

Dinâmica do Fluido Geofísico I

Geophysical Fluid Dynamics I

Olga T. Sato, Ph.D.

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

São Paulo, 2023

Roteiro

1 Dinâmica do Fluido Geofísico I

- A Disciplina
- Importância

Roteiro

1 Dinâmica do Fluido Geofísico I

- A Disciplina
- Importância

Dinâmica do Fluido Geofísico I: Ementa

- Hipótese do contínuo; transportes; descrições lagrangeana e euleriana;
- Forças atuantes; equações; condições de contorno; simplificações;
- Ondas de gravidade superficiais e internas; Instabilidade de Kelvin-Helmholtz;
- Vorticidade e circulação; Teoremas de Kelvin e de Taylor-Proudman;
- Movimentos estacionários: geostrófico, de gradiente e inercial;
- Ondas de Poincare e de Kelvin; modos naturais de oscilação; marés oceânicas;
- Teoria inviscida de águas rasas: aproximação quase-geostrófica; soluções estacionárias (geostrofia) e ondulatórias (Ondas de Rossby).

Dinâmica do Fluido Geofísico I: Método

- Onde: e-disciplinas
- Aulas de apresentação, solução de dúvidas
- Estudo individual e resolução de listas de exercícios
- Duas provas
- *Média* = 100% Prova

Dinâmica do Fluido Geofísico I: Listas

- As listas são fornecidas para auxiliá-los a estudar.
- É importante que a física e a matemática dos problemas sejam bem entendidos. Formalismo matemático é crucial.

Dinâmica do Fluido Geofísico I: Material

- **Cushman-Roisin, B. e J-M. Beckers - Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, 2nd Edition (2011).**
- Gill, A.E., 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press.
- Kundu, P. 2002. Fluid Mechanics. Academic Press, 2nd edition.
- McWilliams, J. C. - Fundamentals of Geophysical Fluid Dynamics (2006).
- Müller, P., 2006. The Equations of Oceanic Motions.
- Pedlosky, J., 1998. Geophysical Fluid Dynamics. Springer-Verlag.
- Pedlosky, J., 2003. Waves in the Ocean and Atmosphere: Introduction to Wave Dynamics. Springer-Verlag.
- Salmon, R., 1998. Lectures on geophysical fluid dynamics.
- **Vallis, G. K., 2017. Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics**
- Outros...

Dinâmica do Fluido Geofísico I: Vallis

A basic GFD course

A first course in GFD might cover much of Part I and, in many cases, Rossby waves and possibly baroclinic instability from Part II. If the students have already had a course in fluid dynamics then much of Chapter 1 can be skipped. Some of the thermodynamics may in any case be omitted on a first reading, and a basic course might encompass the following:

For students with no fluid mechanics:

- Equations of motion, Sections 1.1–1.6, omitting starred sections.
- Compressibility, Sections 1.8 and 1.9.
- Energetics, Section 1.10 (optional).

Then, for all students:

- Rotational effects and Boussinesq equations, Sections 2.1–2.4.
- Pressure coordinates, Section 2.6 (optional, mainly for meteorologists).
- Hydrostatic and geostrophic balance, Sections 2.7 and 2.8.
- Static instability, Section 2.10.
- Shallow water equations and geostrophic adjustment: Sections 3.1, 3.2, 3.5, 3.7–3.9.
- Vorticity, Sections 4.1–4.4 (for students with no fluids background).
- Potential vorticity, some or all of Sections 4.5 and 4.6.

Geostrophic theory, Sections 5.1–5.5.

Ekman layers, Section 5.7.

Rossby waves, Sections 6.4 and 6.5, and possibly Section 16.5 on vertical propagation.

Jet formation, Section 15.1.

Baroclinic instability, Sections 9.5 and/or 9.6.

DFG I

DFG II

Dinâmica do Fluido Geofísico I

Perguntas?

Roteiro

1 Dinâmica do Fluido Geofísico I

- A Disciplina
- Importância

Introdução

Leitura requisitada para a introdução sobre a importância do estudo da dinâmica de fluidos geofísicos:

- Cap. 1 - McWilliams (McW)
- Cap. 1.1–1.7 - (CB - Cushman-Roisin and Beckers (CB))

Dinâmica do Fluido Geofísico: Foco

- Fluxos de larga escala, objetivando um entendimento mais simplificado dos movimentos vistos na natureza em fluidos geofísicos.
- Descrição deve conter a parte fundamental da física envolvida.
- Simples porém fiel.
- Exemplos: Variabilidade na atmosfera, clima e tempo; Oceano: ondas, correntes, vórtices; movimentos no interior da Terra, vórtices em outros planetas (Júpiter); convecção em estrelas, etc.
- Segundo McWilliams: **“Não sairemos da Terra”**.

Dinâmica do Fluido Geofísico: Importância

Em última instância, manutenção da vida no planeta.

- Melhor entendimento dos processos à nossa volta
- Melhoria dos modelos de previsão de tempo, clima, oceânico
- Implementação de um sistema de alertas, e.g. furacões
- Salvar vidas e recursos (naturais e financeiros)

Dinâmica do Fluido Geofísico: Uma Ciência Básica

Para que? É útil?

