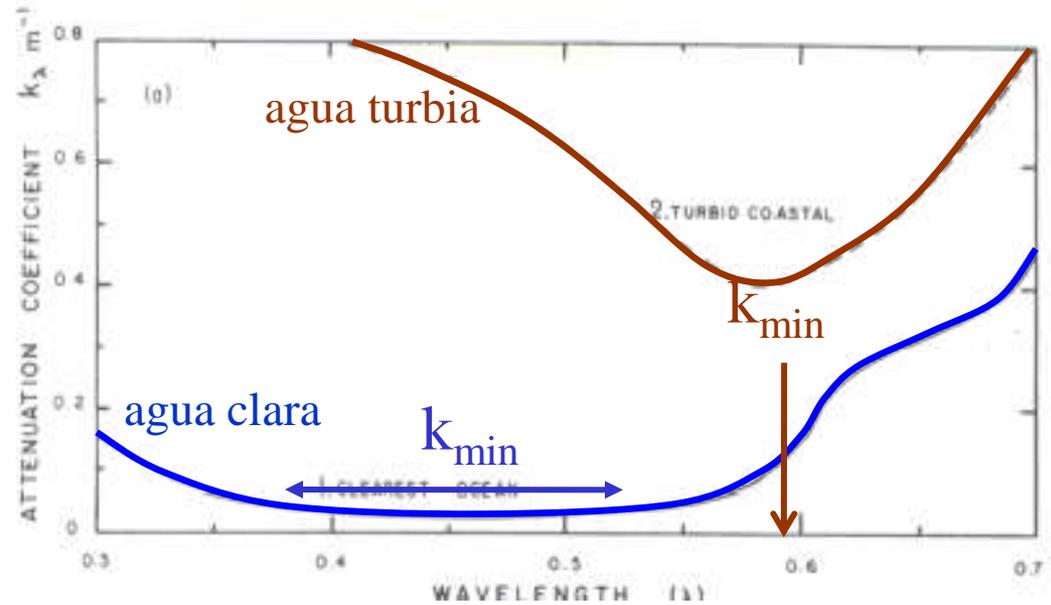
Tiempo en años transcurridos desde que una parcela de agua situada actualmente a 3000 m de profundidad estuvo en contacto con la atmósfera.

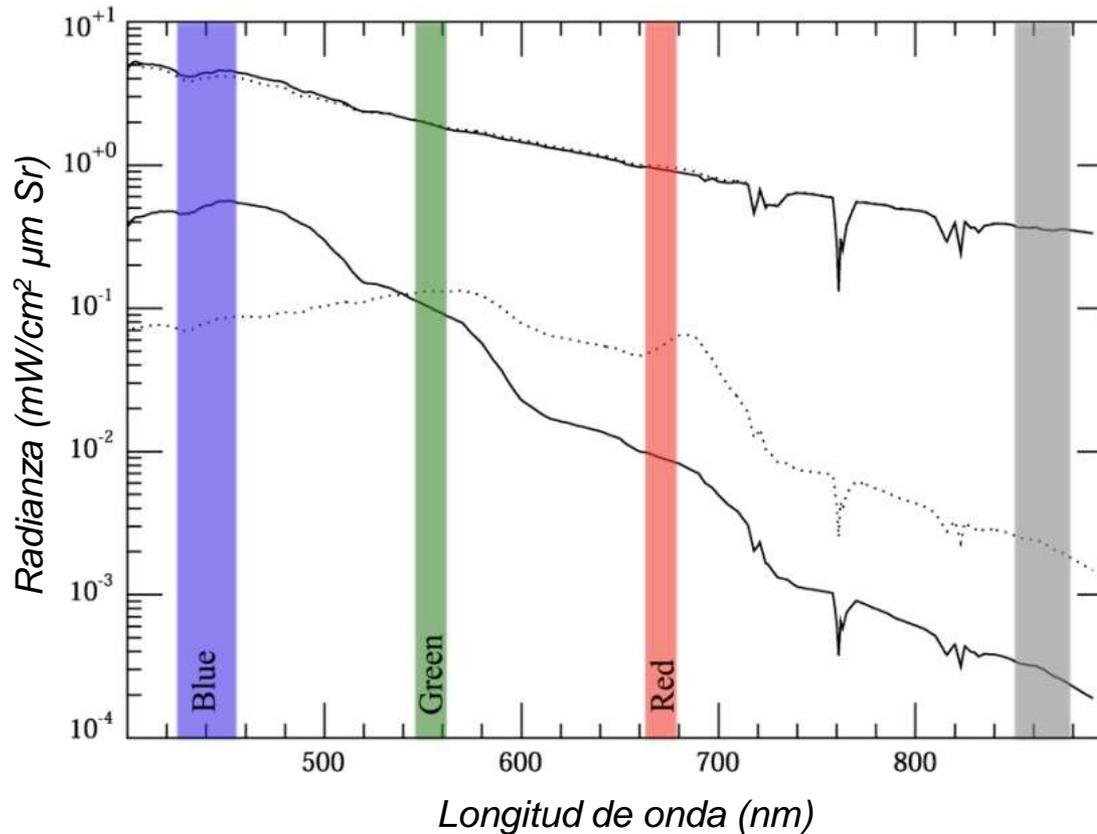
Penetración de la luz en el mar

$$I(z) = I_0 e^{-k_\lambda z}$$



k_λ es el coeficiente de absorción que depende de la longitud de onda (λ)

