

# Oceanografia por Satélites

## Uso de Dados de Satélites no Estudo da Dinâmica Equatorial

**Paulo S. Polito, Ph.D.**

**polito@io.usp.br**

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

# Roteiro

- 1 O Problema do  $f \rightarrow 0$ 
  - Geostrofia
  - Ageostrofia
  - Relação de Dispersão
- 2 Caracterização da Região
  - Hidrografia
  - Seções com Velocidades Absolutas ADCP
- 3 Aplicações Usando Satélites
  - Medidas Operacionais de Correntes
  - Componentes do Sinal da Altura
  - Estudos Multi-Sensor
- 4 Um Exemplo Concreto
  - Blooms de Fitoplâncton no Pacífico
  - O que Acontece no Oeste?
  - Resultados
  - Considerações Finais

# Roteiro

- 1 O Problema do  $f \rightarrow 0$ 
  - Geostrofia
  - Ageostrofia
  - Relação de Dispersão
- 2 Caracterização da Região
  - Hidrografia
  - Seções com Velocidades Absolutas ADCP
- 3 Aplicações Usando Satélites
  - Medidas Operacionais de Correntes
  - Componentes do Sinal da Altura
  - Estudos Multi-Sensor
- 4 Um Exemplo Concreto
  - Blooms de Fitoplâncton no Pacífico
  - O que Acontece no Oeste?
  - Resultados
  - Considerações Finais

# Geostrofia e Altura da Superfície

Considerando movimentos quase estacionários:

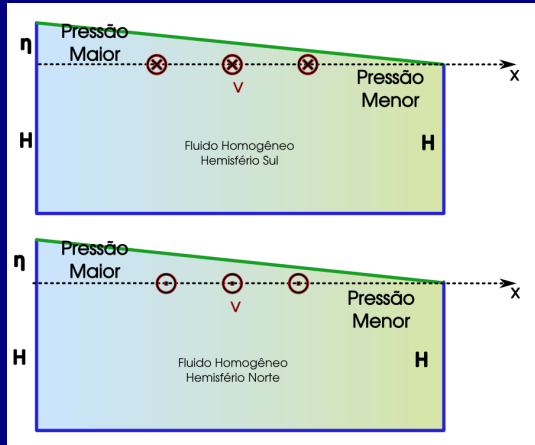
$$-fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Substituindo  $p = \rho_0 g \eta$  temos a velocidade superficial em função de  $\eta$ :

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$u = \frac{-g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$



Podemos medir  $\eta$  com o altímetro e inferir correntes geostróficas superficiais absolutas exceto perto do equador.

# Velocidade de Ekman

Com o termo viscoso no lugar do gradiente de pressão

$$-fv = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad fu = \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

Com condições de contorno:

- $\nu \rho_0 \frac{du}{dz} = \tau$  em  $z = 0$  ( $\vec{\tau} = (\tau_x, 0)$ )
- $\frac{dv}{dz} = 0$  em  $z = 0$
- $u, v \rightarrow 0$  em  $z \rightarrow \infty$

A solução é do tipo:

$$\vec{v} = u + iv = Ae^{(1+i)\frac{z}{\delta}} + Be^{-(1+i)\frac{z}{\delta}}$$

com

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{f}}$$

- Onde  $\delta$  é a profundidade da camada de Ekman  $O[30 \text{ m}]$ .

# Velocidade de Ekman

Das condições de contorno:  $B = 0$  e  $A = \frac{\tau\delta(1-i)}{2\rho\nu}$

$$v = \frac{\tau}{\rho_0\sqrt{f\nu}} e^{\frac{z}{\delta}} \cos\left(-\frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \Rightarrow \int v dz = -\frac{\tau}{\rho f}$$

$$u = \frac{\tau}{\rho_0\sqrt{f\nu}} e^{\frac{z}{\delta}} \sin\left(-\frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \Rightarrow \int u dz = 0$$

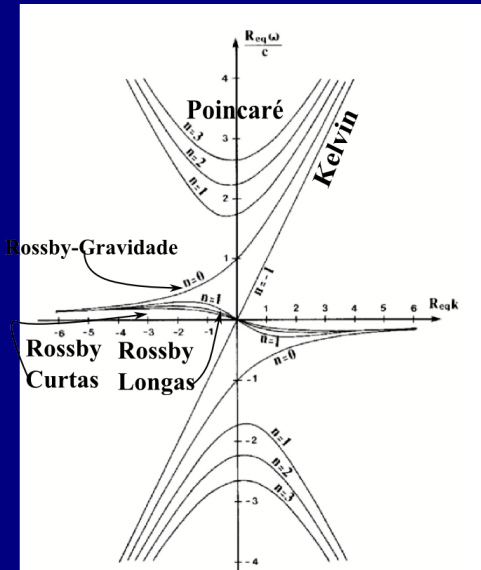
Portanto:

- A velocidade na superfície é a  $45^\circ$  do vento.
- Ela decai exponencialmente com  $z$  com escala vertical  $\delta$ .
- O transporte integrado é a  $90^\circ$  do vento.
- Podemos medir vento com escaterômetro e calcular  $\vec{v}$  exceto perto do equador pois  $f \rightarrow 0$ .