Temos muito a contribuir como cientistas mas em algumas áreas do conhecimento a ajuda à sociedade não é de forma tão direta quanto outras.

- Tente pensar um pouco fora da caixa. Não responda a essas perguntas se justificando dentro do próprio contexto de sua pesquisa.
- Expanda a sua resposta para ir além de seus próprios interesses.
- Pense no que a sociedade, país, ou humanidade vai ganhar com a sua contribuição. Pense grande!
- Lembre-se: os recursos financeiros são limitados ou escassos.

Características do Fluido Geofísico

- Rotação: Coriolis e força centrífuga. Rigidez rotacional em fluidos formando “fitas” com movimento livre na vertical mas limitado na horizontal.
- Estratificação: ação da gravidade e diferenças na densidade, empuxo. Promoção de movimento oscilatório.

Entender o Movimento

- Processos físicos são estudados isolando-se as contribuições importantes para o movimento em questão → ordem de magnitude.
- Exemplos: Mancha vermelha de Júpiter ou um furacão no Atlântico Norte.
- As vezes as escalas não são obtidas tão diretamente, é preciso analisar o que queremos estudar. Por exemplo: tempo de revolução do furacão ou o tempo de propagação?

Equações que governam o movimento

■ $\frac{D\rho}{Dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$ (Conservação de massa)

■ $\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} + \rho \mathbf{2} \vec{\Omega} \times \vec{u} = \rho [\vec{g} - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})] - \vec{\nabla} p + \vec{F}$ (Momento)

■ $\rho = \rho(p, T, S)$ (Estado)

■ $\frac{D}{Dt}(\rho c_v T) = \vec{\nabla} \cdot (k_T \vec{\nabla} T) + Q_T$ (Conservação de Energia Interna)

■ $\frac{DS}{Dt} = \vec{\nabla} \cdot (K_S \vec{\nabla} S) + Q_S$ (Conservação de Sal)

As incógnitas do problema são:

$u \quad v \quad w \quad p \quad \rho \quad T \quad S$

Escalas importantes do movimento

- Tempo (T), comprimento (L) e velocidade (U), onde $T = \frac{L}{U}$.
- Estratificação: densidade (ρ), $\Delta\rho$, e espessura da camada (H).
- Rotação: $\Omega = \frac{2\pi}{T_S} \left(\frac{\text{radianos}}{\text{tempo de revolução}} \right)$.

$$\Omega_T = \frac{2\pi}{24 \text{ h}} + \frac{2\pi}{365.24 \text{ d}} = \frac{2\pi}{T_S} = 7.2921 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$T_S = 1$ dia sideral (23h56m4.1s (< 24h pois a Terra se moveu)).

Fluidos em movimento sentem a rotação

- $\omega = \frac{\text{tempo para 1 revolução}}{\text{escala de tempo}} = \frac{2\pi/\Omega}{T} = \frac{2\pi}{\Omega T}$

- Se $\omega \lesssim 1 \rightarrow$ efeitos da rotação são importantes.

Na Terra, isso ocorre a partir de $T > 24\text{h}$.

- Mesmo que $\omega \gtrsim 1$ (tempo curto) mas com escala espacial grande, esse fenômeno pode ser influenciado pela rotação.

$$\epsilon = \frac{\text{tempo para 1 revolução}}{\text{tempo para partícula cobrir distância } L, \text{ com velocidade } U}$$

$$\epsilon = \frac{2\pi/\Omega}{L/U} = \frac{2\pi U}{\Omega L}$$

se $\epsilon \lesssim 1 \rightarrow$ rotação é **importante**.

Quando a rotação se torna importante?

TABLE 1.1 Length and Velocity Scales of Motions in Which Rotation Effects are Important

$L = 1 \text{ m}$	$U \leq 0.012 \text{ mm/s}$
$L = 10 \text{ m}$	$U \leq 0.12 \text{ mm/s}$
$L = 100 \text{ m}$	$U \leq 1.2 \text{ mm/s}$
$L = 1 \text{ km}$	$U \leq 1.2 \text{ cm/s}$
$L = 10 \text{ km}$	$U \leq 12 \text{ cm/s}$
$L = 100 \text{ km}$	$U \leq 1.2 \text{ m/s}$
$L = 1000 \text{ km}$	$U \leq 12 \text{ m/s}$
$L = \text{Earth radius} = 6371 \text{ km}$	$U \leq 74 \text{ m/s}$

Fonte: Tabela 1.1 (pag. 12) (CB)

Importância da Estratificação

- Considere a distribuição de densidades no fluido.
- Perturbações (movimento) tendem a mudar a distribuição até chegar ao equilíbrio novamente → custo de energia (C + P).

$$\sigma = \frac{\text{energia cinética}}{\text{variação da energia potencial}} = \frac{1/2\rho_0 U^2}{\Delta\rho g H}$$

se $\sigma \approx 1$, estratificação é **importante**.

