

Oceanografia por Satélites

Sensor de Cor do Oceano. Aplicação em Medidas de
Concentração de Clorofila

Paulo S. Polito, Ph.D.

polito@usp.br

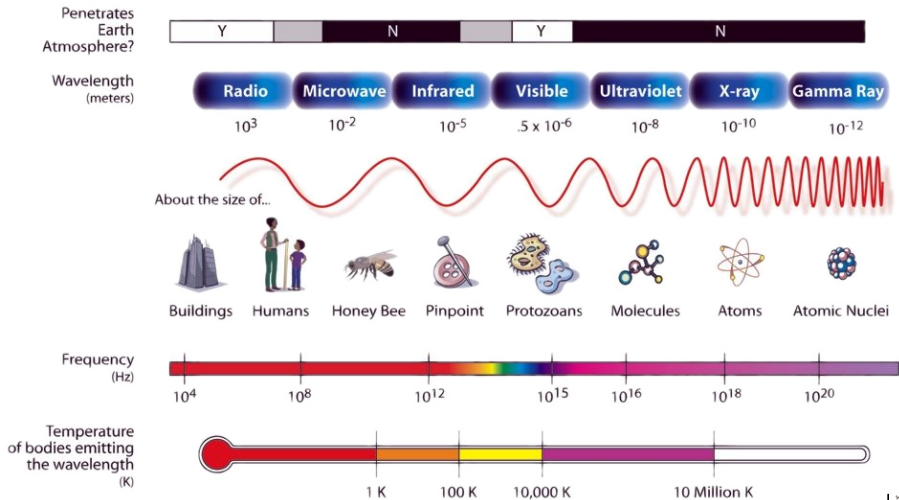
Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
<http://los.io.usp.br>
Laboratório de Oceanografia por Satélites

- 1 **Introdução**
 - RADAR
 - O efeito da Atmosfera
 - Princípio de Funcionamento
 - Satélites e Instrumentos
- 2 **Teoria**
 - Dinâmica de Ekman
- 3 **Aplicações**
 - Vento
 - Stress
 - Bombeamento de Ekman

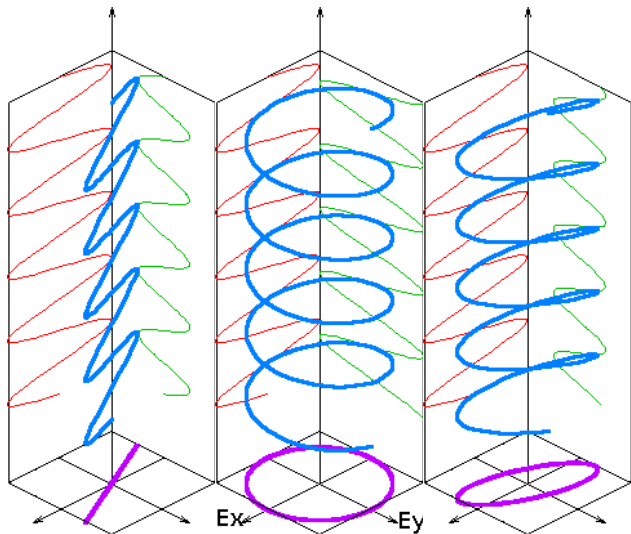
Roteiro

- 1 Introdução
 - RADAR
 - O efeito da Atmosfera
 - Princípio de Funcionamento
 - Satélites e Instrumentos
- 2 Teoria
 - Dinâmica de Ekman
- 3 Aplicações
 - Vento
 - Stress
 - Bombeamento de Ekman