# Perto do Equador

- $f \rightarrow 0$  causa uma singularidade nas equações das velocidades geostrófica e de Ekman, apreciável a  $2\text{--}3^\circ$  do equador.
- 
- Para resolver o problema sobre o equador várias estratégias podem ser utilizadas.
  - A que apresenta melhores resultados (Lagerloef et al. JGR 1999) é a adoção de um plano  $\beta$  equatorial.
  - Um dos resultados mais interessantes é a formação do **guia de onda equatorial**.
  - Nesse guia ou canal propagam-se ondas de Rossby, Poincaré, Rossby-gravidade e Kelvin.
  - As duas primeiras são decompostas em modos **meridionais**.

# Regimes Dinâmicos Relação de Dispersão



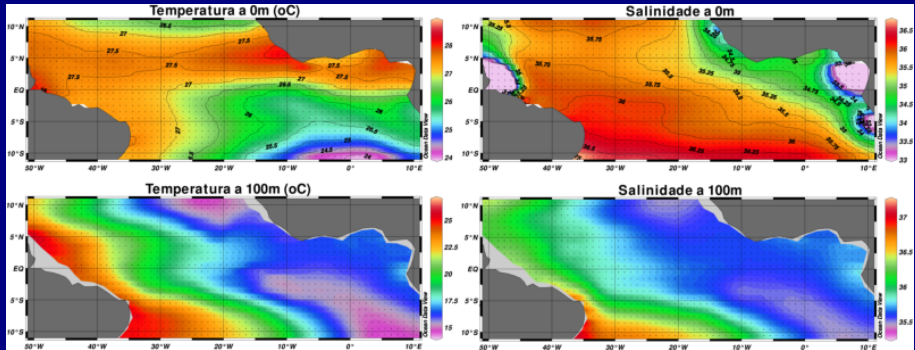
- $c_p = \frac{\omega}{k}$      $c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$
- Ondas de Poincaré (gravidade) tem  $\omega$  alta.
- ...de Kelvin se propagam para Leste.
- ...de Rossby– gravidade são assintóticas.
- ...de Rossby (efeito  $\beta$ ) se propagam para oeste.
- ...de Rossby longas tem  $\omega$  muito baixa.



# Roteiro

- 1 O Problema do  $f \rightarrow 0$ 
  - Geostrofia
  - Ageostrofia
  - Relação de Dispersão
- 2 Caracterização da Região
  - Hidrografia
  - Seções com Velocidades Absolutas ADCP
- 3 Aplicações Usando Satélites
  - Medidas Operacionais de Correntes
  - Componentes do Sinal da Altura
  - Estudos Multi-Sensor
- 4 Um Exemplo Concreto
  - Blooms de Fitoplâncton no Pacífico
  - O que Acontece no Oeste?
  - Resultados
  - Considerações Finais

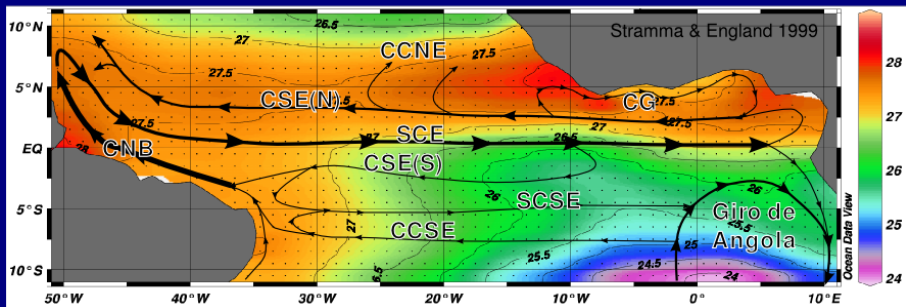
# Mapa Climatológico, T e S no Atlântico



As escalas de cores de T e S são diferentes a 0 e 100m.

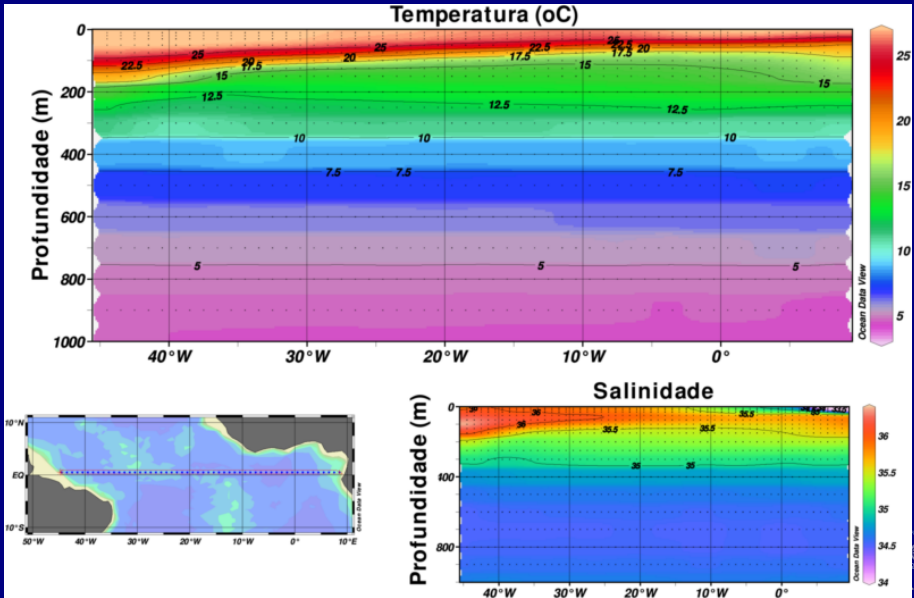
- A superfície é quente e salina, muda bastante a 100m.
- Ressurgência equatorial e ZCIT influenciam T (assimetria).
- Mínimos de salinidade  $\rightsquigarrow$  rios Congo e Amazonas.

