



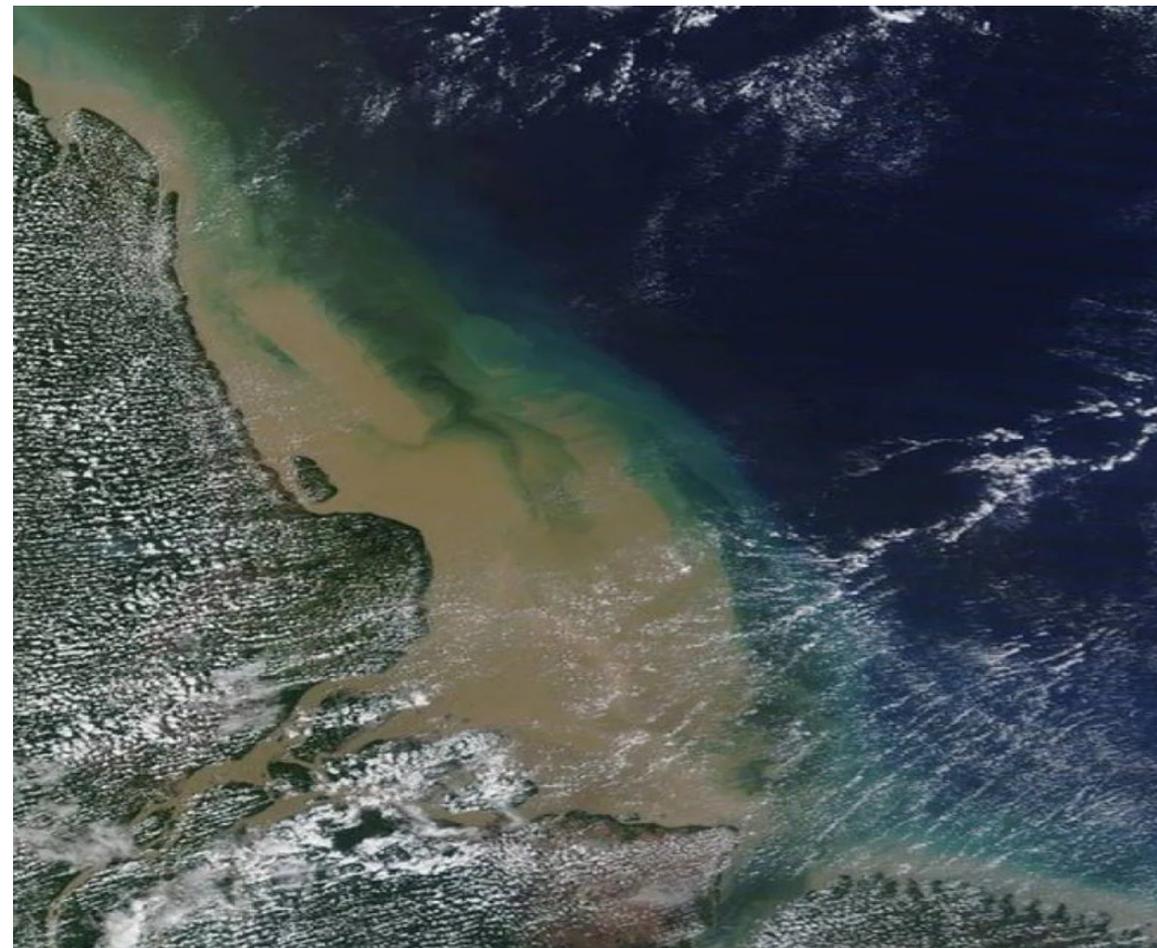
# Desenvolvimento de Base Hidrodinâmica para a Margem Equatorial Brasileira

Gabriel Clauzet

I CMMEB - Outubro/2024

Universidade Federal do Maranhão, São Luis - MA

- **Apresentação do projeto e equipe técnica**
- **Breve descrição dinâmica da Margem Equatorial Brasileira**
- **Etapas do Trabalho**
  - Análise de dados
  - Implementação, calibração e validação dos modelos numéricos:
    - Base ATL 1/12
    - Base MEB 1/36
    - Base FZA ~0.5-3km
    - Composição MEBFZA
- **Conclusões**

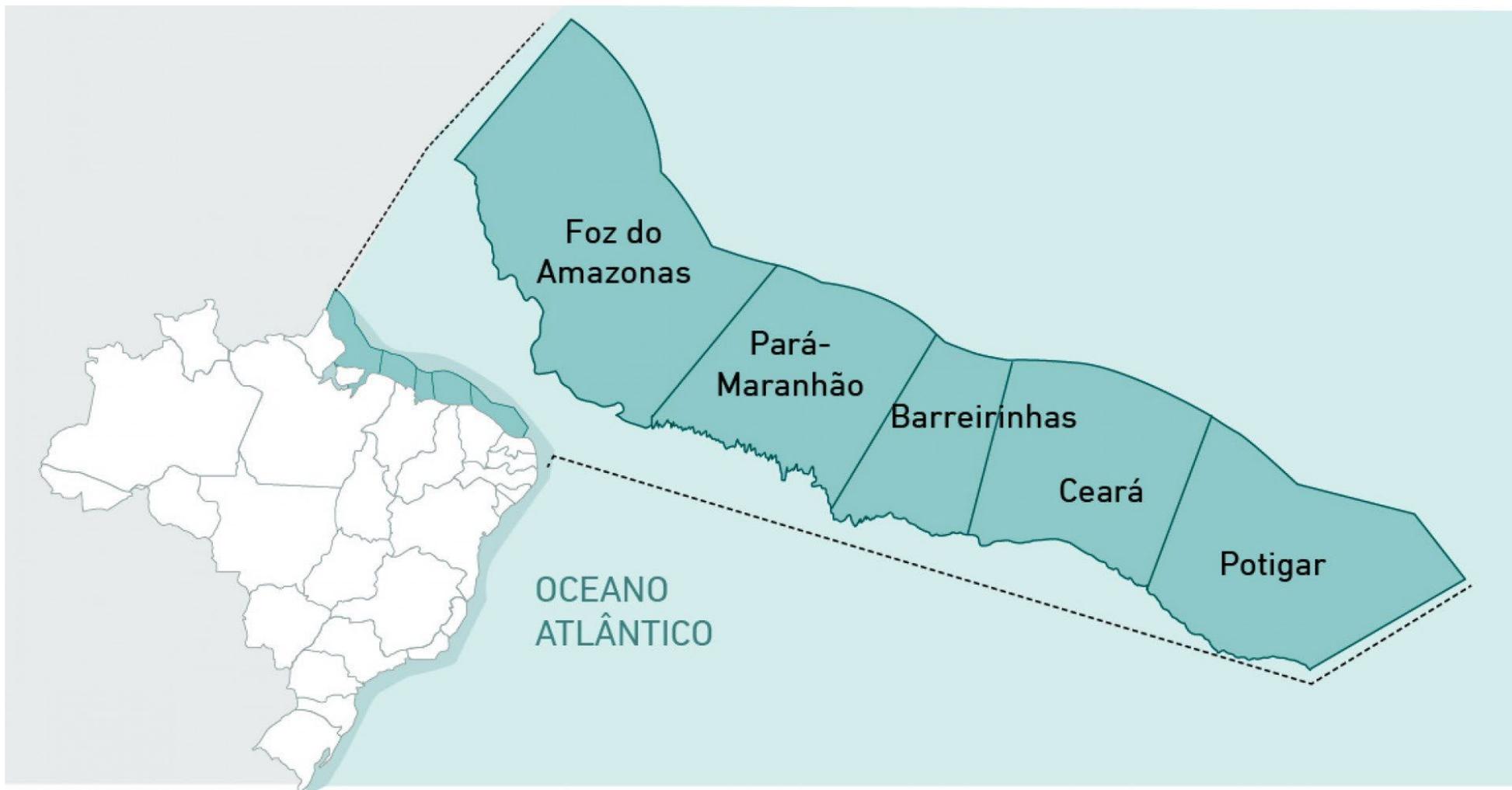


# Resumo do Projeto

- Pioneiro esforço conjunto de operadoras para o **Desenvolvimento de Base Hidrodinâmica para a região da Margem Equatorial Brasileira;**
- **Objetivo:** Base Hidrodinâmica composta por 10 anos contínuos com resolução espacial e temporal para resolver os processos de mesoescala, plataforma continental e a interação entre estes;
- **Duração:** Projeto entre Fevereiro/2020 e Novembro/2023;
- **Produtos Gerados:**
  - Cinco Relatórios Técnicos
  - 6.5 Tb de resultados numéricos disponibilizados (4 bases hidrodinâmicas)