Espectro Eletromagnético

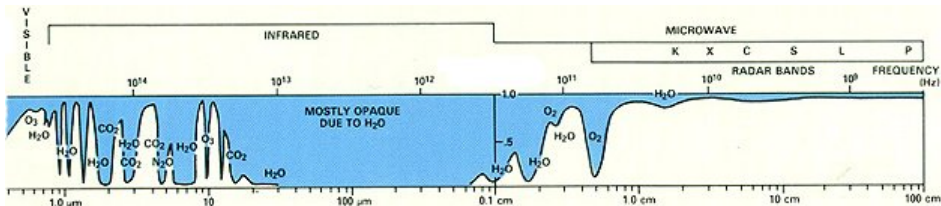


Ondas Eletromagnéticas - Polarização



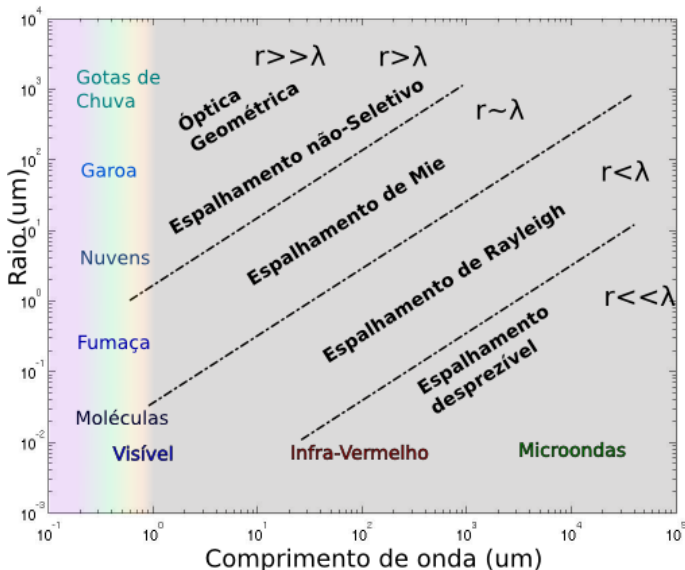
- Da relação de fase entre a oscilação nos dois planos podemos classificar a onda EM quanto à polarização: linear, circular e elíptica.
- Escaterômetros usam polarização linear horizontal e vertical.

Absorção



- A combinação dos espectros de absorção da atmosfera torna a atmosfera opaca a alguns comprimentos de onda e transparente a outros.
- O escaterômetro opera em $\lambda = 2.1$ cm (NSCAT, QuikSCAT) e 5.7 cm (ERS).
- Portanto trata-se de um radar de microondas que opera nas bandas K_U e C .
- A absorção atmosférica nestas bandas é pequena e se deve majoritariamente ao vapor d'água.

Espalhamento



O espalhamento para $\lambda = 2.1$ e 5.7 cm depende da presença de gotas de chuva de tamanho apreciável.

Note que este é o **espalhamento na atmosfera**, não no oceano.

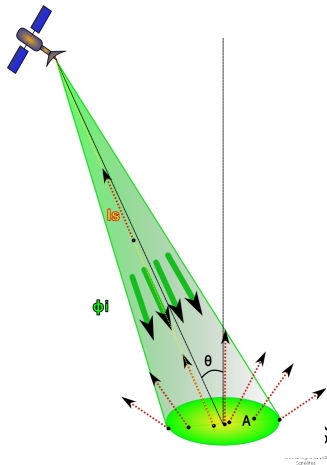
Seção Reta

A seção reta de espalhamento por unidade de área σ_0 é a medida básica do escaterômetro, relacionada ao vento.

$$\sigma_S = 4\pi A \cos \theta \left(\frac{I_S}{\Phi_i} \right)$$

$$\sigma_S = \int_A \sigma_0 dA \quad \sigma_0 = \left\langle \frac{\sigma_i}{\Delta A_i} \right\rangle$$

- A é a área iluminada pelo radar.
- Φ_i é o fluxo radiante (W) incidente na área projetada na direção do satélite $A \cos \theta$, θ é o ângulo de incidência.
- I_S é a intensidade radiante (Wsr^{-1}) espalhada pela superfície do mar.
- σ_S é a seção reta de espalhamento em m^2 e σ_0 é adimensional.



Equação do Radar

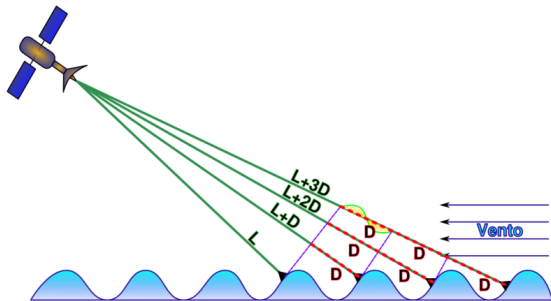
- A seção reta de espalhamento é portanto uma relação entre as potências transmitida P_t e recebida P pelo radar.
- A equação do radar quantifica esta relação:

$$P = \underbrace{\frac{P_t G}{4\pi R^2}}_1 \underbrace{\frac{\sigma_s}{4\pi}}_2 \underbrace{\frac{A_e}{R^2}}_3$$