# Correntes Médias e T no Atlântico

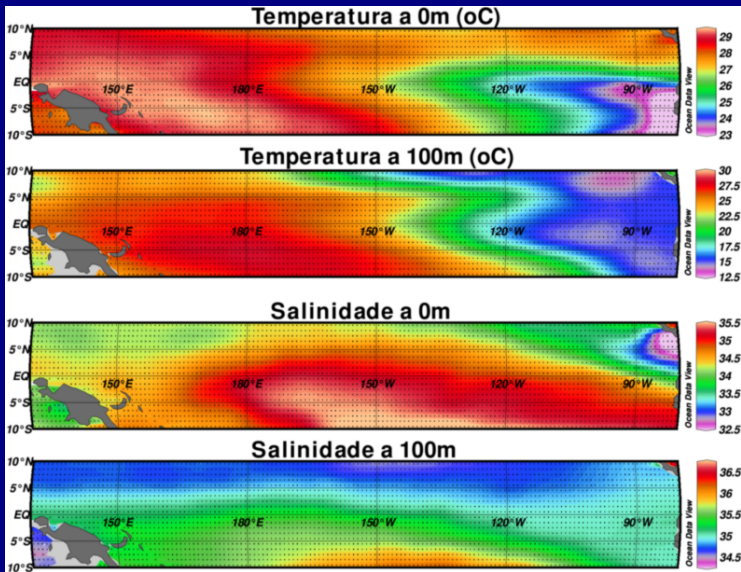


- Correntes mais fortes: SCE e CNB.
- Correntes em sentidos opostas são comuns.
- Isto implica em cisalhamento intenso ...
- Que, por sua vez, resulta em instabilidades.

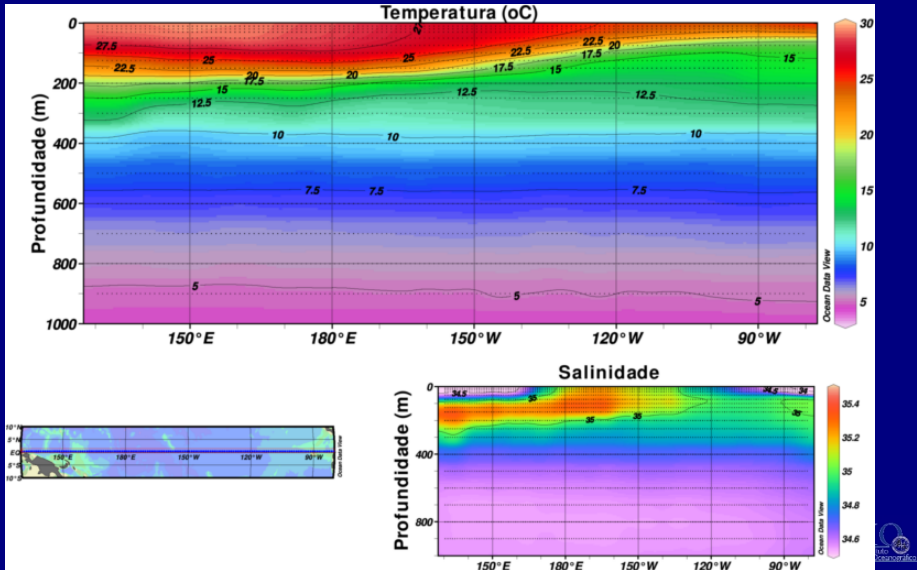
# Seção Climatológica, T e S no Atlântico



