

Coleta e análise de dados físicos em estuários

Medições fundamentais: S, T, P, nível, correntes, vento,

Medições em estuários

- Planejamento

- Medições espaciais – escalas? Resultados?

- Medições temporais – escalas? Maré, vento, descarga fluvial

$$\Delta_{tm} = \frac{\Psi^2}{2B_e \varepsilon^2 u_m^2}$$

$$\Psi = 2 \times 10^{-2} U$$

B_e – largura da banda espectral das flutuações do vento > 0,03 cph

U – velocidade do vento em cm/s

erro tolerado – desvio médio

ε – quadrático/valor médio

u_m – velocidade média da corrente

Medições em estuários

- Planejamento – hipótese, qual o problema?
- Trabalho de campo – medições com cobertura espacial; séries temporais
- Controle e qualidade dos dados na medição
- Tratamento dos dados
- Análise
- Relatório

O que medir? Como medir

- Espaço e tempo: ideal, real
 - Relações
 - Custos - limitações
- Propriedades básicas:
 - Batimetria/morfologia – informações básicas
 - Salinidade - perfis
 - Descarga fluvial
 - Nível
 - Tempo de residência

Medições em estuários: coleta de dados, representação

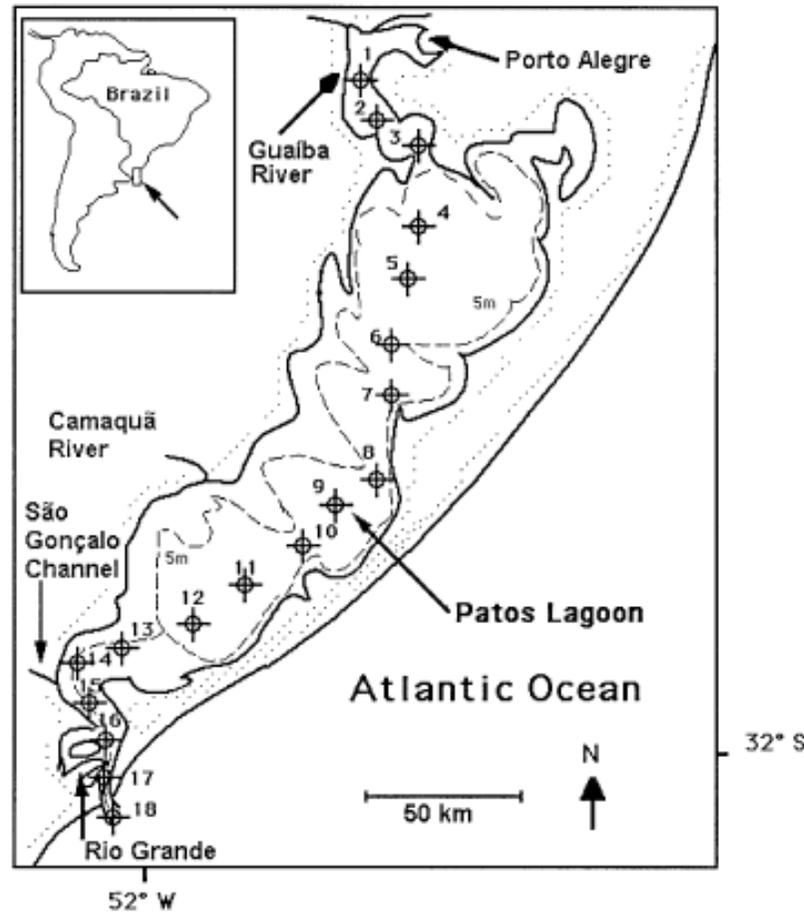
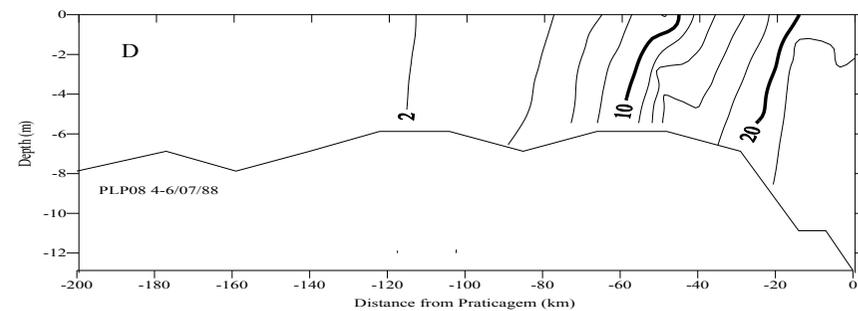
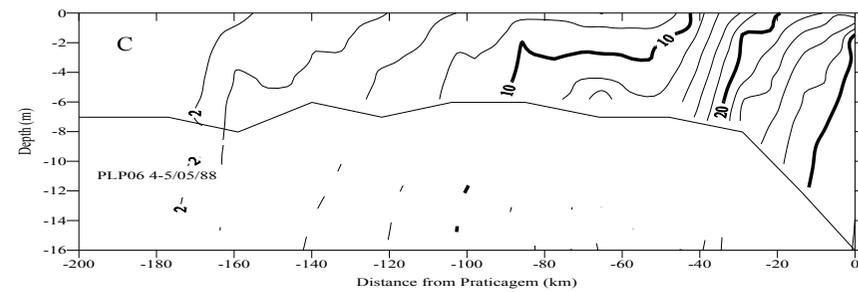
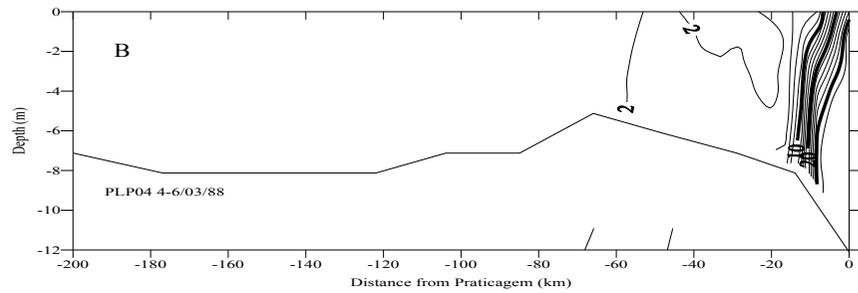
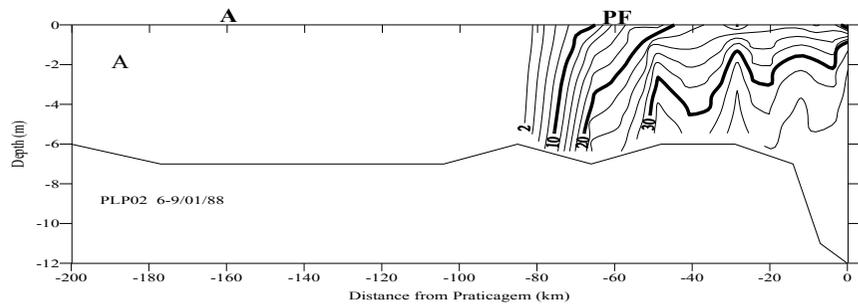
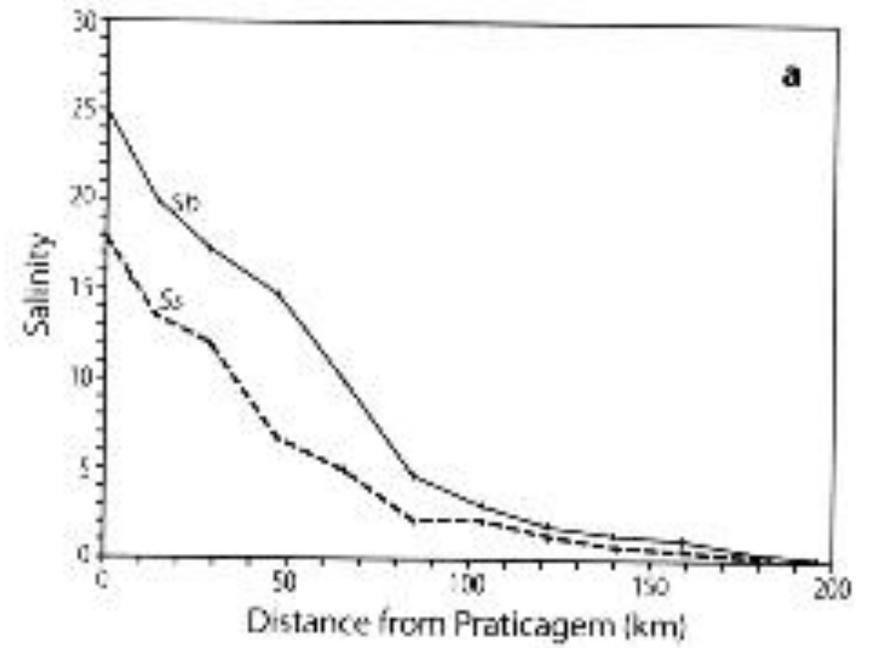
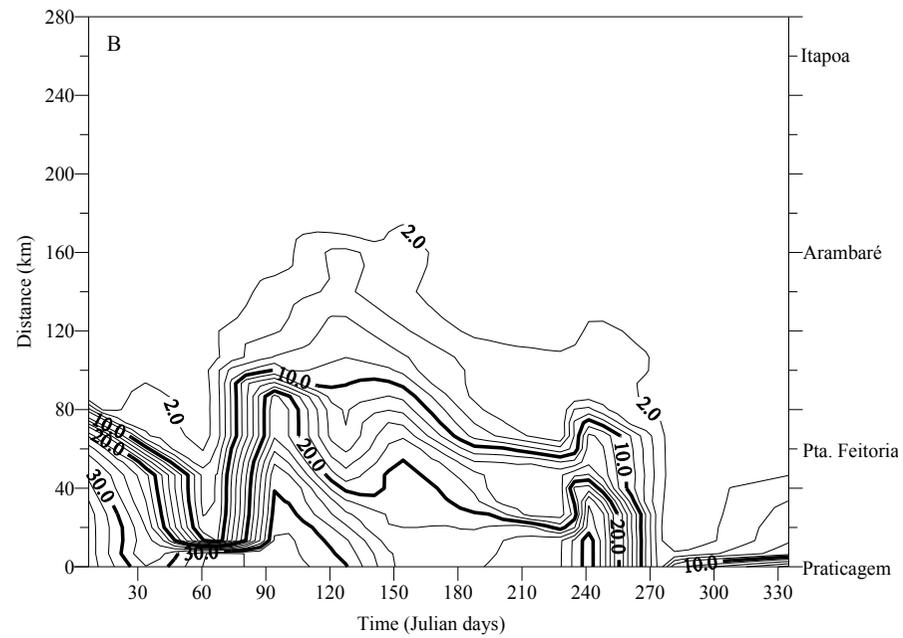
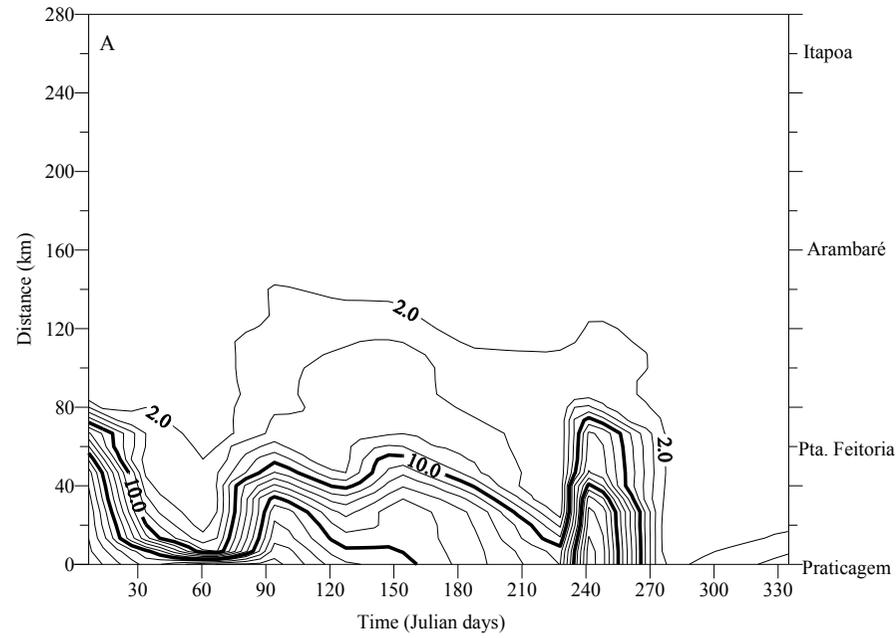


Fig. 1. Sampling stations along the main axis of Patos Lagoon, southern Brazil.