- 1 é a potência por m^2 à distância R .
- 2 é a fração da intensidade radiante espalhada na direção do radar, produzida por uma superfície com seção reta σ_s .
- 3 é o ângulo sólido que uma antena com área efetiva $A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$ abrange. Substituindo A_e temos:

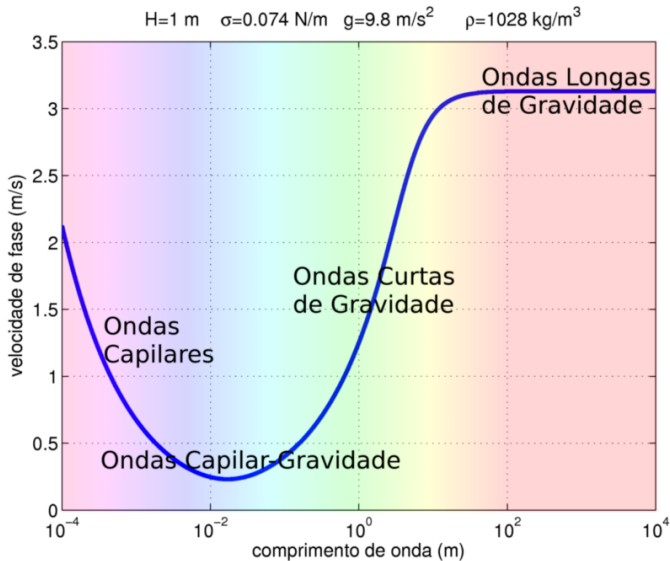
$$P = \sigma_s \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

Espalhamento Bragg

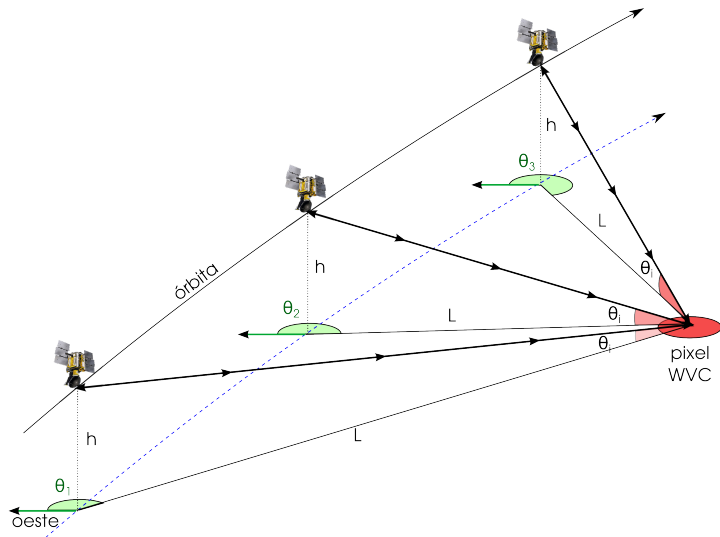


- Ondas capilar-gravidade aparecem e desaparecem em 1–5s e tem um comprimento típico de 1-5 cm.
- Da geometria $\lambda_{onda} = \frac{n\lambda_{RADAR}}{2 \sin \theta}$.
- Quando a relação acima for verdadeira há maior chance de interferência construtiva $\Rightarrow \sigma_0$ maior.

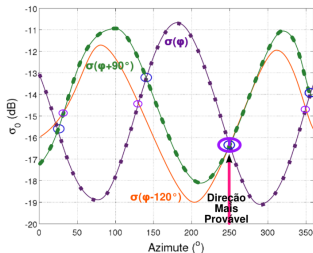
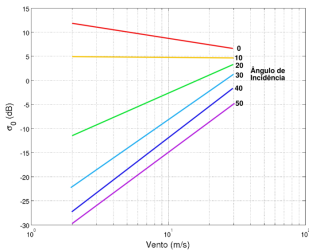
Transição Capilar/Gravidade Curta/Longa



Incidência e Azimute



Incidência e Azimute



- Bragg funciona bem para ângulos de incidência $\theta \simeq 20 - 60^\circ$.
 - Ela falha para $\theta \sim 0^\circ$ (nadir) pois domina a reflexão especular
 - e para $\theta \sim 90^\circ$ (rasante) pois as cristas próximas fazem sombra.
- σ_0 depende também do ângulo φ entre a direção do pulso de radar e a direção do vento (azimute).
- Portanto se a mesma região é amostrada de ângulos diferentes podemos obter a direção do vento.

