

Circulação Geral dos Oceanos

Paulo S. Polito, Ph.D.

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

São Paulo, 2023

Roteiro

- 5 Dinâmica de Ekman
 - Para começo de conversa...
 - A Espiral de Ekman
 - O Vento e o Mar
 - O Sistema Global de Ventos
 - Sobre os Ventos
 - Circulação Forçada pelo Vento
 - Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Objetivos desta aula:

- Entender fisicamente a espiral de Ekman.
- Explorar a conexão entre transporte de Ekman e ressurgência.
- Entender porque a espessura da camada de Ekman é limitada e varia.
- Relembrar as limitações do modelo
- Visualizar o papel da dinâmica de Ekman na circulação geral.

Capítulo 8.6 do livro do Benoit, 9.4 do Pond & Pickard, depois o da Talley caps. 9-12

Conhecimento prévio:

- Familiaridade com a equação de NS.
- Intimidade com números complexos.
- Saber calcular derivadas e integrais de exponenciais, seno e cosseno.
- Intimidade com a equação da continuidade.
- Uma boa base em oceanografia física descritiva.
- Saber o papel de micronutrientes na floração de fitoplâncton.
- Se você tem dificuldade com qualquer um desses pontos, **estude-o**.

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

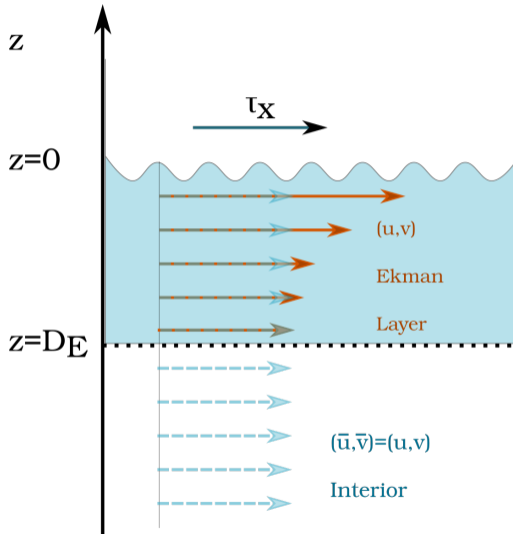
- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Escalando a equação de NS

Para $Ek = \frac{A_z}{fH^2} \ll 1$, NS fica assim:

$$\begin{cases} -f(v - \bar{v}) = A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \\ f(u - \bar{u}) = A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \end{cases}$$

- ρ_0 : o fluido homogêneo.
- Sem $\frac{D}{Dt}$: fluxo médio.
- Não tem $\vec{\nabla} p$.



Condições de Contorno

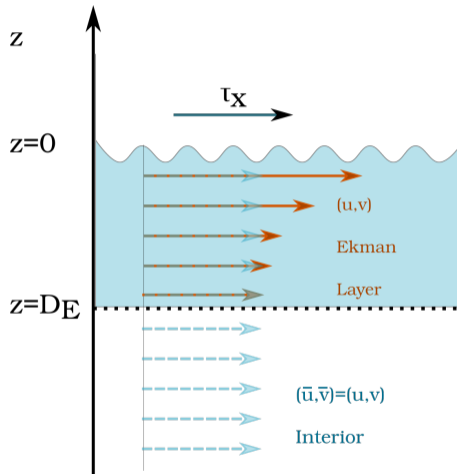
Em $z = 0$

$$\begin{cases} \rho_0 A_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x, \\ \rho_0 A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y. \end{cases}$$

Em $z \rightarrow -\infty$

$$\begin{cases} u = \bar{u} \\ v = \bar{v}. \end{cases}$$

- Viscosidade age de $z = 0$ até $z = D_E$.
- Momentum é introduzido pelo vento.
- Momentum não pode ser infinito!
- Quais as unidades SI de τ ?



Condições de Contorno

Em $z = 0$

Em $z \rightarrow -\infty$

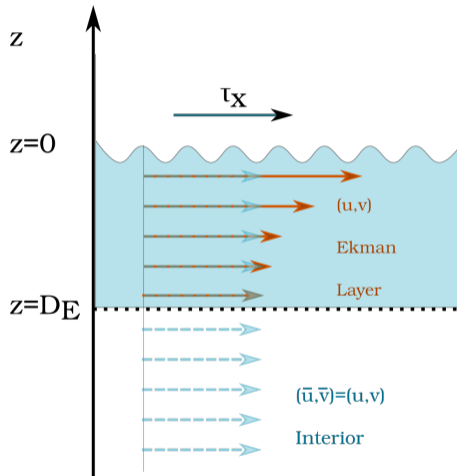
$$\begin{cases} \rho_0 A_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x, \\ \rho_0 A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y. \end{cases} \quad \begin{cases} u = \bar{u} \\ v = \bar{v}. \end{cases}$$

■ NS esté em termos de aceleração, $\frac{L}{T^2}$

■ Veja primeiro o $A_z \frac{L}{TL^2} = \frac{L}{T^2}$, $A_z = \frac{L^2}{T}$

■ Do slide 6,

$$\frac{M}{L^3} \frac{L^2}{T} \frac{L}{TL} = \tau, \quad \tau = \frac{M}{LT^2} = \text{N/m}^2 = \text{Pa}.$$



Voltando à equação de Ekman

Em $z = 0$

Em $z \rightarrow -\infty$

$$\left\{ \begin{array}{l} -f(v - \bar{v}) = A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \\ f(u - \bar{u}) = A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho_0 A_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x, \\ \rho_0 A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} u = \bar{u} \\ v = \bar{v}. \end{array} \right.$$

- Por ora, $\bar{u} = \bar{v} = 0$. Depois podemos somar à solução.
- Ekman *imaginou* assim: $\vec{v} = u + i v$, $i = \sqrt{-1}$.
- Substituindo, multiplicando a 2ª eq. por i e somando:

$$f i(u + i v) = A_z \frac{\partial^2 (u + i v)}{\partial z^2} \quad f i \vec{v} = A_z \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} \quad \text{ou} \quad \boxed{\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} - a^2 \vec{v} = 0, \quad a = \sqrt{\frac{f i}{A_z}}.}$$

Resolvendo a Equação Diferencial

- Esta equação $\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial \mathbf{z}^2} - \alpha^2 \vec{v} = 0$ te pergunta o seguinte:
- O que é, o que é... que você deriva, deriva de novo e dá ela mesma?
- Pense um pouco.
- Mmmmpphhh...

Resolvendo a Equação Diferencial

- Esta equação $\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} - a^2 \vec{v} = 0$ te pergunta o seguinte:
- Pense um pouco.
- **Isso mesmo**, é a exponencial!
- Agora vejamos aquele a^2 no 2º termo.
- Basta a regra da cadeia e um pouco de sagacidade para enxergar que...

Resolvendo a Equação Diferencial

- Esta equação $\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} - a^2 \vec{v} = 0$ te pergunta o seguinte:
- Pense um pouco.
- Sim, é preciso colocar o a dentro da exponencial.
- A solução geral é:
- $\vec{v} = Ae^{az} + Be^{-az}$ com A e B constantes a determinar.
- Mas se $B \neq 0$, $Be^{-az} \rightarrow \infty$ se $z \rightarrow -\infty \therefore B = 0$.

Trabalhando a Solução

- Sobrou $\vec{v} = Ae^{az}$. Com a definição de i em mente,

$$\text{defino}^1 D_E = \sqrt{\frac{2A_z}{|f|}} \text{ de modo que } a = \frac{1+i}{D_E},$$

defino $A = \hat{A}e^{i\phi}$, \hat{A} constante.

- Substituindo D_E e \hat{A} ali em cima, temos $\vec{v} = \hat{A}e^{i\phi} e^{(i+1)\frac{z}{D_E}}$

- Separando o real do imaginário (recomendo muito):

$$\vec{v} = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} e^{i\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right)}$$

¹Pond & Pickard definem $D_e = \pi D_E$, dá na mesma.