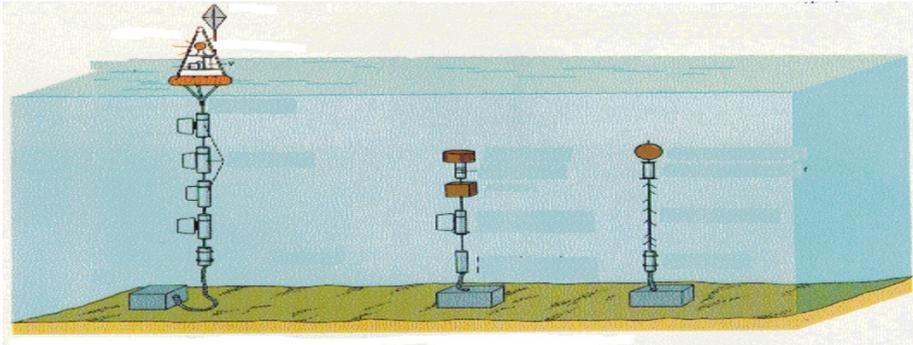




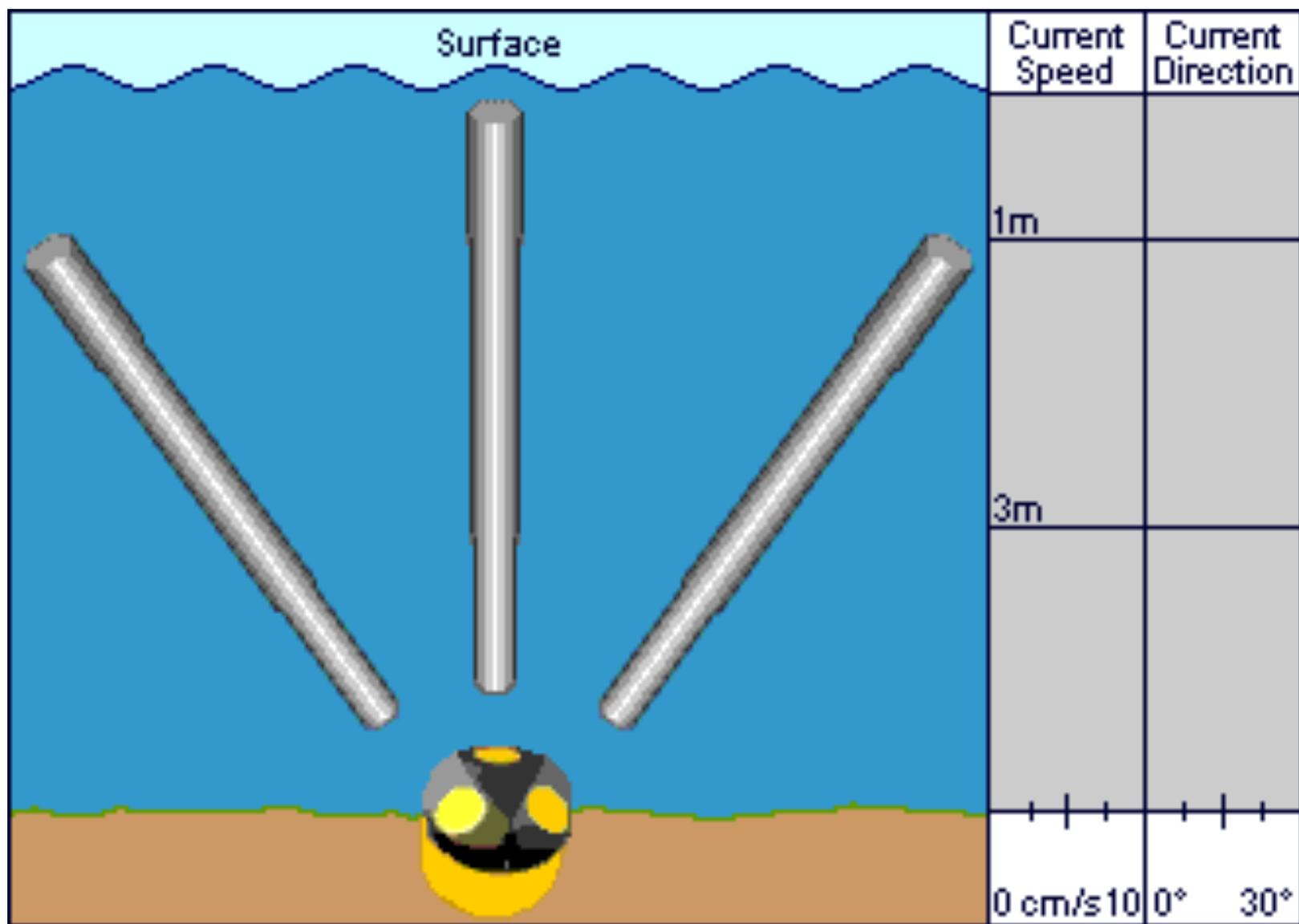
Möller e Castaing, 1999

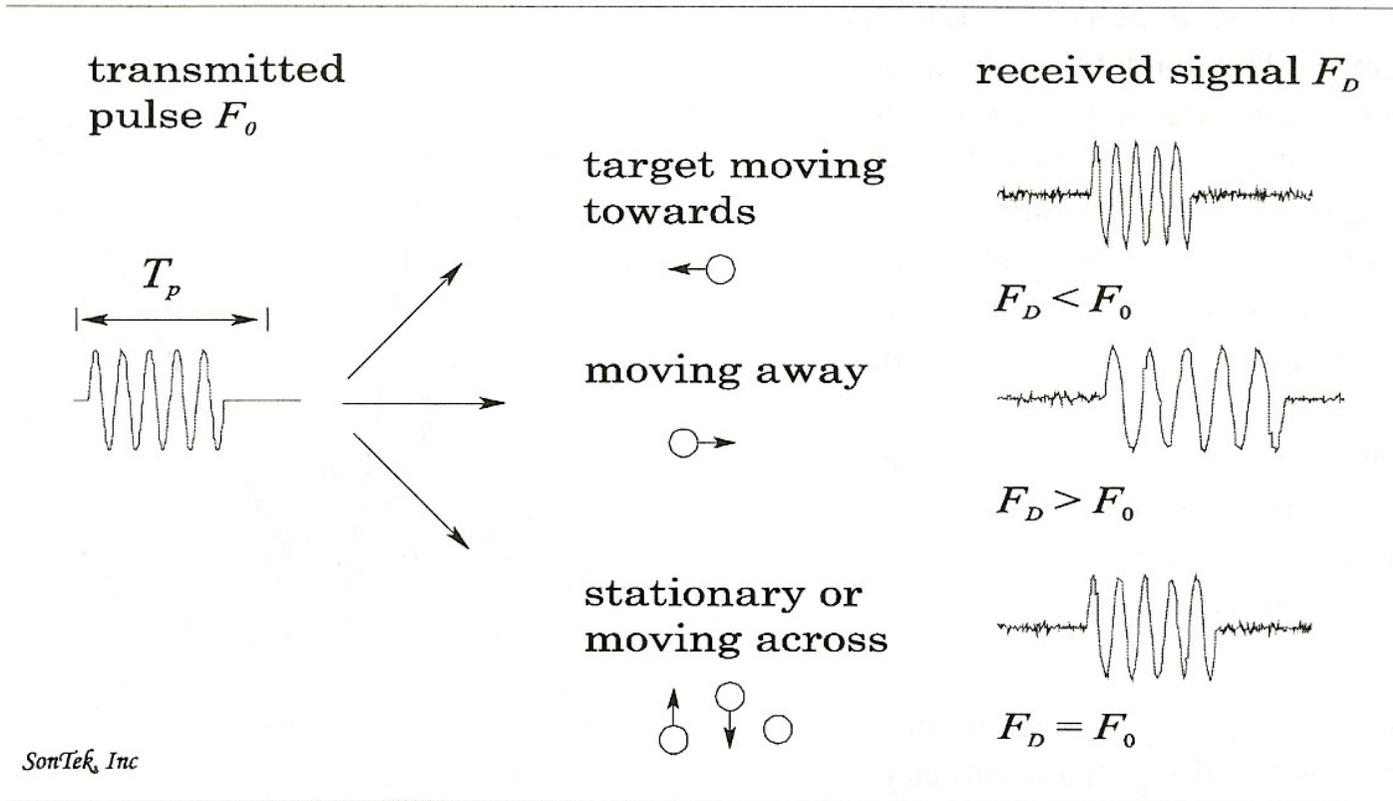
Medições em Estuários

Medição de Correntes









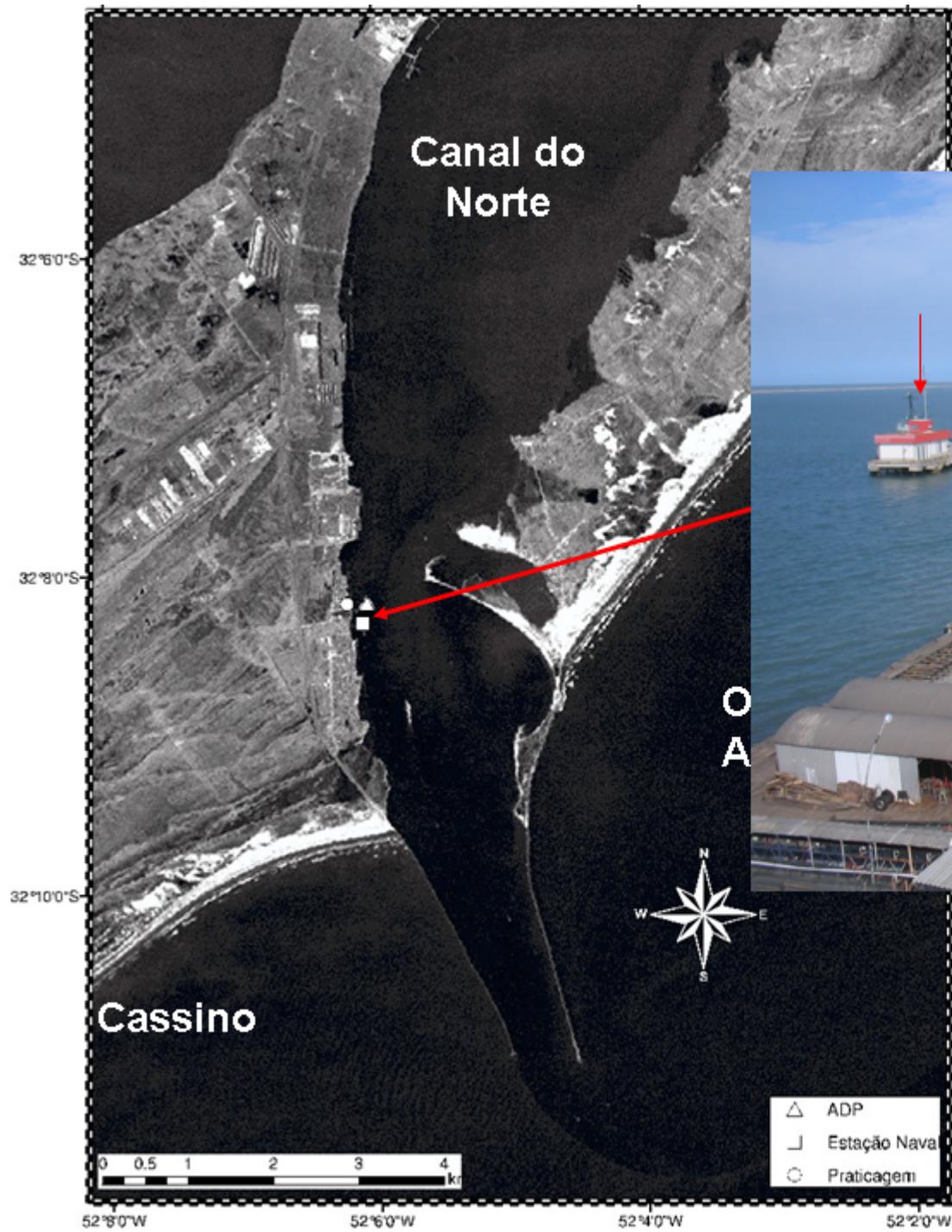
$$F_D = -2 F_S (V / c)$$

V - velocidade relativa entre fonte e alvo

C – velocidade de propagação do som

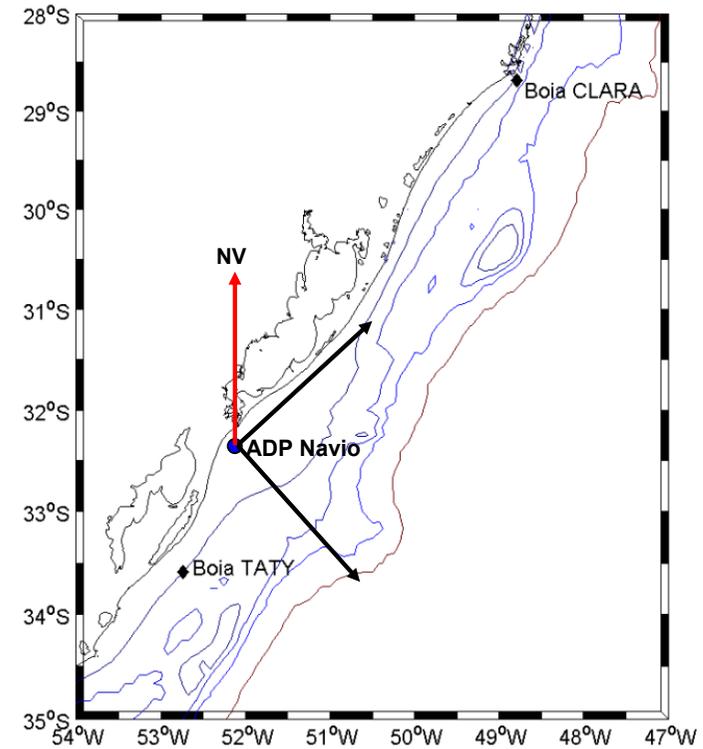
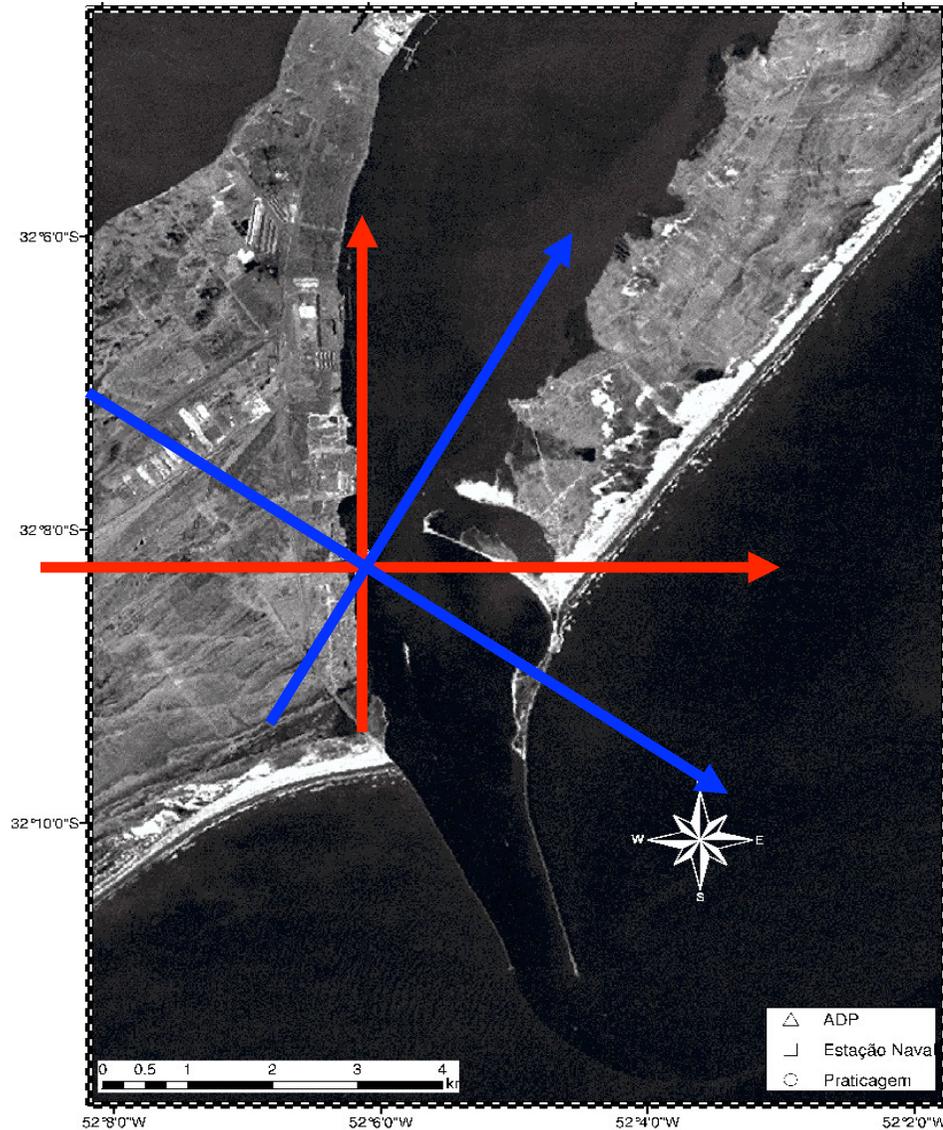
F_S – freqüência de transmissão do som

