

# Massas de Água e Frentes Oceânicas

Sueli Susana de Godoi - [ssdgodoi@usp.br](mailto:ssdgodoi@usp.br)

Laboratório de Dinâmica Oceânica - [www.lado.io.usp.br](http://www.lado.io.usp.br)  
Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica  
Instituto Oceanográfico  
Universidade de São Paulo

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas*
- Um dos estudos pioneiros, de natureza descritiva e dinâmica, sobre as características de frentes oceânicas foi conduzido por Uda (1938).
- "Frentes oceânicas", também denominadas de "interfaces frontais", são nítidas fronteiras horizontais estreitas entre massas de água de diferentes densidades. Neste caso, considera-se frentes entre massas de água.
- Consequência: apresentam estratificação diferenciada ao longo da coluna de água.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Introdução*

- De acordo com Belkin (2009) frentes oceânicas são descritas como descontinuidades devido as próprias características abruptas.
- "Zona frontal" - pode ser entendida como uma região ampla, onde pode ocorrer uma série de frentes oceânicas ou interfaces frontais.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Características gerais de frentes oceânicas e zonas frontais*
- As escalas espaciais de frentes envolvem desde frações de metros até milhares de quilômetros.
- Essas são encontradas nas camadas de superfície, em profundidades médias e próximo ao fundo oceânico, denominadas de frentes bênticas.
- Frentes oceânicas podem apresentar uma largura variando entre 10 m - 10 km na zona de máximo gradiente horizontal da propriedade principal.
- Zonas Frontais são regiões comparativamente mais largas, 100 km ou mais, que as frentes oceânicas.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Características gerais de frentes oceânicas e zonas frontais*
- A compreensão da formação de frentes oceânicas, sua variabilidade espacial e persistência são fatores importantes para o entendimento da interação entre movimentos de larga escala da circulação oceânica e de menor escala promovidos por processos costeiros.
- Frentes oceânicas podem ter um curto período de vida, da ordem de dias.
- Entretanto, a maioria das frentes são quase-estacionárias e sazonalmente persistentes.
- Frentes proeminentes estão presentes ao redor dos oceanos (Belkin, 2009).

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Classificação*
- Segundo Bowman (1978) as frentes oceânicas ou interfaces frontais podem ser convenientemente classificadas em seis categorias:
  - Frentes de escala planetária;
  - Frentes de contorno oeste;
  - Frentes de quebra de plataforma;
  - Frentes de ressurgência;
  - Frentes de pluma;
  - Frentes em mares rasos.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Escalas características típicas*  
(Fedorov, 1986; Fedorov & Kuz'mina, 1977)
- Largura da zona de máximo gradiente horizontal da principal propriedade .....10 m - 10 km
- Diferença de temperatura através desta zona..... 1 - 6 °C
- Diferença de salinidade através desta zona.....0,2 - 10 partes por mil  
Em casos excepcionais, isto é em frentes estuarinas e de descarga de rios, as diferenças são maiores que o máximo indicado.
- Diferença de densidade através desta zona..... $10^{-1}$  -  $10 \text{ kg.m}^{-3}$

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Escalas características típicas*  
(Fedorov, 1986; Fedorov & Kuz'mina, 1977)
- Gradiente horizontal de temperatura  
.....0,1 - 30,0 °C / km
- Gradiente horizontal de salinidade  
.....0,1 - 10 partes por mil / km  
Em casos excepcionais, isto é em frentes estuarinas e de  
descarga de rios, os gradientes são maiores que o máximo  
indicado.
- Gradiente horizontal de densidade  
..... $10^{-1}$  -  $10 \text{ kg.m}^{-3}$  / km
- Declive das interfaces frontais  
.....0,001 - 3,00