Algoritmos para Relacionar σ_0 e U_{10}

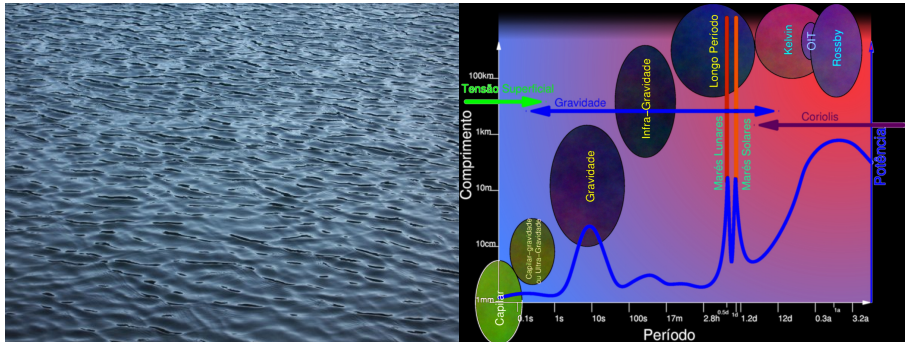
- Os escaterômetros utilizam duas polarizações, HH e VV, sendo que a VV funciona melhor.
- O algoritmo **empírico** mais usado é o CMOD4, baseado em $\sigma_{0,VV}$.

$$\sigma_0 = b_0 (1 + b_1 \varphi + b_3 \tanh(b_2) \cos(2\varphi))^{1.6}$$

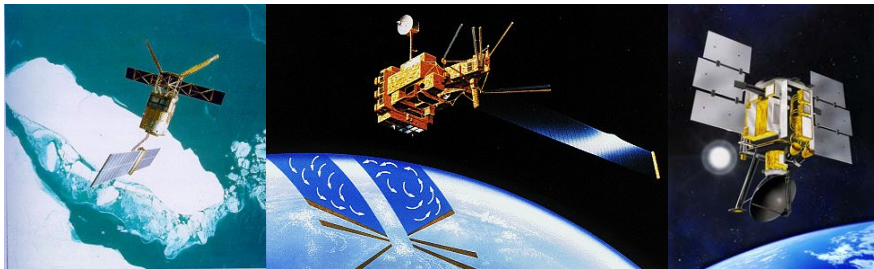
- φ é o ângulo entre a direção do pulso de radar e a direção do vento.
- Os valores de $b_{0,1,2,3}$ dependem do **vento equivalente neutro a 10 m U_{10}** .
- Portanto esta função nos permite associar a variável observada σ_0 à variável de interesse U_{10} .

Em suma...

- É um instrumento ativo e opera na banda de microondas.
- Espalhamento de Bragg é o princípio básico.
- O sensor mede o sinal retroespalhado por ondas capilar-gravidade (σ_0 , seção reta de espalhamento).
- σ_0 depende **(a)** do ângulo de incidência θ , **(b)** do ângulo entre o vento e o feixe de radar e **(c)** do vento.



Escaterômetros



Satélite	Ano	Freq. GHz	Resol. km	Varredura km	Cobertura Diária
Skylab	1973	13.9	15	800	-
SeaSat	1978	14.6	50	750 + 750	-
ERS/1-2	1991-2008	5.3	50	500	< 41 %
NSCAT	1996-1997	13.9	50	600 + 600	78 %
QuikScat	1999-2008	13.4	12.5	1800	92 %

Acesso aos Dados

The image shows two side-by-side browser windows. The left window displays the JPL-PODAAC website, which is a NASA portal for remote sensing data. It features a search bar, navigation tabs for 'HOME', 'DATA PRODUCTS', 'TOOLS & SERVICES', 'FAQ', 'CONTACT', 'NASA SURVEY', and 'ANNOUNCEMENTS'. A specific product page is shown for 'SeaWinds on QuikSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors'. A table lists various data products with columns for Spatial Coverage, Spatial Resolution, Temporal Coverage, Temporal Resolution, Processing Level, Data Format, Tools & Services, and Accuracy. The right window displays the ESA Data Products website, which is the European Space Agency's portal for Earth Observation data. It features a search bar, navigation tabs for 'ESA', 'Earth Home', 'Missions', 'Data Products', 'Resources', and 'Applications Directory'. A specific product page is shown for 'Wind Scatterometer Fast Delivery Product (ERS.WSC.UWI)', detailing the product's characteristics and availability.