F_D – mudança na freqüência de transmissão (Efeito Doppler)



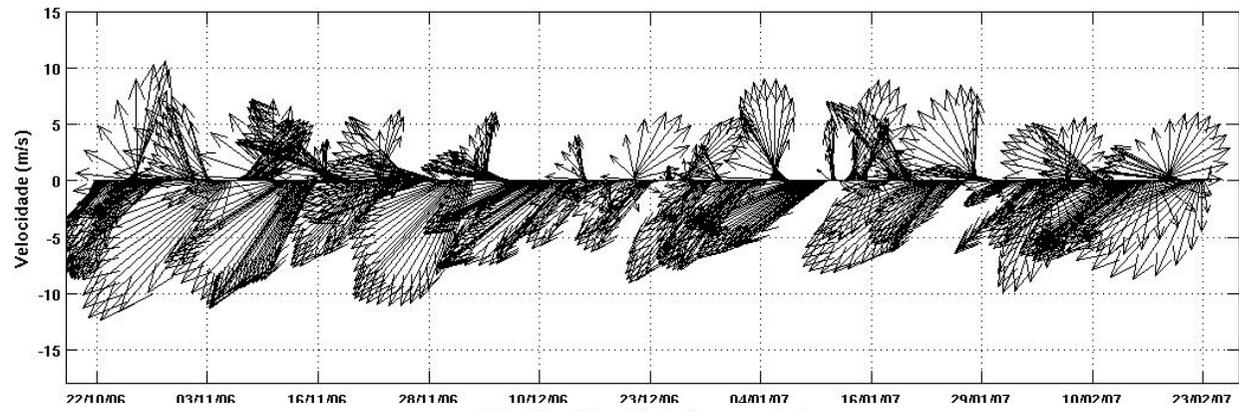
Análises

- Decomposição da corrente e do vento em componentes

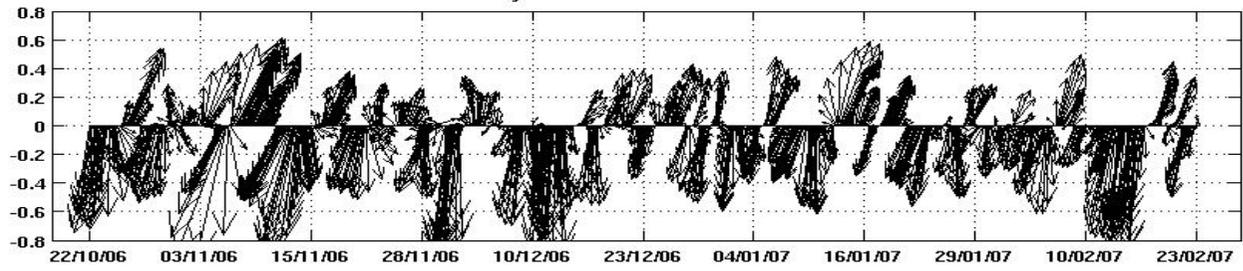


Medição de grandezas vetoriais

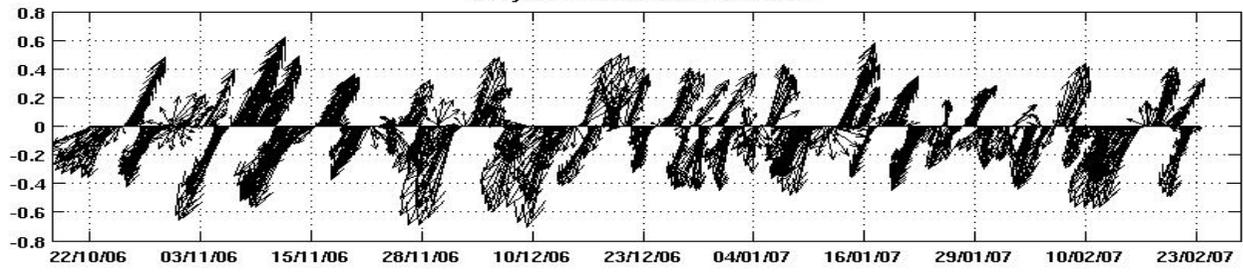
- Círculo trigonométrico
 - $x \rightarrow u = V \cos \theta$
 - $y \rightarrow v = V \sin \theta$
- Rosa dos Ventos – Correntômetro (dd)/anemômetro
 - $\theta = 90 - dd$ - $\theta_a = 270 - dd$
 - Declinação magnética D – $d = 90 - (dd \pm D)$
 - $D+$ declinação para leste - horária
 - $D-$ declinação para oeste – anti-horária
- Rotação do referencial
 - $d = 90 - (dd \pm D) \pm \gamma$
 - $\gamma +$ rotação - horária
 - $\gamma -$ rotação – anti-horária



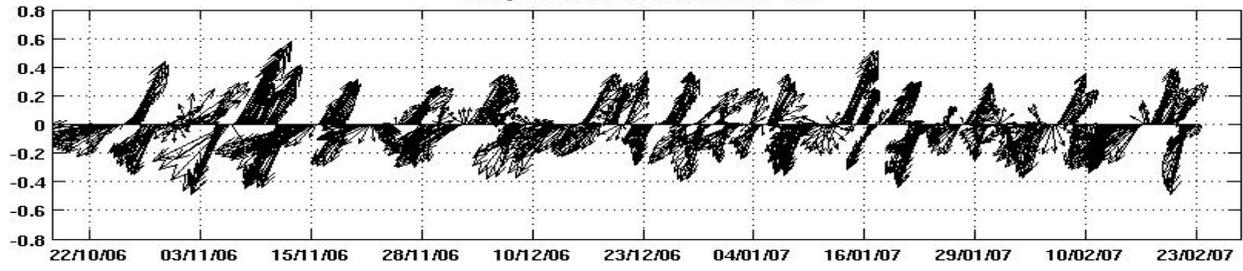
Direção e intensidade de corrente 3m



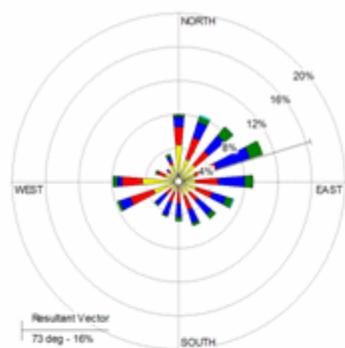
Direção e intensidade de corrente 8m



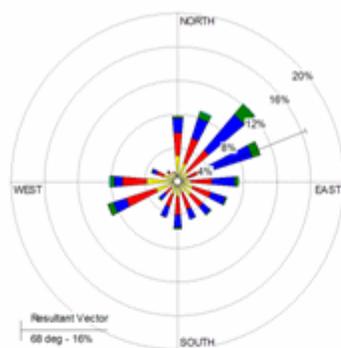
Direção e intensidade de corrente 12m



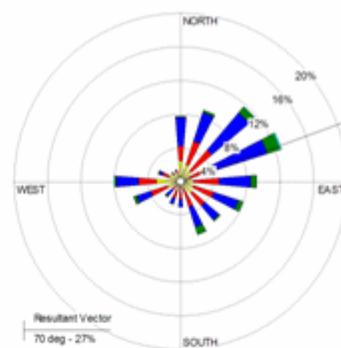
Rosa de ventos



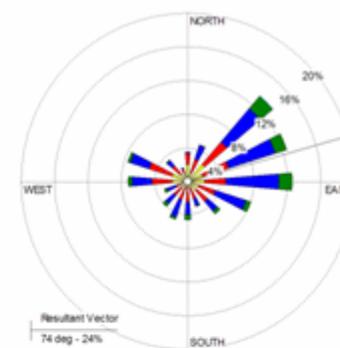
1998



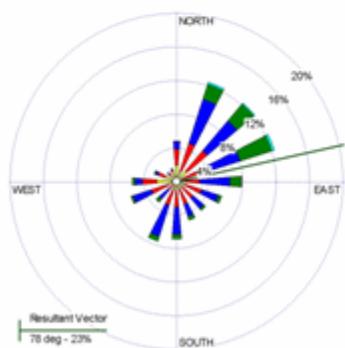
1999



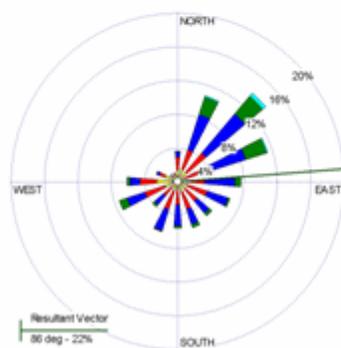
2000



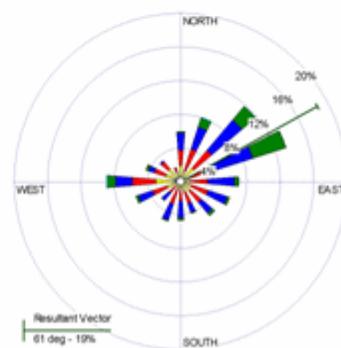
2001



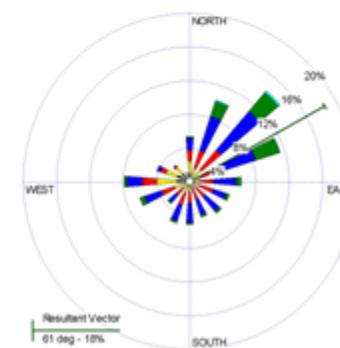
2005



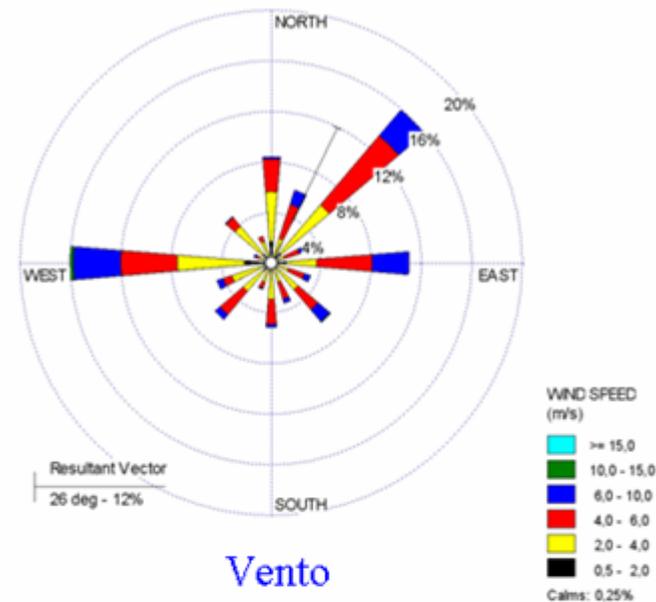
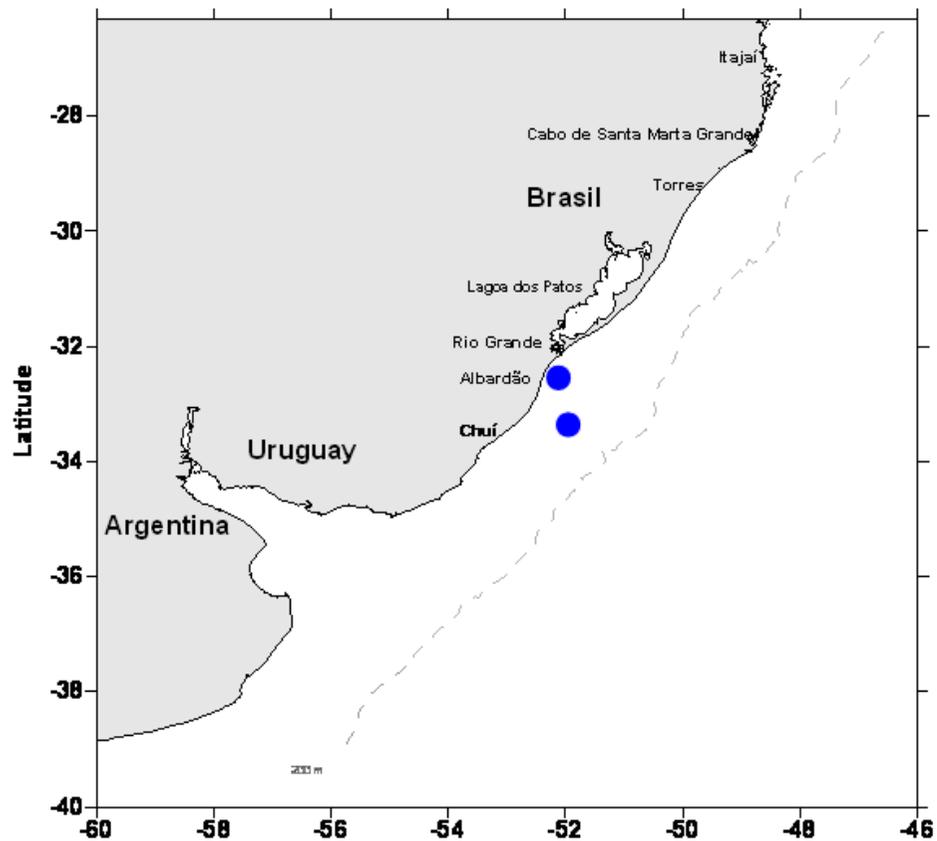
2006