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Contorno Oeste*

- Considerando, agora, alguns aspectos de frentes de contorno oeste.
- Saunders (1971) coloca que, de modo geral, tais frentes, caracterizadas como processos oceânicos de meso-escala, estão associadas com a intrusão de águas quentes e salinas de origem tropical em direção a latitudes mais altas.
- Como exemplo, pode-se citar a Frente da Corrente do Brasil, no Atlântico Sul (Garfield, 1990, Piola et al., 2000; Lorenzetti et al., 2009, Medeiros, 2012), Frente de Kuroshio, no Pacífico Norte (Takahashi, 2005), a Frente da Corrente do Golfo, no Atlântico Norte, entre outras.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Contorno Oeste*
- Especificamente, a Frente da Corrente do Brasil (FCB), em superfície, é constituída, em termos de massas de água, pela interface entre água Costeira (AC) e água Tropical (AT), a qual é transportada para Sul-Sudoeste pela Corrente do Brasil (CB).
- A AT, formada na região Tropical, se caracteriza por temperaturas maiores que 20 °C e salinidades maiores que 36.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*
- Métodos de pesquisa de Frentes Oceânicas
- Uso de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), a várias décadas, tem fornecido informações úteis para identificar e traçar a assinatura associada a frentes oceânicas.
- Razão: conforme colocado, é que os gradientes de temperatura em superfície, na zona frontal, são acentuados.
- Imagens da TSM podem ser obtidas via sensores remotos na faixa do infravermelho termal, instalados em satélites.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*
- Imagem da Temperatura da Superfície do Mar - 20 de julho de 1993 mapeada na faixa do infravermelho termal pelo sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*
- Satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

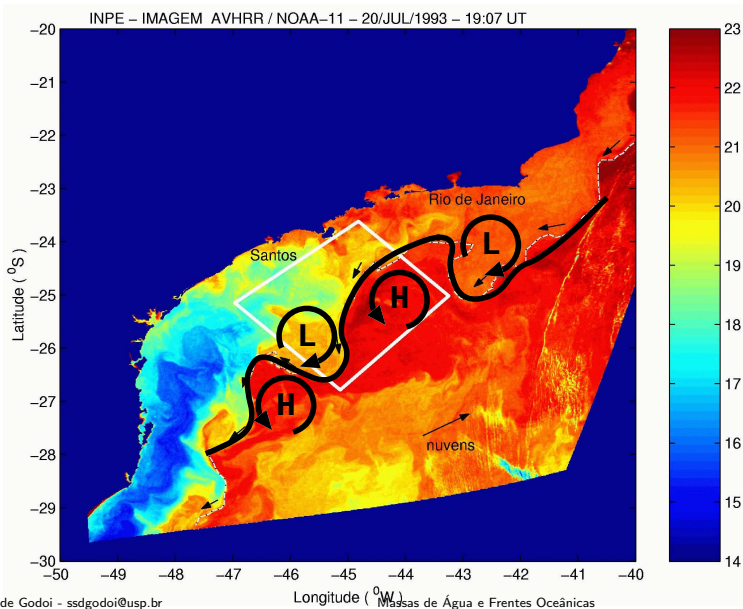
Frente da Corrente do Brasil entre a Corrente do Brasil, transportando Água Tropical, e Águas Costeiras (linha preta) (Godoi, 2005).

Sentido de escoamento da Corrente do Brasil (pequenas setas pretas).

Os semi-círculos em preto indicam vórtices ciclônicos (L) e anti-ciclônicos (H).

Escala lateral indica a Temperatura da Superfície do Mar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

# Frentes Oceânicas - Métodos de Pesquisa



# Frentes Oceânicas

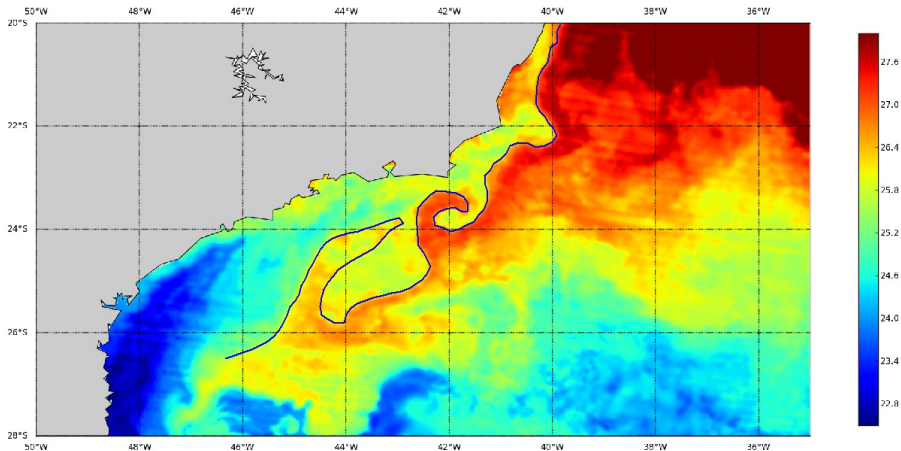
- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*
- Mapa indicando a digitalização da Frente Térmica da Corrente do Brasil - 28 de abril de 2008, em eventos do Vórtice de Cabo Frio (*Medeiros, 2012*).
- Região ao largo de Cabo Frio - RJ.
- Imagens *Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature* (MUR SST)
- *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2009)