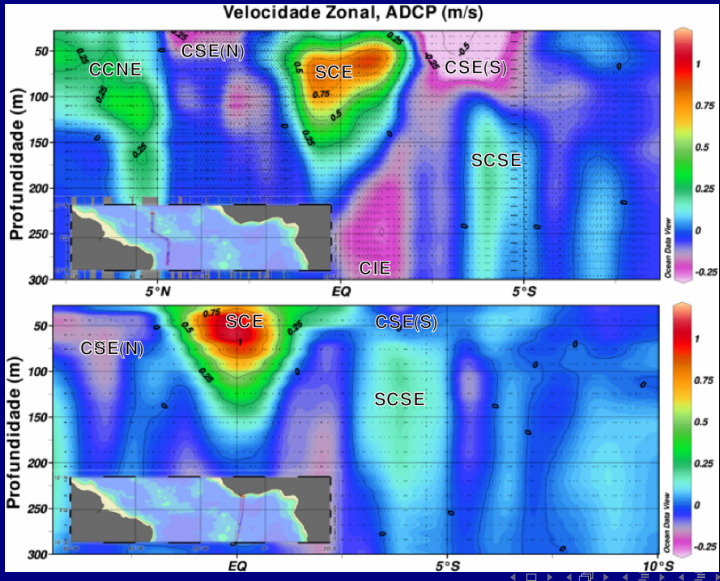
# Mapa Climatológico, T e S no Pacífico



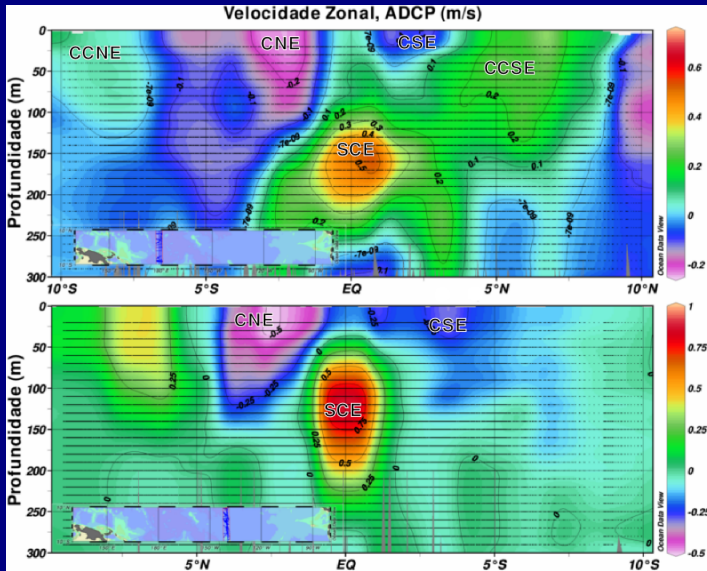
# Seção Climatológica, T e S no Pacífico



# Velocidades Absolutas no Atlântico

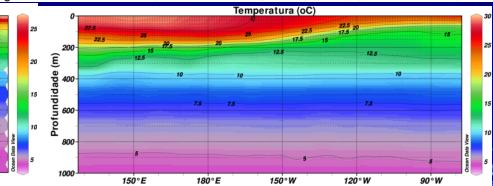
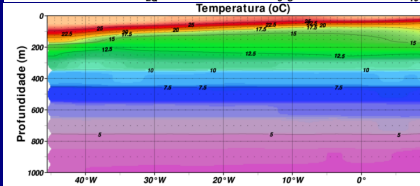
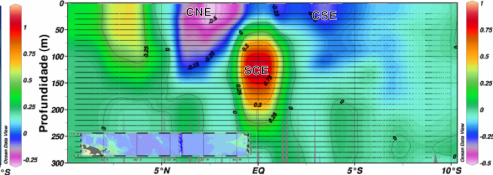
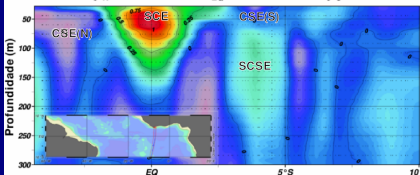
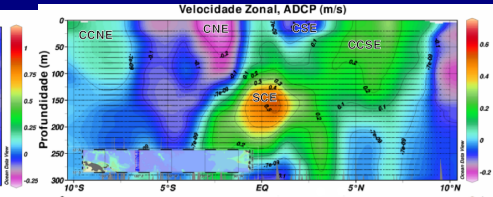
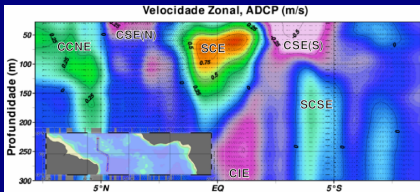