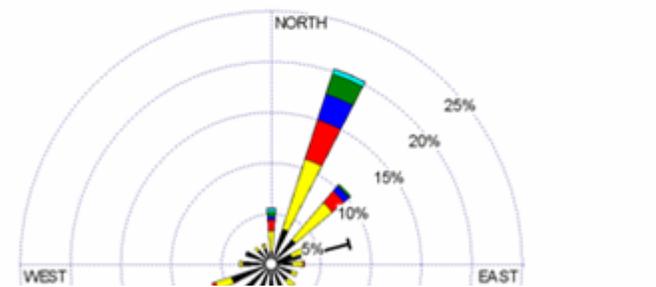
2007



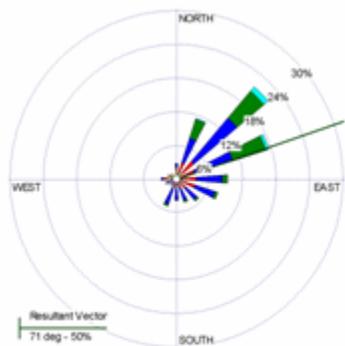
2008



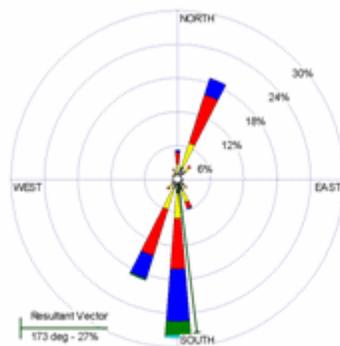
Vento



Corrente 3m



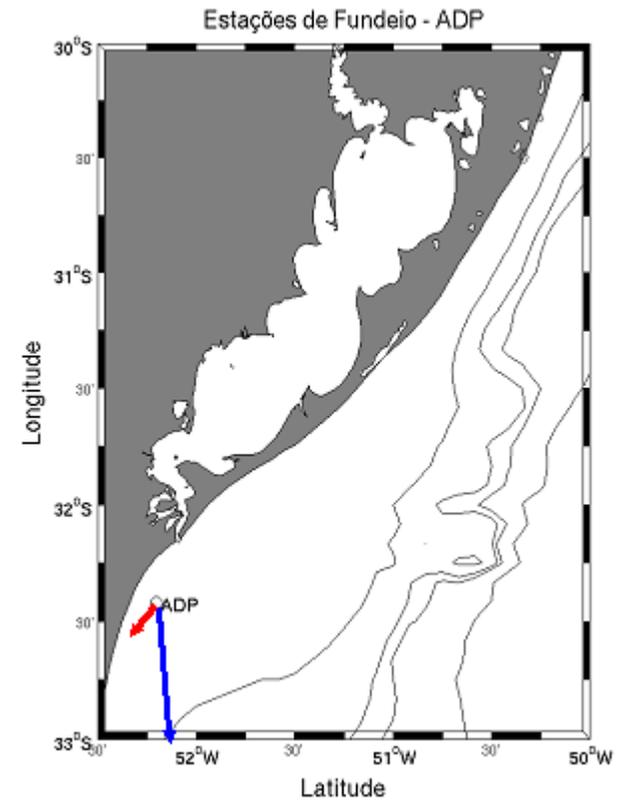
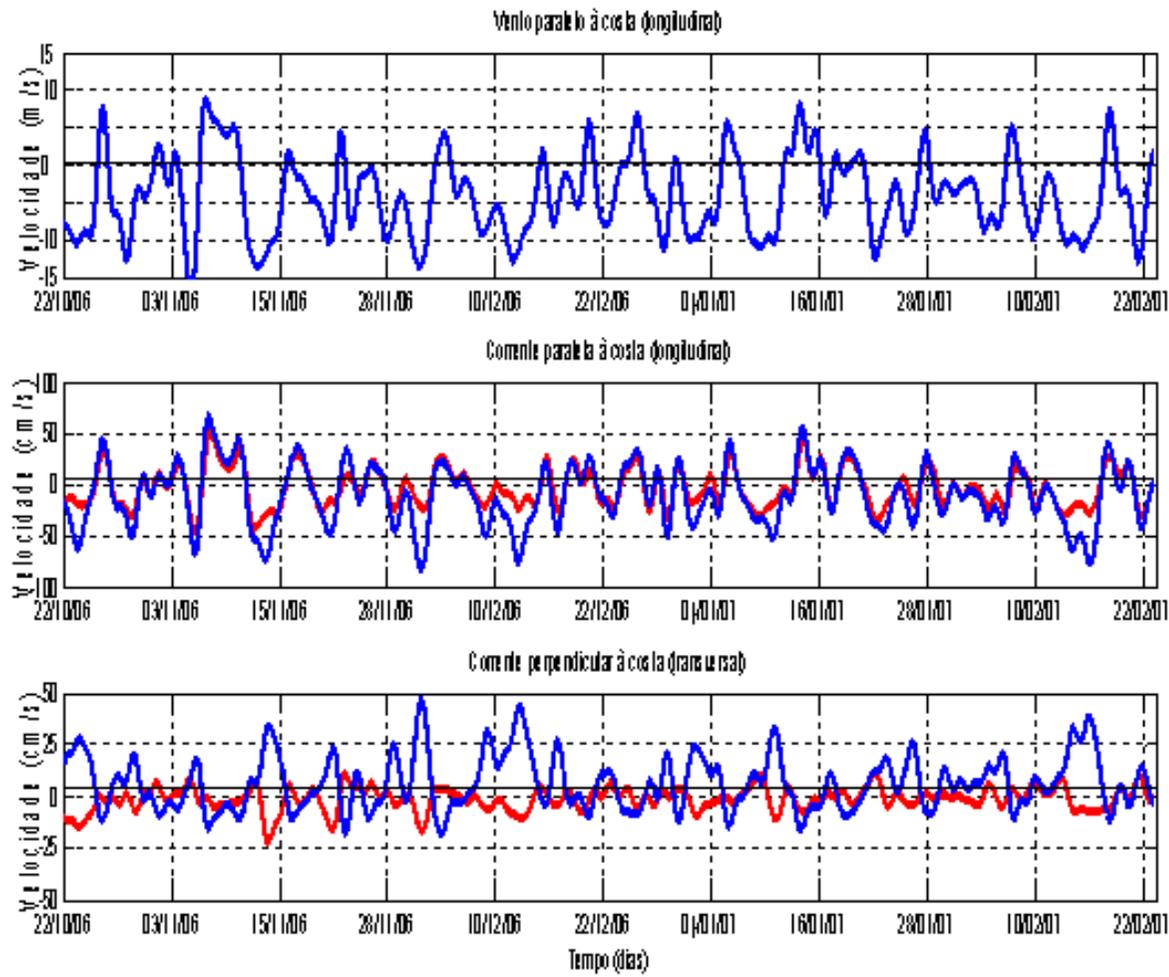
Corrente 8 m



Corrente 12 m

Vento

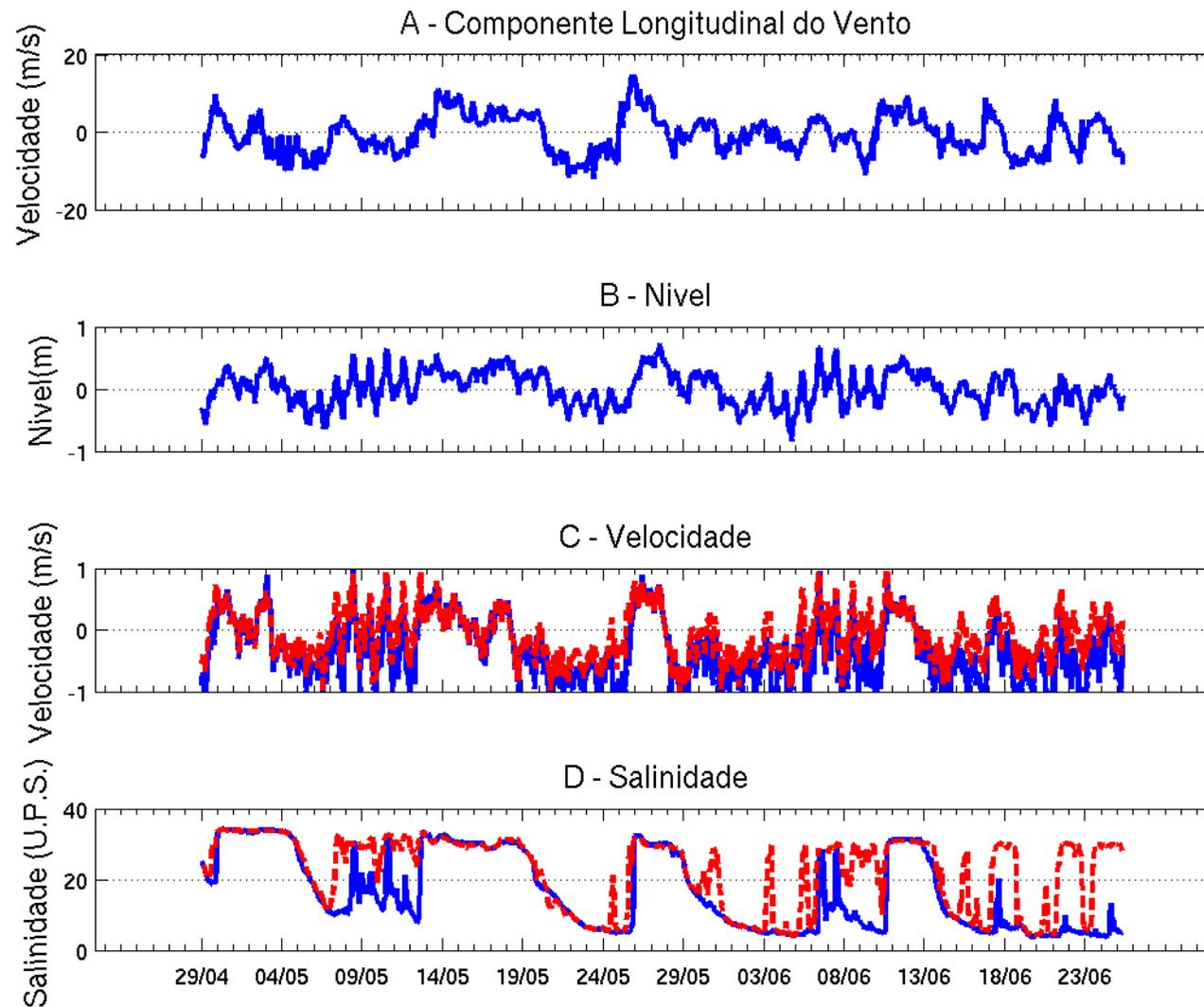
Componentes



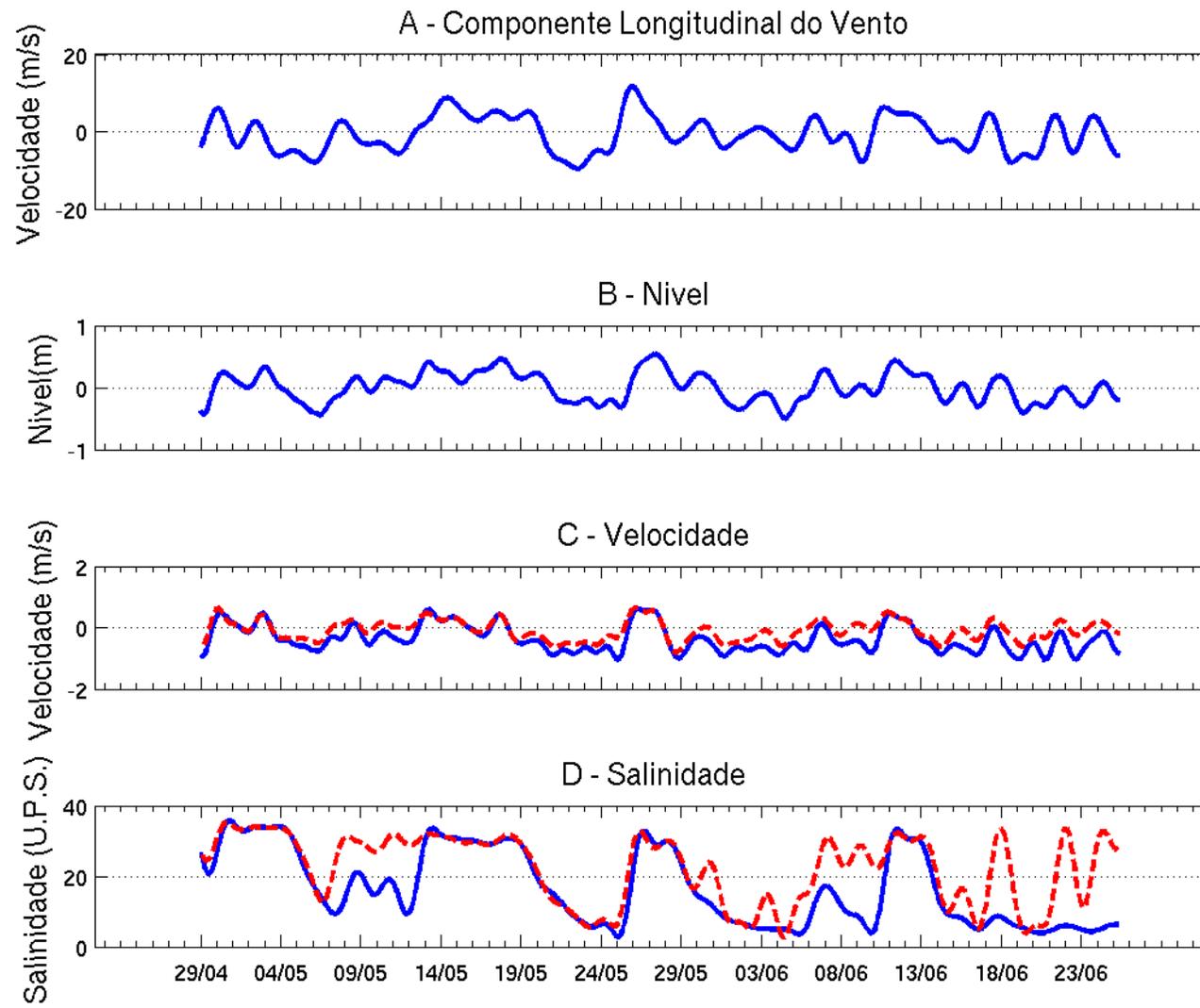
Métodos de análise

- Domínio do tempo
 - Auto-correlação
 - Correlação cruzada
- Domínio das frequências
 - Análise harmônica – maré
 - Análise espectral
 - Análise espectral cruzada
- Filtros
 - Passa alta
 - Passa baixa