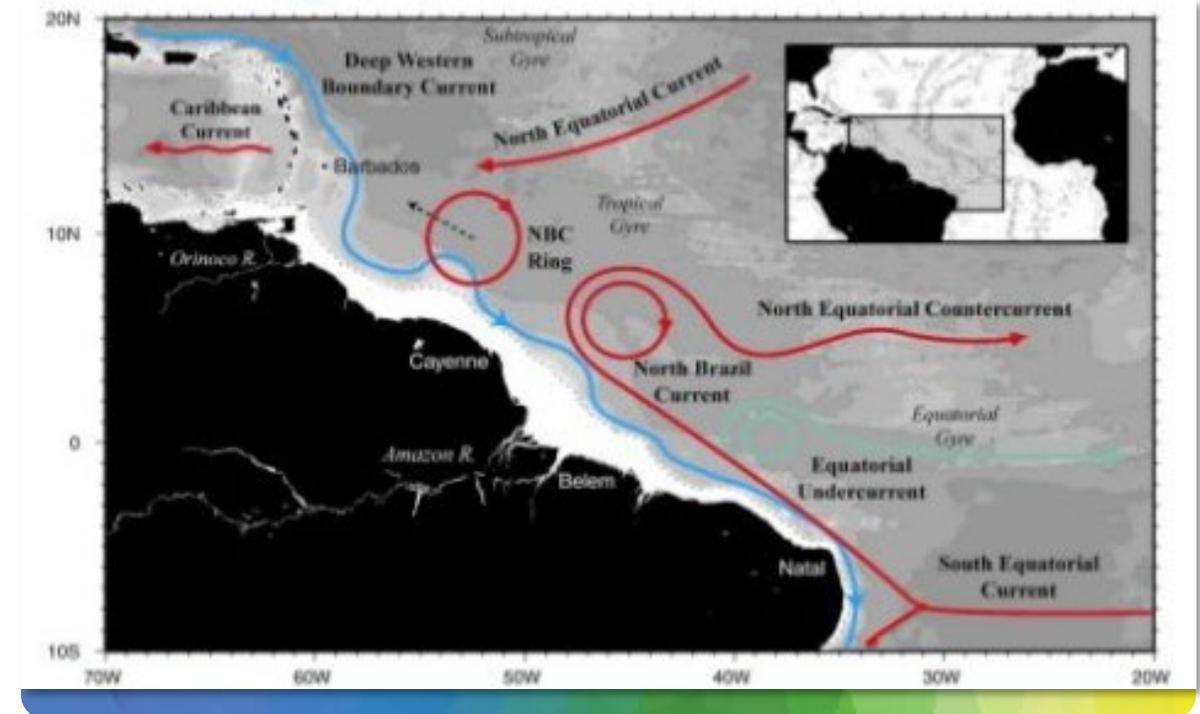


# Área de Foco do Estudo – 5 Bacias Sedimentares da MEB



# Dinâmica da Margem Equatorial Brasileira

- Em regiões profundas, a circulação oceânica é dominada pela Corrente Norte do Brasil em superfície, e pela Corrente de Contorno Oeste Profunda a partir de 2.000 m de profundidade.
- A CNB tem origem no ramo norte da bifurcação da Corrente Sul Equatorial, de onde ruma para NO fluindo ao longo do talude continental até aproximadamente 7°N, onde retroflete para leste alimentando a Contracorrente Norte Equatorial.
- A Corrente de Contorno Oeste Profunda - transporte da Água Profunda do Atlântico Norte para o hemisfério sul e junto a CNB são contrapartes do balanço de calor no Oceano Atlântico.
- Influência significativa dos padrões climatológicos em mesoescala (e.g. variação da ZCIT), refletindo-se na variabilidade dos padrões mais energéticos presentes na área.





1.

## ANÁLISE DE DADOS

- a) Dados Primários da Contratante (conjunto das operadoras) coletados nas bacias da MEq
- b) Levantamento de Dados Históricos (dados públicos medidos, reanálises, modelos, referências)

2.

## MODELAGEM NUMÉRICA

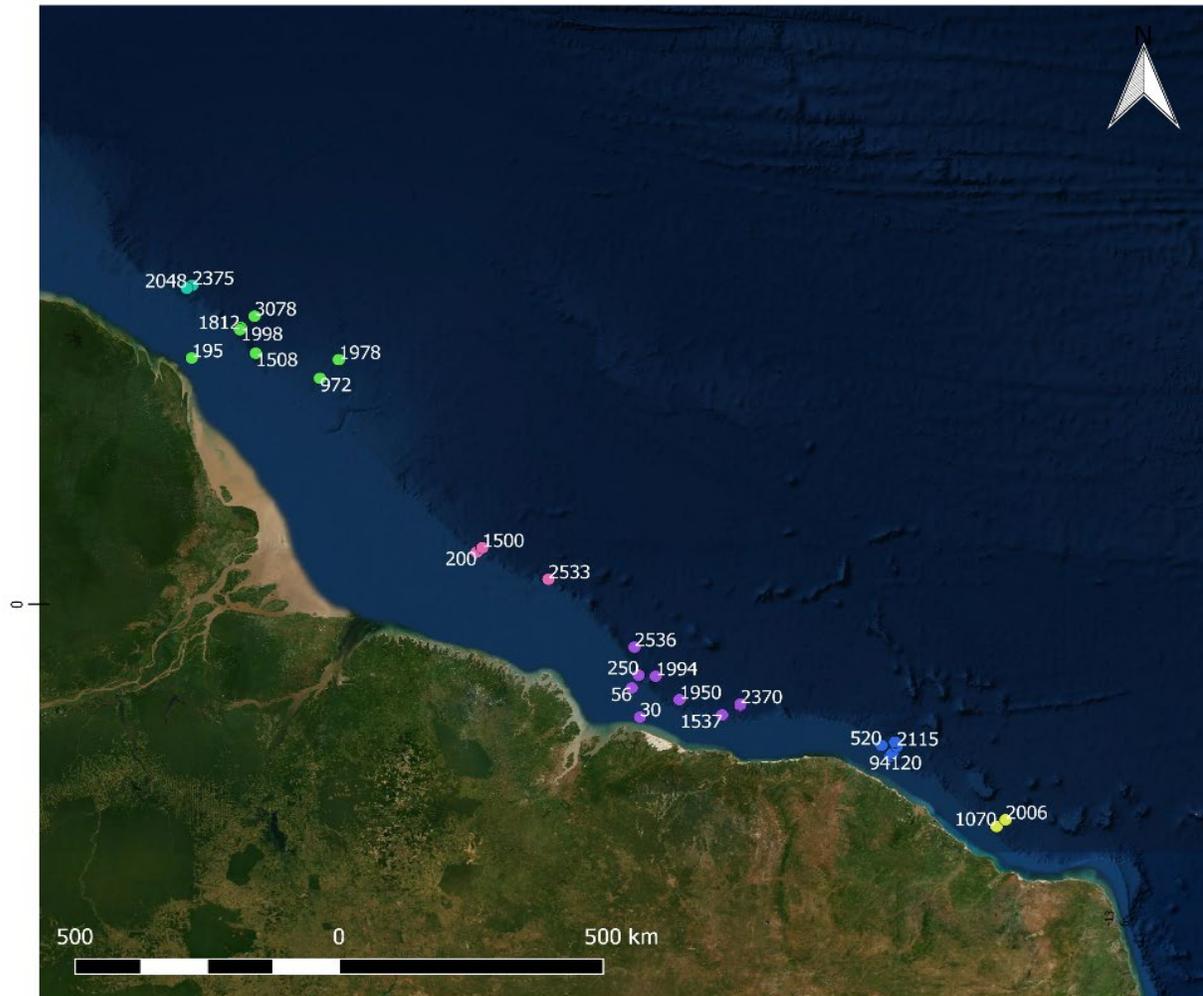
- Definição de domínio, forçantes, bordas, campos iniciais, fluxos, etc;
- Processo contínuo de calibração e validação dos resultados;
  - a) Modelo de Larga-Escala – ATL –  $1/12^\circ$
  - b) Modelo de Meso-Escala – MEB –  $1/36^\circ$
  - c) Modelo de Costeiro – FZA – 0.5 – 3 km

3.

## SIMULAÇÃO DE LONGO PRAZO (10 ANOS)

- a) Composição MEB e FZA - MEBFZA

# Análise de Dados Primários Coletados na MEB



## FUNDEIOS

### Legenda

Profundidade Local (m)

Bacias

- BAR
- CE
- FZA
- Guiana
- PAMA
- POT

### NOTAS TÉCNICAS:

- Projeção: Coordenadas Geográficas
- Datum: SIRGAS 2000
- Escala: 1:10000000

“Dados medidos” = dados pré-existentes públicos (pontuais ou gradeados)

## Meteorológicos

- INMET: temperatura do ar, pressão, precipitação, velocidade e direção do vento;
- METAR: temperatura do ar, pressão, velocidade e direção do vento;
- PNBOIA: temperatura do ar, velocidade e direção do vento;
- SiMCosta: temperatura do ar, velocidade e direção do vento.
- ANA: chuva e vazão.

## Oceanográficos

- PNBOIA: temperatura da superfície do mar, velocidade e direção da corrente;
- SiMCosta: nível do mar;
- GLOSS: nível do mar;
- AVISO: nível do mar;
- ICOADS: Variáveis oceano-atmosfera;
- OISST: temperatura e salinidade da superfície do mar;
- WOA18: climatologia de temperatura e salinidade.
- PIRATA: temperatura da superfície do mar, velocidade e direção da corrente.

# Análise de Dados Históricos – Reanálises e Modelos

“Dados de reanálise” = resultados (produtos) de consórcios científicos envolvendo a execução de modelos globais e o uso de processos de ajustes utilizando-se observações como satélites e mesmo bases climatológicas bem estabelecidas

## Meteorológicos

- Reanálise do CFSR: temperatura do ar, velocidade e direção do vento.
- Reanálise ERA 5: Variáveis atmosféricas.