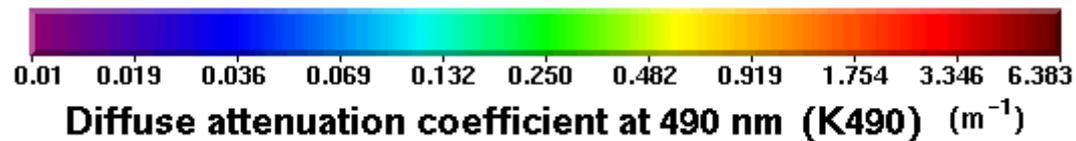
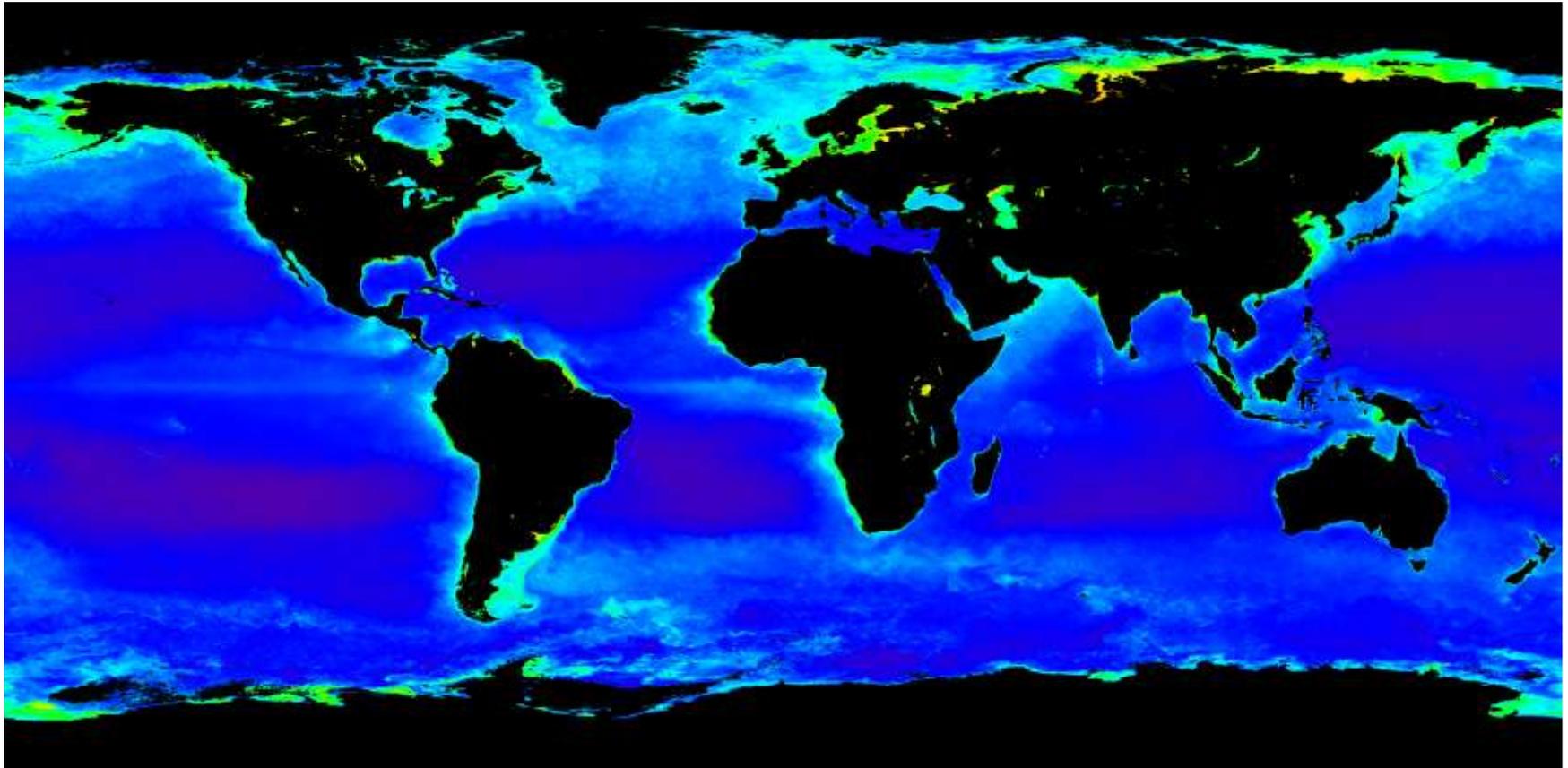




Ejemplo de la radianza emitida de la superficie del mar y la recibida por el sensor MIST (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*), con las bandas observadas indicadas. Las curvas llenas corresponden a aguas de baja concentración de clorofila (0.01 mg/m^3). Las curvas punteadas corresponden a alta concentración (10.0 mg/m^3). Las curvas de menor radianza tienen las correcciones atmosféricas aplicadas (H. Gordon, comunicación personal , 2009.)