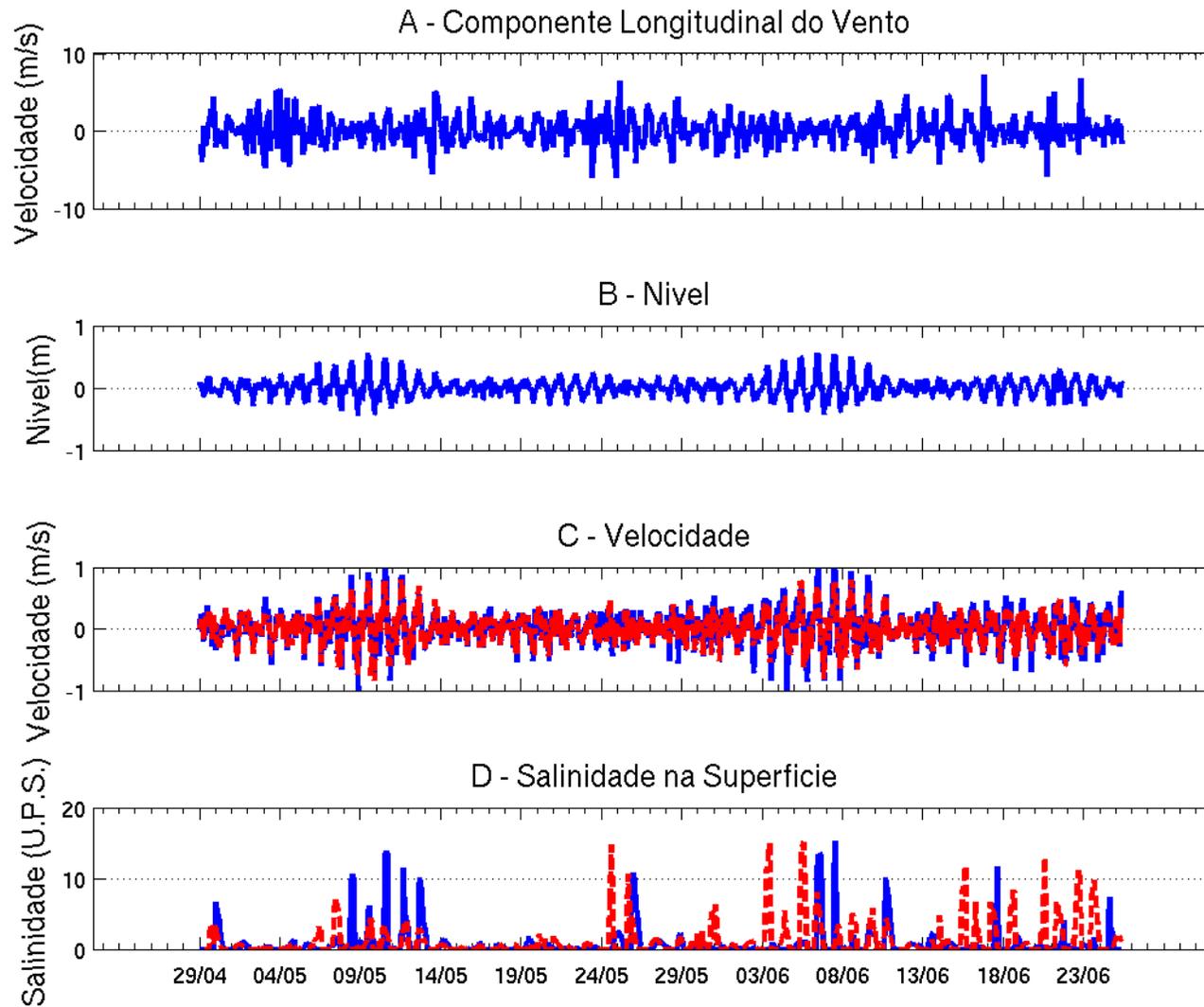
Tratamento de Dados - Filtros



Vitta, 2006



Vitta, 2006



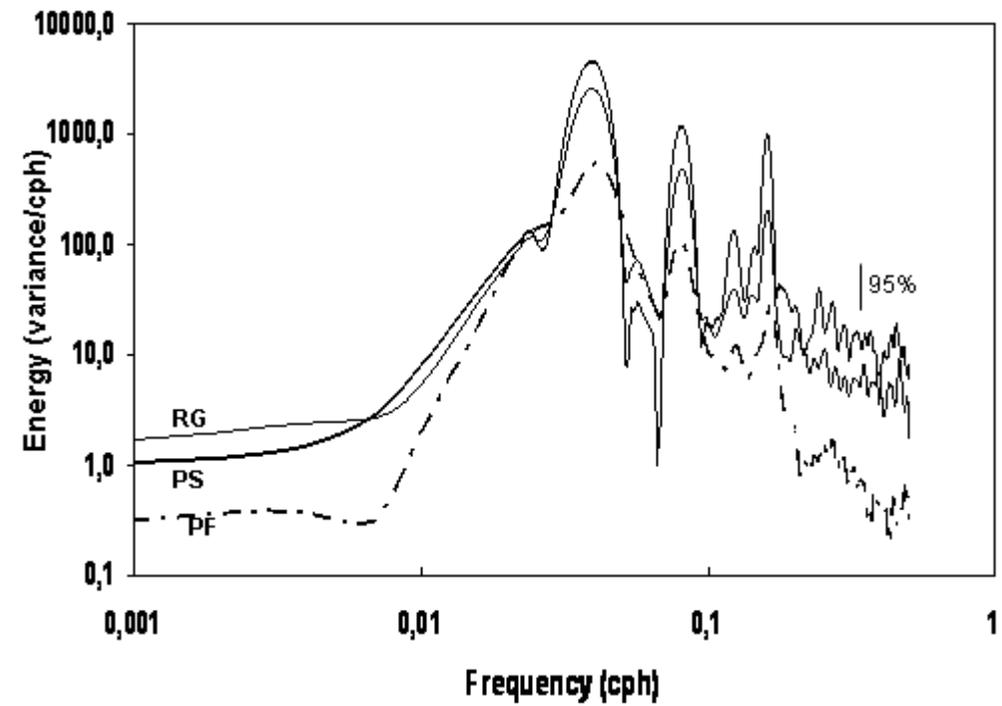
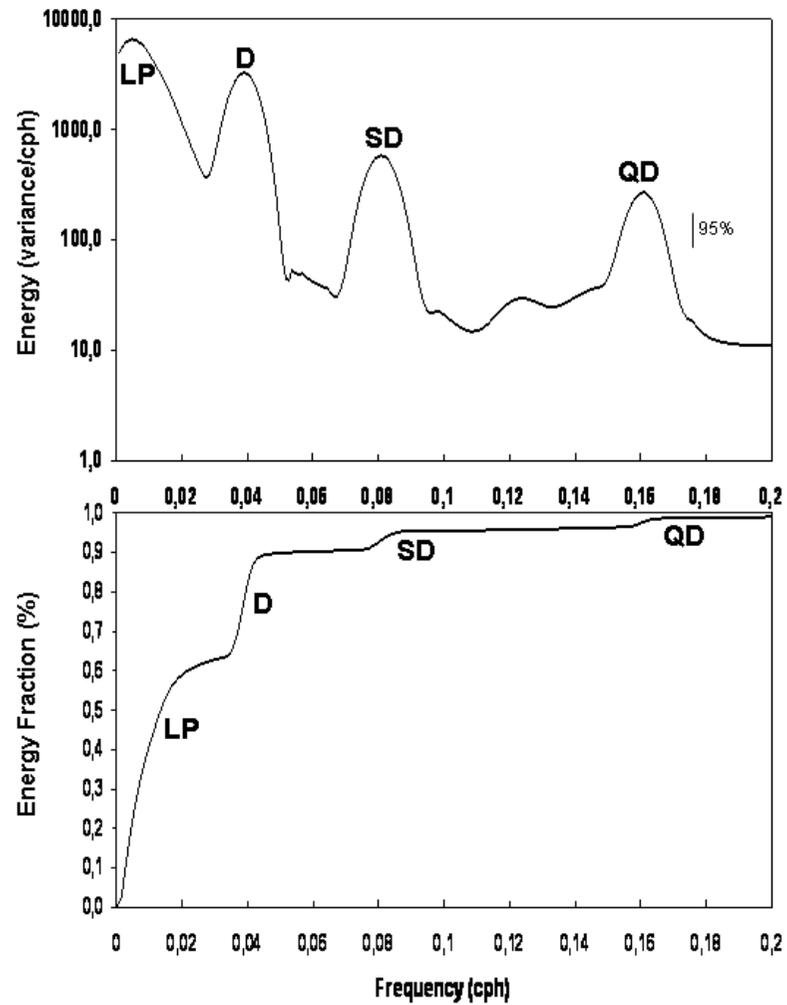
Vitta, 2006

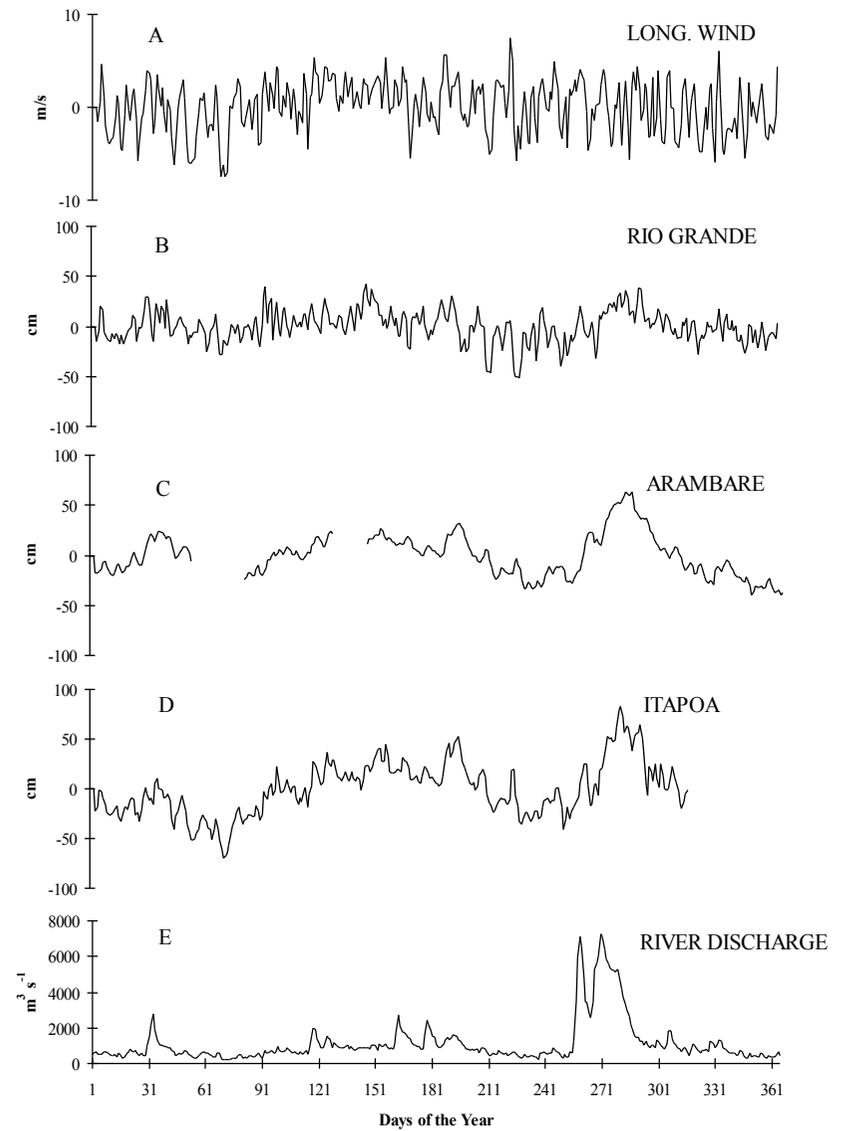
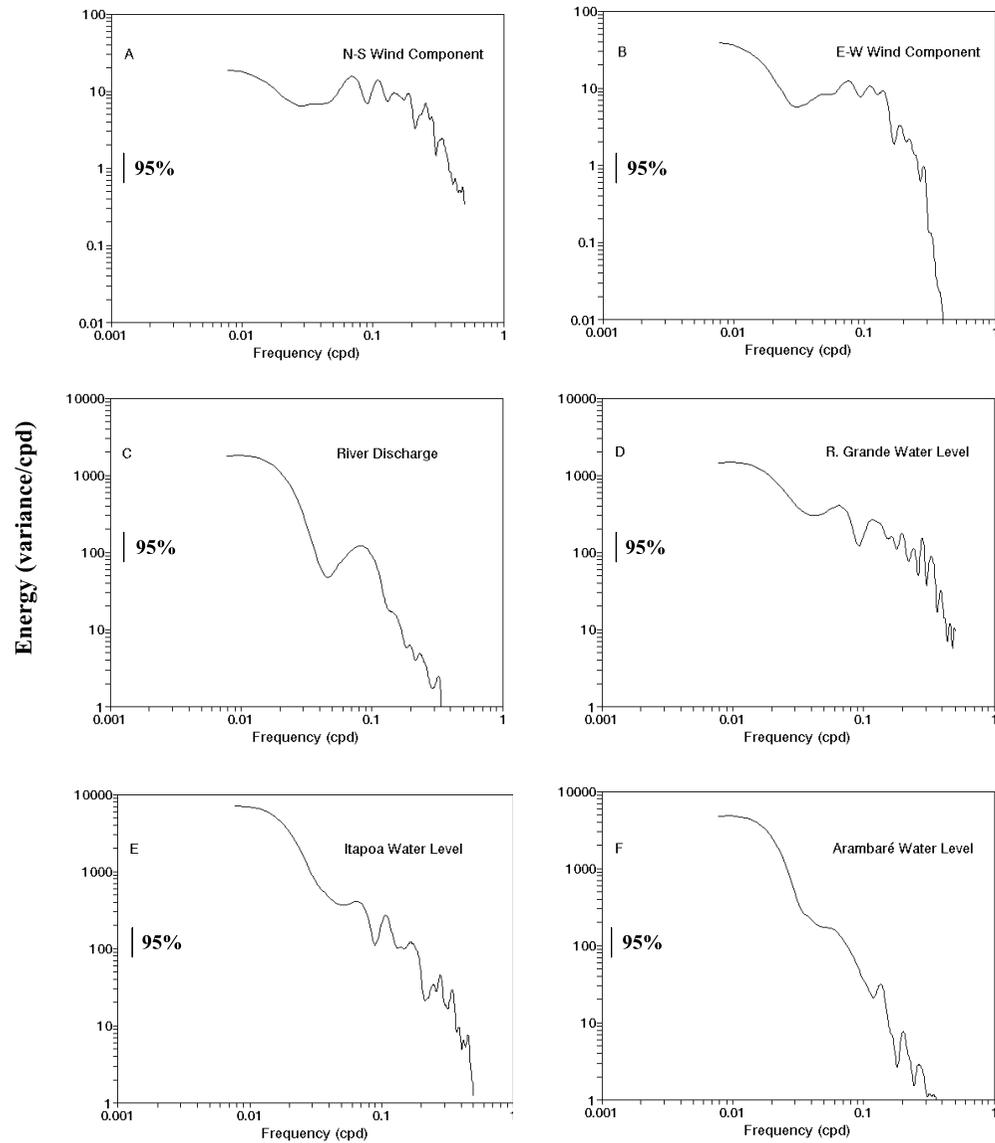
Análise harmônica