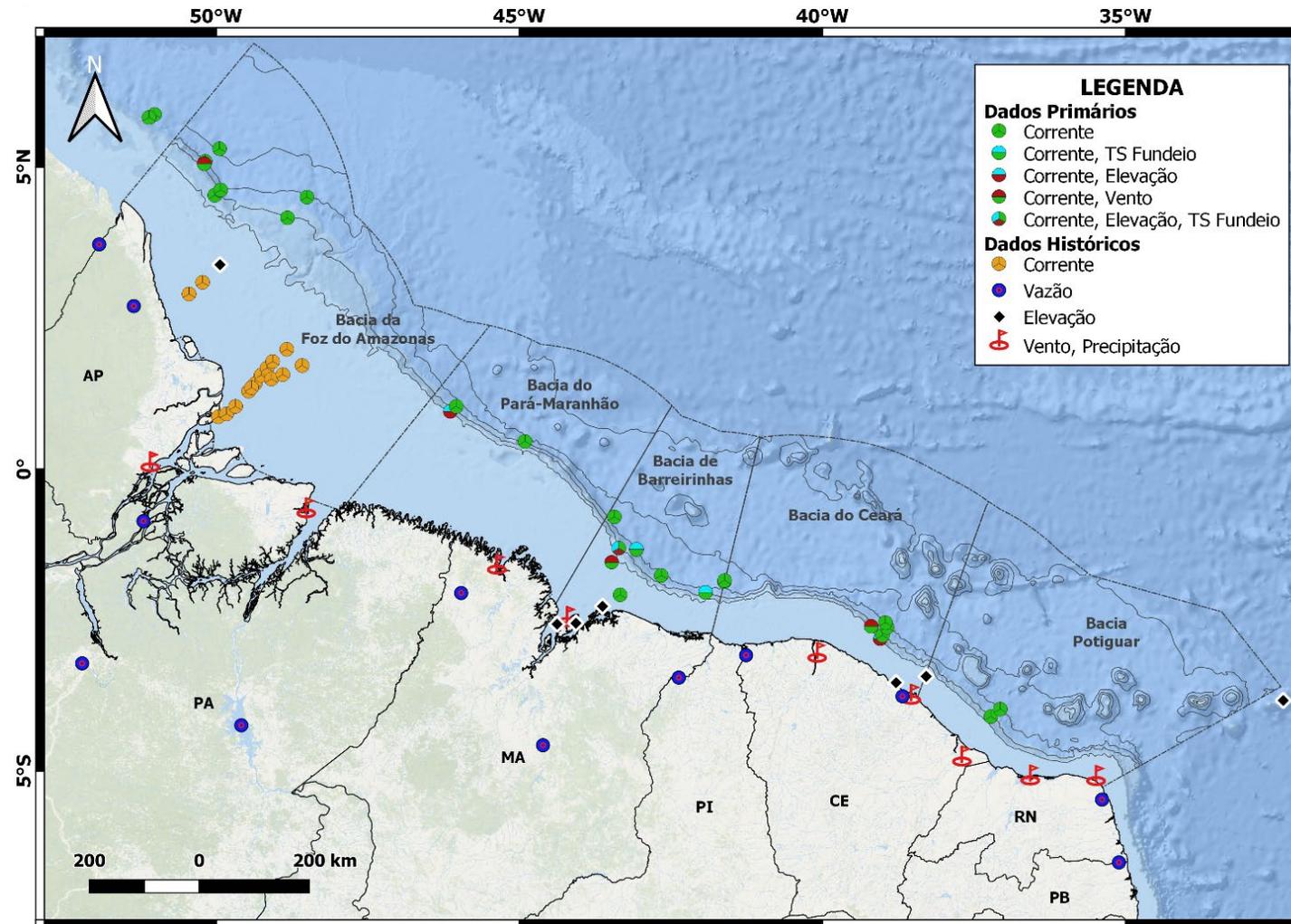
## Oceanográficos

- Reanálise do CFSR: nível médio do mar.

## Modelos Numéricos Oceanográficos

- CSR3: dados de amplitude e fase de maré;
- FES2014: :dados de amplitude e fase de maré.
- HYCOM Consortium
- MERCATOR

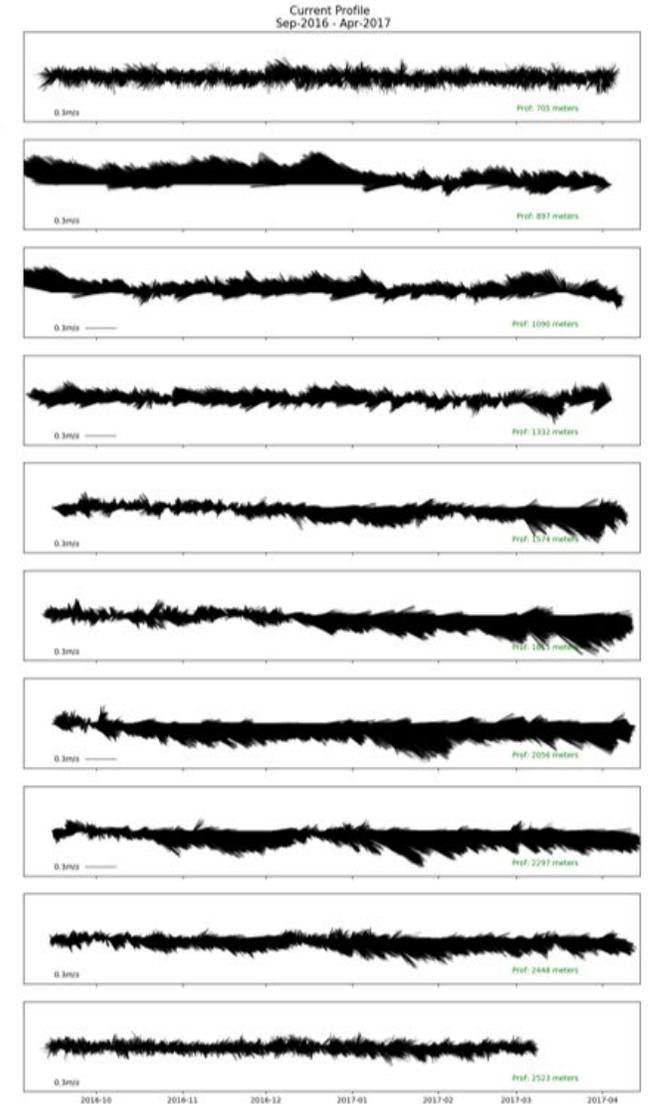
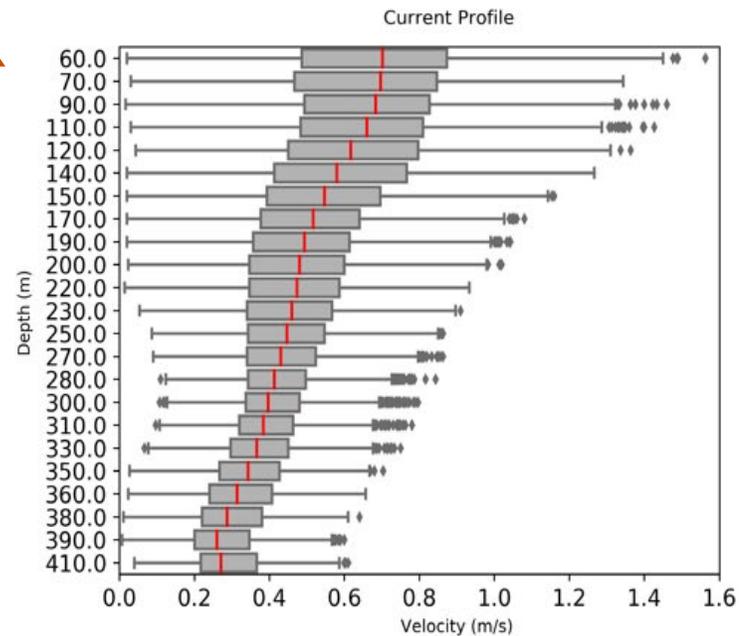
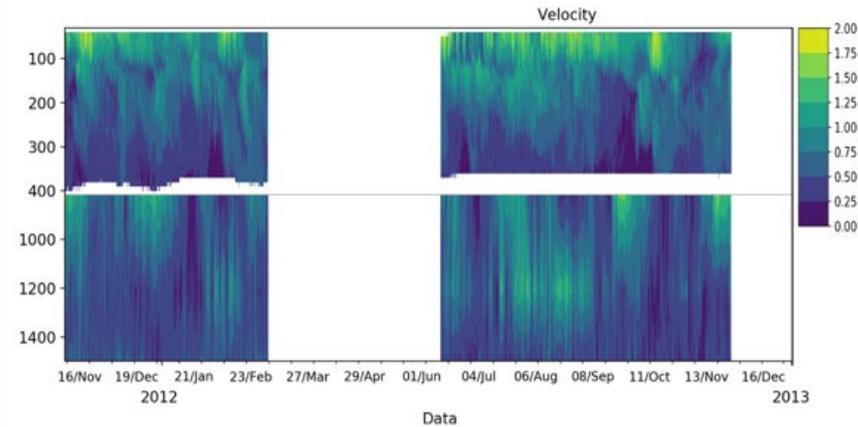
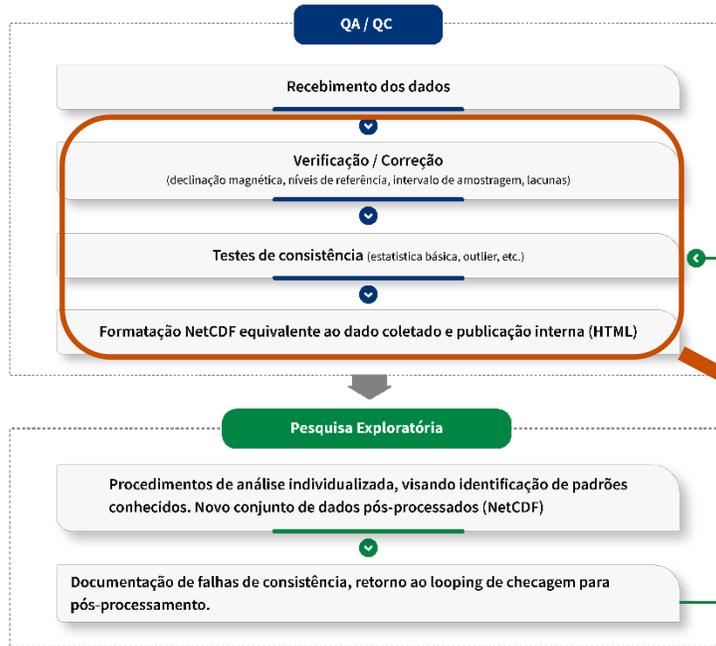
# Análise de Dados Considerados na MEB