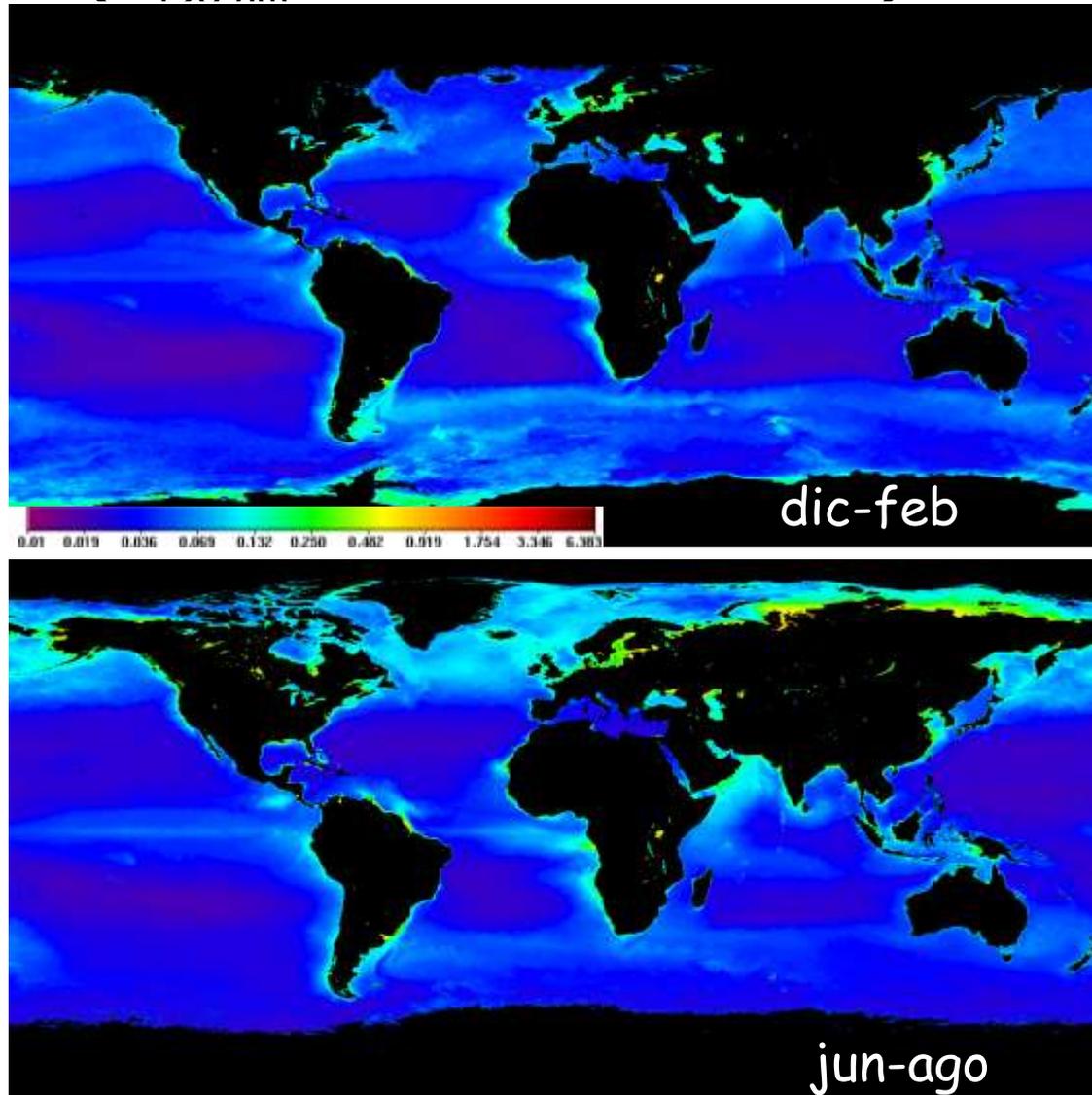
Distribución de coeficientes de atenuación

($K_{490 \text{ nm}}$, año 2002)



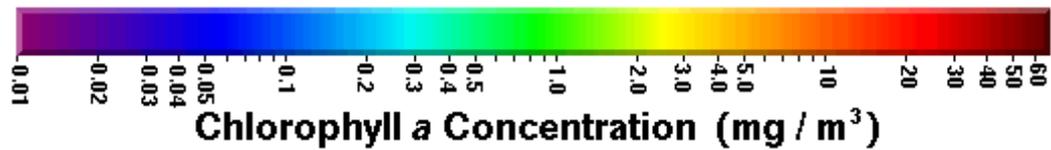
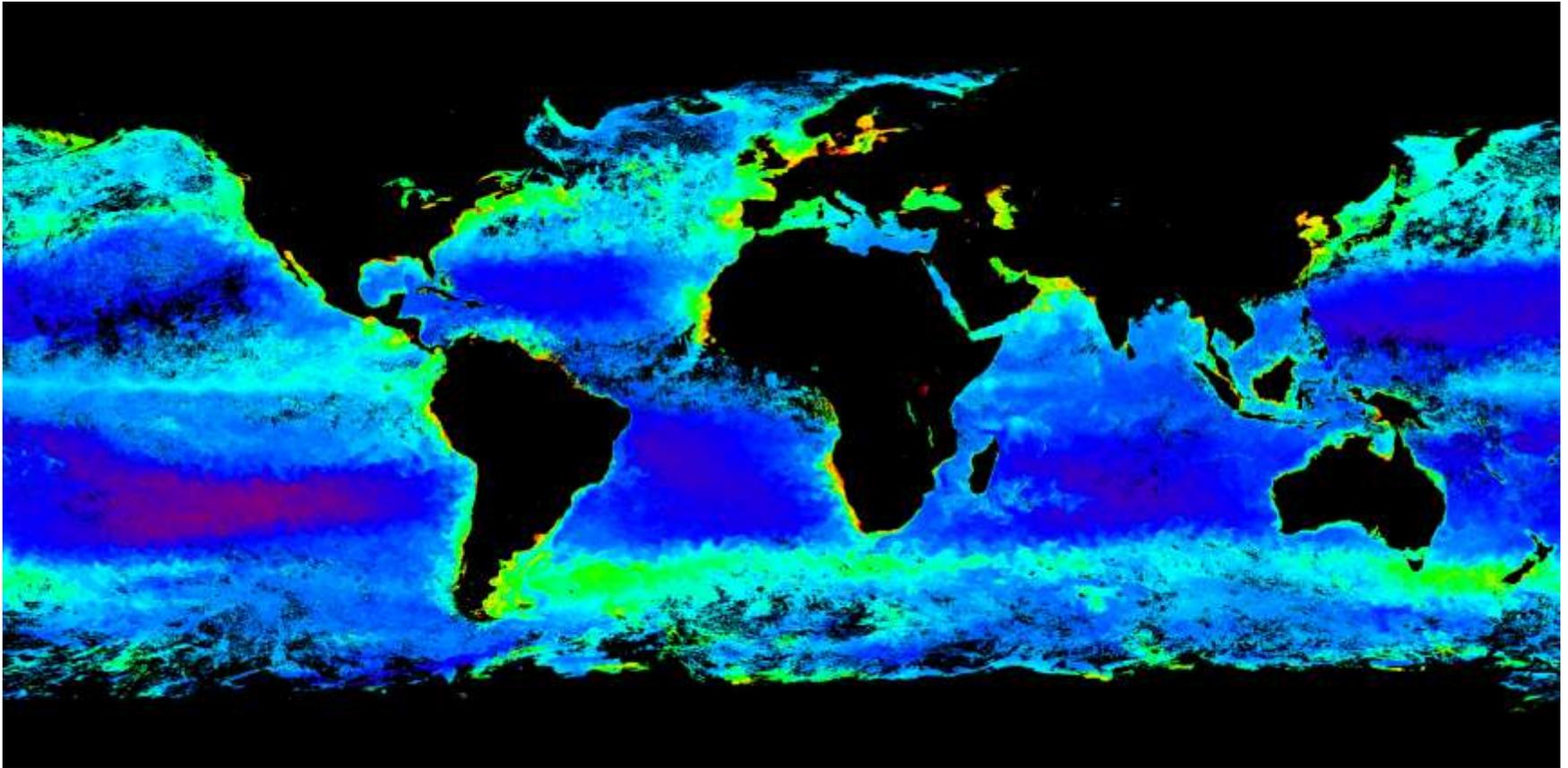
Distribución de coeficientes de atenuación

