Turbulencia en el Océano

Angel Rodríguez Santana

Grupo I+D OFYGA: Observación y Modelización de Fenómenos Geofísicos y Marinos Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Ciencia Compartida, 21 de abril de 2014

Desarrollo:

- 1.- Turbulencia y Mezcla vertical en el Océano
- 2.- Difusividad turbulenta vertical:
 - 2.1.- desde la estructura fina
 - 2.2.- desde la microestructura
- 3.- La mezcla vertical y la Circulación Oceánica Global
- 4.- Conclusiones

Turbulencia y de Mezcla Vertical en el Océano



Difusión turbulenta

Transición a la turbulencia:

Número de Reynolds: Término inercial no lineal / Término viscoso

 $Re = \frac{UL}{v}$ Re: 600 - 2000

Descomponemos el campo de la propiedad y el campo de velocidades:

$$C = \widetilde{C} + C' \qquad u = \widetilde{u} + u' \qquad v = \widetilde{v} + v' \qquad w = \widetilde{w} + w'$$

$$\overline{C} = \widetilde{C} \qquad \overline{u} = \widetilde{u} \qquad \overline{v} = \widetilde{v} \qquad \overline{w} = \widetilde{w}$$

$$\overline{C'} = 0 \qquad \overline{u'} = 0 \qquad \overline{v'} = 0 \qquad \overline{w'} = 0$$

Flujos difusivos turbulentos: $\tilde{\vec{F}}_{tC} \equiv (\tilde{F}_{tCx}, \tilde{F}_{tCy}, \tilde{F}_{tCz}) \equiv (\overline{u'C'}, \overline{v'C'}, \overline{w'C'})$

Anisotropía

$$F_{x} \equiv \overline{\rho' u'} \qquad F_{x} = -K_{x} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial x} \qquad \text{Difusion horizontal} \\ K_{x}, K_{y} \quad (10^{4} - 10^{-1}) \text{m}^{2} \text{s}^{-1} \\ F_{y} \equiv \overline{\rho' v'} \qquad F_{y} = -K_{y} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial y} \qquad F_{z} = -K_{z} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial z} \qquad \text{Difusion vertical} \\ K_{z} \quad (10^{-3} - 10^{-6}) \text{m}^{2} \text{s}^{-1} \\ F_{z} = \Gamma_{z} = -K_{z} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial z} \qquad F_{z} = -K_{z} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial z} \qquad F_{z} = -K_{z} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial z} \qquad \text{Difusion vertical} \\ F_{z} = \overline{\rho' w'} \qquad F_{z} = -K_{z} \frac{\partial \widetilde{\rho}}{\partial z} \qquad F_{z} = -K_{$$

2.1.- Difusividad turbulenta vertical desde la estructura fina:

a) Inducida por cizalla vertical del flujo:

Estimación de K_z K_z $(10^{-3} - 10^{-6})$ $m^2 s^{-2}$

En la termoclina:

Difusión vertical inducida por la cizalla vertical del flujo. Parametrizaciones en función del número de gradiente de Richardson, Ri.



Munk y Anderson (1948), Pacanowski y Philander (1981), Ueda et al. (1981), Turner (1986), Peters et al. (1988), Pelegrí y Csanady (1994), Rodríguez-Santana et al, (1999).

Inestabilidades Kelvin-Helmholtz



b) Inducida por doble difusión

Dedos de Sal

$$\mathbf{T}_{z} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial z}$$
 $\mathbf{S}_{z} = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial z}$ $\boldsymbol{\rho}_{z} = \frac{\partial}{\partial}$

lpha Coeficiente de expansión térmica

 β Coeficiente de contracción halina

k_T Coeficiente de difusión molecular térmica

K_S Coeficiente de difusión molecular para la sal

 $\frac{k_{\rm T}}{k_{\rm S}} \approx 10^2$

$$R_{\rho} = \frac{\alpha T_z}{\beta S_z}$$
 (razón de estabilidad

 αT_z

 $\beta \beta S_z$

 $\begin{array}{c} T_z > 0 \\ S_z > 0 \end{array} \quad \rho_z < 0 \end{array}$

 $1 < R_{\rho} <$





Inducida por doble difusión

Convectivo Difusivo

 $R_{\rho} = \frac{\alpha T_{z}}{\beta S_{z}}$



 k_{T} Coeficiente de difusión molecular térmica

 $k_{\rm S}$ Coeficiente de difusión molecular para la sal

 $\frac{k_{\rm T}}{k_{\rm S}} \approx 10^2$















Intrusions and fingers. (A) Salinity versus depth and latitude for the equatorial Pacific. (B) Salinity anomaly (salinity minus a smoothed average) for the cross section shown in (A). Individual layers can be seen and tracked horizontally. (C) Density anomaly calculated from measured salinity, temperature, and pressure in a manner similar to that in (B). (D) The Turner angle (a measure of the tendency of the water column toward double diffusion) indicates the possibility of salt fingering (red) or diffusive convection (blue). (E) Salt fingers visualized with fluorescein in a laboratory demonstration. (F) Diffusive convection in a laboratory experiment, showing sharp interfaces (dark and light bands) from which convecting fluids rise as (barely visible) dark plumes.