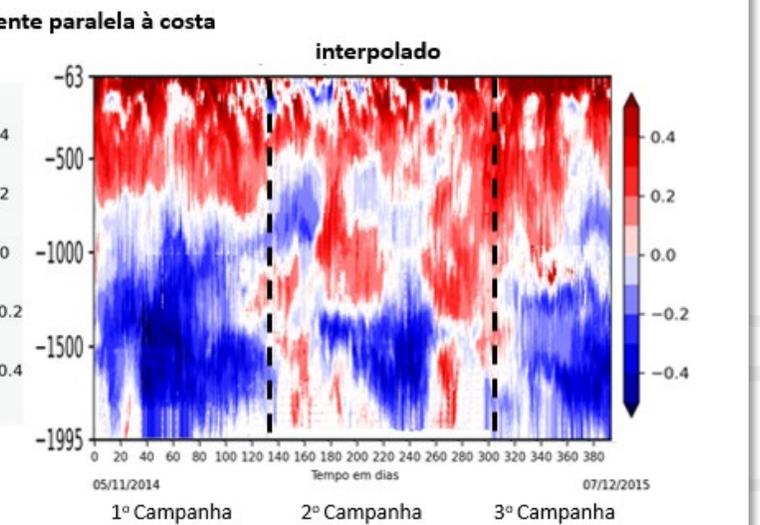
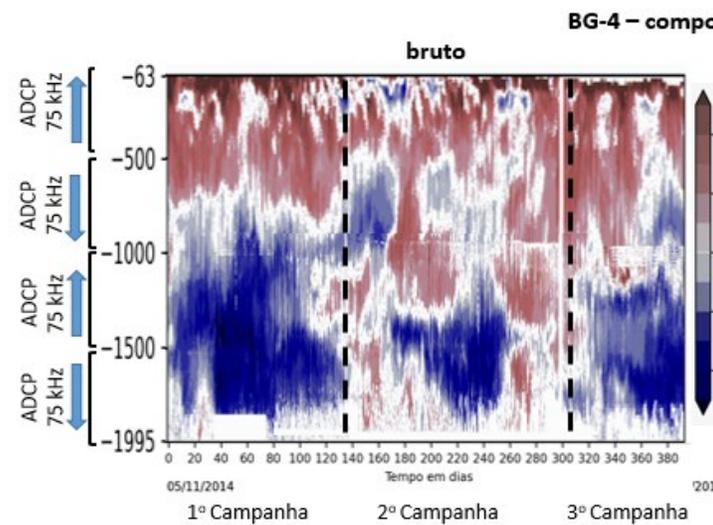
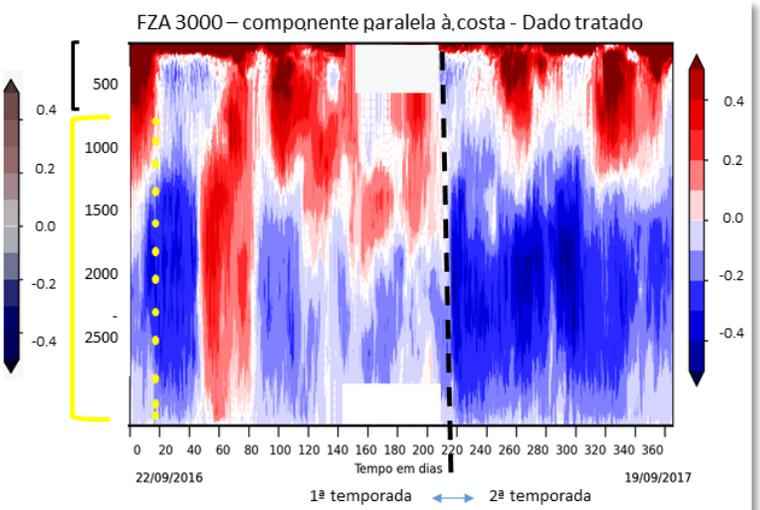
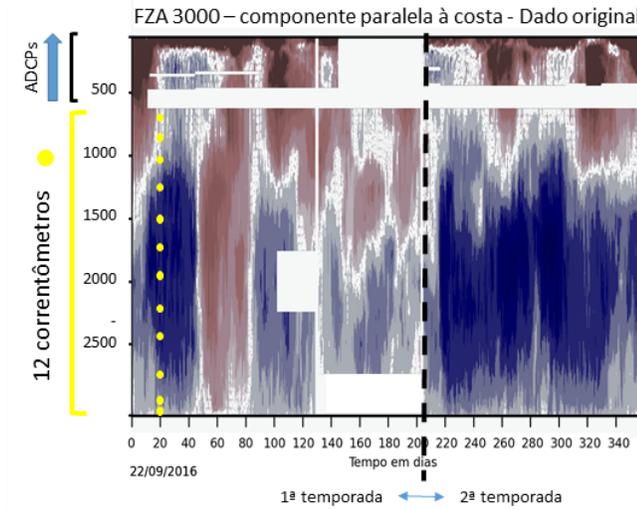
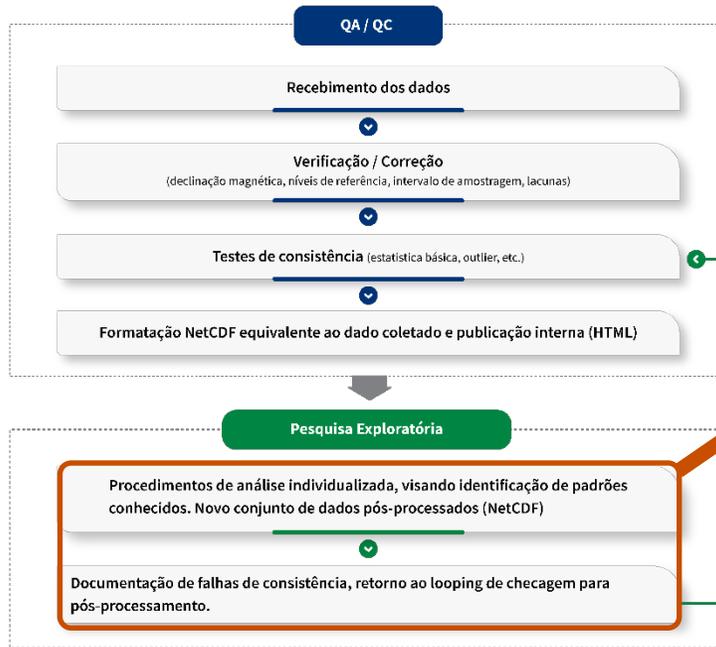
# Processamento dos Dados