($K_{490\text{ nm}}$ variación estacional)



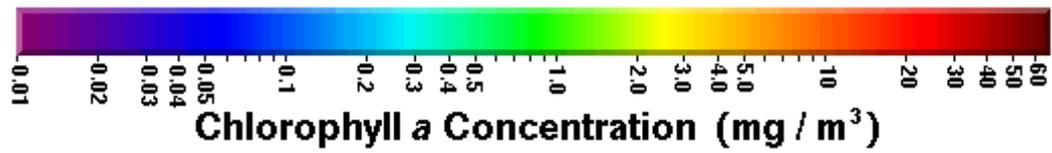
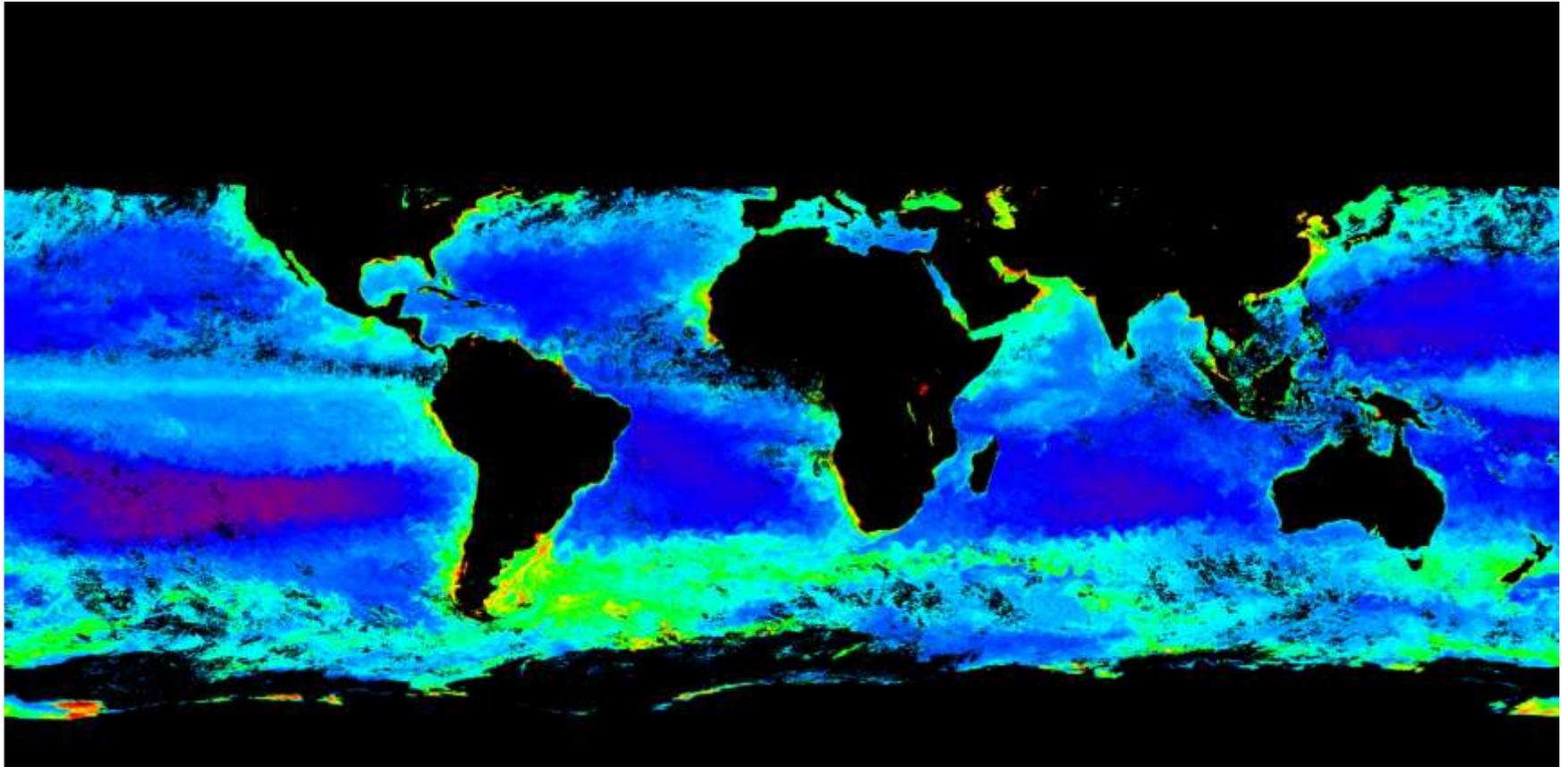
Clorofila desde satélite