Invocando Euler

$$\vec{v} = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} e^{i\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right)}$$

- Euler nos diz que $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$, substituindo:

$$\vec{v} = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \left[\cos \left(\frac{z}{D_E} + \phi \right) + i \sin \left(\frac{z}{D_E} + \phi \right) \right]$$

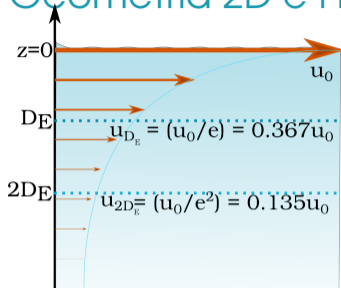
- Mas $\vec{v} = u + iv$, a separação fica bem mais fácil por causa das constantes:

$$u = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \cos \left(\frac{z}{D_E} + \phi \right),$$

$$v = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \sin \left(\frac{z}{D_E} + \phi \right).$$

- A beleza dessa forma é que nos permite enxergar a geometria e a física.

Geometria 2D e Física da Solução de Ekman



■ Perceba que $|\vec{v}| = \hat{A} e\left(\frac{z}{D_E}\right)$.

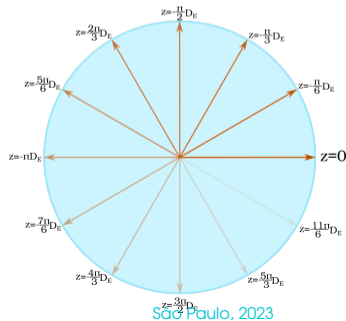
■ No mar $z < 0$, $|\vec{v}|$ decai exponencialmente.

■ Da figura, qual o valor de $u(z = 5D_E)/u(z = 0)$?

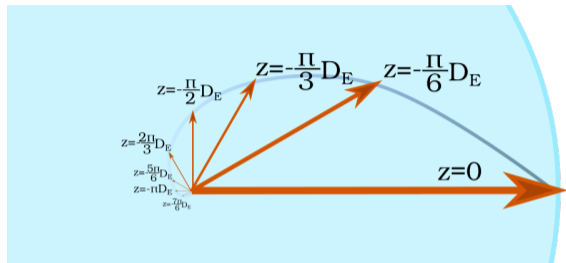
■ Vejamos $\frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} = \cos\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right)\hat{i} + \sin\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right)\hat{j}$.

■ É um vetor unitário desenhado para $\phi = 0$.

■ À medida que z diminui, $\frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}$ gira.



Juntando Métrica e Rotação



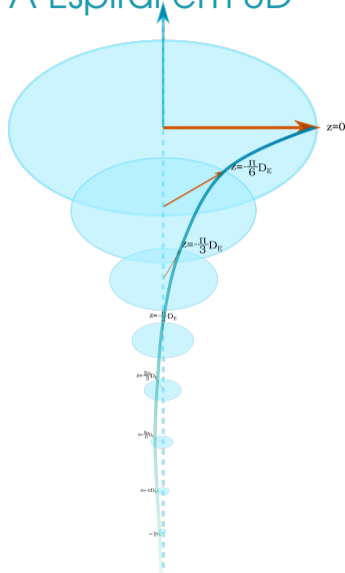
- Podemos voltar a:

$$u = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \cos\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right),$$

$$v = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \sin\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right).$$

- A espiral de Ekman é a curva que une as pontas dos vetores \vec{v} .
- Perceba que o valor exato de D_E não é importante pois a velocidade de Ekman é evanescente em z .

A Espiral em 3D



$$u = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \cos\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right),$$

$$v = \hat{A} e^{\left(\frac{z}{D_E}\right)} \sin\left(\frac{z}{D_E} + \phi\right).$$

- Cisalhamento vertical das velocidades horizontais,
- \therefore transfere momentum da atmosfera \rightarrow oceano.
- A rotação desvia as velocidades progressivamente.

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Mas e as Constantes?

Primeiro vamos fazer $\vec{\tau} = \tau_x \hat{i} + 0\hat{j}$, vento zonal, HN.

$$\rho A_z \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\rho_0 A_z}{D_E} \hat{A} (\cos \phi - \sin \phi) = \tau_x, \quad (1)$$

$$\rho A_z \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\rho_0 A_z}{D_E} \hat{A} (\sin \phi + \cos \phi) = \tau_y = 0. \quad (2)$$

De 2, $\sin \phi + \cos \phi = 0 \Rightarrow \boxed{\phi = -\frac{\pi}{4}}$. Substituindo isso em 1, $\frac{\rho_0 A_z}{D_E} \hat{A} \left(2 \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \tau_x$.

$$\boxed{\hat{A} = \frac{\tau_x D_E}{\sqrt{2} \rho_0 A_z} = \frac{\tau_x}{\rho_0 \sqrt{A_z} |f|} = \frac{\tau_x \sqrt{2}}{|f| \rho_0 D_E}}$$

$|f|$, já pensando no HS.

Como Interpretar Esses Resultados?

Fizemos com vento zonal, o resultado genérico é análogo:

$$\phi = -\frac{\pi}{4}, \quad \hat{A} = \frac{|\vec{\tau}|}{\rho_0 \sqrt{A_z} |f|} = \frac{\sqrt{2} |\vec{\tau}|}{\rho_0 |f| D_E}, \quad \text{with } D_E = \sqrt{\frac{2A_z}{|f|}}.$$

- A corrente de Ekman aponta 45° à direita (esquerda) do vento no HN (HS).
- $\hat{A} \rightarrow \infty$ se $f \rightarrow 0$, este modelo não funciona perto do equador.
- $|\vec{u}| \propto |\vec{\tau}|$, mas lembre $|\vec{\tau}| \propto \text{vento}^2$; ventos fortes \rightsquigarrow correntes muito fortes.
- Quanto maior for $\sqrt{A_z}$ maior é D_E e menor \hat{A} : o momentum se distribui na camada de Ekman mais grossa.

Substituindo as Constantes

Colocando-as de volta em u e v ainda **com vento zonal no HN**,

$$u = \frac{\tau_x}{\rho_0 \sqrt{A_z f}} e^{\frac{z}{D_E}} \cos\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right), \quad (3)$$

em $z = 0$:
$$u = \frac{\tau_x}{\rho_0 \sqrt{A_z f}} \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right),$$

$$v = \frac{\tau_x}{\rho_0 \sqrt{A_z f}} e^{\frac{z}{D_E}} \sin\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right). \quad (4)$$

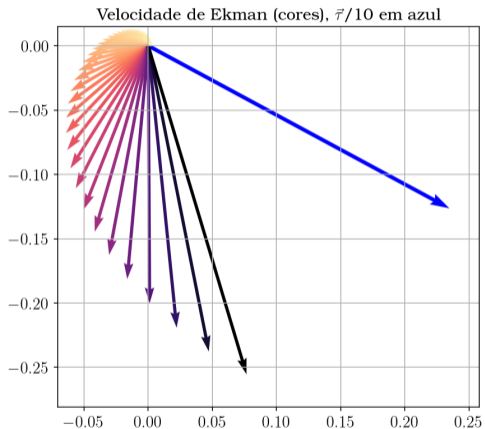
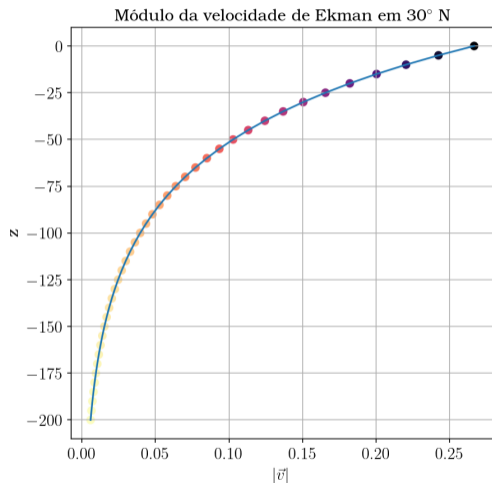
$$v = \frac{\tau_x}{\rho_0 \sqrt{A_z f}} \sin\left(-\frac{\pi}{4}\right).$$

A forma geral para **qualquer $\vec{\tau}$, qualquer hemisfério**, com fluxo médio é:

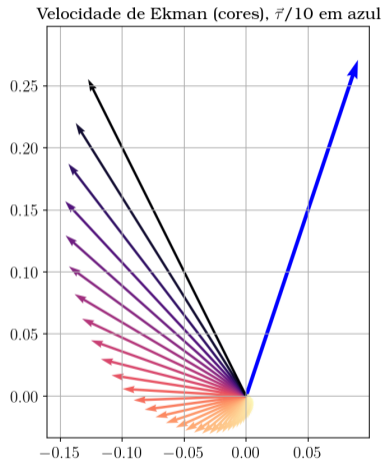
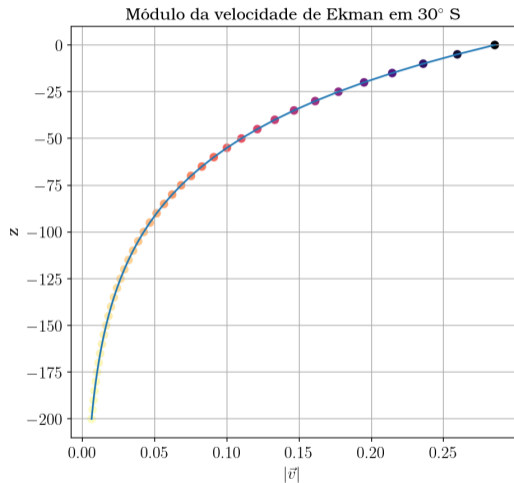
$$u_E - \bar{u} = \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \cos\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right) - \tau_y \mathbf{s} \sin\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right) \right], \quad (5)$$

$$v_E - \bar{v} = \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \mathbf{s} \sin\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right) + \tau_y \cos\left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4}\right) \right], \quad \mathbf{s} = \frac{f}{|f|}. \quad (6)$$

Dois Exemplos



Dois Exemplos ... continuação



Limitações Desta Teoria

- Todo modelo teórico é limitado pelas simplificações da sua construção.
- Pense nas simplificações que fomos fazendo:
- Sem continentes², horizontalmente homogêneo ($\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} = 0$)
- $z \rightarrow -\infty$. A solução para a camada de Ekman de fundo é análoga.
- $A_z = \text{constante}$.
- Não tem ondas, não tem $\vec{\nabla} p$.

²Good old Panthalassa is back!

Limitações Desta Teoria

- Todo modelo teórico é limitado pelas simplificações da sua construção.
- Pense nas simplificações que fomos fazendo:
- Sem continentes², horizontalmente homogêneo ($\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} = 0$)
- $z \rightarrow -\infty$. A solução para a camada de Ekman de fundo é análoga.
- $A_z = \text{constante}$.
- Não tem ondas, não tem $\vec{\nabla} p$.

²Good old Panthalassa is back!

Limitações Desta Teoria

- Todo modelo teórico é limitado pelas simplificações da sua construção.
- Pense nas simplificações que fomos fazendo:
- Sem continentes², horizontalmente homogêneo ($\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} = 0$)
- $z \rightarrow -\infty$. A solução para a camada de Ekman de fundo é análoga.
- $A_z = \text{constante}$.
- Não tem ondas, não tem $\vec{\nabla} p$.

²Good old Panthalassa is back!

Limitações Desta Teoria

- Todo modelo teórico é limitado pelas simplificações da sua construção.
- Pense nas simplificações que fomos fazendo:
- Sem continentes², horizontalmente homogêneo ($\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} = 0$)
- $z \rightarrow -\infty$. A solução para a camada de Ekman de fundo é análoga.
- $A_z = \text{constante}$.
- Não tem ondas, não tem $\vec{\nabla} p$.

²Good old Panthalassa is back!

Pergunta Motivacional

- Se a velocidade de Ekman tende a zero em $z \sim [10 - 10^2]$ m, como se transmite momentum para o interior oceânico, $z \sim [10^2 - 10^3]$ m abaixo?
- É fácil imaginar cenários onde a velocidade de Ekman (u_E, v_E) é convergente.
- Pense um pouco, desvia a 45° , faça um desenho, pois vai ajudar.
- Ótimo. Guarde esse pensamento.

Pergunta Motivacional

- Se a velocidade de Ekman tende a zero em $z \sim [10 - 10^2]$ m, como se transmite momentum para o interior oceânico, $z \sim [10^2 - 10^3]$ m abaixo?
- É fácil imaginar cenários onde a velocidade de Ekman (u_E, v_E) é convergente.
- Pense um pouco, desvia a 45° , faça um desenho, pois vai ajudar.
- Ótimo. Guarde esse pensamento.

Pergunta Motivacional

- Se a velocidade de Ekman tende a zero em $z \sim [10 - 10^2]$ m, como se transmite momentum para o interior oceânico, $z \sim [10^2 - 10^3]$ m abaixo?
- É fácil imaginar cenários onde a velocidade de Ekman (u_E, v_E) é convergente.
- Pense um pouco, desvia a 45° , faça um desenho, pois vai ajudar.
- Ótimo. Guarde esse pensamento.

Pergunta Motivacional

- Se a velocidade de Ekman tende a zero em $z \sim [10 - 10^2]$ m, como se transmite momentum para o interior oceânico, $z \sim [10^2 - 10^3]$ m abaixo?
- É fácil imaginar cenários onde a velocidade de Ekman (u_E, v_E) é convergente.
- Pense um pouco, desvia a 45° , faça um desenho, pois vai ajudar.
- Ótimo. Guarde esse pensamento.

Transporte de Ekman Zonal

Integrando u_E verticalmente:

$$\begin{aligned} U_E &= \int_{-\infty}^0 u_E dz = \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} \int_{-\infty}^0 e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \cos \left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4} \right) - \tau_y \mathbf{s} \sin \left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4} \right) \right] dz, \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} \left\{ \frac{D_E}{\sqrt{2}} e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \sin \left(\frac{z}{D_E} \right) + \tau_y \mathbf{s} \cos \left(\frac{z}{D_E} \right) \right] \right\} \Bigg|_{z=-\infty}^0, \end{aligned}$$

Calculando a integral entre $z = -\infty$ e $z = 0$, $U_E = \frac{\tau_y}{\rho_0 f}$.

- 1 Quem **efetivamente** contribui para a integral é a região acima de D_E .
- 2 $U_E \perp \tau_y$.

Transporte de Ekman Meridional

Integrando v_E verticalmente:

$$\begin{aligned} V_E &= \int_{-\infty}^0 v_E dz = \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} \int_{-\infty}^0 e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \mathbf{s} \sin \left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4} \right) + \tau_y \cos \left(\frac{z}{D_E} - \frac{\pi}{4} \right) \right] dz, \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 |f| D_E} \left\{ -\frac{D_E}{\sqrt{2}} e^{\frac{z}{D_E}} \left[\tau_x \mathbf{s} \cos \left(\frac{z}{D_E} \right) - \tau_y \sin \left(\frac{z}{D_E} \right) \right] \right\} \Bigg|_{z=-\infty}^0, \end{aligned}$$

Calculando a integral entre $z = -\infty$ e $z = 0$, $V_E = -\frac{\tau_x}{\rho_0 f}$.

- 1 $V_E \perp \tau_x$.
- 2 Compare os dois últimos slides, refaça as contas.

O Transporte de Ekman é Divergente

Integrando em z $\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0$

$$\int_{z=-\infty}^0 \left(\frac{\partial u_E}{\partial x} + \frac{\partial v_E}{\partial y} + \frac{\partial w_E}{\partial z} \right) dz = 0,$$

$$\frac{\partial U_E}{\partial x} + \frac{\partial V_E}{\partial y} + \int_{z=-\infty}^0 \frac{\partial w_E}{\partial z} dz = 0,$$

$$\frac{\partial U_E}{\partial x} + \frac{\partial V_E}{\partial y} + w_E|_{z=-\infty}^0 = 0.$$

$z = 0$ é uma superfície material,

$w_E(z = 0) = 0$. Em $z = -\infty$, dos 2 slides anteriores,

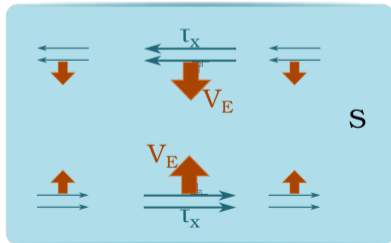
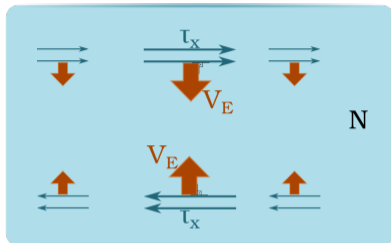
$$U_E = \frac{\tau_y}{\rho_0 f},$$

$$V_E = -\frac{\tau_x}{\rho_0 f} \quad \text{substituindo,}$$

$$w_E = \frac{1}{\rho_0 f} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right)$$