- Os dados do ERS-1 são acessados via portal da ESA: <http://earth.esa.int>, via software EOLI (Java).
- Os demais podem ser acessados via JPL-PODAAC: <http://podaac-www.jpl.nasa.gov/>, em formato HDF.

Roteiro

- 1 Introdução
 - RADAR
 - O efeito da Atmosfera
 - Princípio de Funcionamento
 - Satélites e Instrumentos
- 2 Teoria
 - Dinâmica de Ekman
- 3 Aplicações
 - Vento
 - Stress
 - Bombeamento de Ekman

Transporte de Ekman

Se o termo viscoso é balanceado pelo atrito:

$$-fV_E = \frac{\mu}{\rho_0} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \qquad fU_E = \frac{\mu}{\rho_0} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

Podemos considerar o *stress* do vento $\mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = \vec{\tau}$ como forçante em $z = 0$ e integrar na camada de Ekman (de $z = 0$ até $z = z_E$) onde a viscosidade **turbulenta** atua:

$$\int_0^{z_E} -\rho_0 f V_E dz = \int_0^{z_E} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz \qquad \int_0^{z_E} \rho_0 f U_E dz = \int_0^{z_E} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} dz$$

$$-\rho_0 f V_E = \tau_x \qquad \rho_0 f U_E = \tau_y$$

Onde U_E e V_E são os transportes de volume na camada de Ekman.

Bombeamento de Ekman

Integrando a equação da continuidade na camada de Ekman com $w = 0$ na superfície:

$$\int_0^{z_E} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} dz = \frac{\partial U_E}{\partial x} + \frac{\partial V_E}{\partial y} + w_E = 0$$

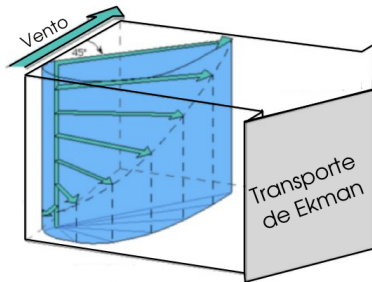
Onde w_E é a velocidade vertical na base da camada de Ekman.

Usando

$$V_E = -\frac{\tau_x}{\rho_0 f} \quad U_E = \frac{\tau_y}{\rho_0 f}$$

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

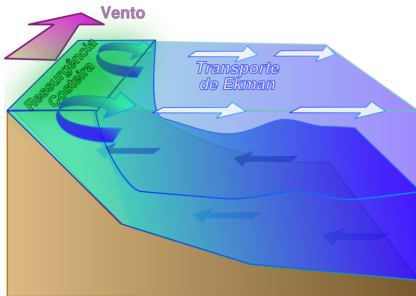
$$w_E = \frac{\vec{\nabla}_H \times \vec{\tau}}{\rho_0 f}$$



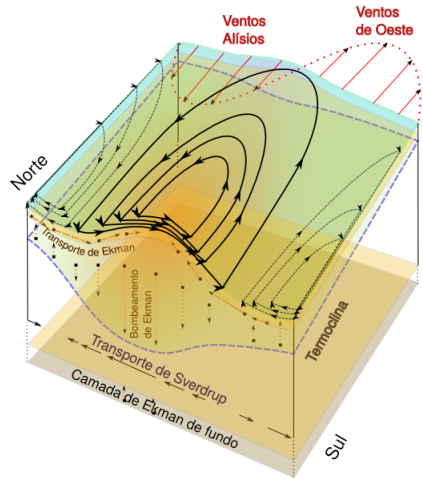
No Hemisfério Norte

Importância da Dinâmica de Ekman

No Hemisfério Norte (Sul) o transporte é à direita (esquerda) do vento.



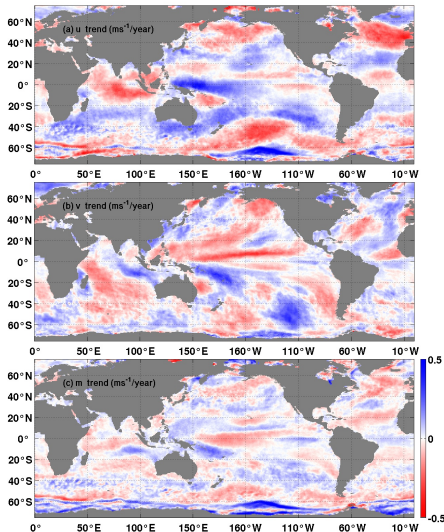
Tanto para a circulação de larga escala como costeira, o transporte de Ekman tem papel fundamental.