FuNdeio ADP/CT Canal de aCESSO

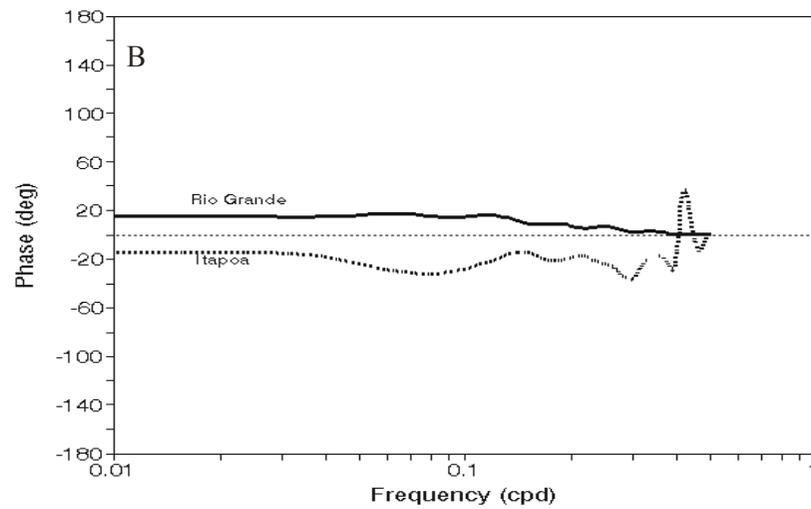
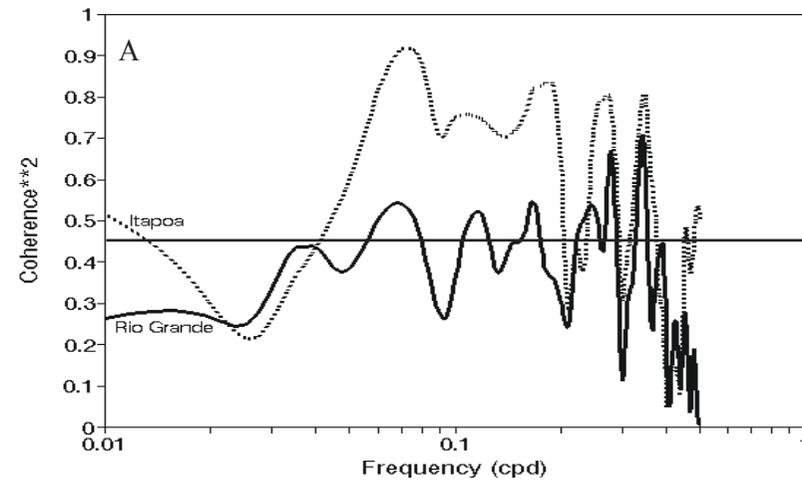
| Profundidade | 1,8 m | | 7,0 m | | 9,0 m | | 12,0 m | |
|--------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Componente | A (cm) | F (gr.) |
| "Q1" | 6,51 | 191,8 | 7,48 | 190,6 | 7,86 | 189,1 | 7,07 | 177,4 |
| "O1" | 21,38 | 202,5 | 21,57 | 207,0 | 22,47 | 208,9 | 21,24 | 205,0 |
| "QUI1" | 2,23 | 79,7 | 2,41 | 85,4 | 2,83 | 79,9 | * | * |
| "P1" | 3,02 | 157,8 | 3,35 | 160,0 | 3,06 | 159,3 | * | * |
| "K1" | 8,50 | 265,3 | 8,24 | 266,6 | 7,97 | 265,5 | 6,37 | 263,1 |
| "N2" | 10,96 | 129,7 | 10,55 | 131,3 | 10,44 | 134,2 | 11,16 | 132,8 |
| "M2" | 6,97 | 160,5 | 6,90 | 159,1 | 7,22 | 160,6 | 6,86 | 152,2 |
| "L2" | 2,92 | 282,5 | 2,43 | 283,6 | 2,12 | 294,9 | * | * |
| "S2" | 8,89 | 314,5 | 8,88 | 314,1 | 9,24 | 316,0 | 8,74 | 316,3 |
| "K2" | 3,72 | 302,2 | 3,88 | 304,4 | 3,91 | 304,5 | 3,80 | 303,7 |
| "2N2" | 1,46 | 98,9 | 1,40 | 103,4 | 1,39 | 107,7 | 1,48 | 113,0 |
| "NU2" | 2,08 | 132,9 | 2,00 | 134,1 | 1,98 | 136,9 | 2,12 | 134,8 |
| "M3" | 2,43 | 241,9 | 2,43 | 244,6 | 2,86 | 250,2 | 1,83 | 250,5 |
| "MN4" | 6,09 | 319,2 | 5,58 | 320,1 | 5,56 | 323,3 | 5,19 | 321,5 |
| "M4" | 10,08 | 346,4 | 9,36 | 347,2 | 9,33 | 348,3 | 8,30 | 345,4 |
| "MS4" | 3,23 | 45,1 | 2,92 | 48,2 | 3,04 | 47,3 | 2,82 | 50,8 |
| "2MS6" | 1,91 | 72,4 | 1,97 | 53,4 | 1,65 | 50,1 | 1,59 | 65,9 |
| 2(O1+K1) | 59,80 | | 59,60 | | 30,40 | | 55,20 | |
| F | 1,90 | | 1,90 | | 1,80 | | 1,80 | |

Análise espectral

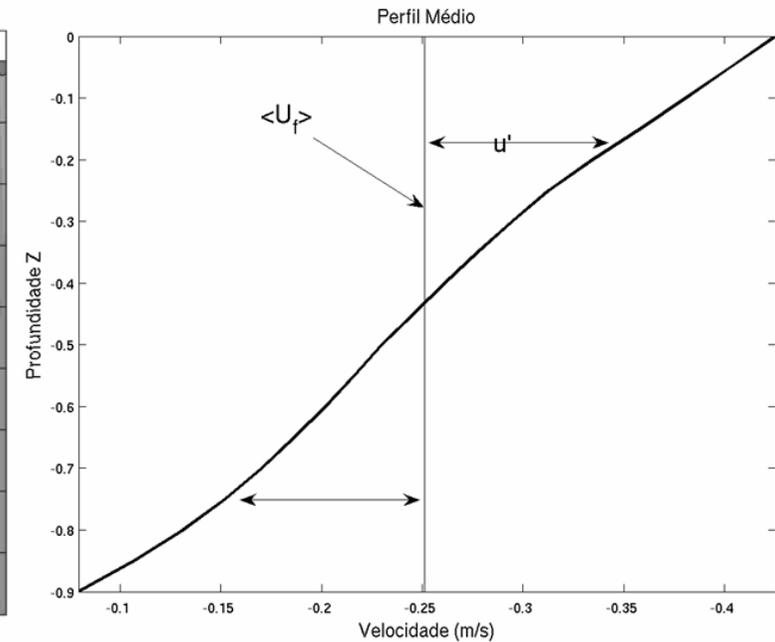
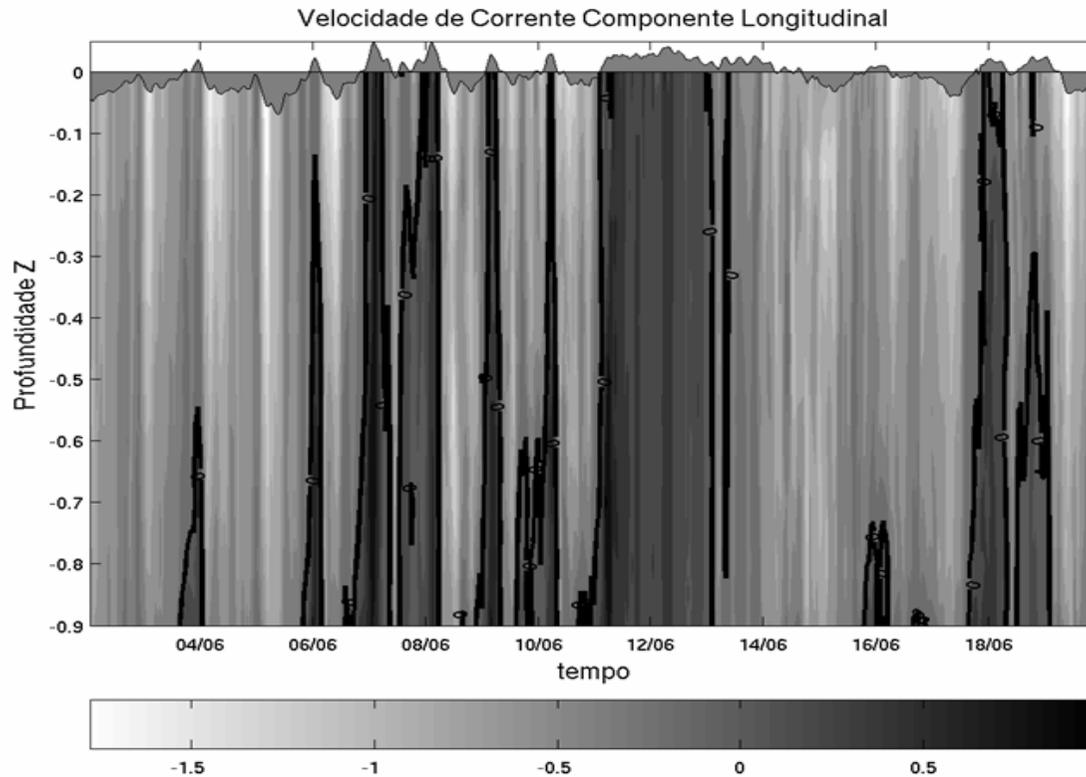




Análise espectral cruzada



Cálculo do perfil médio



$Z = z/H$ (Miranda et al,2002)

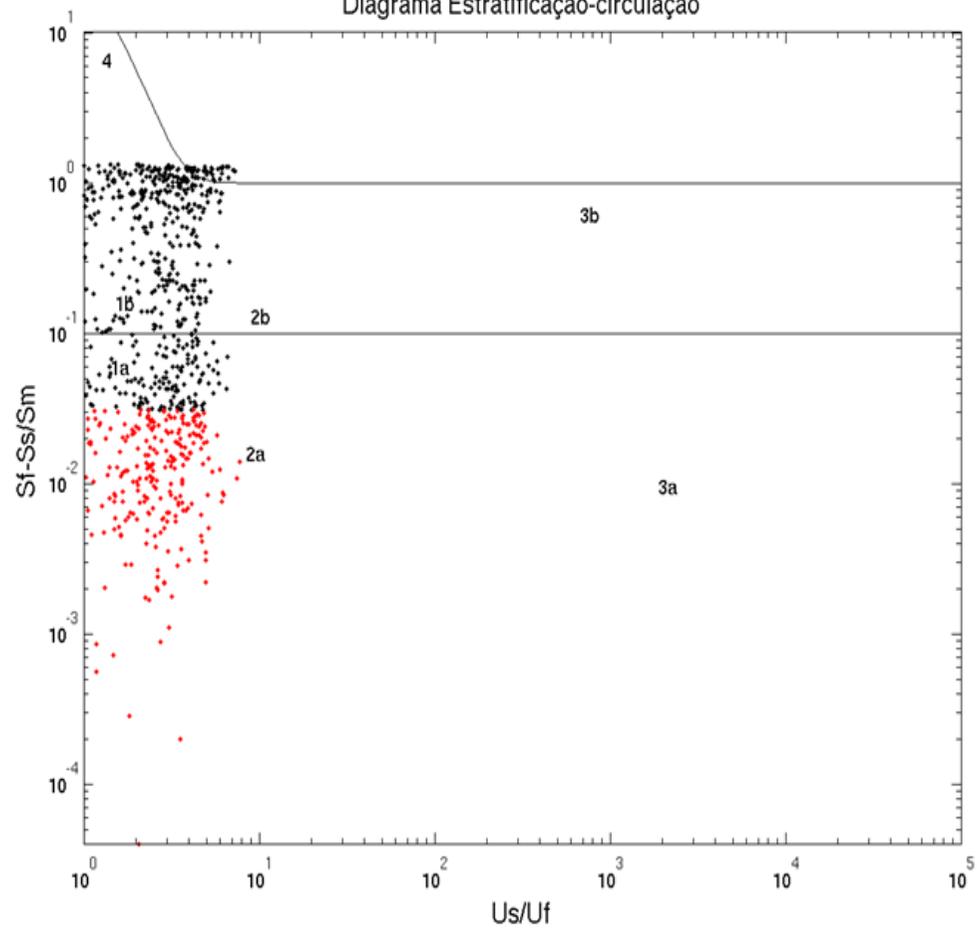
$$\langle u \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_k u(t_k) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