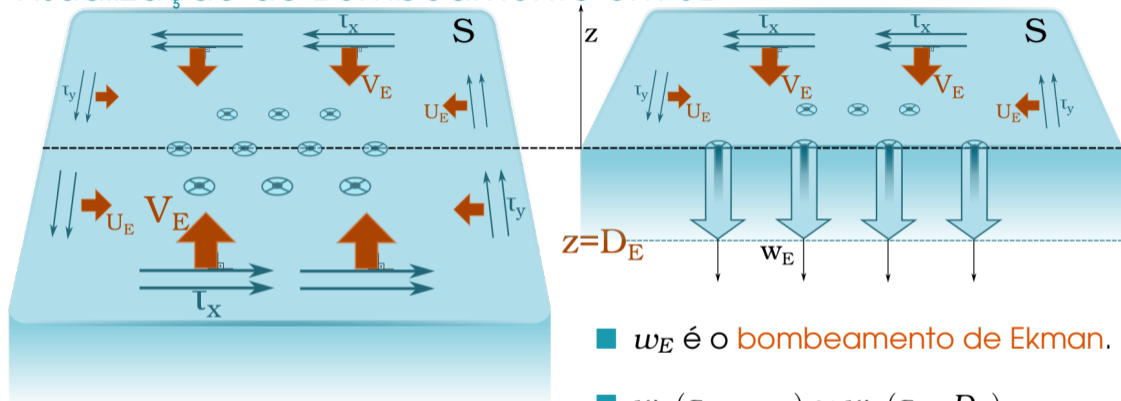
$$w_E = \boxed{\frac{1}{\rho_0 f} (\vec{\nabla} \times \vec{\tau}) \cdot \hat{k}}$$

Aplicando à Circulação de Larga Escala



- O transporte no HN é 90° à direita do vento.
- O transporte no HS é 90° à esquerda do vento.
- Esse transporte é contido entre $z = 0$ e $z = D_E$.
- Pense nos ventos Alíseos e de oeste ou nos *trades and westerlies* e a ideia do vento rotacional fica evidente.

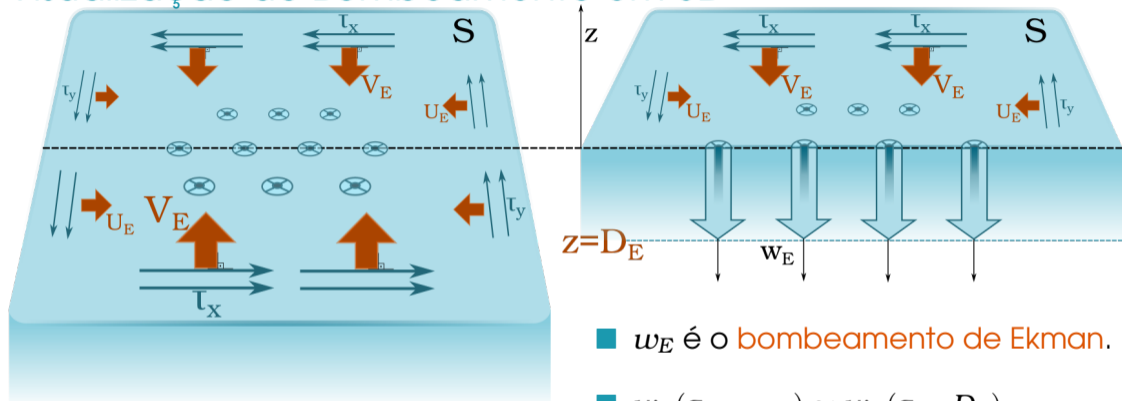
Visualização do Bombeamento em 3D



- Convergência \rightarrow velocidade vertical.

- w_E é o bombeamento de Ekman.
- $w_E(z = -\infty) \simeq w_E(z = D_E)$.
- Pense em w_E levando nutrientes.
- O interior dos giros é oligotrófico.

Visualização do Bombeamento em 3D



- Convergência \rightarrow velocidade vertical.

- w_E é o bombeamento de Ekman.
- $w_E(z = -\infty) \simeq w_E(z = D_E)$.
- Pense em w_E levando nutrientes.
- O interior dos giros é oligotrófico.

Pontos a Ponderar

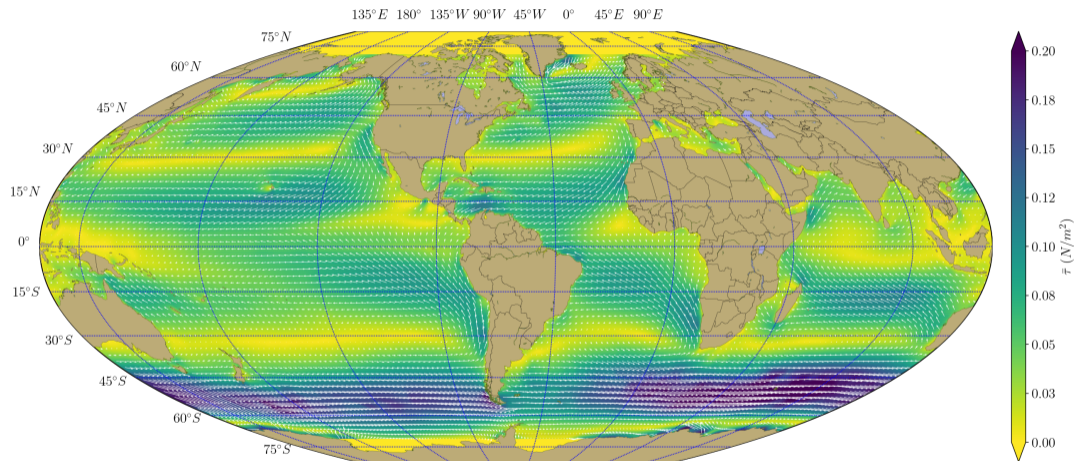
- Recupere a pergunta do slide 22.
- É o $\vec{\nabla} \cdot \vec{U}_E$ e não a viscosidade que transfere momentum para o interior.
- w_E move verticalmente e deforma as superfícies isopicnais.
- Isso muda o peso (pense $p = \rho g h_1$) acima da termoclina .
- Portanto pode gerar o $\vec{\nabla} p$ que entra na geostrofia.
- Percebe como as peças do quebra cabeça se juntam?

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Média de $\vec{\tau}$ 1979–2016, ERAi



Confira na Figura da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 30.
- 2 Em média $\tau_x > \tau_y$. Como em Júpiter.
- 3 O jato mais intenso está entre 45°S e 60°S.
- 4 Em todas as grandes bacias, o padrão é similar:
 - Fraco perto do equador.
 - Forte por volta de 15°.
 - Fraco por volta de 30°.
 - Forte por volta de 45°.

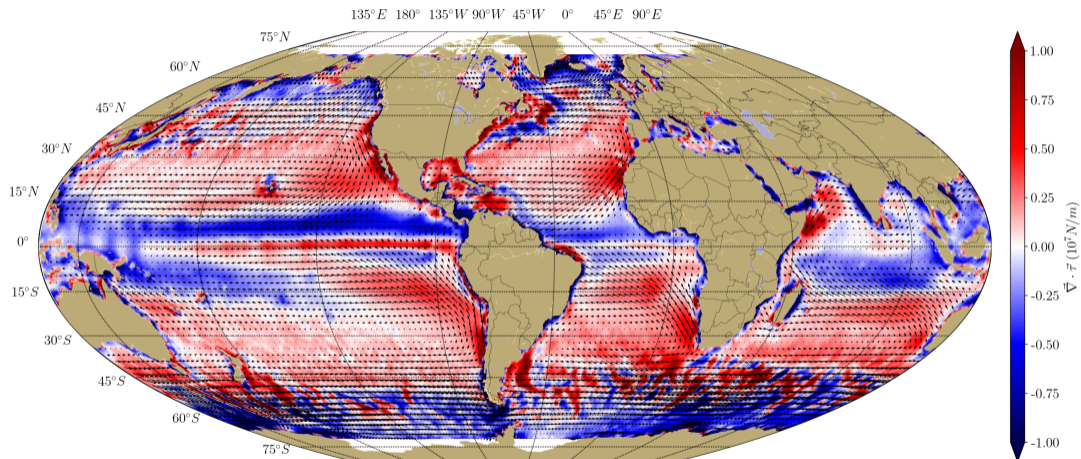
Confira na Figura da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 30.
- 2 Em média $\tau_x > \tau_y$. Como em Júpiter.
- 3 O jato mais intenso está entre 45°S e 60°S.
- 4 Em todas as grandes bacias, o padrão é similar:
 - Fraco perto do equador.
 - Forte por volta de 15°.
 - Fraco por volta de 30°.
 - Forte por volta de 45°.