# Velocidades Absolutas no Pacífico





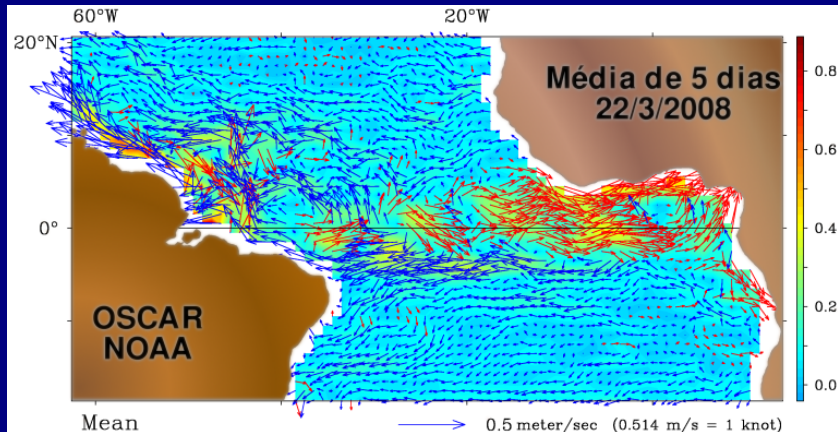
# Pensando em 3D



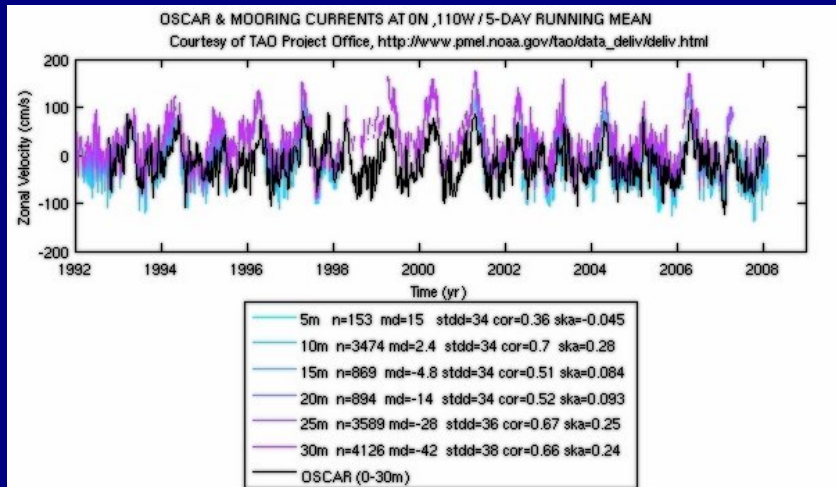
# Roteiro

- 1 O Problema do  $f \rightarrow 0$ 
  - Geostrofia
  - Ageostrofia
  - Relação de Dispersão
- 2 Caracterização da Região
  - Hidrografia
  - Seções com Velocidades Absolutas ADCP
- 3 Aplicações Usando Satélites
  - Medidas Operacionais de Correntes
  - Componentes do Sinal da Altura
  - Estudos Multi-Sensor
- 4 Um Exemplo Concreto
  - Blooms de Fitoplâncton no Pacífico
  - O que Acontece no Oeste?
  - Resultados
  - Considerações Finais

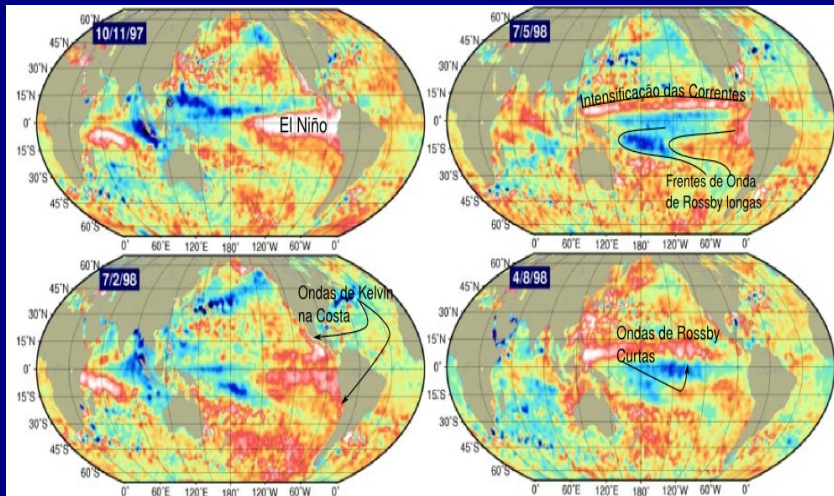
# Projeto OSCAR/NOAA (Lagerloef et al.)



# Plano $\beta$ Equatorial dá Certo?

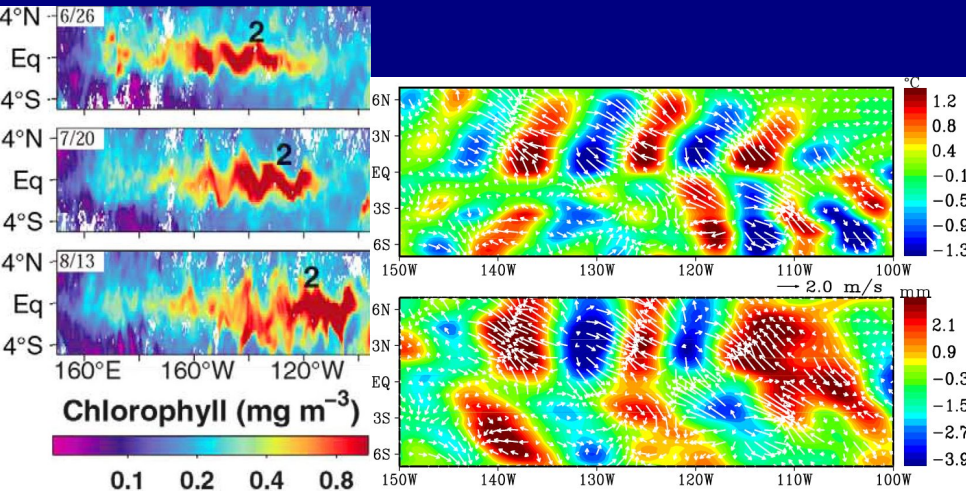


# Anomalia da Altura, ENSO e Ondas



A escala de cores vai de -70 cm a +70 cm

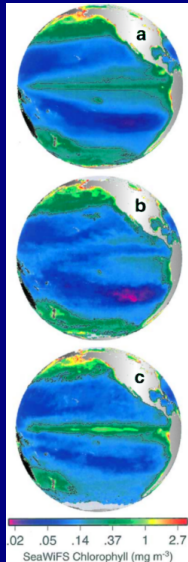
# OITs influenciam Clorofila, TSM, Vapor e Vento