(marzo 2009)



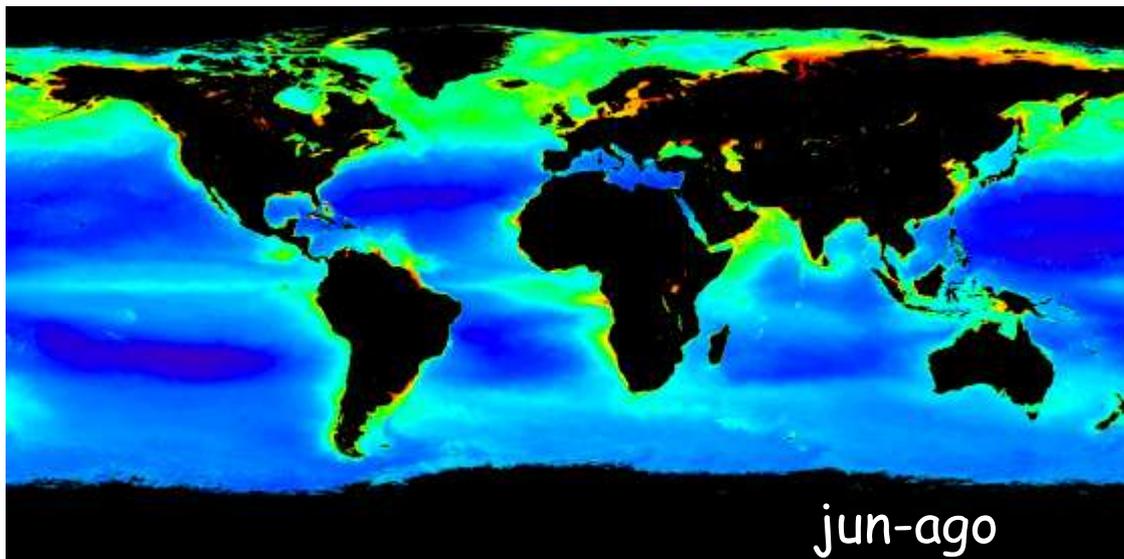
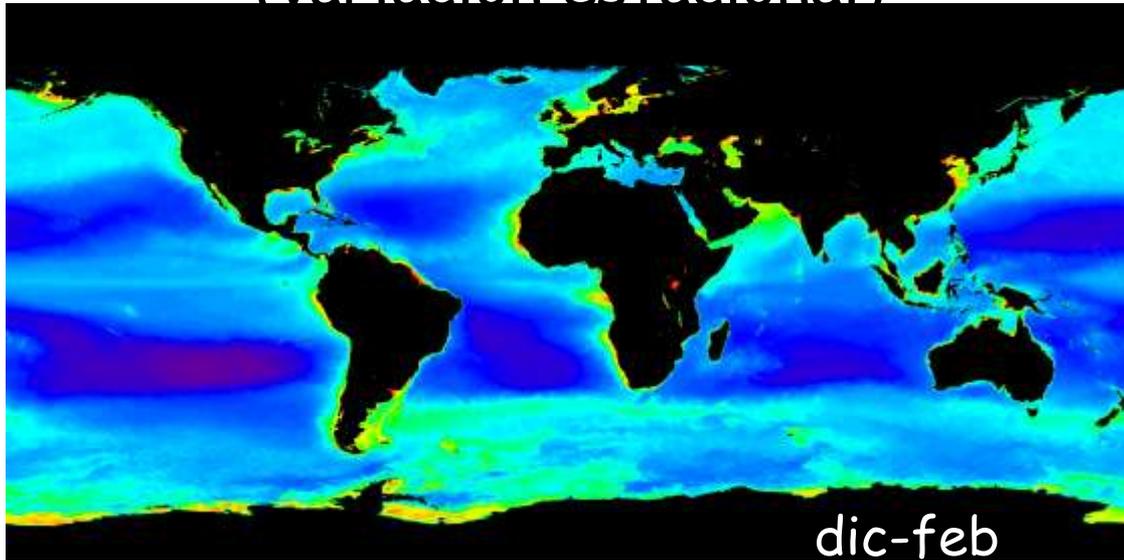
Clorofila desde satélite

(diciembre 2008)