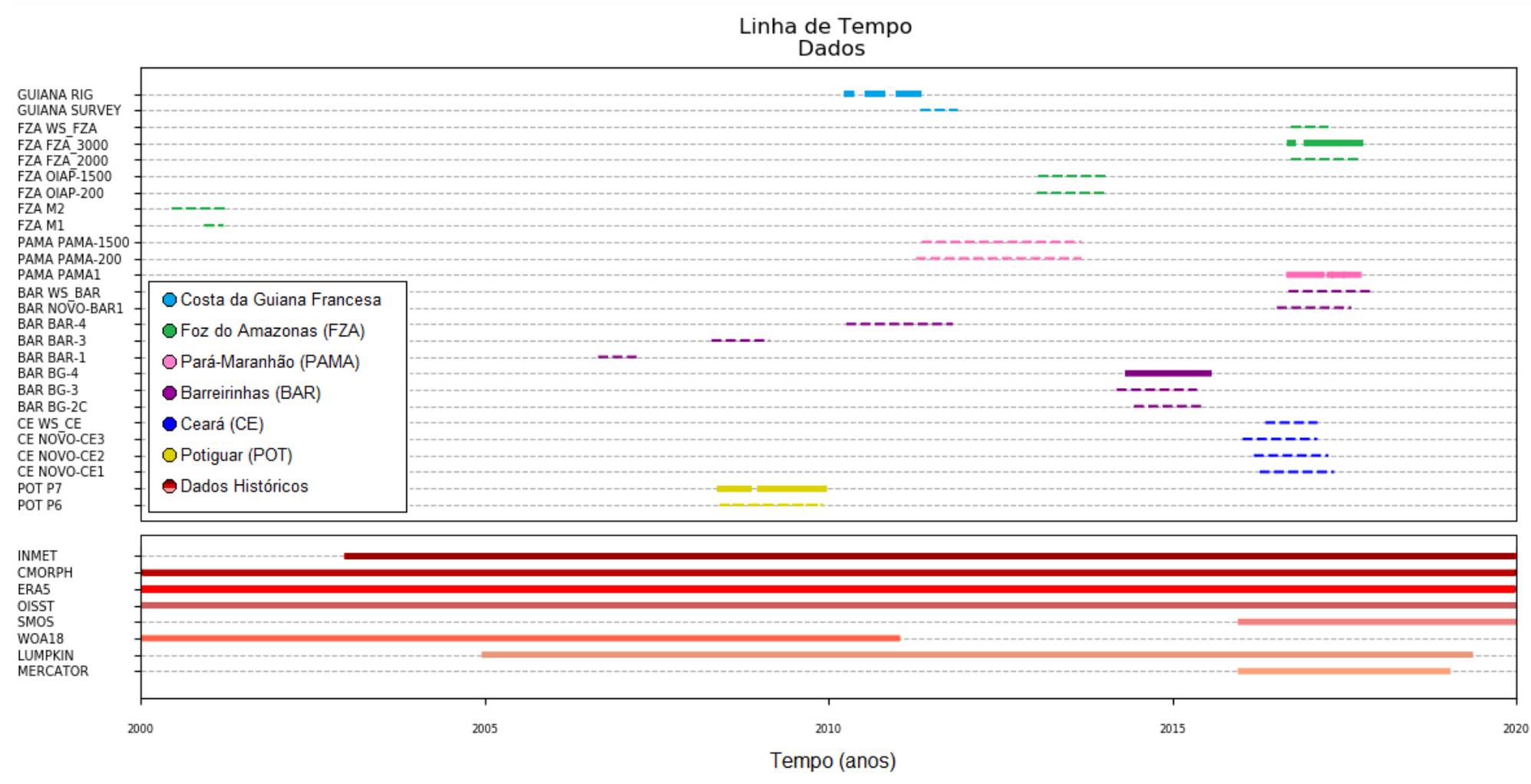
# Processamento dos Dados



# Processamento dos Dados



# Análise de Dados – Disponibilidade Temporal



## HYCOM - Hybrid Coordinates Ocean Model

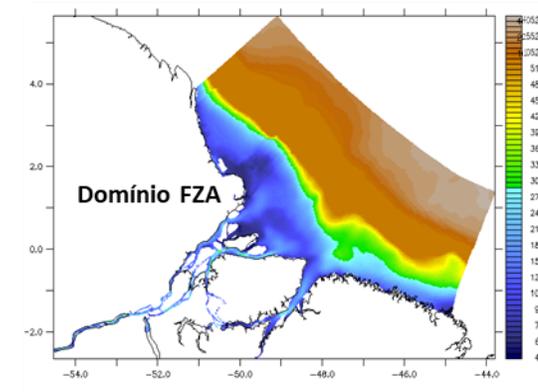
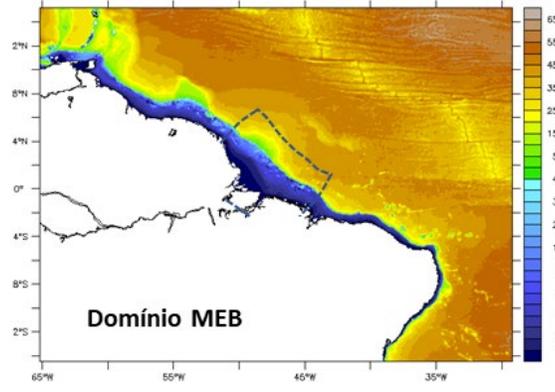
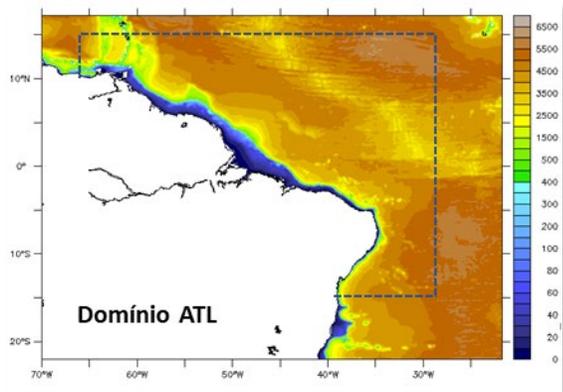
- O HYCOM representa o estado da arte em modelo de circulação geral do oceano (OGCM), com coordenadas verticais híbridas.
- O termo “híbrido” refere-se ao sistema de coordenadas que permanece isopical (*densidade constante*) no oceano aberto estratificado, mas pode mudar para coordenadas Z na camada superior de mistura, menos estratificada, e então para coordenadas sigma, acompanhando o terreno, sobre a plataforma continental e regiões de águas rasas.

## Modelo Hidrodinâmico DELFT3D

- O módulo hidrodinâmico Delft3D representa o estado da arte em modelo numérico para águas rasas, estuarinas, lagunares e fluviais.
- O Delft3D resolve as equações de águas rasas tridimensionais, permitindo serem forçados com resultados obtidos a partir de modelos larga escala para elevação e correntes.



## Domínios Implementados

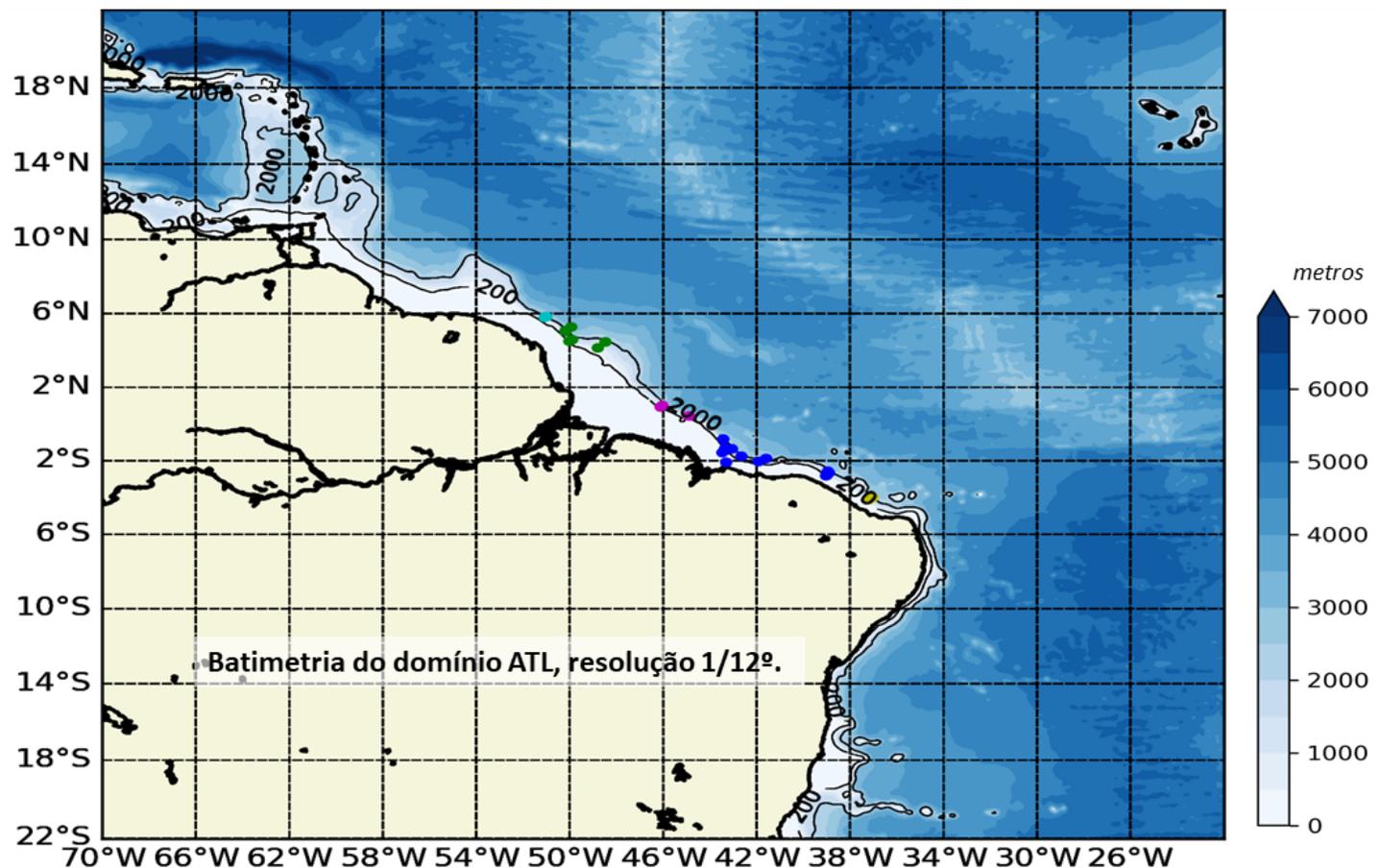


| Características                              | Nome de Referência | Distribuição da grade | Numero de camadas     | Resolução temporal           |
|--|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| Modelo Global: forçantes oceânicas primárias | Hycot 1/4          | 1440 × 720            | 75 isopicnal          | diário                       |
| Modelo de conexão entre escalas              | ATL                | 580x 481              | 33 camadas Levitus    | diário                       |
| Modelo principal                             | MEB                | 1272 × 1060           | 33 camadas Levitus    | horário (2D)<br>3 horas (3D) |
| Modelo Costeiro                              | FZA                | 482 × 252             | 11 camadas (até 200m) | horário (3D)                 |

## Processo de Avaliação da Modelagem

- A avaliação dos resultados do sistema de modelagem, e conseqüentemente da qualidade da base hidrodinâmica desenvolvida, foi realizada tanto de forma qualitativa quanto quantitativa;
- Primeiramente, foram avaliadas características do fluxo médio, padrões de circulação e feições conhecidas em locais chave, buscando analisar a capacidade do modelo em reproduzir todos os processos físicos e padrões gerais conforme literatura;
- Posteriormente a acurácia do modelo foi quantificada através da comparação direta com dados locais disponíveis, usando métricas estatísticas.