# Roteiro

- 1 O Problema do  $f \rightarrow 0$ 
  - Geostrofia
  - Ageostrofia
  - Relação de Dispersão
- 2 Caracterização da Região
  - Hidrografia
  - Seções com Velocidades Absolutas ADCP
- 3 Aplicações Usando Satélites
  - Medidas Operacionais de Correntes
  - Componentes do Sinal da Altura
  - Estudos Multi-Sensor
- 4 Um Exemplo Concreto
  - Blooms de Fitoplâncton no Pacífico
  - O que Acontece no Oeste?
  - Resultados
  - Considerações Finais

# El Niño, La Niña e o Pacífico Equatorial



- No Pacífico Equatorial ocorrem intensas variações inter- anuais de:
  - Temperatura e Salinidade,
  - Vento e Precipitação,
  - a **Concentração de Clorofila e Nutrientes.**
  
- b **El Niño:** alísios cessam, aquece-se costa Latino Americana e há redução da atividade biológica.
  
- c **La Niña:** alísios intensificam, resfria-se a costa Latino Americana e há aumento da atividade biológica.

Picaut et al., 1996; Yu e McPhaden, 1999; Delcroix et al., 2000; Barber e Chavez, 1983, 1986; Fiedler et al., 1991; Chavez et al., 1998, 1999; Strutton e Chavez, 2000; Murakami et al., 2000; McPhaden, 1999; Martin et al., 1990.



# A Origem dos Nutrientes

- Neste estudo abordamos blooms de 1998, 2003 e 2005 que sucederam El Niños.
- Ferro é o nutriente limitante no Pacífico equatorial. Sua origem primária é a New Guinea Coastal Under-Current (NGCUC).
- O Ferro, neste caso, é de origem litogênica (Coale et al., 1996; Gordon et al., 1997).
- Apesar de pequena, a Nova Guiné despeja 10% do total global de sedimentos, metade ( $860 \times 10^{12}$  kg/ano) na costa norte (Milliman et al., 1999; Sholkovitz et al., 1999).

# A Origem dos Nutrientes

- Neste estudo abordamos blooms de 1998, 2003 e 2005 que sucederam El Niños.
- Ferro é o nutriente limitante no Pacífico equatorial. Sua origem primária é a New Guinea Coastal Under-Current (NGCUC).
- O Ferro, neste caso, é de origem litogênica (Coale et al., 1996; Gordon et al., 1997).
- Apesar de pequena, a Nova Guiné despeja 10% do total global de sedimentos, metade ( $860 \times 10^{12}$  kg/ano) na costa norte (Milliman et al., 1999; Sholkovitz et al., 1999).

# A Origem dos Nutrientes

- Neste estudo abordamos blooms de 1998, 2003 e 2005 que sucederam El Niños.
- Ferro é o nutriente limitante no Pacífico equatorial. Sua origem primária é a New Guinea Coastal Under-Current (NGCUC).
- O Ferro, neste caso, é de origem litogênica (Coale et al., 1996; Gordon et al., 1997).
- Apesar de pequena, a Nova Guiné despeja 10% do total global de sedimentos, metade ( $860 \times 10^{12}$  kg/ano) na costa norte (Milliman et al., 1999; Sholkovitz et al., 1999).

# A Origem dos Nutrientes

- Neste estudo abordamos blooms de 1998, 2003 e 2005 que sucederam El Niños.
- Ferro é o nutriente limitante no Pacífico equatorial. Sua origem primária é a New Guinea Coastal Under-Current (NGCUC).
- O Ferro, neste caso, é de origem litogênica (Coale et al., 1996; Gordon et al., 1997).
- Apesar de pequena, a Nova Guiné despeja 10% do total global de sedimentos, metade ( $860 \times 10^{12}$  kg/ano) na costa norte (Milliman et al., 1999; Sholkovitz et al., 1999).

# Sobre o Ferro de Nova Guiné

- **O total de Ferro lábil na NGCUC aumenta conforme ela flui sobre a plataforma** (Mackey et al., 2002).
- As concentrações aumentam durante períodos de seca intensa causada pelo El Niño.
- Concentrações elevadas de Ferro são observadas a 100-150 m, a 50 km da costa. O máximo de turbidez é observado na quebra de plataforma, a 150 km do rio mais próximo.
- Portanto é razoável supor que a entrada do Ferro na NGCUC se dá por ressuspensão de sedimentos trazidos pelos rios.
- A concentração de Ferro varia muito, dependendo do El Niño (Ueki et al., 2003).

# Sobre o Ferro de Nova Guiné

- O total de Ferro lábil na NGCUC aumenta conforme ela flui sobre a plataforma (Mackey et al., 2002).
- As concentrações aumentam durante períodos de seca intensa causada pelo El Niño.
- Concentrações elevadas de Ferro são observadas a 100-150 m, a 50 km da costa. O máximo de turbidez é observado na quebra de plataforma, a 150 km do rio mais próximo.
- Portanto é razoável supor que a entrada do Ferro na NGCUC se dá por ressuspensão de sedimentos trazidos pelos rios.
- A concentração de Ferro varia muito, dependendo do El Niño (Ueki et al., 2003).