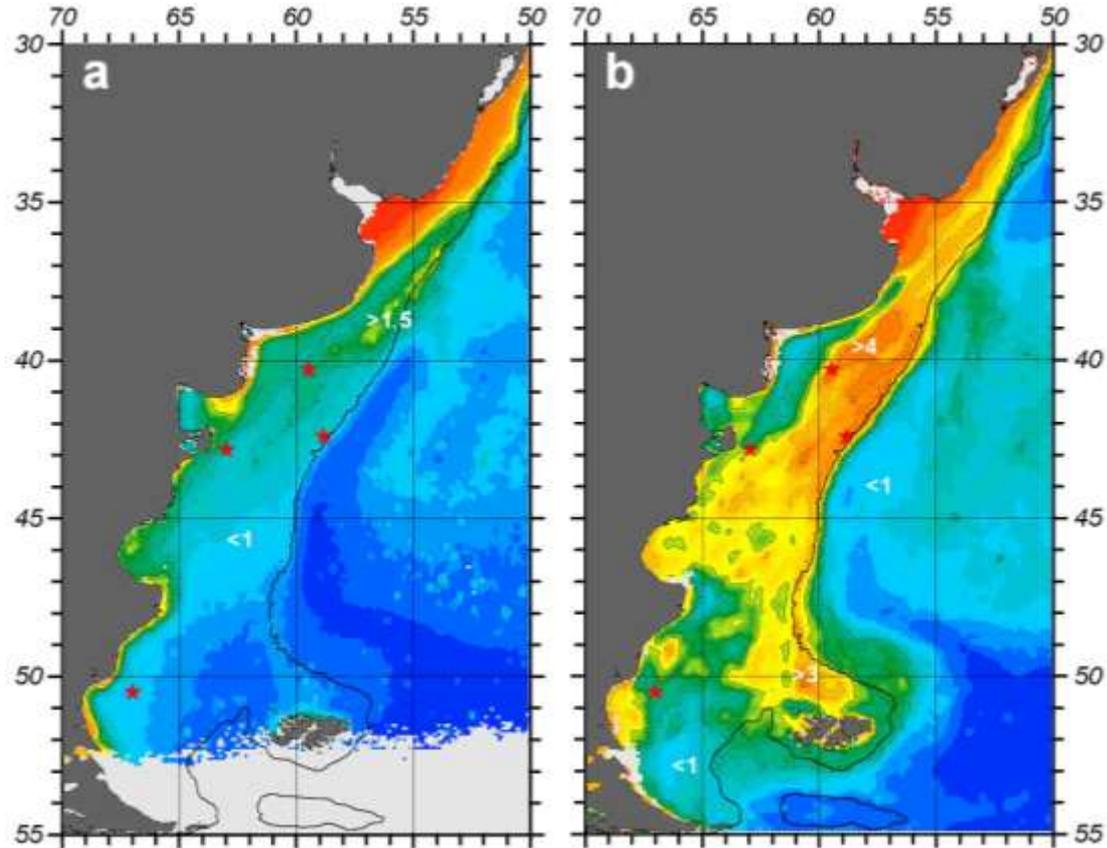
Clorofila

(variación estacional)



Clorofila

(variación estacional, detalle Atl Sudoeste)



Clorofila

(variación estacional. detalle Atl Sudoeste)

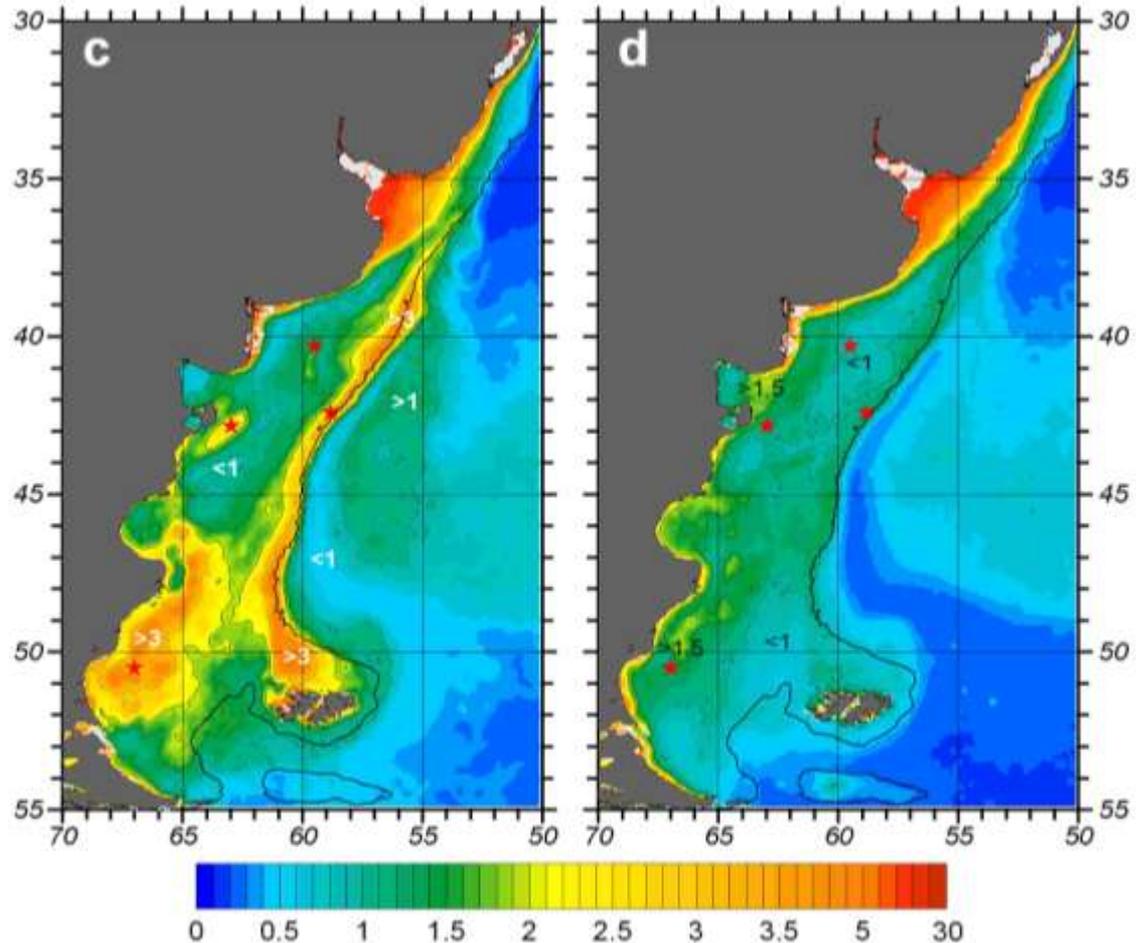


Figure 2: SeaWiFS derived surface chlorophyll a (mg/m³) in austral winter (JJA, a), spring (SON, b), summer (DJF, c) and fall (MAM, d) in the western South Atlantic. The red stars indicate the locations selected to analyze the time variability. The solid black line is the 200 m isobath and the dashed line in (c) is the location of the Southern Patagonia Front. The light gray shading shows areas where cloud cover exceeds 30% of the total number of months and areas where CSAT values exceed 64 mg/m³, usually associated to high suspended sediments, such as within the Plata estuary.