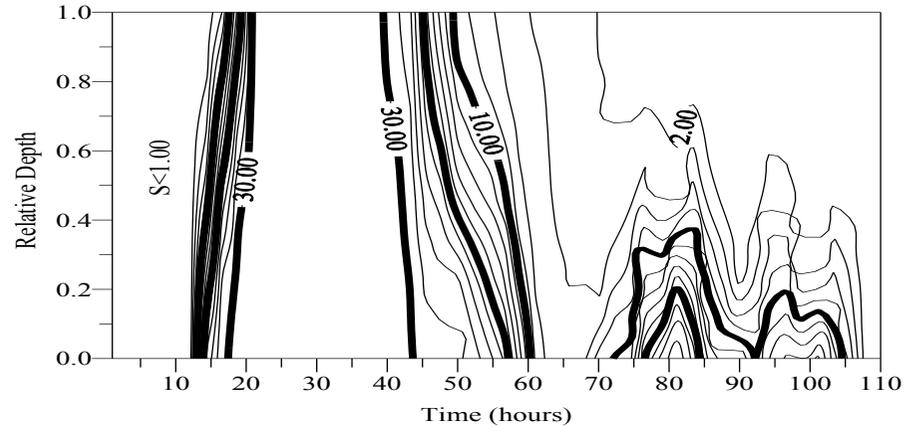
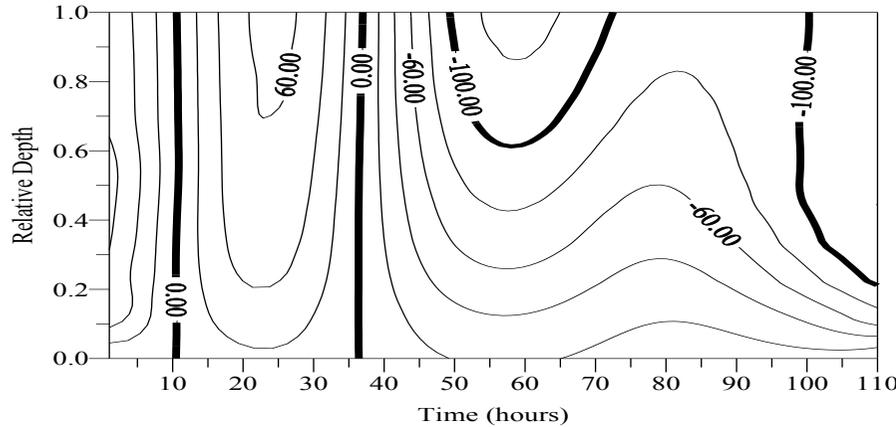
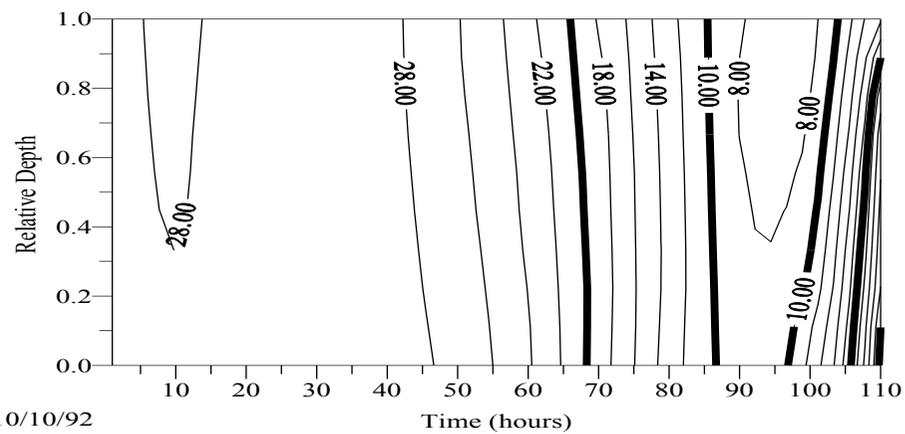
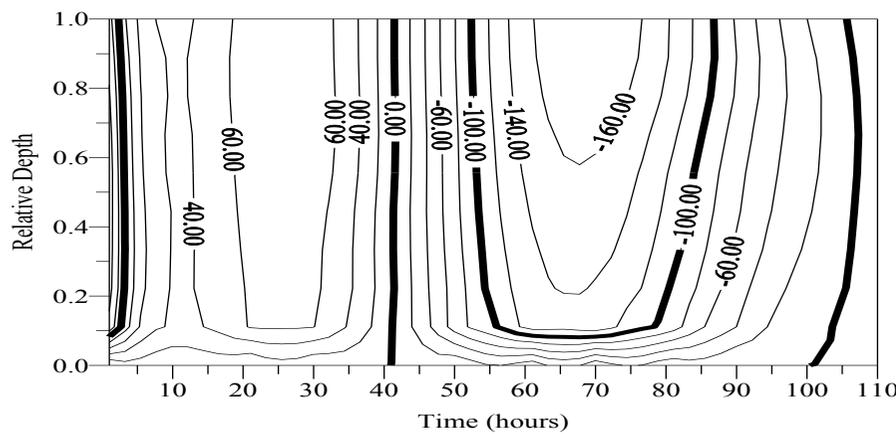
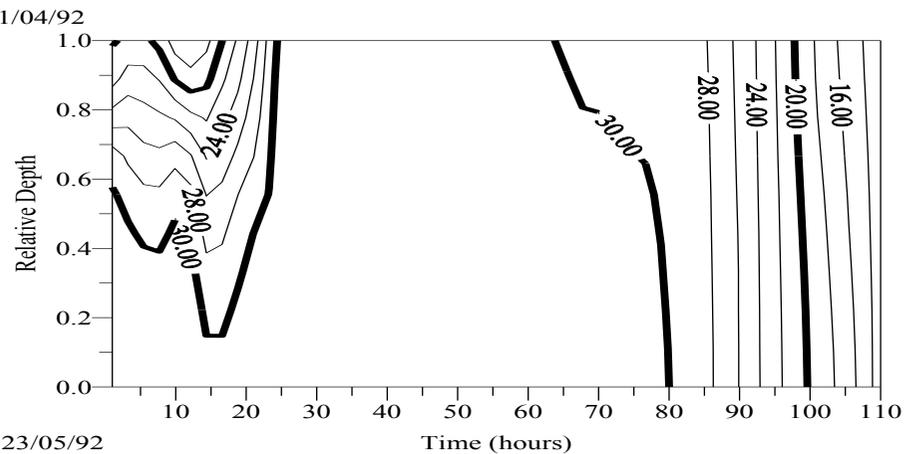
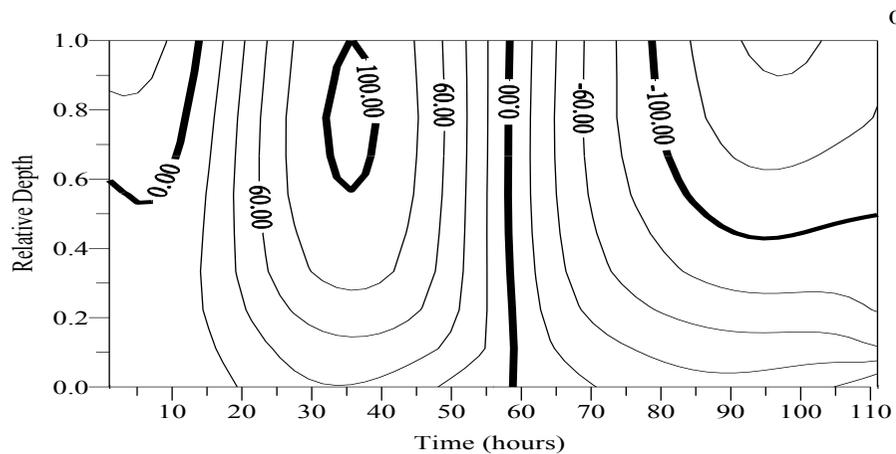
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_i u(t_i) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{h} \int_0^h u(x, z, t) dz \right] dt$$

$$\langle \bar{s} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{h} \int_0^h s(x, z, t) dz \right] dt$$

Diagrama Estratificação-circulação





Transporte de propriedades

$$T_v = \bar{u}A$$

$$T_m = \bar{\rho}\bar{u}A$$

$$Ts = s\bar{\rho}\bar{u}A$$

$$\langle (T_v) \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u(t_0)h(t_0)}{2} \right] + \sum_k u(t_k)h(t_k) + \left[\frac{u(t_n)h(t_n)}{2} \right]$$

$$h(t) = H_0 + \eta_0 \text{sen}(\omega t - \phi)$$

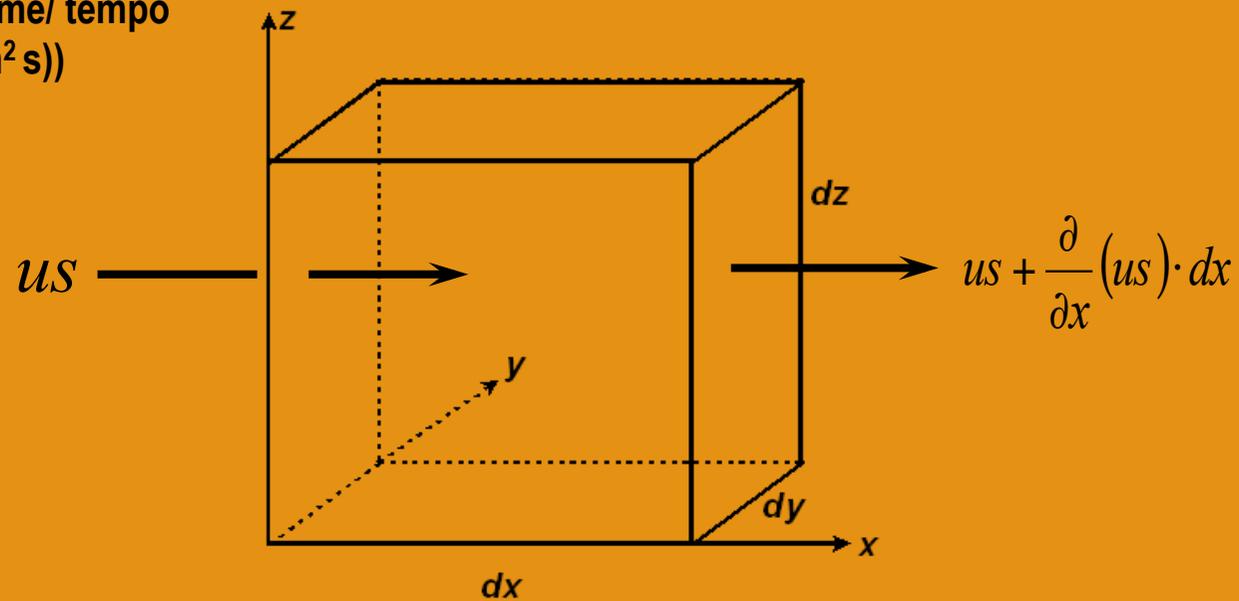
$$u(t) = u_0 + U_0 \text{sen}(\omega t)$$

$$\langle (T_v) \rangle = u_0 H_0 + \frac{U_0 \eta_0}{2} \cos(\phi)$$

$$\langle u \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_k u(t_k) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \left[\frac{u(t_0)}{2} \right] + \sum_i u(t_i) + \left[\frac{u(t_n)}{2} \right]$$

Massa/ volume/ tempo
(kg/(m² s))



$$\text{Fluxo líquido de sal em 'x'} = -\frac{\partial}{\partial x}(us) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$\text{Fluxo líquido de sal em 'y'} = -\frac{\partial}{\partial y}(vs) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$\text{Fluxo líquido de sal em 'z'} = -\frac{\partial}{\partial z}(ws) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

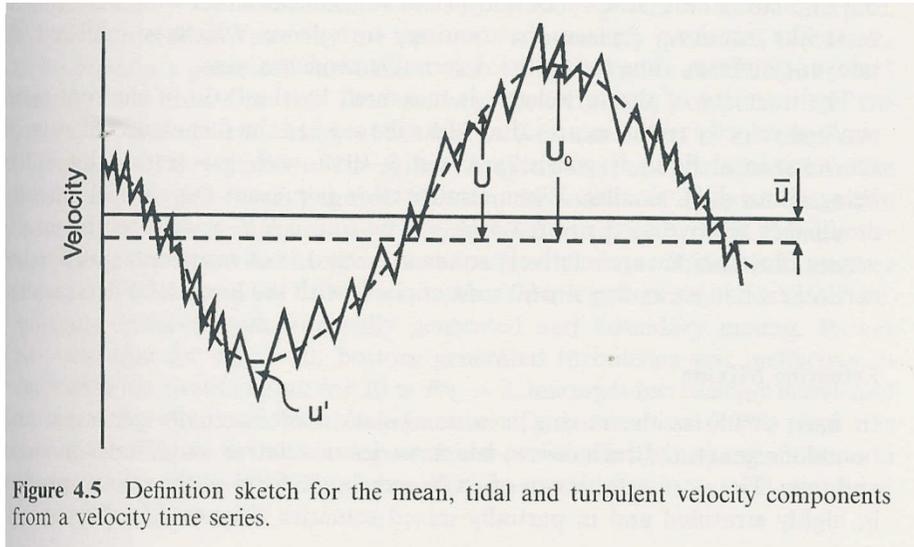
A variação de salinidade por unidade de tempo passando pelo volume unitário :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [s \cdot dx \cdot dy \cdot dz]$$

A difusão molecular será dada por :

$$\text{em 'x'} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial s}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2}$$



$$u = \bar{u} + U + u'$$

$$s = \bar{s} + S + s'$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{s} + \bar{u}S + \bar{u}s' + U\bar{s} + US + Us' + u'\bar{s} + u'S + u's')$$

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\frac{\partial(\bar{u}\bar{s})}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{s})}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}\bar{s})}{\partial z} - \frac{\partial(u's')}{\partial x} - \frac{\partial(v's')}{\partial y} - \frac{\partial(w's')}{\partial z}$$

$$u's' = -K_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \bar{s}}{\partial z}$$

Equação da advecção-difusão

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

$$K_x = \frac{\langle u' s' \rangle}{\frac{\partial s}{\partial x}}$$

$$K_y = \frac{\langle v' s' \rangle}{\frac{\partial s}{\partial y}}$$

$$K_z = \frac{\langle w' s' \rangle}{\frac{\partial s}{\partial z}}$$

$K_{x,y,z}$ – coeficientes turbulentos de difusão

u', v', w' – flutuações turbulentas da velocidade

Para estuários K_x varia entre 100 e 500 m² s⁻¹

Substâncias conservativas e não conservativas

Tipos de estuários

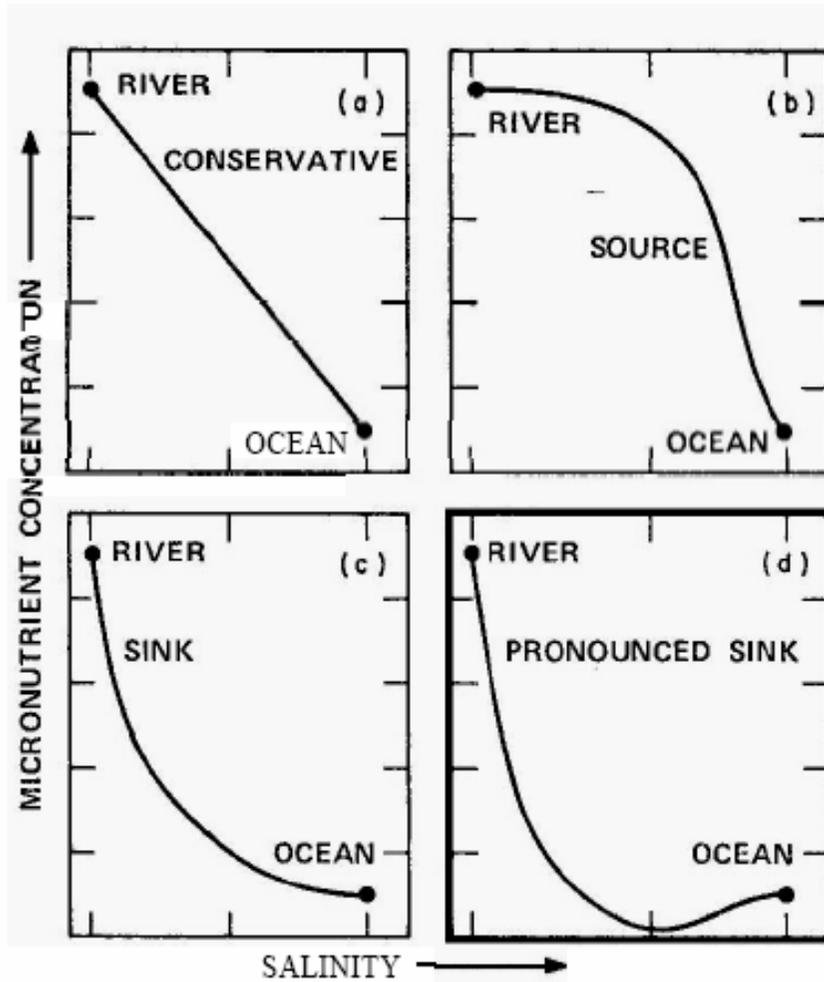


Figure 3. Idealized longitudinal distributions of salinity covarying with a non-conservative substance which has a higher concentration in river water than seawater. (a) Horizontal mixing rates dominate and effects of internal sources or sinks are negligible; (b) secondary source is present; (c) sink is present; (d) sink is pronounced relative to the horizontal mixing rate. After Peterson et al. (1975a).