# Sobre o Ferro de Nova Guiné

- O total de Ferro lábil na NGCUC aumenta conforme ela flui sobre a plataforma (Mackey et al., 2002).
- As concentrações aumentam durante períodos de seca intensa causada pelo El Niño.
- Concentrações elevadas de Ferro são observadas a 100-150 m, a 50 km da costa. O máximo de turbidez é observado na quebra de plataforma, a 150 km do rio mais próximo.
- Portanto é razoável supor que a entrada do Ferro na NGCUC se dá por ressuspensão de sedimentos trazidos pelos rios.
- A concentração de Ferro varia muito, dependendo do El Niño (Ueki et al., 2003).

# Sobre o Ferro de Nova Guiné

- O total de Ferro lábil na NGCUC aumenta conforme ela flui sobre a plataforma (Mackey et al., 2002).
- As concentrações aumentam durante períodos de seca intensa causada pelo El Niño.
- Concentrações elevadas de Ferro são observadas a 100-150 m, a 50 km da costa. O máximo de turbidez é observado na quebra de plataforma, a 150 km do rio mais próximo.
- Portanto é razoável supor que a entrada do Ferro na NGCUC se dá por ressuspensão de sedimentos trazidos pelos rios.
- A concentração de Ferro varia muito, dependendo do El Niño (Ueki et al., 2003).



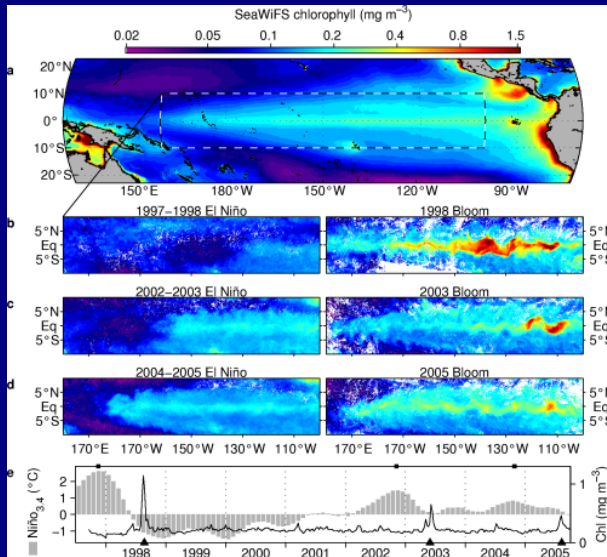
# Sobre o Ferro de Nova Guiné

- O total de Ferro lábil na NGCUC aumenta conforme ela flui sobre a plataforma (Mackey et al., 2002).
- As concentrações aumentam durante períodos de seca intensa causada pelo El Niño.
- Concentrações elevadas de Ferro são observadas a 100-150 m, a 50 km da costa. O máximo de turbidez é observado na quebra de plataforma, a 150 km do rio mais próximo.
- Portanto é razoável supor que a entrada do Ferro na NGCUC se dá por ressuspensão de sedimentos trazidos pelos rios.
- A concentração de Ferro varia muito, dependendo do El Niño (Ueki et al., 2003).

# Usamos Dados de Vários Sensores

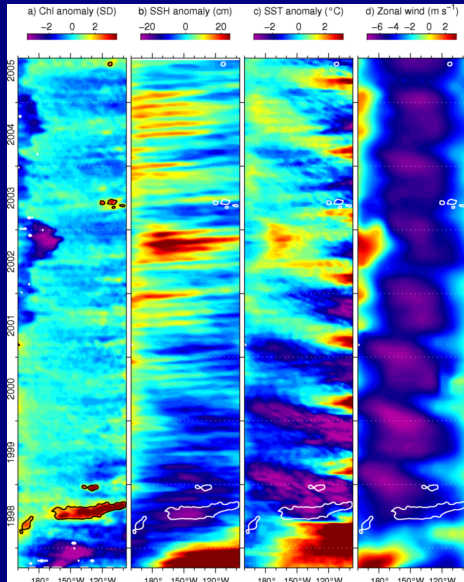
- Usamos Niño 3.4 = TSM média entre 5°S e 5°N, 120°W e 170°W.
- A concentração de clorofila foi obtida do satélite **SeaWiFS**.
- Ventos, correntes e temperaturas in-situ obtidos das bóias TAO.
- A TSM foi obtida da reanálise de Reynolds e Smith (RSV2) que inclui dados de radiômetros I-V.
- Dados altimétricos vem dos satélites **TOPEX/Jason**.
- Dados de vento do **QUIKScat** foram analisados.
- Dados de ADCP de cruzeiros e de bóias foram utilizados no estudo das variações da NGCUC.
- O ROMS com 12.5 km de resolução e 15 camadas foi forçado de 1992 a 2004 com fluxos de reanálise do NCEP.

# Três Blooms Anômalos: 1998, 2003 e 2005



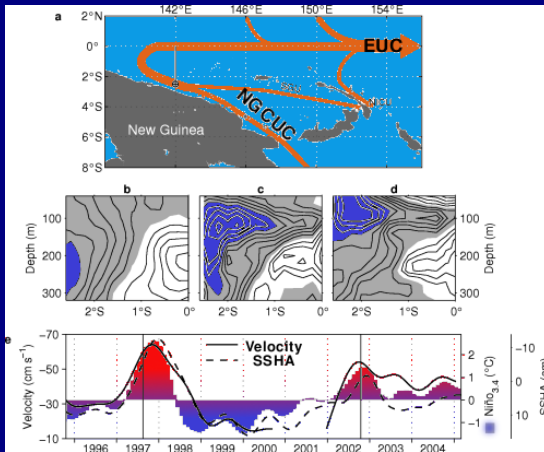
- Os três blooms sucedem El Niños.
- Intensidades decrescem nos três eventos.
- A clorofila é a média entre 2°S e 2°N, 110°W e 115°W.