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*
- As imagens são mapeadas por radiômetros acoplados em satélites nas faixas: micro-ondas, infravermelho ( $3,66 - 11,21 \mu m$  e  $3,55 - 12,50 \mu m$ ).
- A escala de cores lateral indica valores da temperatura da superfície do mar ( $^{\circ}C$ ).



# Frentes Oceânicas - Métodos de Pesquisa



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

- Ao largo de Cabo Frio: variação térmica da ordem de 1 °C na fronteira da Corrente do Brasil com a zona costeira.
- Vórtice de Cabo Frio: evidencia um núcleo de água relativamente mais frio (25,5 °C), comparado com a estrutura da assinatura da Frente Térmica da Corrente do Brasil (27 °C).
- Características indicam vórtice ciclônico, isto é um centro de baixa pressão.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

- Um ponto a colocar é que em baixas latitudes e no verão os gradientes de temperatura são relativamente fracos.
- Consequência: tal situação torna difícil a observação de frentes térmicas com imagens da TSM.
- Uso de outras fontes de imagens mapeadas por sensores remotos: imagens da cor do oceano, as quais estão relacionadas com o gradiente de concentração de Clorofila-a da Superfície do Mar (CSM).

# Frentes Oceânicas

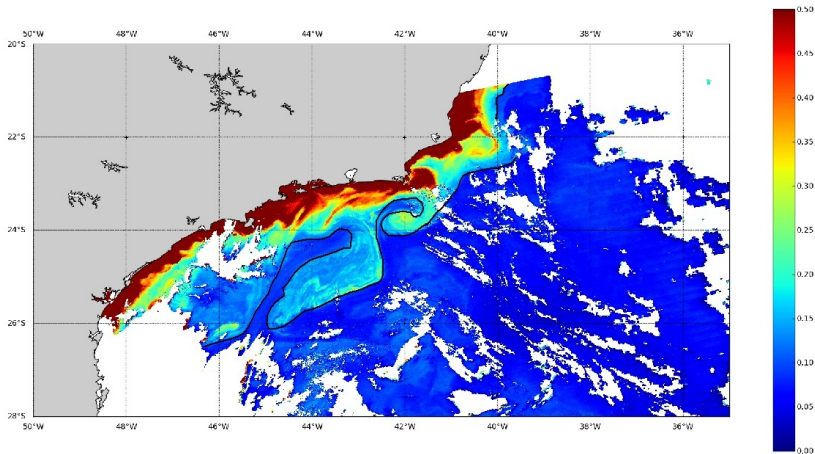
- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

- A clorofila-a é o tipo mais abundante, representando cerca de 75% de todos os pigmentos verdes encontrados nas plantas.
- Onde é encontrada: em praticamente todos os organismos que realizam fotossíntese, excetuando-se algumas bactérias fotossintetizantes que possuem pigmentos especializados.
- Função: possui papel fundamental no processo de fotossíntese, atuando ativamente na produção de substâncias orgânicas.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*
- Mapa indicando a digitalização da Frente de Clorofila-a da Corrente do Brasil - 28 de abril de 2008, em eventos do Vórtice de Cabo Frio (*Medeiros, 2012*).
- Região ao largo de Cabo Frio - RJ.
- Imagens *MODIS* satélite AQUA - radiômetro operando na faixa do espectro visível - 0,41 - 0,88  $\mu\text{m}$
- *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2012)
- A escala de cores lateral indica valores da concentração de clorofila-a na superfície do mar em  $\mu\text{g/l}$