A variação de energia potencial irá utilizar a energia cinética disponível e perturbará a estratificação.

Rotação e Estratificação?

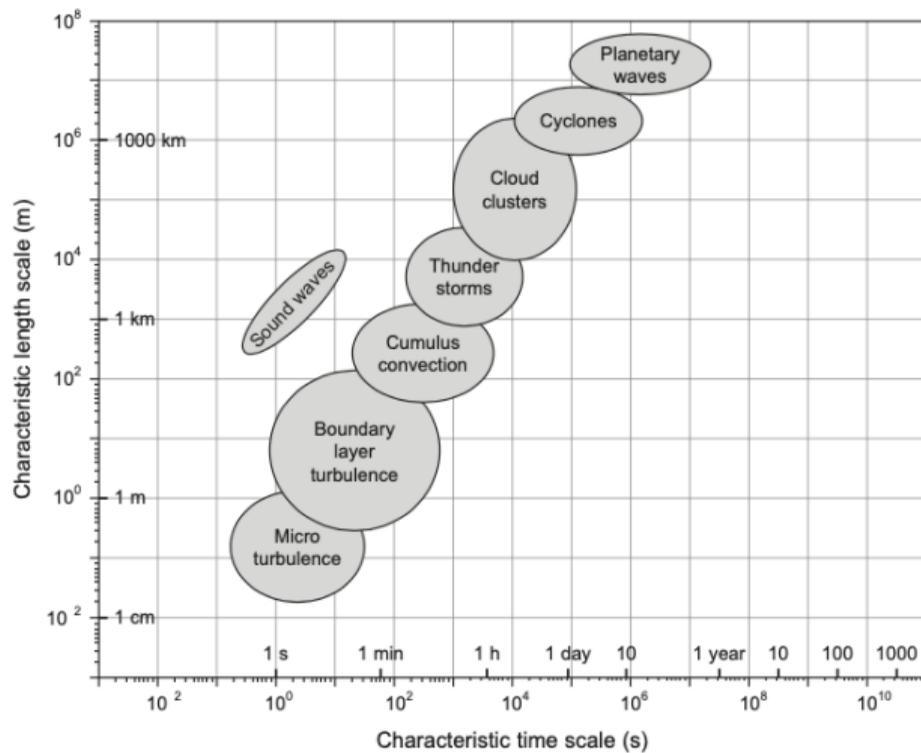
- Ou seja: $\epsilon \approx 1$ e $\sigma \approx 1$
- Utilizando algumas relações de escalas:

$$L \sim \frac{U}{\Omega} \quad U \sim \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}gH}$$

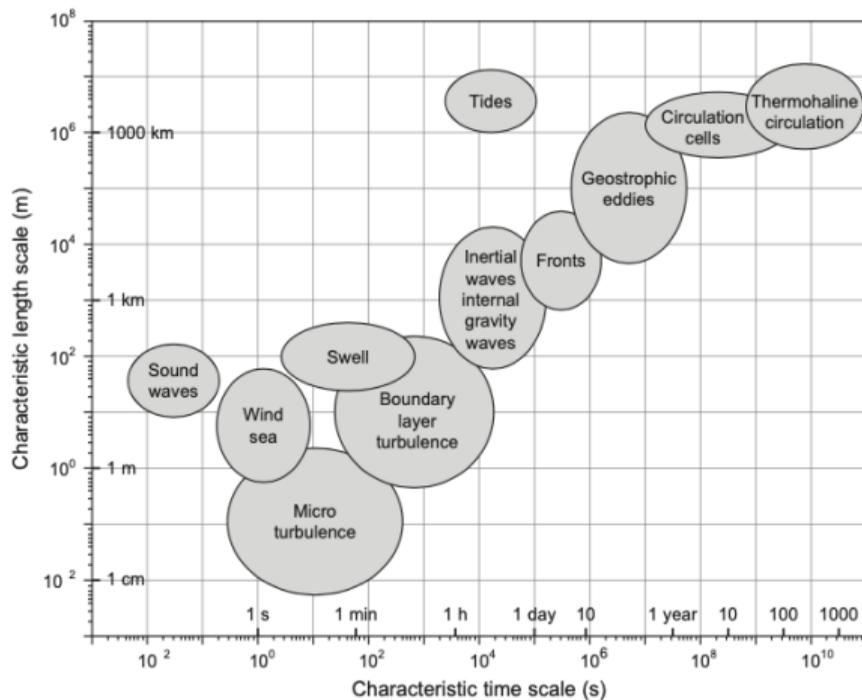
$$L \sim \frac{1}{\Omega} \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}gH}$$

- Escala naturais para movimentos que envolvem rotação e estratificação:
 - $L_{atm} = 500 \text{ km}$, $U_{atm} = 30 \text{ m/s}$.
 - $L_{oc} = 60 \text{ km}$, $U_{oc} = 4 \text{ m/s}$.

Escalas Características na Atmosfera



Escalas Características no Oceano



Fonte: Seção 1.7 (CB).