Clorofila

variación estacional e interanual en el Frente del Talud continental

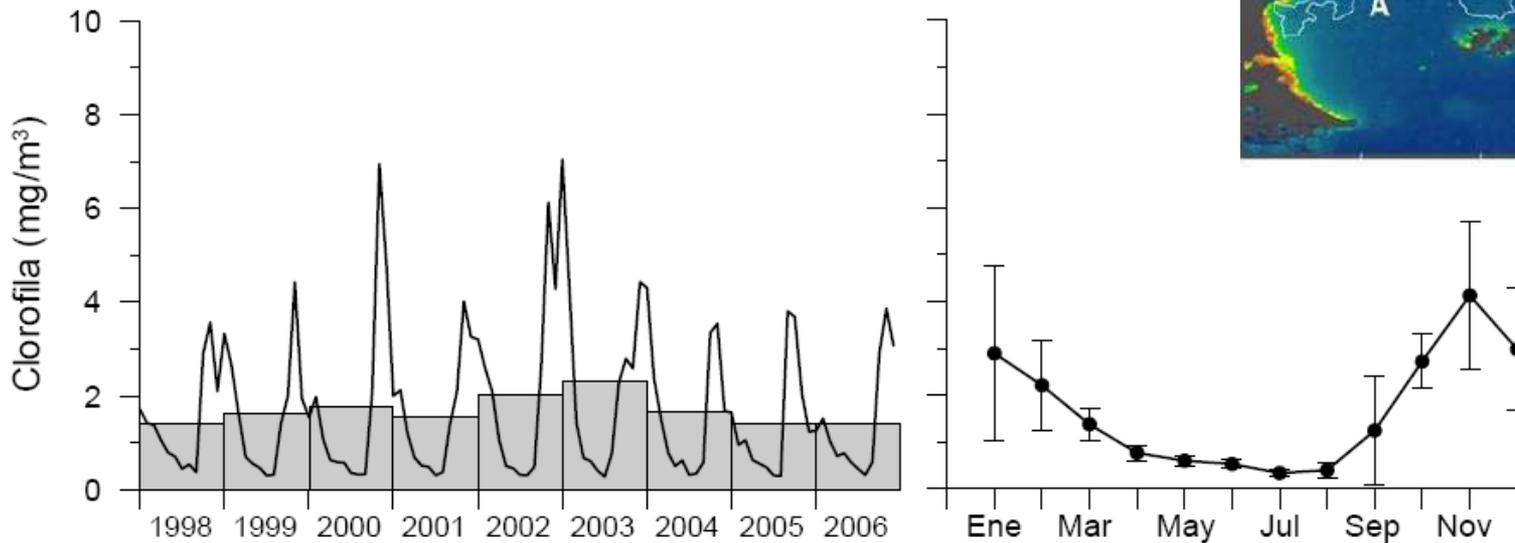
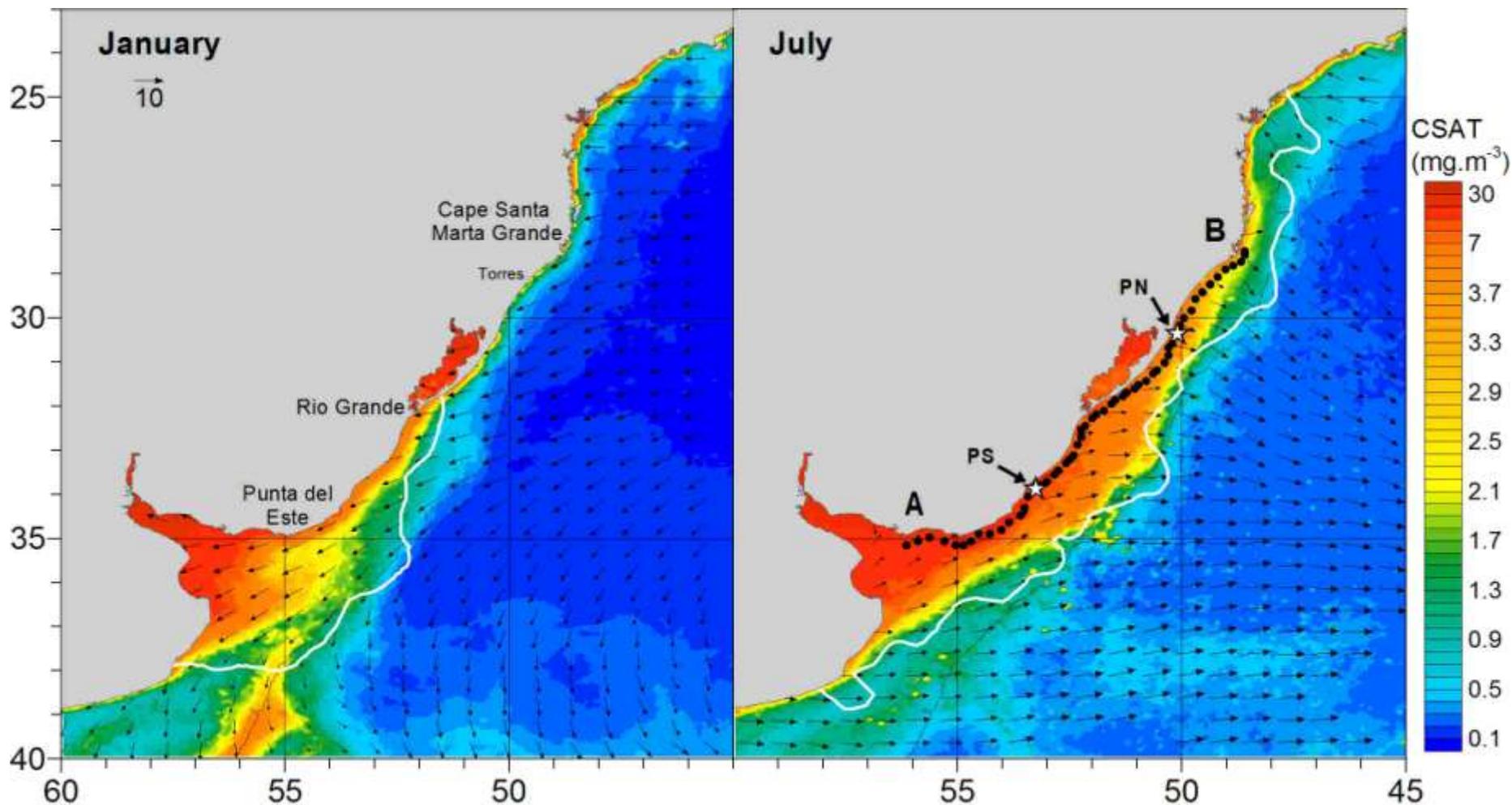