# Frentes Oceânicas



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

- Inspeção visual: é possível identificar a fronteira entre a CB, caracterizada por águas oligotróficas
- baixa concentração de clorofila-a ( 0 - 0,1  $\mu\text{g/l}$ ),
- e a região de plataforma, onde há comparativamente uma maior produção primária, com concentração de clorofila-a acima de 0,25  $\mu\text{g/l}$ .
- A assinatura do Vórtice de Cabo Frio está bem evidente na imagem CSM, destacando-se um núcleo concentração de clorofila-a ao redor de 0,25 - 0,30  $\mu\text{g/l}$ .

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Métodos de pesquisa*

- Imagens da cor do oceano são fontes de informações que podem complementar o traçado da assinatura de frentes térmicas.
- Takahashi *et al.* (2005) têm utilizado com sucesso essa base de dados na detecção da Frente de Kuroshio.
- As pesquisas realizadas por esses autores mostram que a assinatura da frente oceânica mapeada, usando a TSM, concentração de clorofila-a e propriedades físico-químicas da água do mar observadas *in situ*, se equivalem.
- A aplicação de tal técnica revela que a eficiência do método para detecção de frentes é 82%, a qual é considerada suficientemente elevada para aplicações práticas.



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- Questão: As frentes são encontradas com a mesma frequência em áreas costeiras e oceano aberto?
- Baseado na compilação de informações apresentadas por Fedorov (1986), tal questão pode ser respondida da seguinte forma:

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- (1) Em áreas costeiras, especialmente em lugares de intensa ressurgência, em mares interiores e estreitos, e também em zonas frontais de intensas correntes de contorno, por exemplo Correntes do Golfo, Kuroshio, Brasil entre outras, a distância média entre frentes termais pode ser somente de várias dezenas de quilômetros (30 - 50 km), com variações desde 5 a 100 km em certas situações.
- Valores de 3 - 5 km obtidos para a distância média entre zonas de centenas de quilômetros com base em dados registrados por embarcações de pesquisa em áreas costeiras podem ter resultado proveniente do cruzamento de numerosos meandros de um lado e na mesma frente.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- (2) Em regiões de oceano aberto onde zonas frontais de origem climática são encontradas, isto é na convergência subtropical, os valores característicos da distância média entre zonas ficam ao redor de 100 km.
- Em alguns casos, as zonas frontais, na presença de vórtices sinóticos, podem ser caracterizadas por escalas menores, 40 - 50 km também.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- (3) Na partes do oceano aberto as quais estão distantes das principais zonas frontais, os valores da distância média entre zonas aumentam de 500 - 1000 km.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- (4) Nas regiões oeste do oceano aberto, fortes interfaces frontais termais são, de forma geral, encontradas mais frequentemente do que em à leste dos oceanos.
- Entretanto, esta diferença pode ser alterada como um resultado de fenômenos e processos sazonais.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Quão frequentemente as frentes oceânicas são encontradas nos oceanos?*
- Devido as ondas internas, desomogeneidades de pequena escala do campo termal, com gradientes horizontais de temperatura frontais que alternam em um intervalo de 1 - 5 km, podem aparecer na camada superior 3 - 8 m praticamente em qualquer lugar em m'dias e baixas latitudes sobre condições de intenso aquecimento solar em condições de tempo calmo.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*
- Os seguintes parâmetros físicos são considerados como os mais importantes para satisfazer descrição física de zonas frontais e interfaces frontais:
- (1) a largura da zona frontal na superfície do oceano, ou qualquer característica de superfície;
- (2) a direção ao longo da frente, a extensão e limites de profundidade da frente;

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*
- (3) a característica geral de temperatura e salinidade da zona frontal. Os gradientes horizontais médios de temperatura e salinidade através da zona. O espaçamento das isopícnais (linhas de mesma densidade), isotermas (linhas de mesma temperatura) e isohalinas (linhas de mesma salinidade) em uma seção transversal das zonas frontais, e suas posições relativas entre si;
- (4) o número total de interfaces frontais na zona frontal;