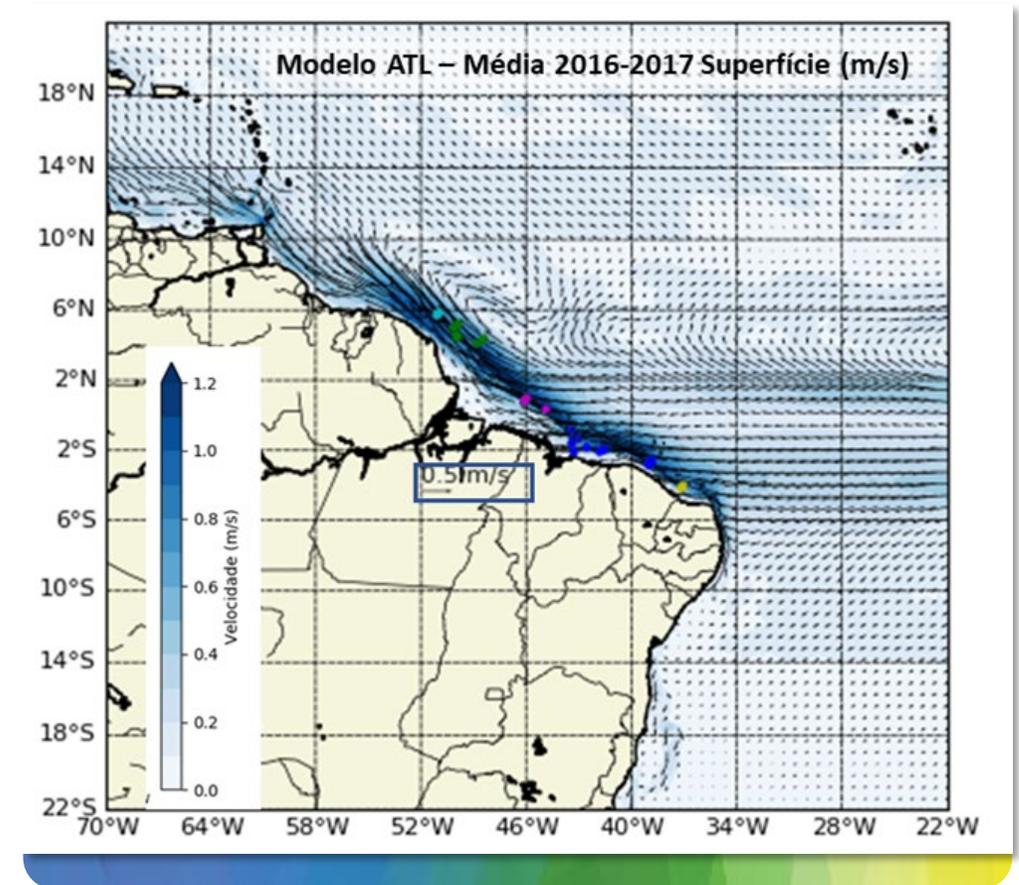
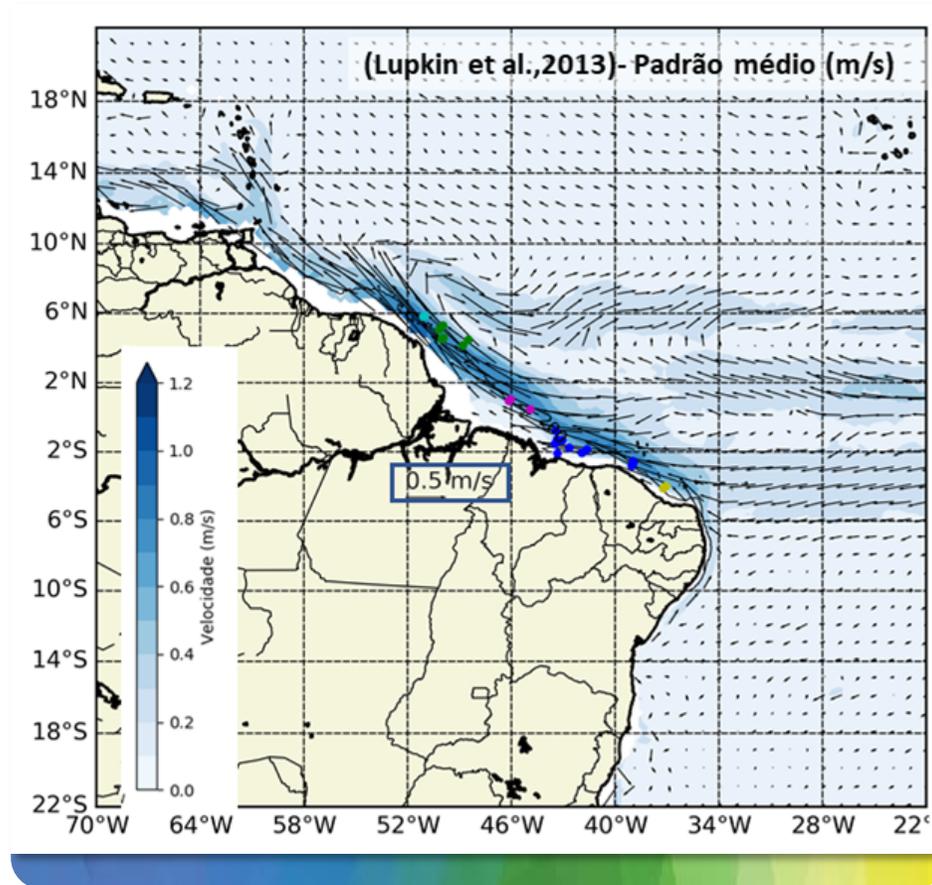
## Resultados – ATL – 1/12°



*Batimetria foi gerada a partir de uma base de dados compostas, foram usados dados do ETOPO1 para regiões profundas, combinadas ao GEBCO para regiões com profundidades menores que 200 metros, devido à maior resolução.*

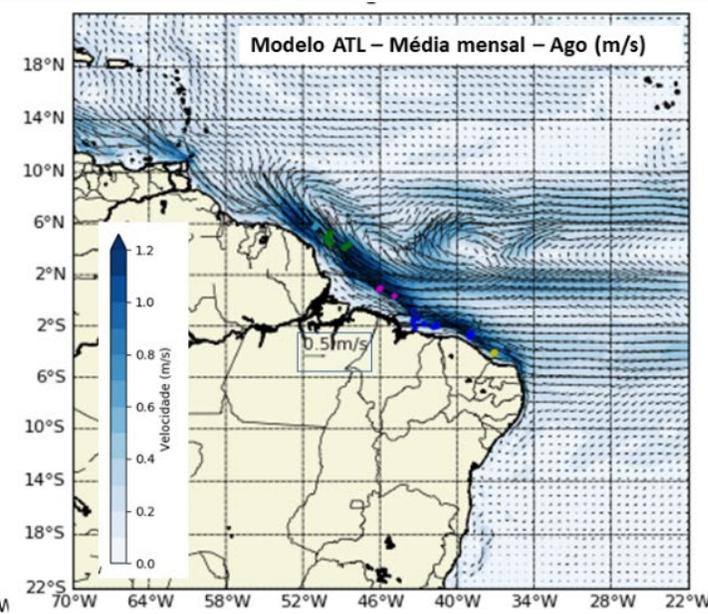
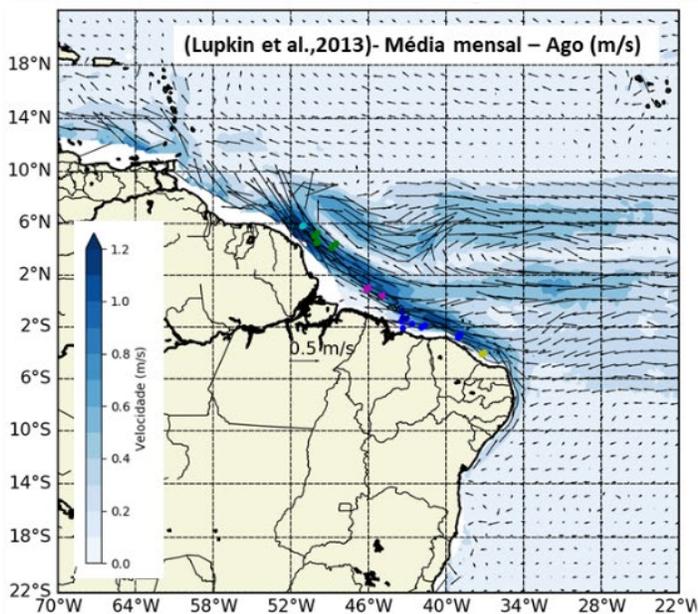
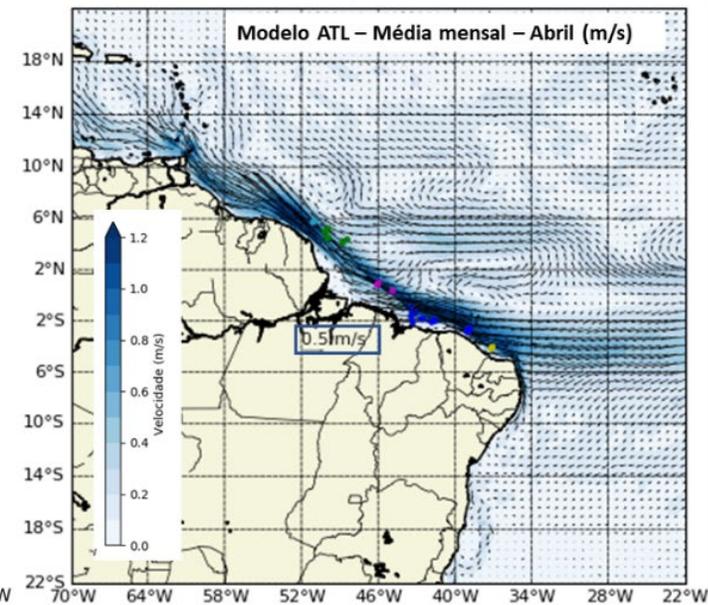
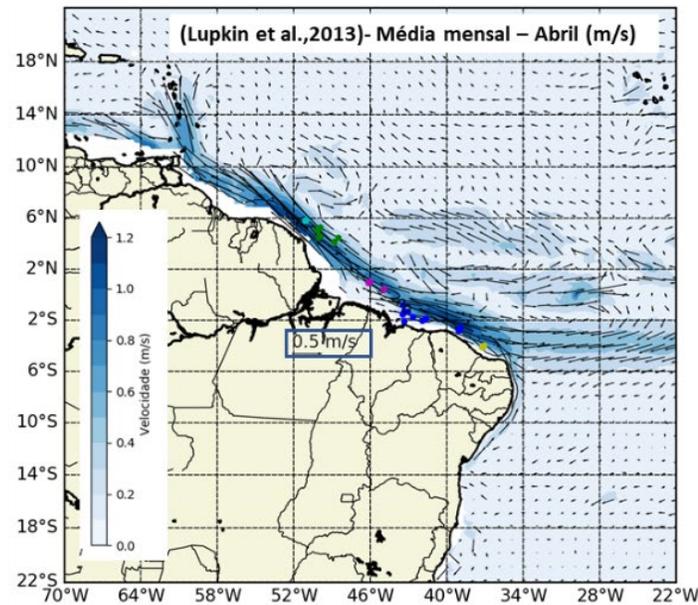
# Resultados – ATL – 1/12°