Confira na Figura da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 30.
- 2 Em média $\tau_x > \tau_y$. Como em Júpiter.
- 3 O jato mais intenso está entre 45°S e 60°S.
- 4 Em todas as grandes bacias, o padrão é similar:
 - Fraco perto do equador.
 - Forte por volta de 15°.
 - Fraco por volta de 30°.
 - Forte por volta de 45°.

Média de $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ 1979–2016, ERAI



Confira na Figura da Divergência da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 32.
- 2 $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$.
- 3 As convergências mais intensas estão perto de 60° , 5°N no Atlântico e Pacífico e no Índico, em 5°S .
- 4 Zonas de divergência ocupam amplas regiões de médias e baixas latitudes em todas as bacias.
- 5 Convergência \Rightarrow ar ascendente \Rightarrow chuvas.
- 6 Esta figura deve completar a das células de Walker e Hadley.

Confira na Figura da Divergência da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 32.
- 2 $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$.
- 3 As convergências mais intensas estão perto de 60° , 5°N no Atlântico e Pacífico e no Índico, em 5°S .
- 4 Zonas de divergência ocupam amplas regiões de médias e baixas latitudes em todas as bacias.
- 5 Convergência \Rightarrow ar ascendente \Rightarrow chuvas.
- 6 Esta figura deve completar a das células de Walker e Hadley.

Confira na Figura da Divergência da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 32.
- 2 $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$.
- 3 As convergências mais intensas estão perto de 60° , 5°N no Atlântico e Pacífico e no Índico, em 5°S .
- 4 Zonas de divergência ocupam amplas regiões de médias e baixas latitudes em todas as bacias.
- 5 Convergência \Rightarrow ar ascendente \Rightarrow chuvas.
- 6 Esta figura deve completar a das células de Walker e Hadley.

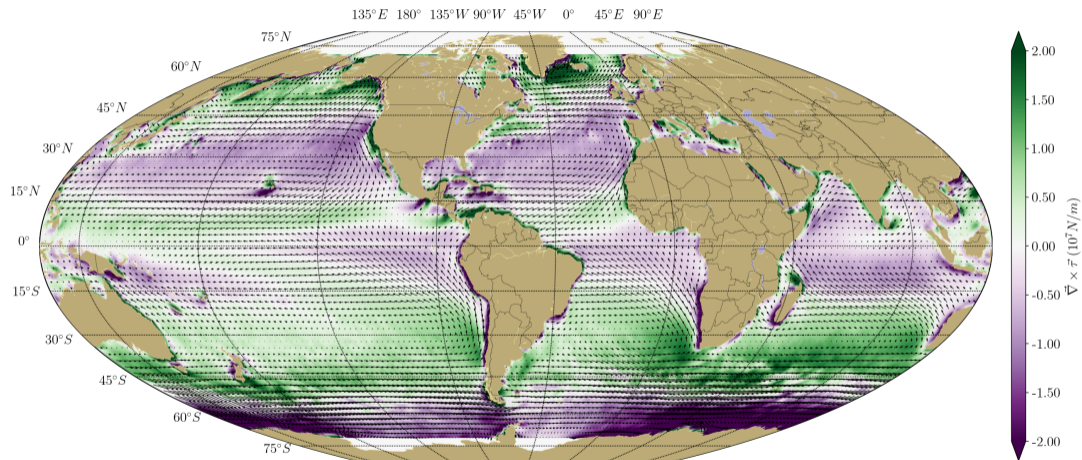
Confira na Figura da Divergência da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 32.
- 2 $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$.
- 3 As convergências mais intensas estão perto de 60° , 5°N no Atlântico e Pacífico e no Índico, em 5°S .
- 4 Zonas de divergência ocupam amplas regiões de médias e baixas latitudes em todas as bacias.
- 5 Convergência \Rightarrow ar ascendente \Rightarrow chuvas.
- 6 Esta figura deve completar a das células de Walker e Hadley.

Confira na Figura da Divergência da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 32.
- 2 $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$.
- 3 As convergências mais intensas estão perto de 60° , 5°N no Atlântico e Pacífico e no Índico, em 5°S .
- 4 Zonas de divergência ocupam amplas regiões de médias e baixas latitudes em todas as bacias.
- 5 Convergência \Rightarrow ar ascendente \Rightarrow chuvas.
- 6 Esta figura deve completar a das células de Walker e Hadley.

Média de $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ 1979–2016, ERAi



Confira na Figura do Rotacional da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 34.
- 2 $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$ e nem com $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$.
- 3 A figura é **anti-simétrica**: Os padrões do HN estão invertidos no HS.
- 4 O f muda de sinal \Rightarrow a circulação causada pelo $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **simétrica**.
- 5 Nos giros subtropicais, de 15° a 45° , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é positivo no HS e negativo no HN.
- 6 A linha branca de rotacional nulo marca as bordas dos giros.

Confira na Figura do Rotacional da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 34.
- 2 $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$ e nem com $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$.
- 3 A figura é **anti-simétrica**: Os padrões do HN estão invertidos no HS.
- 4 O f muda de sinal \Rightarrow a circulação causada pelo $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **simétrica**.
- 5 Nos giros subtropicais, de 15° a 45° , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **positivo** no HS e **negativo** no HN.
- 6 A linha branca de rotacional nulo marca as bordas dos giros.

Confira na Figura do Rotacional da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 34.
- 2 $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$ e nem com $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$.
- 3 A figura é **anti-simétrica**: Os padrões do HN estão invertidos no HS.
- 4 O f muda de sinal \Rightarrow a circulação causada pelo $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **simétrica**.
- 5 Nos giros subtropicais, de 15° a 45° , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **positivo** no HS e **negativo** no HN.
- 6 A linha branca de rotacional nulo marca as bordas dos giros.

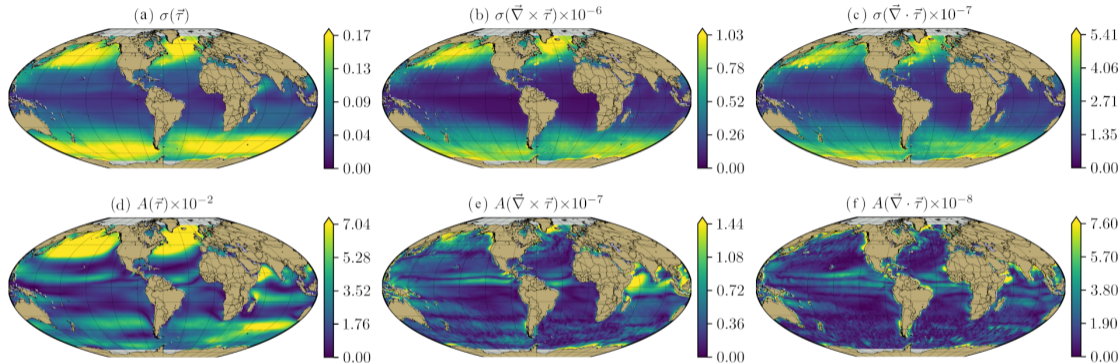
Confira na Figura do Rotacional da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 34.
- 2 $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$ e nem com $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$.
- 3 A figura é **anti-simétrica**: Os padrões do HN estão invertidos no HS.
- 4 O f muda de sinal \Rightarrow a circulação causada pelo $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **simétrica**.
- 5 Nos giros subtropicais, de 15° a 45° , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **positivo** no HS e **negativo** no HN.
- 6 A linha branca de rotacional nulo marca as bordas dos giros.