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*

- (5) as características das interfaces frontais:
  - (5.1) o ângulo de inclinação de uma interface frontal;
  - (5.2) os gradientes horizontais de temperatura e salinidade através da frente em diferentes níveis;
  - (5.3) a profundidade na qual a interface frontal é discernível;
  - (5.4) as características de temperatura e salinidade das estruturas verticais em ambos os lados de cada interface frontal e abaixo desta;

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*
- (5.5) o campo de velocidade na vizinhança da interface frontal, e especialmente os valores característicos das mudanças vertical e horizontal em velocidade, através da interface frontal;
- (5.6) o comprimento de onda do meandramento frontal, ou o número de meandros em 100 km, em diferentes níveis ou superfícies isopícnais;
- (5.7) o raio de curvatura da maioria das partes curvas da frente;
- (5.8) a velocidade e direção da migração geral de uma interface frontal;

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*

- (5.9) a velocidade e direção de migração de meandros;
- (5.10) a tendência observada de proeminência ou o relaxamento da interface frontal;
- (6) as características estatísticas e físicas da fina estrutura vertical termohalina próximo às interfaces frontais e sobre as bordas da zona frontal

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Principais parâmetros físicos das frentes oceânicas e zonas frontais*
- Todas as características listadas previamente podem, em princípio, serem observadas por meio de medidas diretas no oceano.
- Algumas das características podem ser medidas mais facilmente pelo uso das técnicas de sensoriamento remoto, isto é utilizando sensores remotos a bordo de satélites, do que em embarcações de pesquisa.

# Frentes Oceânicas

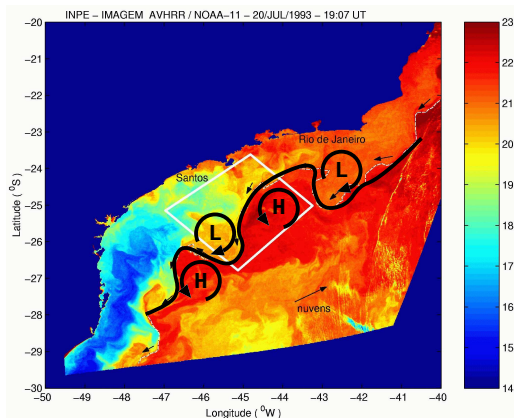
- *Frentes Oceânicas - Feições características de frentes oceânicas*  
*Frentes no oceano e vórtices*
- Interação entre vórtices e frentes:
- Sob ambos pontos de vista, dinâmico e descritivo, os amplos meandros nas principais frentes oceânicas, tais como frente da Corrente do Golfo, apresentam uma maior similaridade com os ciclones atmosféricos.
- Em um meandro deste tipo, pode-se observar o análogo do "setor quente" atmosférico, isto é o "setor frio" no oceano,
- e a configuração de uma frente deformada como uma onda é análogo a combinação de uma frente quente e fria em um ciclone atmosférico desenvolvido.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Feições características de frentes oceânicas*  
*Frentes no oceano e vórtices*
- Ao contrário de meandros frontais, vórtices sinóticos no oceano aberto e "anéis" ou vórtices frontais, completamente separados, por exemplo, da Corrente do Golfo, Corrente do Kuroshio ou Corrente do Brasil assim como pequenos, mas intensos vórtices ciclônicos com 20 a 50 km em diâmetro, se desenvolvem nas interfaces frontais ou próximo à estas.
- Estes possuem dinâmicas mais ou menos independentes e próprios campos de intensa deformação.
- Tais efeitos podem influenciar as características do meio no qual estes migram.