Roteiro

- 1 Introdução
 - RADAR
 - O efeito da Atmosfera
 - Princípio de Funcionamento
 - Satélites e Instrumentos
- 2 Teoria
 - Dinâmica de Ekman
- 3 Aplicações
 - Vento
 - Stress
 - Bombeamento de Ekman

O Vento Global Está Mudando?



- Variações inter-anuais (1999–2007) no vento podem ser detectadas em séries temporais do vetor vento.
- A posição e a intensidade da ZCIT no Pacífico e no Atlântico estão mudando.
- A componente zonal ao redor da Antártica está enfraquecendo.
- Estas variações podem estar associadas à variações no calor armazenado nos oceanos.

Cálculo da Tensão de Cisalhamento

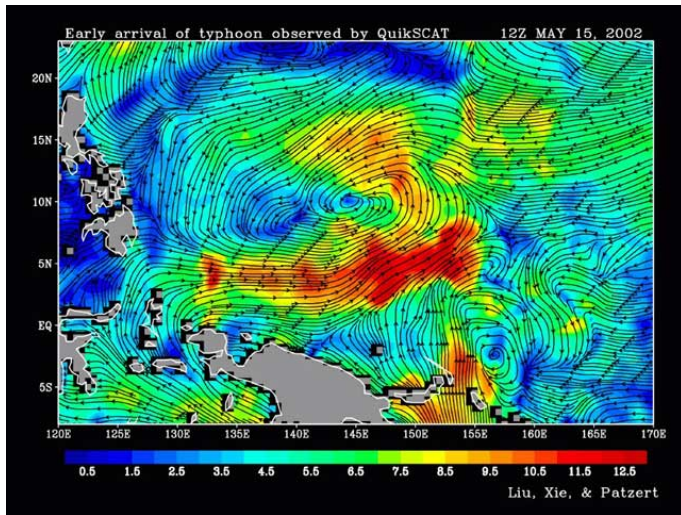
- Podemos estimar τ a partir de U_{10} , o vento equivalente

$$\vec{\tau} = \rho_{ar} C_D \vec{U}_{10} |U_{10}|$$

neutro:

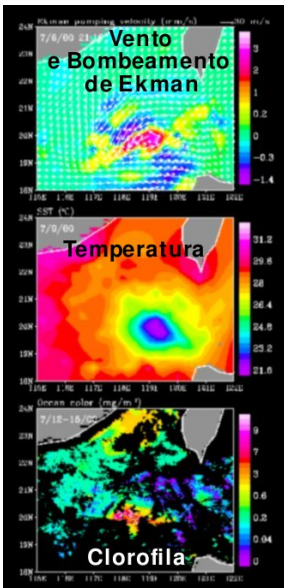
- As *bulk formulas* assumem implicitamente que na camada limite a densidade da coluna atmosférica é constante.
- Se a água está mais quente, a camada de baixo fica menos densa e ocorre convecção turbulenta (viscosidade diminui).
- Se a água está mais fria aumenta a estratificação e a coluna de ar se estabiliza (viscosidade aumenta).
- O método LKB inclui estes efeitos e resulta em medidas de τ 5% mais precisas em média global.

Detecção de Tufões



- Ventos de escaterômetro tem mais detalhes que ventos de modelos.
- Com eles é possível antecipar em até 2 dias a detecção.
- Isto salva vidas e bilhões de \$\$.

O Impacto Biológico de w_E



$$w_E = \frac{\vec{\nabla}_k \times \vec{\tau}}{\rho f}$$

- Podemos estimar τ de *bulk formulas* e com τ podemos estimar a velocidade vertical w_E .
- Em geral w_E é relativamente pequeno, da ordem de 1 m/dia.
- Em condições extremas pode aumentar 1-2 ordens de magnitude pois $\vec{\tau} = \rho_{ar} C_D \vec{U}_{10} |U_{10}|$.
- w_E traz para a superfície águas frias.
- Estas águas não estavam expostas à luz e são ricas em nutrientes.
- O resultado final é um *bloom*.

Muito Obrigado!