Estuários bem misturados

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial x^2}$$

$$\int dx$$

$$\bar{u} \bar{s} = K_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x}$$

$$\langle \bar{u} \rangle = u_f = \frac{R}{A}$$

$$S_x = S_o \exp\left(\frac{u_f}{K_x} x\right)$$

$$x < 0$$

$$f_x = 1 - \exp\left(\frac{u_f}{K_x} x\right)$$

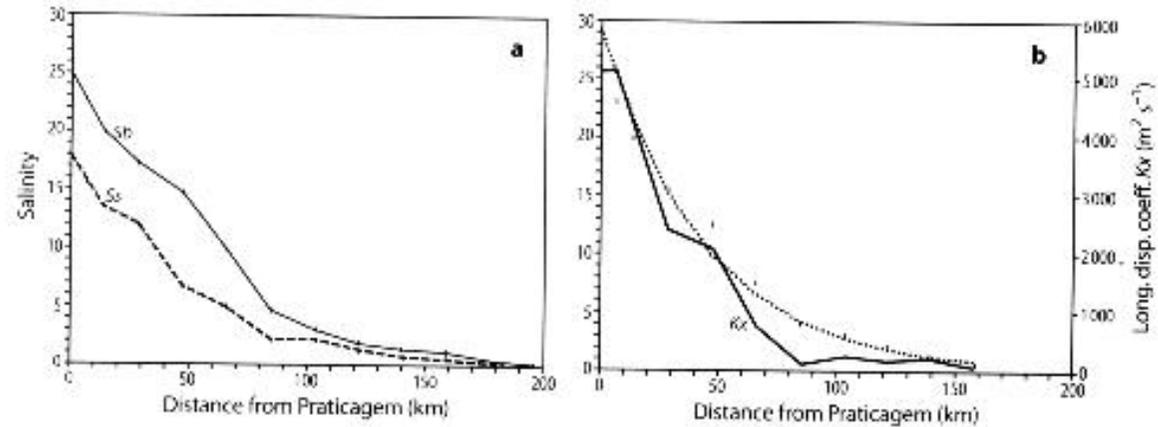
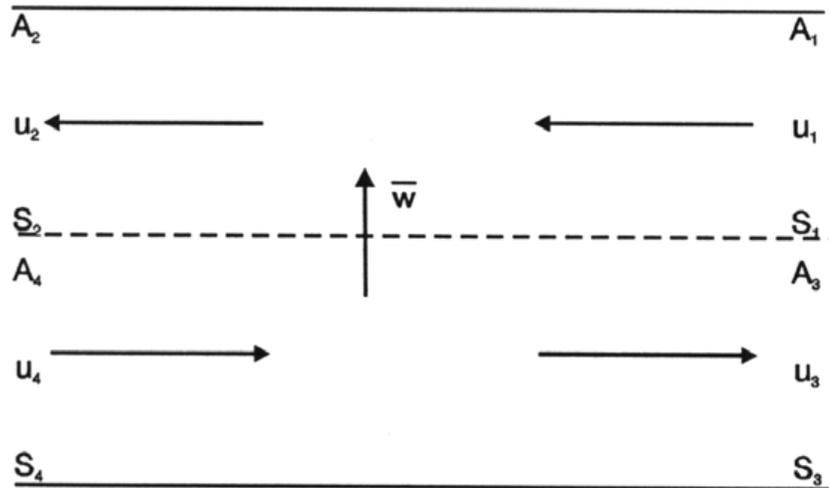


Fig. 5.6. a Mean surface (S_s) and bottom (S_b) salinity (psu) distribution along the longitudinal profile of the lagoon. **b** Mean depth salinities (psu) along the lagoon (dots); the exponential decrease in salinity calculated through regression analysis represented by the dotted line ($r^2 = 0.94$) and the variation of the longitudinal dispersion coefficient (K_x)

Teorema Hidrográfico de Knudsen



$$A_1 u_1 - A_3 u_3 = A_2 u_2 - A_4 u_4$$

E a continuidade de sal requer que:

$$A_1 u_1 S_1 - A_3 u_3 S_3 - A_2 u_2 S_2 + A_4 u_4 S_4 = 0$$

Para a condição de estado estacionário, a taxa líquida de transporte de sal através de cada secção é zero, então:

$$A_1 u_1 S_1 = A_3 u_3 S_3 \quad \text{e} \quad A_2 u_2 S_2 = A_4 u_4 S_4$$

Então:

$$A_2 u_2 \left(1 - \frac{S_2}{S_4}\right) = A_1 u_1 \left(1 - \frac{S_1}{S_3}\right) \quad \text{e} \quad A_4 u_4 \left(\frac{S_4}{S_2} - 1\right) = A_3 u_3 \left(\frac{S_3}{S_1} - 1\right)$$

Se a secção abrangendo A_1 e A_3 estiver localizada na cabeça do estuário e R for rio:

$$A_1 u_1 - A_3 u_3 = R \quad \text{e} \quad A_1 u_1 S_1 = A_3 u_3 S_3 = 0$$

Consequentemente:

$$R = A_2 u_2 - A_4 u_4 \quad \text{e} \quad A_2 u_2 S_2 = A_4 u_4 S_4$$

Então:

$$A_2 u_2 = \frac{RS_4}{S_4 - S_2} \quad \text{e} \quad A_4 u_4 = \frac{RS_2}{S_4 - S_2}$$

Entre as duas secções verticais a advecção completa o circuito:

$$\bar{w}B = A_4 u_4 = RS_2 / S_4 - S_2$$

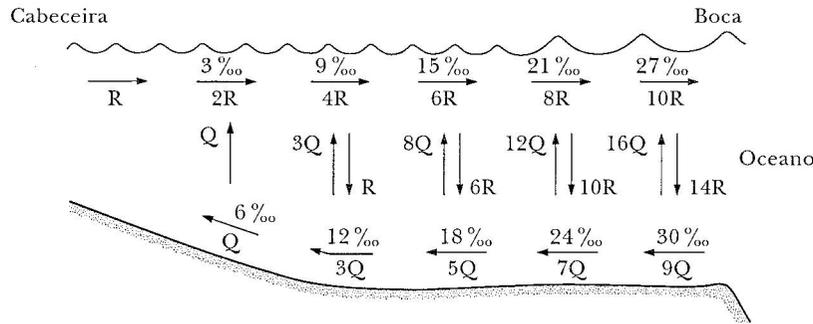


Figura 6.11 Ilustração esquemática dos volumes trocados em segmentos de um estuário e da conservação de volume e sal durante um ciclo completo de maré. Salinidade em ‰ e R e Q são volumes iguais (adaptada de Ketchum, 1953).

Modelos simplificados –
distribuição de uma substância conservativa

$$R=Q$$

Na cabeceira – $6‰Q=S(2R)$

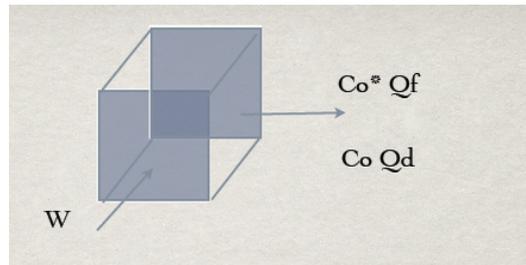
Transporte equivalente

Concentração de uma substância no
ponto de lançamento em um rio

$$Q_d = \frac{Q_f}{f}$$

$$f = \frac{S_0 - S_x}{S_0}$$

$$Q_d = \frac{S_0}{S_0 - S_x} Q_f$$



$$C_0^* = \frac{W}{Q_f} (Kgm^{-3})$$

W – fluxo da substância em Kg/s

Concentração de uma substância no ponto de lançamento em uma seção com salinidade S_w

$$C_0 = \frac{W}{Q_d}$$

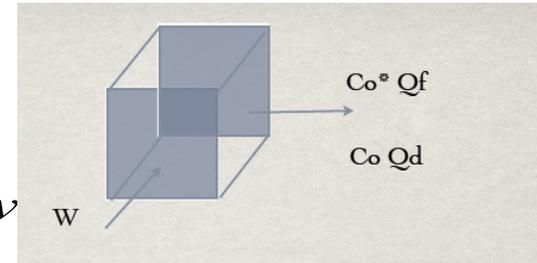
$$C_0 = \frac{W}{Q_f} f_w$$

$$C_0 = C_0^* f_w$$

$$C_0 < C_0^*$$

Eficiência do estuário. Na boca, se $f_w \rightarrow 0$

$$C_0 \rightarrow 0$$



Concentração de uma substância numa seção a jusante ponto de lançamento com salinidade S_j depende da fração de água doce

$$C_{xj} = \frac{W}{Q_f} f_x$$

$$C_{xj} = C_0 \frac{f_x}{f_w}$$

$$C_{xj} = C_0 \frac{S_0 - S_x}{S_0 - S_w}$$

Concentração de uma substância numa seção a montante ponto de lançamento com salinidade S_j – depende da salinidade

$$C_{xm} = C_0 \frac{S_x}{S_w}$$

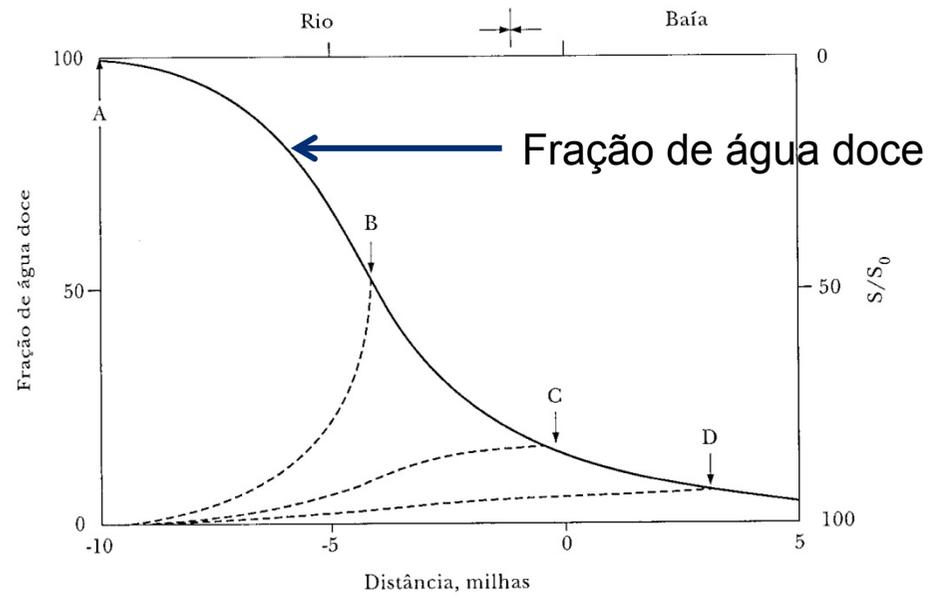


Figura 6.14 Distribuição longitudinal da fração de água doce e da salinidade relativa no Estuário Raritan. A, B, C e D indicam posições de lançamento de um efluente conservativo (de acordo com Ketchum, 1955).

Considerações

- Bowden(1963) propôs que a taxa instantânea de transporte de sal considerando mudanças no perfil vertical de velocidade e salinidade durante um ciclo de maré é dado por:

$$Ts = \langle \overline{\rho u s h} \rangle$$

Transporte de sal – definições básicas

$$Ts = \int_0^h (us) dz$$

$$u = \bar{u} + u'$$

$$s = \bar{s} + s'$$

$$\bar{u} = \langle \bar{u} \rangle + U + u''$$

$$\bar{s} = \langle \bar{s} \rangle + S + s''$$

$$T = \int_0^h (\bar{u}\bar{s} + \bar{u}s' + u'\bar{s} + u's') dz$$

Transporte de sal – definições básicas

$$\bar{u} = \int_0^h u dz$$

$$\bar{s} = \int_0^h s dz$$

$$\int_0^h \bar{u} s' dz = 0$$

$$Ts = h\bar{u}\bar{s} + \int_0^h u' s' dz$$

$$\bar{u} = \int_0^h u dz$$

$$Ts = h(\langle \bar{u} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \bar{u} \rangle S + U \langle \bar{s} \rangle + US + \int_0^h u' s' dz)$$

$$\langle Ts \rangle = \frac{1}{T} \int_0^h Ts dt = \langle h \bar{u} \bar{s} \rangle$$

$$\langle Ts \rangle = \frac{1}{T} \int_0^h h(\langle \bar{u} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \bar{u} \rangle S + U \langle \bar{s} \rangle + US + \int_0^h u' s' dz) dt$$

$$\langle Ts \rangle = \langle h \rangle \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \bar{u} \rangle \langle hS \rangle + \langle hU \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle hUS \rangle + \langle hu's' \rangle$$

$$u = \bar{u} + u'$$

$$s = \bar{s} + s'$$

Média no tempo

Turbulência

$$\bar{u} = \langle \bar{u} \rangle + U + u_s + u' + u''$$

$$\bar{s} = \langle \bar{s} \rangle + S + s_s + s' + s''$$

Média tempo
e prof

Desvios da média
(prof)

U, S – desvios
cíclicos da maré f(t)

u_s, s_s circulação
gravitacional –
shear stress

$$\langle u \rangle = u + U;$$

Flutuações maré

Valor médio em 1
ciclo de maré

$$Ts = \bar{\rho}(u_a h_a s_a + \langle h_t u_t \rangle s_a + h_a \langle u_t s_t \rangle + h_a \bar{u}_s \bar{s}_s + h_a \langle u' s' \rangle + \langle u_t s_t h_t \rangle + u_a \langle s_t h_t \rangle)$$

$$Ts = A + B + C + D + E + F + G$$

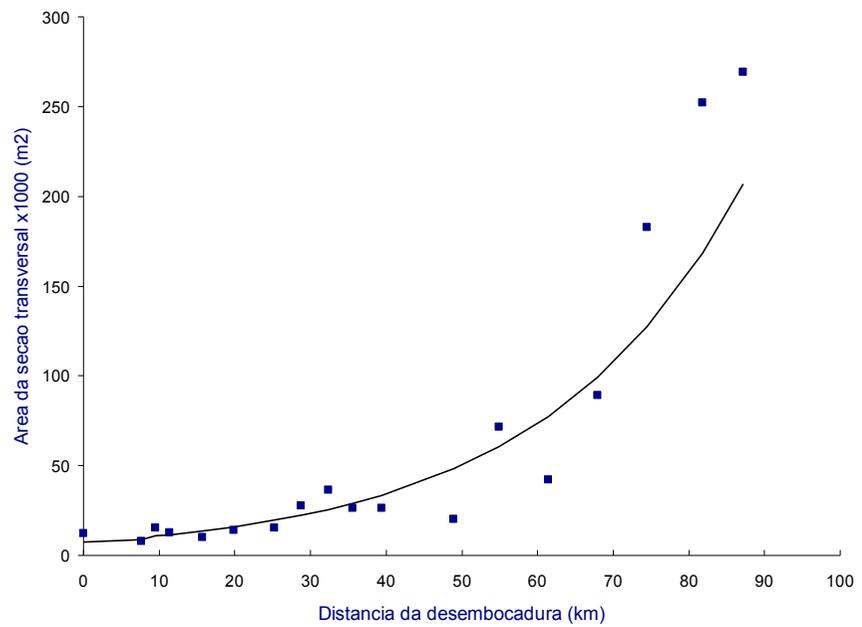
$$-K_x \frac{\partial s}{\partial x} = C + D + E + F + G$$

A+B – advecção – rio + deriva de Stokes

C- correlação da maré – pouco importante

D+E - circulação gravitacional e efeito de cisalhamento do vento - estacionários

F+G – termos não estacionários – cisalhamento da maré e do vento.



A variação de salinidade por unidade de tempo passando pelo volume unitário :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [s \cdot dx \cdot dy \cdot dz]$$

A difusão molecular será dada por :

$$\text{em 'x'} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial s}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \epsilon_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \epsilon_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2}$$