## Padrão Anual de Circulação Superficial – Modelo x Dados



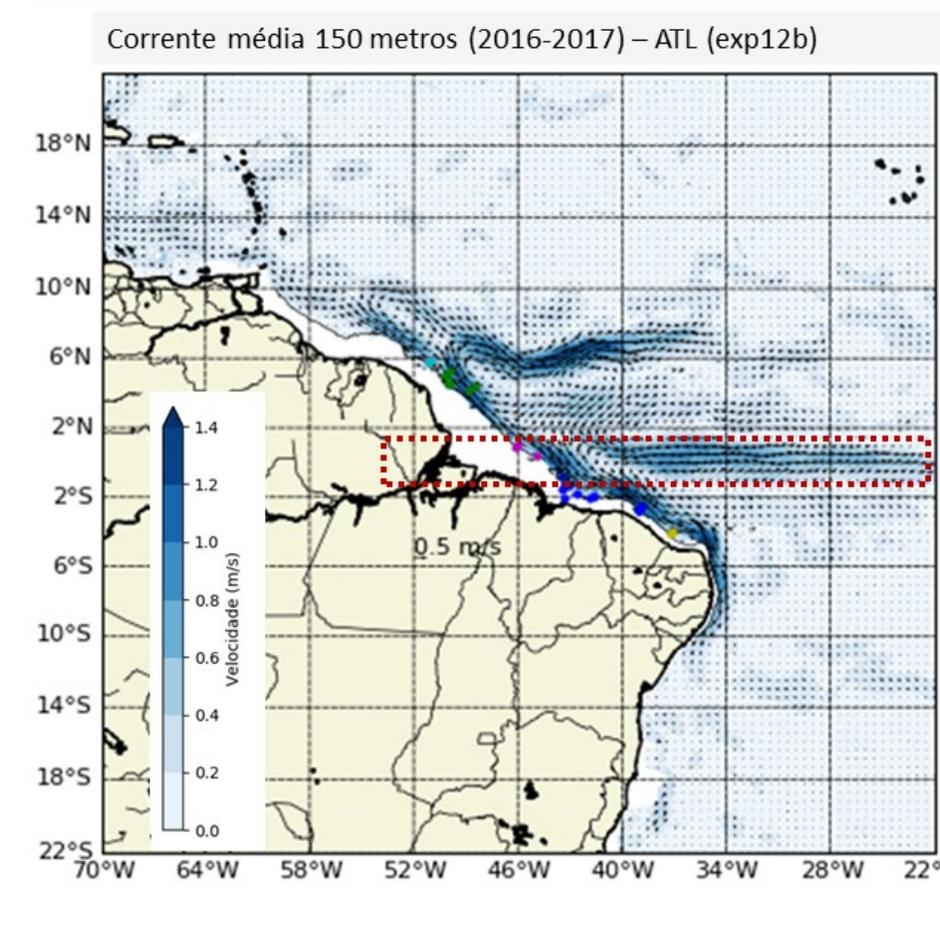
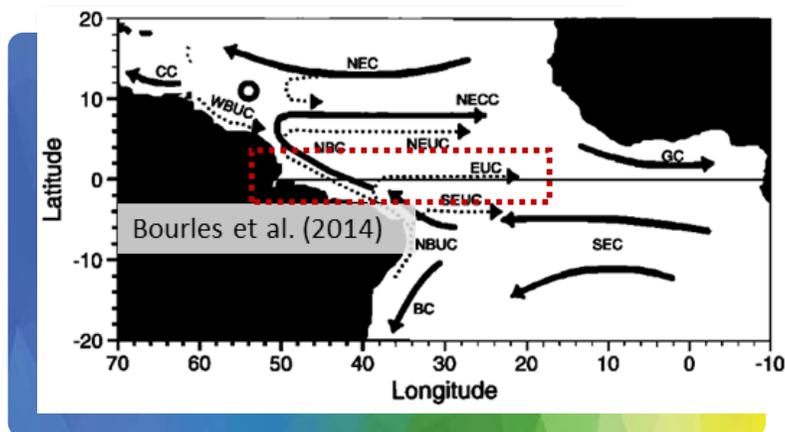
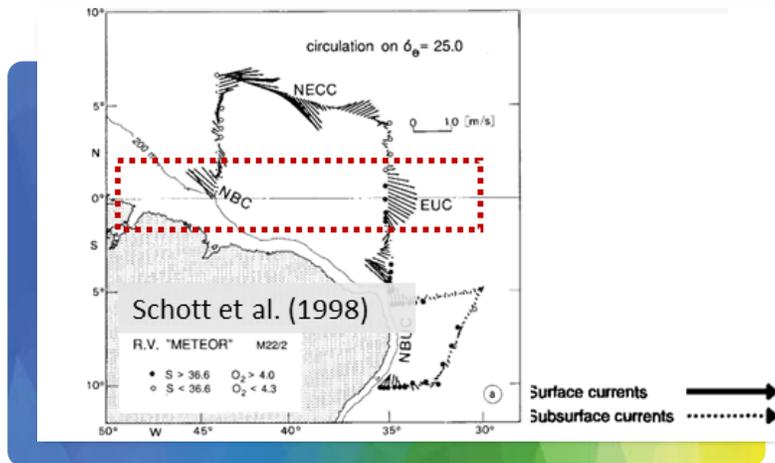
# Resultados – ATL – 1/12°

## Padrão Sazonal – Modelo x Dados



# Resultados – ATL – 1/12°

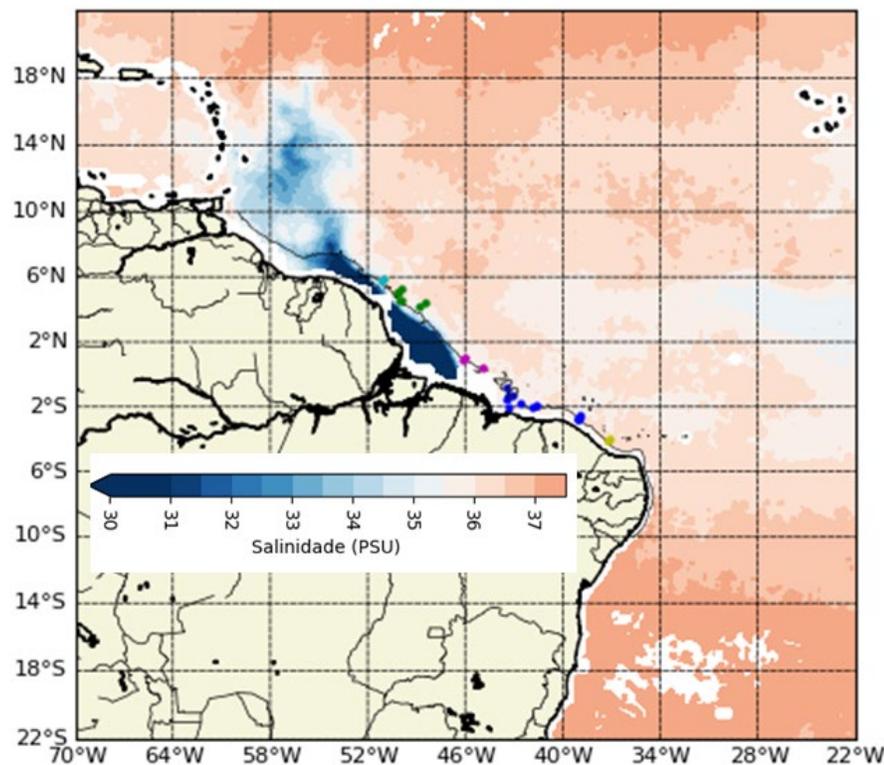
## Padrão Anual de Circulação de Sub-Superfície – Modelo x Literatura