Ruddick, 2003





(Rodríguez-Santana et al 1999)







2.- Difusividad vertical desde la microestructura:

Energía cinética turbulenta media:

$$q^{2} \equiv \overline{v'} \cdot \overline{v'} + \overline{w'^{2}} = \overline{u'^{2}} + \overline{v'^{2}} + \overline{w'^{2}}$$

Tasa de disipación viscosa de la energía cinética turbulenta media:



$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}(q^2) = -\overline{w'\vec{v}'}\frac{\partial\tilde{\vec{v}}}{\partial z} + \overline{w'b'} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{w'(w'^2 + \vec{v}'.\vec{v}')} + \rho^{-1}\overline{w'p'}\right) - \varepsilon$$

Términos:

1º término: Trabajo de $w' \vec{v}'$ sobre la cizalla del flujo medio. Producción de energía cinética turbulenta por cizalla.

- 2º término: Ritmo de energía cinética turbulenta perdida en la realización del trabajo en contra del gradiente de densidad estable.
 - 3º término: Redistribución vertical de la energía cinética turbulenta

4º término: Tasa de disipación viscosa de la energía cinética turbulenta.

$$F_{B}$$

$$\uparrow$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}(q^{2}) = -\overline{w'u'}\frac{\partial\widetilde{u}}{\partial z} + \overline{w'b'} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{w'(u'^{2}+v'^{2}+w'^{2})} + \rho^{-1}\overline{w'p'}\right) - \varepsilon$$

 $F_B < 0$ (término sumidero en fluidos estratificados estables)



Número de flujo de Richardson

$$R_f = \frac{-\overline{w'b'}}{-\overline{w'u'}(\partial \widetilde{u} / \partial z)}$$

Panosfky y Dutton (1984) determinaron un $R_{fcr} \approx 0.25$.

Relación entre R_i y R_f:
$$Ri = \frac{K_m}{K_v} R_f \longrightarrow Ri > R_f$$

Turbulencia estacionaria y homogénea:

$$-\overline{w'u'}\frac{\partial \widetilde{u}}{\partial z} = -\overline{w'b'} + \varepsilon$$

Escalas

Microescala de Kolmogorov: Es la escala espacial de los remolinos turbulentos más pequeños.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}$$

Escala de Ozmidov: Debido a la estratificación hay una restricción a los remolinos turbulentos más grandes en la picnoclina. La escala de Ozmidov vendrá dada por el tamaño de los remolinos turbulentos más grandes en medios estratificados.

$${}_{0} = \left(\frac{\varepsilon^{1/2}}{N^{3/2}}\right)$$

La degeneración de la turbulencia en fluidos estratificados tiene lugar hasta que la escala de longitud externa de la turbulencia, L_0 , se haga igual a la escala de la longitud interna, η , cuando no hay fuente de energía que mantenga la turbulencia.

$$L_0 \equiv (\varepsilon / N^3)^{1/2} = \eta \equiv (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \Longrightarrow \varepsilon_{\min} = \nu N^2$$

$$I = L_0 / \eta = \left(\frac{\varepsilon}{N^3}\right)^{1/2} / \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} = \left(\frac{\varepsilon}{\nu N^2}\right)^{3/4}$$

Índice de isotropía:

$$\left(\frac{\varepsilon}{v N^2}\right) > 200$$
 Se dan condiciones de isotropía
(Gargett et al, 1984)

Difusividad turbulenta vertical a partir de ε .

$$K_{\rho} = \Gamma \frac{\mathcal{E}}{N^2}$$

 $\Gamma = \frac{R_f}{1 - R_f} \approx 0.2$

(Osborn, 1980)

Suposición: Balance entre producción por cizalla, disipación turbulenta y flujo de flotabilidad.

Factor de eficiencia:

Perfilador de Microestructuras Turbulentas



Perfilador de Microestructuras Turbulentas



Proyecto CANOA colaboración ICM - CSIC



Campaña CANOA: Nov 2008



B/O Sarmiento de Gamboa





Proyecto PROMECA



.- 59 XBT (53 T5,

Data:

.- 2 XCP

.- 26 CTD (max. 2000 m)

.- 21 Nutrients

- 19 TurboMAP

.- 25 BAKLÁN

Profiler TurboMAP (ULPGC)



Profiler BAKLÁN (SIO – AB)



B/O García del Cid



Imágenes de Satélite



Chlorophyll Pigment Concentration 28/09/2010 14:20





Sea Surface Temperature 28/09/2010 14:20





Transecto B (T °C)









Lo : Escala de Ozmidov



Mixed layer: dashed line



Fig. 5. Average contribution of salt fingers (light gray) and turbulence (dark gray) to total mixing in the water column. The continuous line depicts the fine-structure scale standard deviation at each depth level (intervals 10 m).