# Física Local $\Rightarrow$ Floração Massiva ?



- a  $2\sigma$  acima de  $\log([Chl])$  médio define bloom.
- b Há coincidência com  $\eta$  em 1998 e 2005, mas 2003...
- c  $\eta$  e TSM estão fora de fase no bloom de 2003.
- d Os ventos zonais não são anômalos.

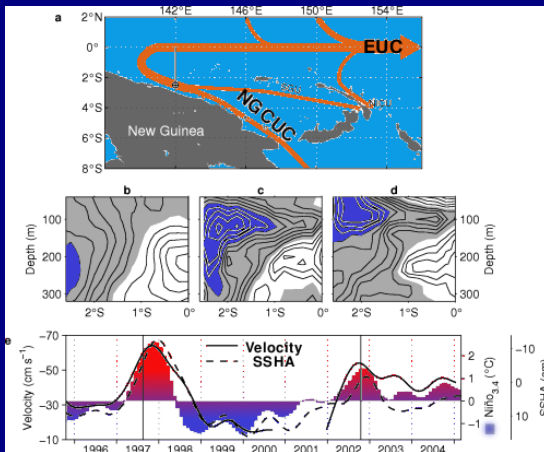
# A Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC)



**b** Na média de verão, núcleo a 200-300 m, 50-60 cm/s.

**c-e** O El Niño alarga e eleva o núcleo a 100-150 m, que sobe a plataforma a ~100 cm/s, causando ressuspensão por turbulência.

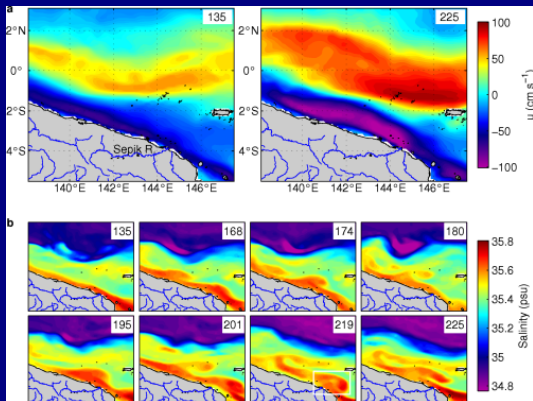
# A Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC)



b Na média de verão, núcleo a 200-300 m, 50-60 cm/s.

c-e O El Niño alarga e eleva o núcleo a 100-150 m, que sobe a plataforma a ~100 cm/s, causando ressuspensão por turbulência.

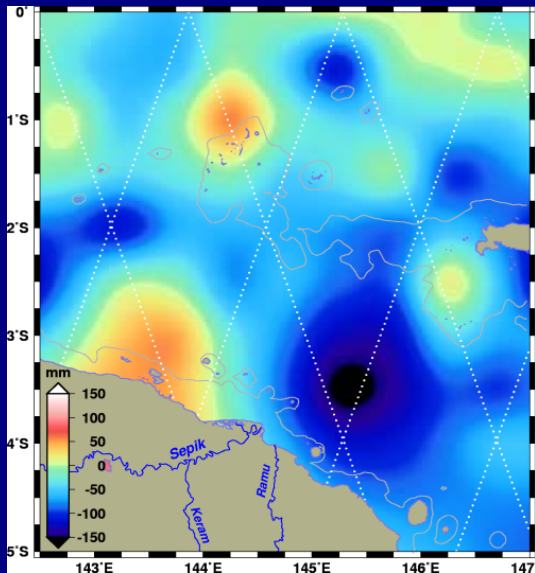
# Modelagem da NGCUC



a A velocidade a 150 m mostra a intensificação da NGCUC durante o El Niño, sobre a plataforma na foz do Rio Sepik.

b A seqüência mostra a injeção de sal na EUC via meandros, vórtices e filamentos que saem da porção costeira da NGCUC.

# Observações × Modelagem



- Durante a intensificação da NGCUC em 2002 o Topex registrou a presença de um vórtice perto de  $145.3^{\circ}\text{E}$ ,  $3.3^{\circ}\text{S}$ .
- O intervalo entre duas passagens sobre o vórtice é de 12 h.



# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Em suma:

- A série temporal ainda é insuficiente para conclusões definitivas.
- Ondas de Rossby e Kelvin elevam a termoclina, nutriclina e EUC .
- A termoclina rasa favorece, mas não determina completamente a ocorrência de florações massivas.
- A advecção de Ferro pela EUC depende de sua injeção via Sub-Corrente Costeira da Nova Guiné (NGCUC).
- Na NGCUC durante El Niños ocorre ressuspensão turbulenta, causada pela intensificação da corrente, deslocamento sobre a plataforma, meandramento e formação de vórtices.
- Os blooms ocorrem após o El Niño e são proporcionais à sua intensidade. O atraso é consistente com a velocidade da EUC.

# Obrigado!