Figura. 22. Panel izquierdo: serie mensual del promedio areal de CSAT para la región limitada por el contorno de $a_{CSAT} = 3,5 \text{ mg/m}^3$, que representa el área total del Frente del Talud. Las barras grises indican los valores medios anuales de CSAT para cada año calendario. En el panel de la derecha se muestran los valores medios mensuales de CSAT para la totalidad del registro y los desvíos estándar correspondientes. (de Carranza et al., en prensa)

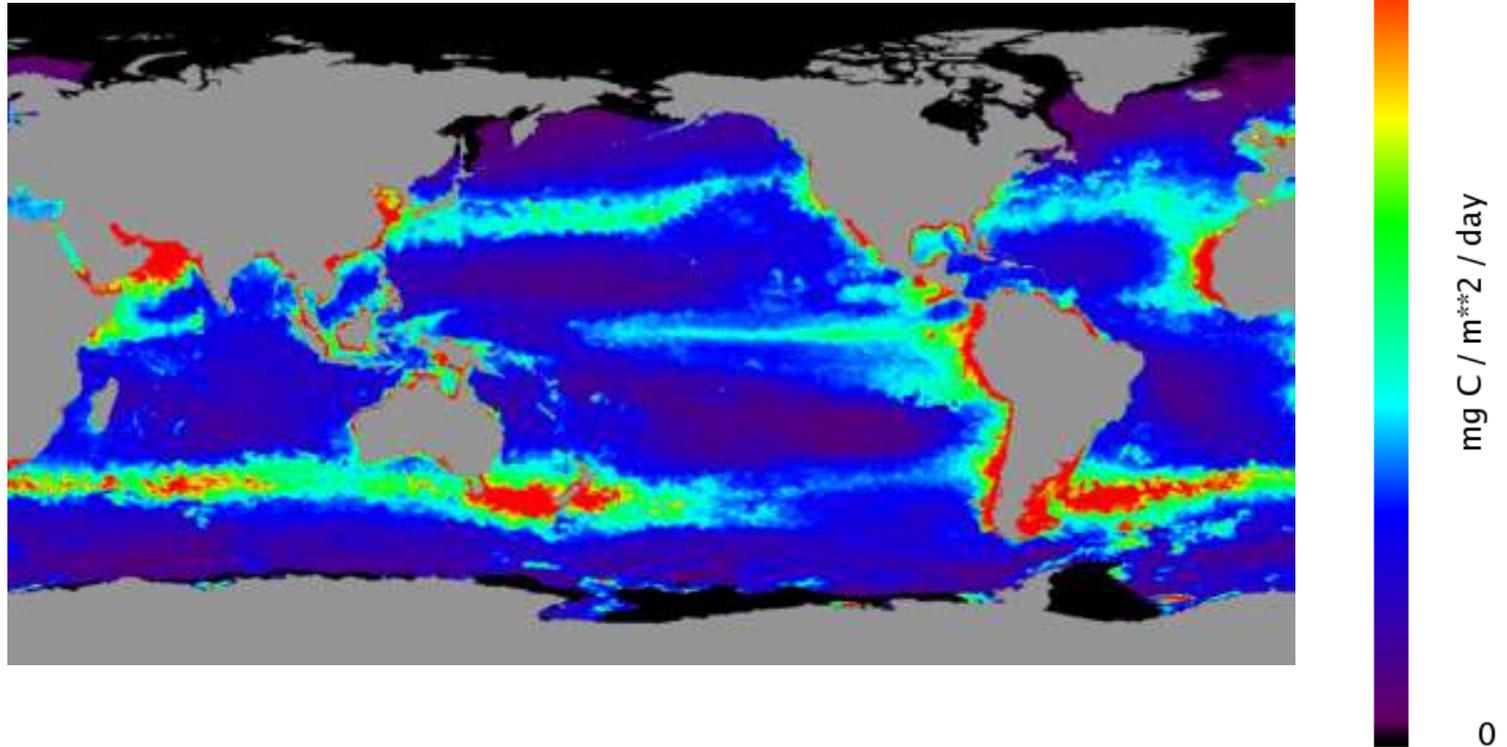
Clorofila

(variación estacional), más detalles



Producción primaria en el océano

febrero 2005



<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>

Behrenfeld, MJ, PG Falkowski, Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography* 1997a, Volume 42: 1-20.