Arcos-Pulido, Rodríguez-Santana et al 2014

Otros Estudios а Strait of Gibraltar Kv (m² s⁻¹) 0 5e-6 1e-5 2e-5 2e-5 3e-5 3e-5 SPAIN 30 EUROPE 20' (n=10) Alboran Sea -50 -50 DCN DCM 10 Depth(m) Depth (m) 24' COLAI 12 48 36 37°N -100 -100 SPAIN SPAIN 30' 10' 36°N 369N -150 Strait of Gibraltar -150 30 3.20-7 6.40-7 9.60-7 1.30-6 (n= 17) Open Atlantic Ocean (n=3) Log10 & (m2 s3) Fluorescence (r.u.) 35°N 30" b Antarctic Kv (m² s⁻¹) 34°N 9°W 30' 8°W 30' 7°W 30' 6°W 30 MOROCCO 0.0 4.0e-6 8.0e-6 1.2e-5 1.6e-5 6°W 50 20 610 Antarctic (n=29) * 30 62°S -50 -50 Depth(m) Depth (m) 30 DCM. DCI 63°S -100 -100 610 62°W 61°W 60°W 59°W 58°W 56°W 57°W 55°W -150 -150 8e-8 2e-7 2e-7 3e-7 4e-7 Log₁₀ ε (m² s⁻³) 0 FIG. 1. - Position and number of profiles in the four study regions. Fluorescence (r.u.)

Macías D., A. Rodríguez-Santana et al, 2013



Mezcla diapicna inducida por oscilaciones diurno-inerciales



3.- La mezcla vertical y la Circulación Oceánica Global

Circulación Termohalina





¿Cómo se comportan los modelos de circulación global si variamos K_z ?



MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change



Sensitivity of Climate to Diapycnal Diffusivity in the Ocean Part I: Equilibrium State. Part II: Global Warming Scenario

Fabio Dalan, Peter H. Stone, Igor Kamenkovich and Jeffery Scott (Part I); Fabio Dalan, Peter H. Stone and Andrei Sokolov (Part II)

> Report No. 109 May 2004

Fabio Dalan^{*}, Peter H. Stone[†], Igor Kamenkovich^I and Jeffery Scott[†]



Experimento de calentamiento global:

Incrementar el CO_2 en la atmósfera a un ritmo del 1% por año durante 75 años.

Figure 1: Maximum meridional streamfunction in the North Atlantic Ocean. For each value of the diapycnal diffusivity, both control experiment and global warming overturning strength is displayed. The control overturning strength of the THC fluctuates around a mean value that depends on the diapycnal diffusivity. In global warming experiments the THC strength diminishes for about 100 years and then partially or fully recovers its original value. Diffusivity 0.1 cm²/s thin dashed line, 0.2 cm²/s thin solid line, 0.5 cm²/s thick dashed line and 1.0 cm²/s thick solid line.

Observaciones y parametrizaciones de k_z a nivel general.

Observaciones:

.- Termoclina: difusividades turbulentas medias en el rango 0,1 - 0,3 cm² s⁻¹ (Ledwell et al 1993; Ledwell et al 1998).

.- Zonas abisales con batimetría irregular: valores en torno a 10 cm² s⁻¹ (Polzin et al 1997; Ledwell et al 2000)

Inferencias desde balances globales:

- valores medios de k_z : 1 cm² s⁻¹ (Munk 1966; Munk et al 1998)

Parametrizaciones:

a) Uniforme

b) Perfil tipo arcotangente (Bryan and Lewis, 1979)

c) Perfil variable donde se incluye efectos mareales (Simmons et al 2004)

Valor medio de 0,9 cm² s⁻¹ aplicado a la componente oceánica del modelo climático de la Universidad de Victoria.



4.- Conclusiones

.- La mezcla vertical, y de aquí el coeficiente k_z , se puede estimar utilizando varios métodos: distribución de las propiedades promedias, microestructura y balances en modelos de advección-difusión.

.- Las comparaciones de los valores de difusividad vertical utilizando los diferentes métodos debe hacerse teniendo en cuenta las fuentes de la turbulencia y las escalas espaciales y temporales.

.- A escala global se debe tener en cuenta los procesos de mezcla vertical. Hay que seguir investigando la sensibilidad de dichos modelos con el coeficiente de difusividad vertical.

Grupo I+D OFYGA

Otras líneas de investigación:

.- Oceanografía regional: Estructuras mesoescalares, transportes geostróficos, etc

.- Simulaciones en Mesa Rotatoria: Corrientes de gravedad, etc

.- Contaminación Marina

.- Geofísica Aplicada

Muchas Gracias

2010-10-22