Confira na Figura do Rotacional da Tensão do Vento

- 1 A ideia é ficar indo, voltando e dando zoom no slide 34.
- 2 $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ não coincide com $|\tau|$ e nem com $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$.
- 3 A figura é **anti-simétrica**: Os padrões do HN estão invertidos no HS.
- 4 O f muda de sinal \Rightarrow a circulação causada pelo $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **simétrica**.
- 5 Nos giros subtropicais, de 15° a 45° , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ é **positivo** no HS e **negativo** no HN.
- 6 A linha branca de rotacional nulo marca as bordas dos giros.

Variabilidade σ e amplitude anual A



(a) Altas latitudes.

(b) + ruído que (a).

(c) Similar a (b).

(d) HN + intenso.

(e) Bandas zonais

(f) ITCZs e monções!

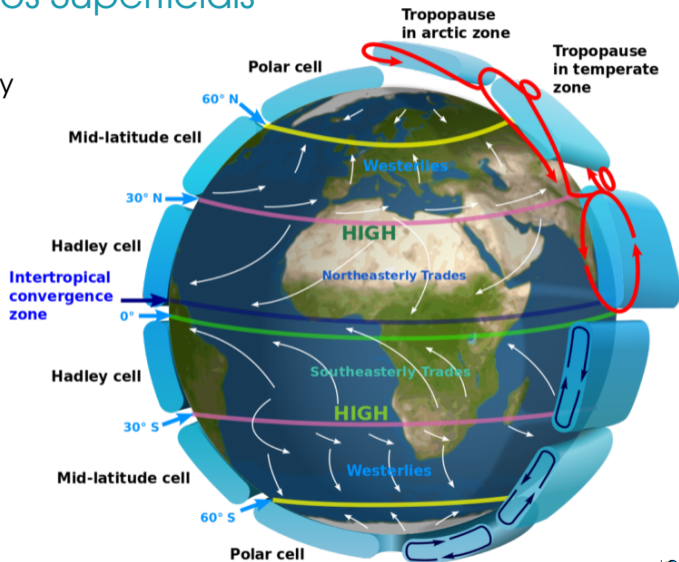
Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Esquema Global de Ventos Superficiais

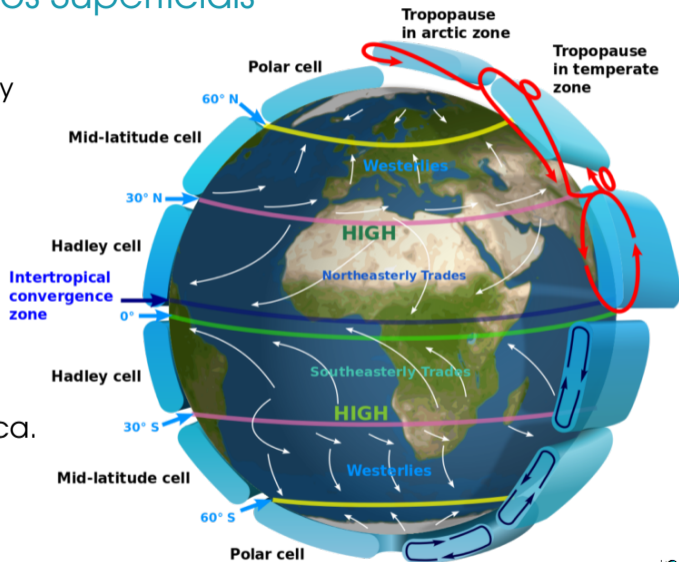
- Hadley
- 3 células (y, z)
- Ferrel
- Polar
- Convergência $\sim 0^\circ$
- Para Leste $\sim 15^\circ$
- Divergência $\sim 30^\circ$
- Para Oeste $\sim 45^\circ$
- Convergência $\sim 60^\circ$



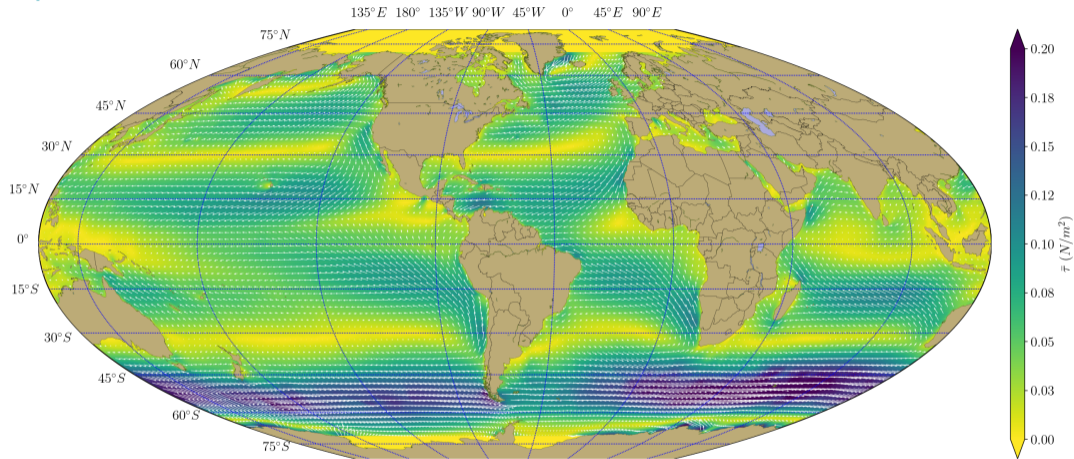
Esquema Global de Ventos Superficiais

- 3 células (y, z)
- Se converge, sobe.
- Se sobe, esfria, chove.
- Se diverge, desce.
- Se desce, esquenta, seca.
- → Desertos e florestas.

- Hadley
- Ferrel
- Polar

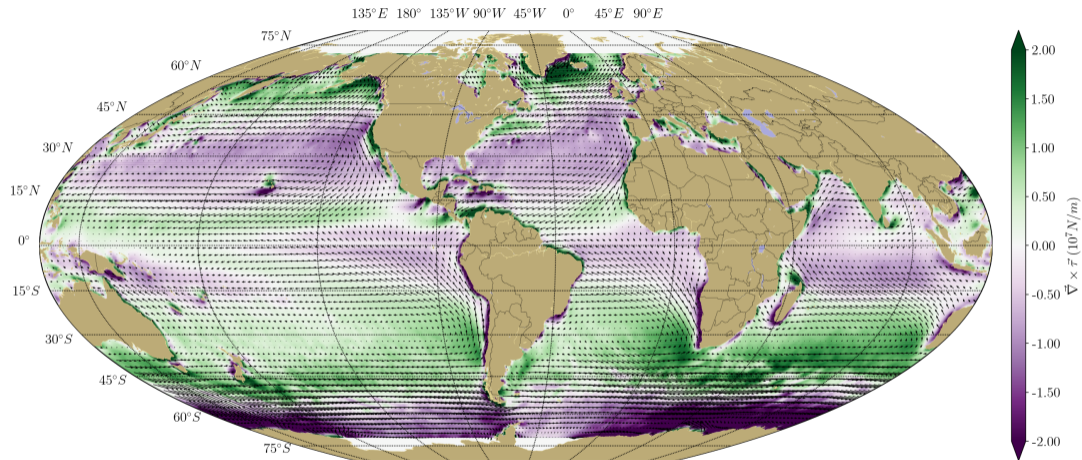


O que nos Interessa é τ ...



Localize as 3 células e os regimes de convergência/divergência.

...mais exatamente $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$



Ache as “linhas” de rotacional zero. Elas delimitam os giros.