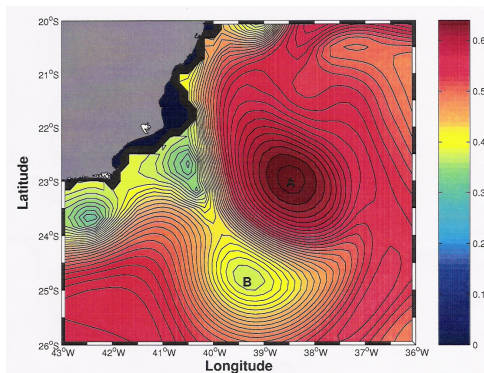
# Frentes Oceânicas

- *Frentes no oceano e vórtices - A Frente da Corrente do Brasil e vórtices ciclônicos e anti-ciclônicos ao longo do meandramento Costa Leste-Sudeste Brasileira*



# Frentes Oceânicas

- *Frentes no oceano e vórtices - A Frente da Corrente do Brasil e vórtices anti-ciclônicos e ciclônico ao largo de Cabo Frio - RJ*  
*Distribuição horizontal da elevação da superfície do mar (cm), gerada por modelo numérico. (Cortesia - Leandro Calado)*





# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Frentes de ressurgência costeira*

- Com exemplos, pode-se citar as seguintes áreas de ressurgência costeira:
- Ressurgência de Oregon;
- Ressurgência da África do Sul - Cidade do Cabo;
- Ressurgência do Brasil - próximo à Cabo Frio;
- Ressurgência das Canárias - oeste da África;
- Ressurgência do Peru;
- Ressurgência da Venezuela.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Frentes Estuarinas*

- Observa-se que:
- Manifestação das frentes pela ocorrência de
  - faixas de espuma e lixo,
  - mudanças na cor e transparência da água,
  - gradientes horizontais de velocidade e densidade
- Tais aspectos são muito mais acentuados em estuários do que em oceano aberto.

# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Frentes Estuarinas*

- Tipos de Frentes Estuarinas:
- Tipo I - interfaces frontais associadas com "cunha salina"
  - ocupa uma posição perpendicular ao eixo do estuário
- Tipo II - interfaces frontais relacionadas com a interação das correntes de marés com a topografia de fundo do estuário
  - localiza-se ao longo dos eixos das feições características da topografia de fundo, principalmente ao longo dos eixos dos estuários

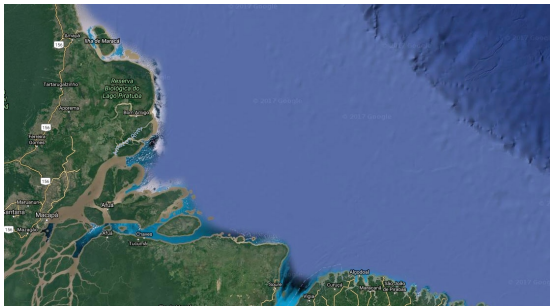
# Frentes Oceânicas

- *Frentes Oceânicas - Frentes Estuarinas*

- Tipos de Frentes Estuarinas:
- Tipo I - interfaces frontais associadas com "cunha salina"
  - mais característica em estuários semelhantes a um canal
- Tipo II - interfaces frontais relacionadas com a interação das correntes de marés com a topografia de fundo do estuário
  - encontrada mais frequentemente em estuários rasos de largura considerável, com uma topografia de fundo complexa e rugosa.

# Frentes Oceânicas

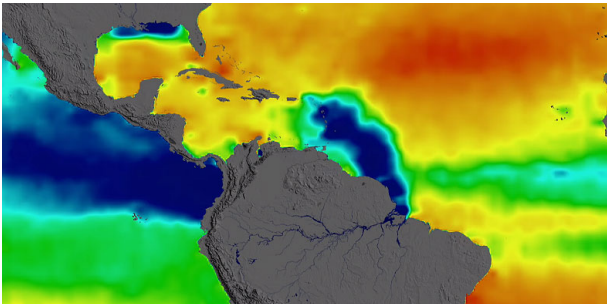
- *Frentes Estuarinas - Foz do Rio Amazonas*



# Frentes Oceânicas

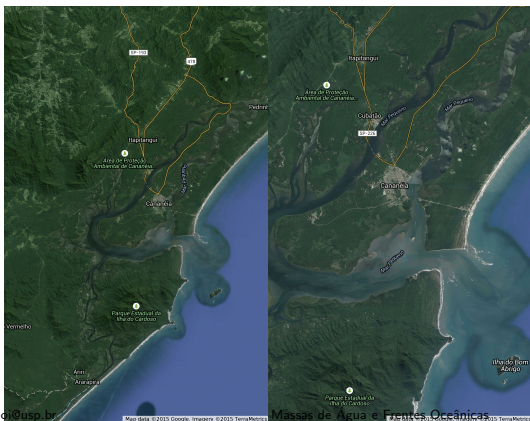
- *Frentes Estuarinas - Foz do Rio Amazonas*

Observar a pluma de água estuarina fluindo sobre a plataforma continental.