Pontos a ponderar sobre $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$

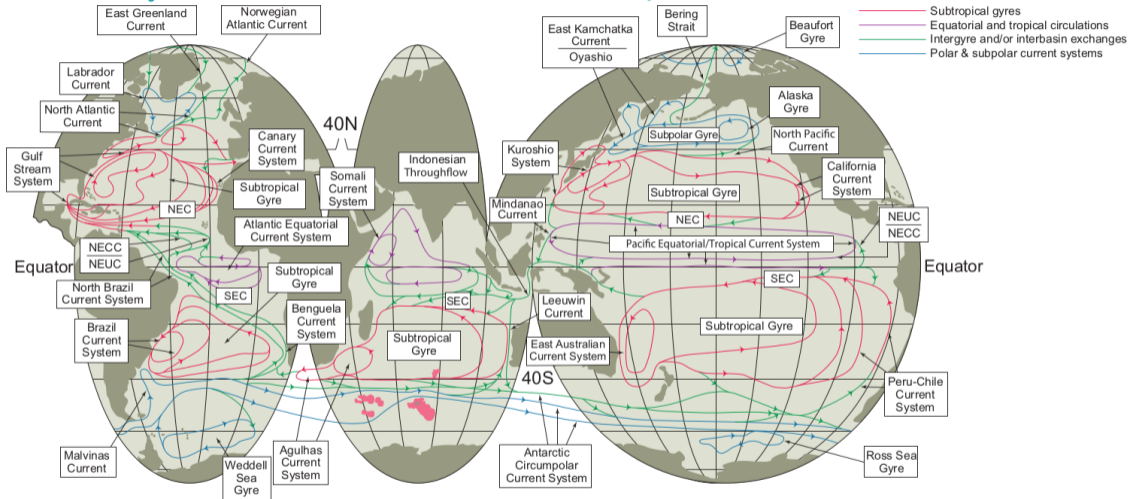
- Esse é o principal forçante da circulação acima da termoclina.
- Compare com (b) do slide 36:
- σ = desvio padrão, a escala é de 1×10^{-6} N/m²;
- Olhe a escala do slide 36: é de 2×10^{-7} N/m².
- A variabilidade é ~ 5 vezes maior que a média!
- Achar a linha do 0 num mapa diário ou semanal não faz sentido.

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

Circulação Global na Camada Superior

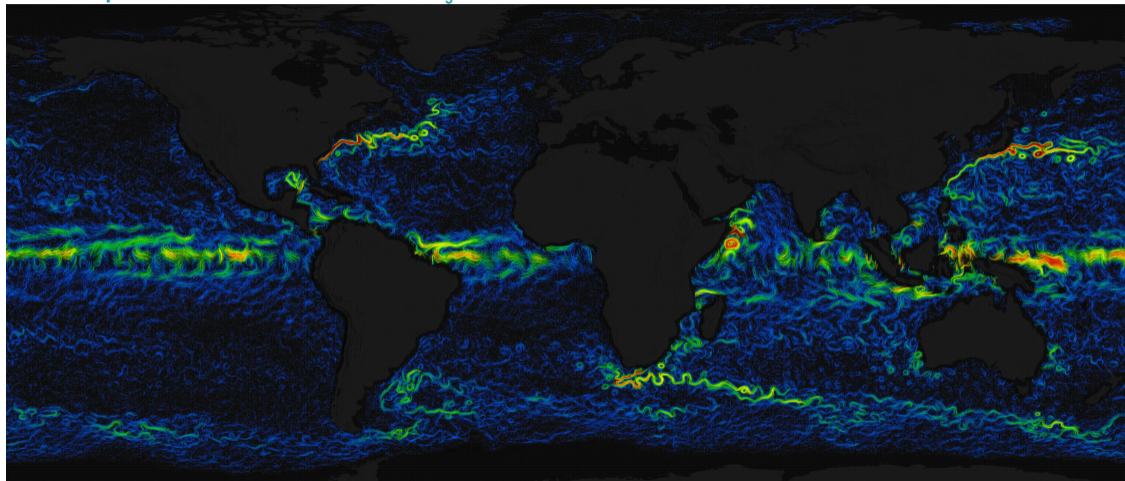


Adaptado de Schmitz, 1996.

Pontos a Ponderar

- 1 O limite dos giros se alinha aproximadamente com $\vec{\nabla} \times \tau = 0$.
- 2 Na região equatorial a dinâmica é diferente.
- 3 O Índico Norte é pequeno e não tem giro subtropical, os outros cinco tem.
- 4 O transporte pelo estreito de Bering, no Pacífico Norte, é minúsculo.
- 5 O transporte entre o Ártico e o Atlântico é significativo.
- 6 A Corrente Circumpolar Antártica conecta os três oceanos.

O Esquema e a Circulação

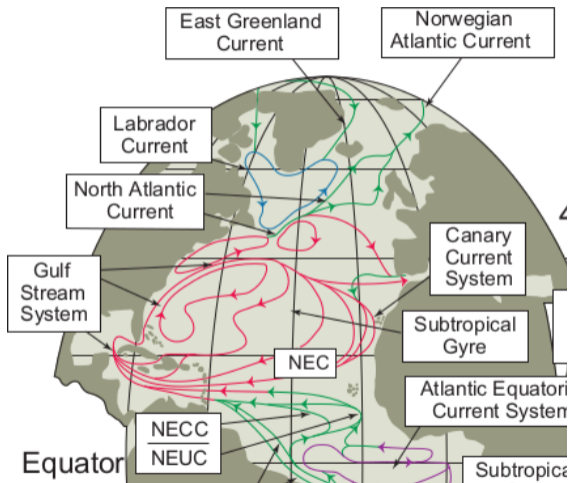


Assistam este [vídeo](#) e leiam como foi feito neste [site](#).

O Esquema e a Circulação

- 1 O slide 48 é um esquema didático.
- 2 A circulação instantânea é muito diferente nos dados do projeto Oscar.
- 3 Perceba a diferença de $|\vec{v}|$ entre a borda oeste e o resto dos giros.
- 4 Em latitudes médias as manchas azuis vão para oeste.
- 5 Isso são ondas de Rossby e vórtices de mesoescala.
- 6 Em latitudes baixas tem ondas de Rossby, Kelvin e Yanai além de vórtices.

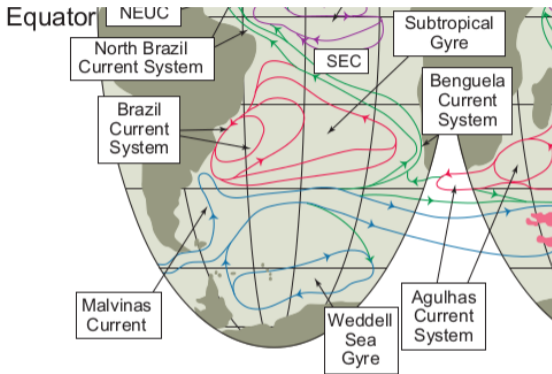
Circulação na Camada Superior do Atlântico Norte



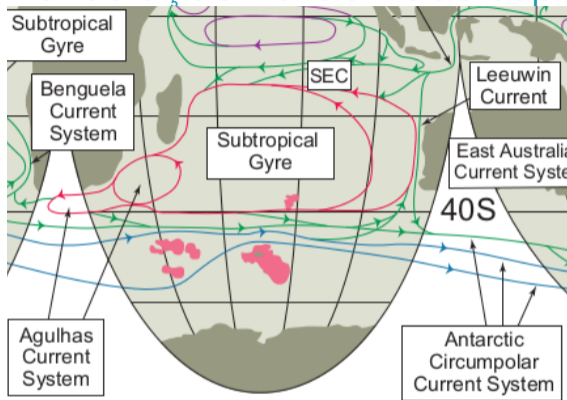
- O giro subtropical é de alta pressão, horário e anti-ciclônico.
- O subpolar é de baixa, anti-horário e ciclônico.
- Na região tropical-equatorial o transporte líquido é para o norte por causa da CNB.
- Em Gibraltar a forçante é halina.

Circulação na Camada Superior do Atlântico Sul

- O giro subtropical é AAA: alta, anti-horário e anti-ciclônico.
- O subpolar é de baixa, horário e ciclônico.
- O sistema CB/CNB bifurca no NE.
- A Confluência Brasil-Malvinas é extremamente energética.
- O movimento meridional de $\vec{\nabla} \times \vec{r} = 0$ influi no vazamento das Agulhas.



Circulação na Camada Superior do Índico Sul



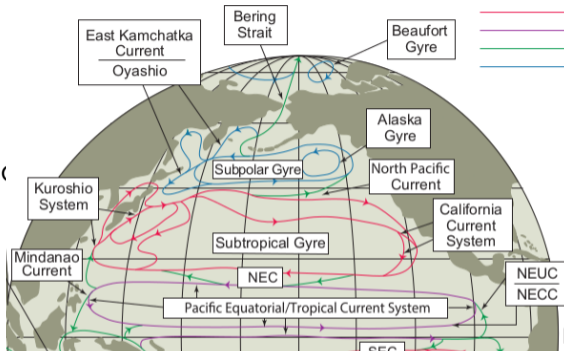
- O giro subtropical é de alta, anti-horário e anti-ciclônico.
- Circulação tropical influenciada por monções (ondas).
- O vazamento da Indonésia traz água fresca e importa p/ El Niño.

■ Não tem giro subpolar!

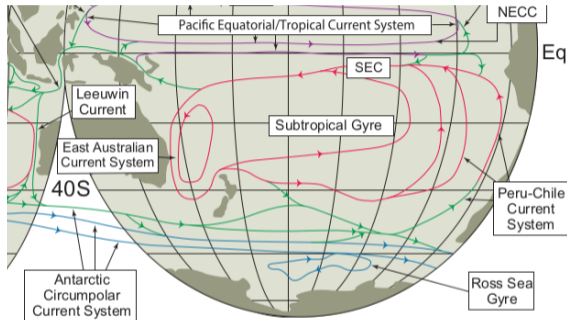
■ Conectado com o Atlântico e Pacífico via Circumpolar Antártica.

Circulação na Camada Superior do Pacífico Norte

- O giro subtropical é de alta pressão, horário e anti-ciclônico.
- O subpolar é de baixa, anti-horário e ciclônico.
- Na região tropical-equatorial as correntes são zonais,
- Vazamento de Bering é pequeno.
- Vórtices do Golfo de Tehuantepec causados pelo vento dos Papagaios.



Circulação na Camada Superior do Pacífico Sul



- O giro subtropical é de alta pressão, anti-horário e anti-ciclônico.
- O subpolar (de Ross) é de baixa, horário e ciclônico.
- Correntes equatoriais assimétricas.

- ACC conecta os 3 oceanos.

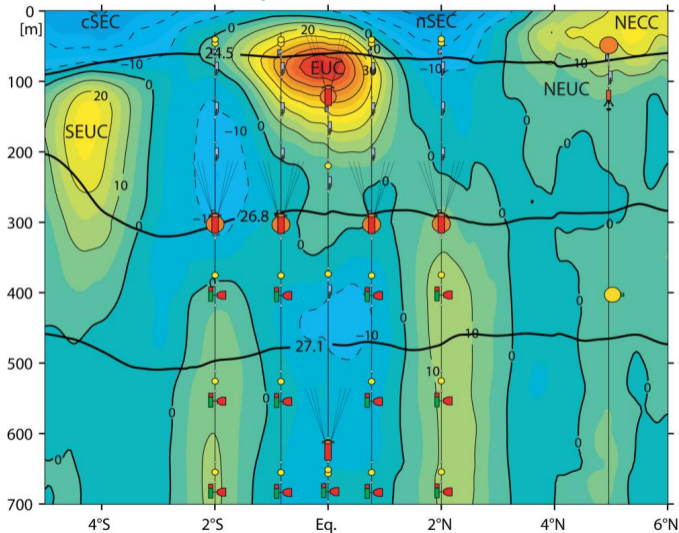
- El Niño e La Niña imperam, via ondas de Kelvin e Rossby.

Roteiro

5 Dinâmica de Ekman

- Para começo de conversa...
- A Espiral de Ekman
- O Vento e o Mar
- O Sistema Global de Ventos
- Sobre os Ventos
- Circulação Forçada pelo Vento
- Circulação Equatorial, Quando $f \rightarrow 0$

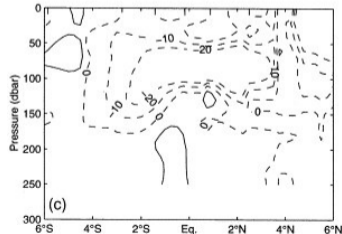
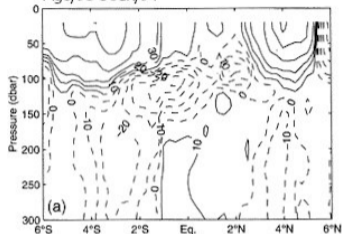
Correntes Equatoriais a 23°W no Atlântico



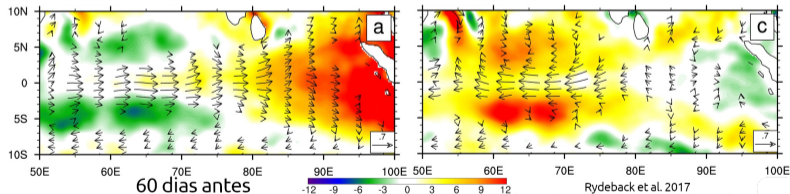
- R/V Atalante Feb./Mar. 2008, Geomar.
- u a cada 10 cm/s, laranja p/ leste, azul p/ oeste.
- Correntes opostas e alternadas em y e z .
- Mais raso na América, mais fundo na África O(50 m).

Correntes Equatoriais a 23°W no Índico

Velocidade zonal a 80.5°W Oceano Índico
Ago/93 e Jan/91

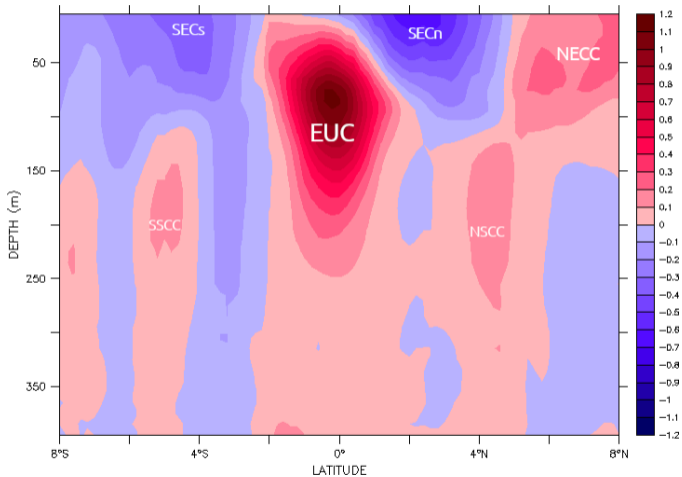


- Schott & McCreary 1991 PO.
- u a cada 10 cm/s, contínua p/ E, tracejada p/ W.
- (a) Verão, (c) Inverno: extremamente variável.



- Ondas de Kelvin \rightsquigarrow ondas de Rossby.

Correntes Equatoriais e 125°E no Pacífico

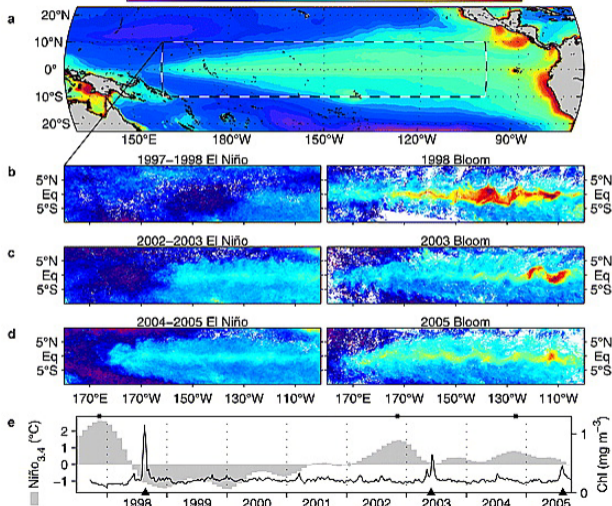


- Jaclyn Brown, preprint, ResearchGate.
- u a cada 10 cm/s, vermelho p/ E, azul p/ W.
- Correntes opostas e alternadas em y e z .
- O sistema sobe ou afunda dependendo do El Niño e La Niña.

Pense em Termo de Processos

SeaWiFS chlorophyll (mg m^{-3})

0.02 0.05 0.1 0.2 0.4 0.8 1.5



- Ryan et al. 2006 JGR.
- *Blooms* de fitoplâncton modificados por OITs.
- Sincronizados com fim do El Niño e não com La Niña.
- Injeção de Fe via NGCUC/EUC supre o micronutriente.

Perceba que...

- Apesar da idealização das teorias, há um forte vínculo com a realidade.
- Há padrões comuns a todas as bacias, apesar das diferenças.
- A variabilidade de τ , $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ e $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ é maior que a média em muitos lugares.
- As variáveis que envolvem derivadas são inerentemente mais ruidosas.
- É o rotacional $\vec{\nabla} \times \vec{\tau}$ que se alinha com os giros subtropicais.
- A integração entre as áreas é possível, aborda problemas interessantes.

Fim do Tema 5