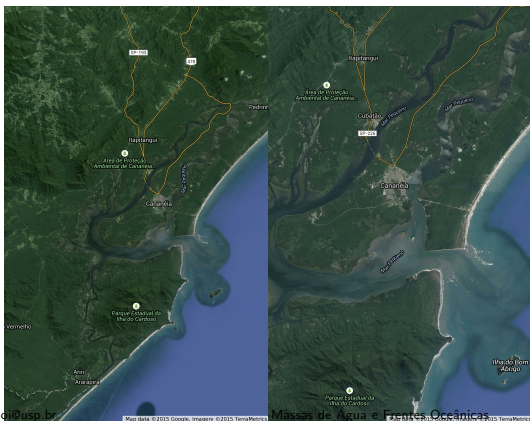
# Frentes Oceânicas

- *Frentes Estuarinas - Barra de Cananéia - Litoral Sul Paulista*  
Observar a pluma de água estuarina fluindo sobre a plataforma continental.



# Frentes Oceânicas

- *Frentes Estuarinas - Barra de Cananéia - Litoral Sul Paulista*  
Observar a pluma de água estuarina fluindo sobre a plataforma continental.





# Referências

- BELKIN, I. M.; CORNILLON, P. C.; SHERMAN, K. Fronts in large marine ecosystems. Progress in Oceanography, v. 81, p. 223 - 236, 2009.
- BOWMAN, M. J.; ESAIAS, W. E. Ocean Fronts in Coastal Processes: proceedings of a Workshop Held at the Marine Science Research Center. [S.l.]: SpringerVerlag, 1978.
- FEDOROV, K.N.: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts. Springer-Verlag New York, Inc.Vol.19.VIII,333 p., 1986.
- FEDOROV, K.N.; Kuz'mina, N.P. Fronts in the ocean. IN: Mesoscale Variability of an Oceanic Temperature Field. Moscow, IOAN, p. 33 - 53, 1977.
- GARFIELD, N. The Brazil Current at Subtropical Latitudes. Tese (Doutorado) University of Rhode Island, 135p., 1990.

# Referências

- GODOI, S.S. de: Dinâmica Quase-Geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no Embaio de São Paulo (23,5°S e 27°S ). Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. São Paulo. 113 p., 2005. Disponível em: [http://lado.io.usp.br/pt/teses/index\\_teses.php](http://lado.io.usp.br/pt/teses/index_teses.php)
- LORENZZETTI, J. *et al.* Satellite observation of brazil current inshore thermal front in the sw south atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. C. Shelf Research, v. 29, n. 17, p. 2061 - 2068, 2009.
- MEDEIROS, H.I.V.de: A Frente da Corrente do Brasil: variabilidade temporal e espacial em eventos do Vórtice de Cabo Frio. Trabalho de Graduação. Bacharelado em Oceanografia. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. São Paulo. 56p., 2012.

# Referências

- NASA. Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature. junho 2012. Disponível em: <http://mur.jpl.nasa.gov/>.
- NASA Ocean Color Products. 2009. Disponível em: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- PIOLA, R. A. *et al.* Subtropical shelf front off eastern south america. J. Geophys. Res., v. 105, n. 3, p. 6565 - 6578, 2000.
- SAUNDERS, P. M. Anticyclonic eddies formed from shoreward meanders of the gulf stream. Deep-Sea Res., v. 18, n. 12, p. 1207 - 1219, 1971.
- TAKAHASHI, W.; KAWAMURA, H. Detection method of the kuroshio front using the satellite-derived chlorophyll-a images. Remote Sensing of Environment, v. 97, n. 1, p. 83 - 91, 2005.