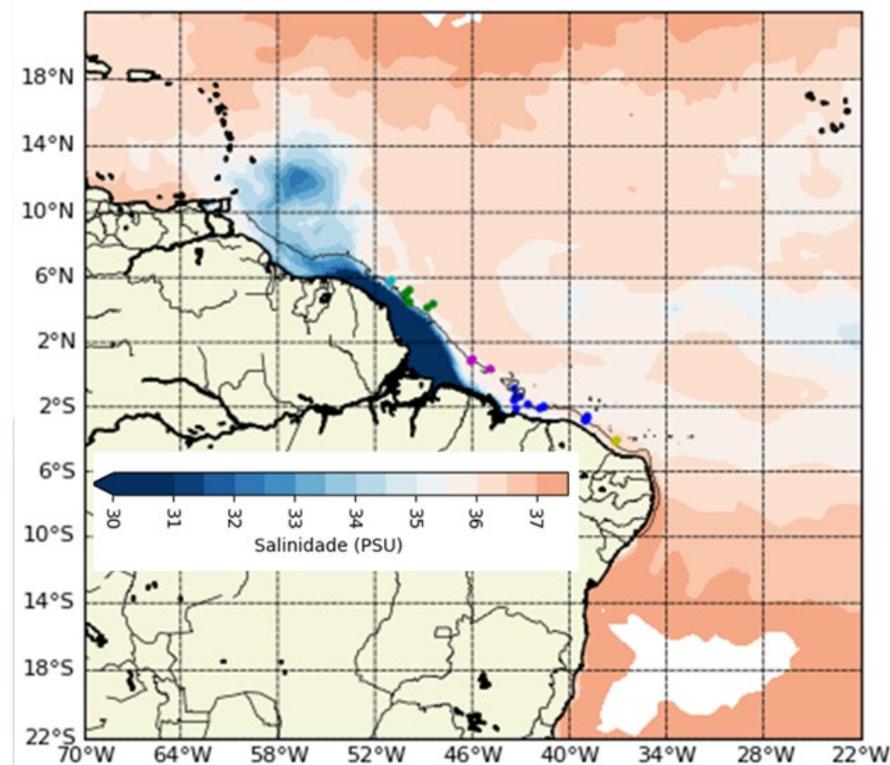
# Resultados – ATL – 1/12°

## Circulação de Meso-Escala – Vórtices da NBC – Salinidade Supercifial

Salinity SMOS - snapshot:  
15/04/2017 00:00

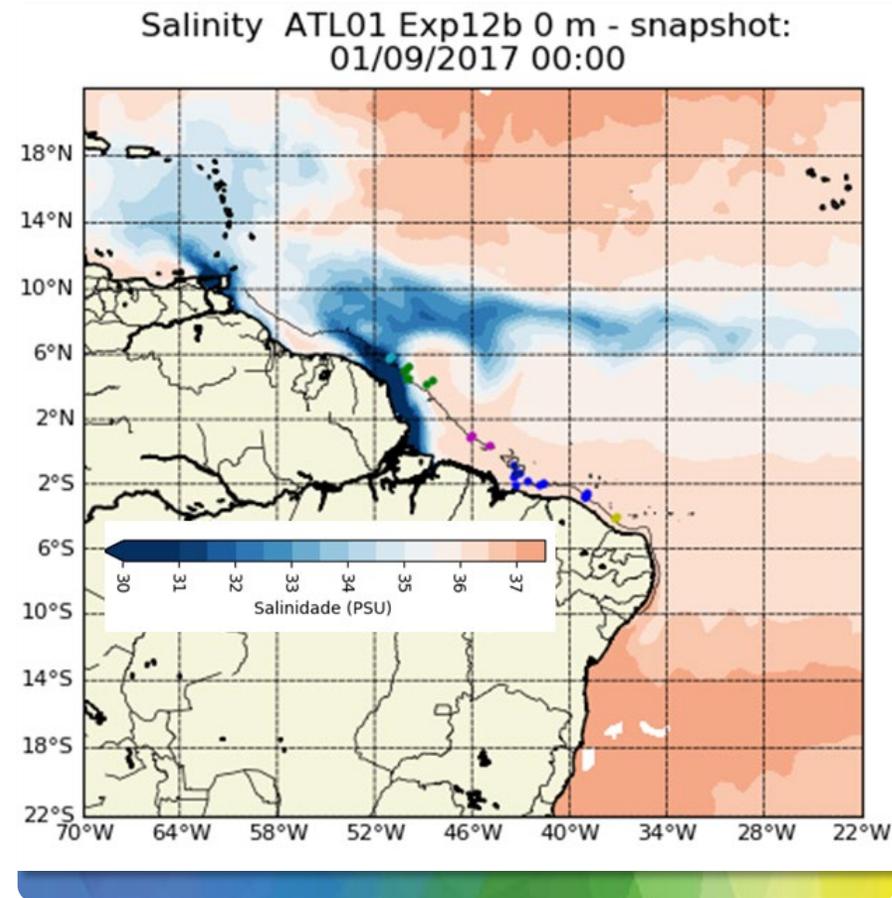
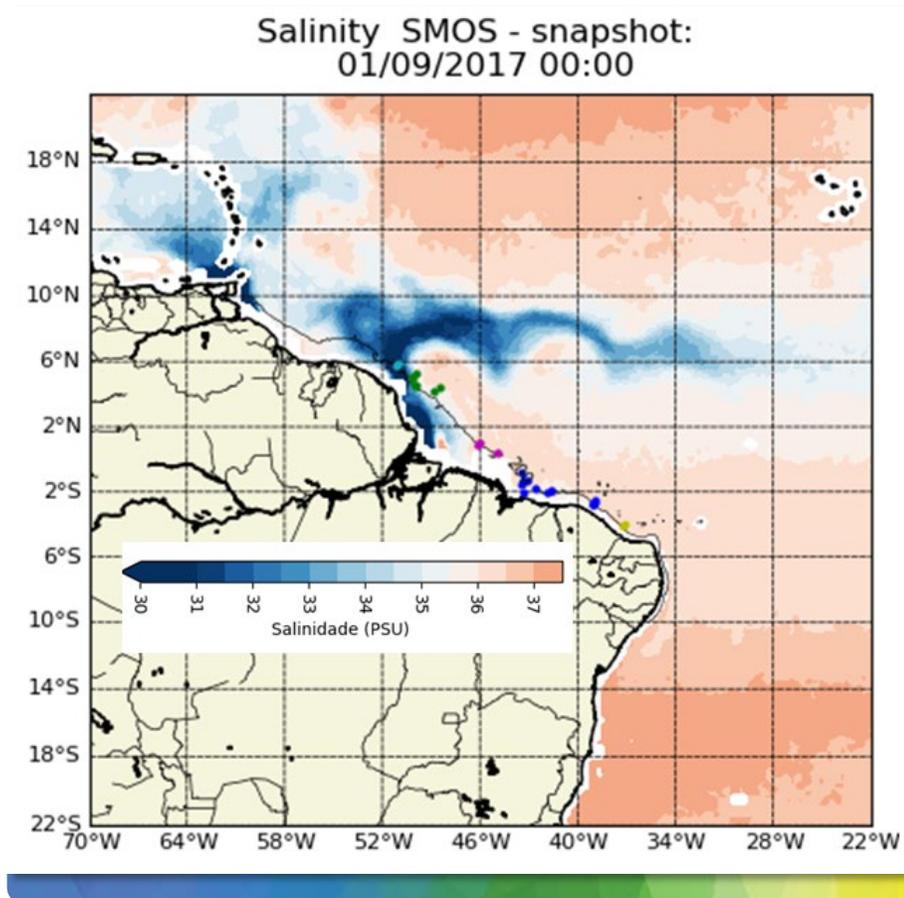


Salinity ATL01 Exp12b 0 m - snapshot:  
10/04/2017 00:00



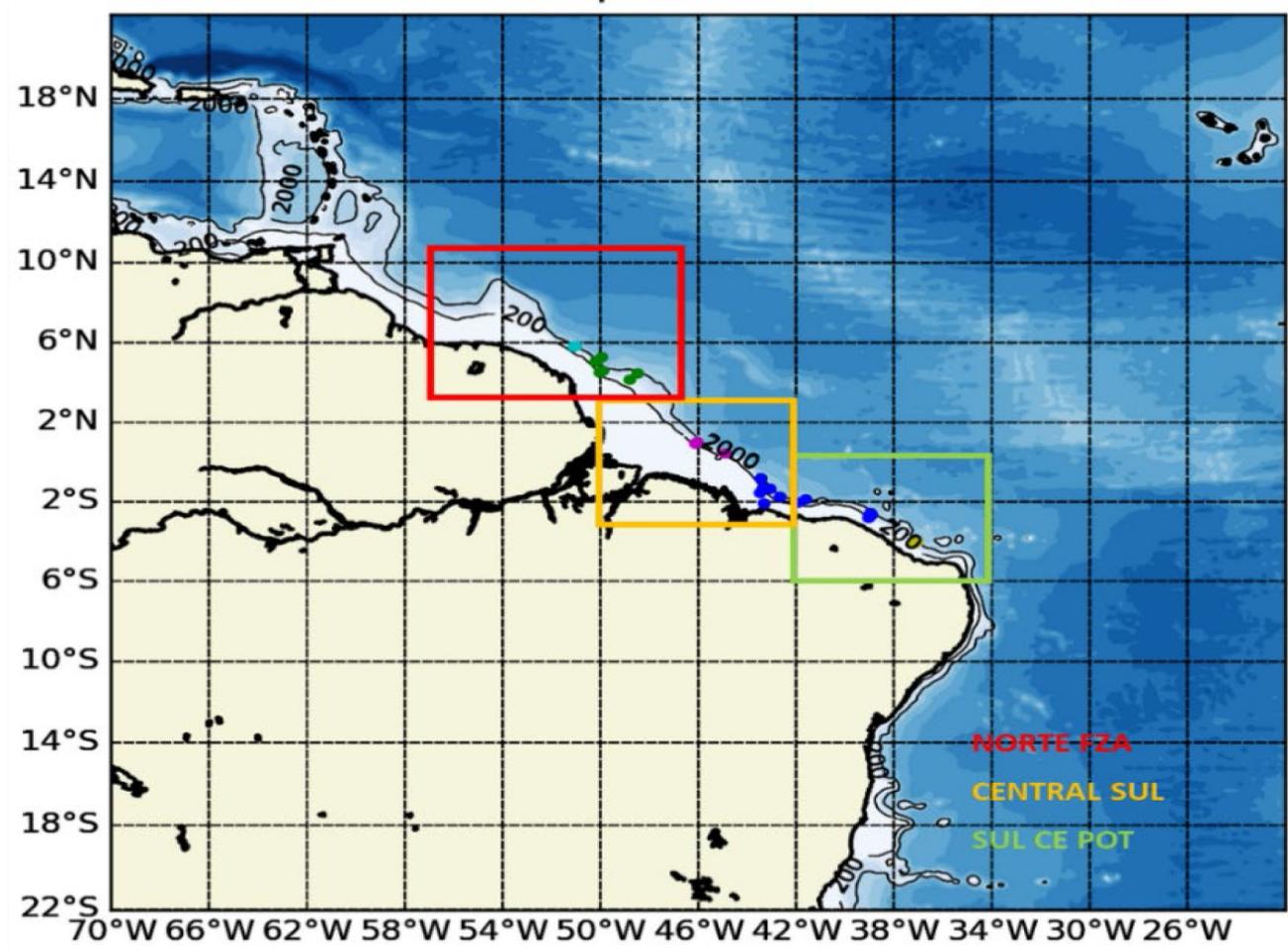
# Resultados – ATL – 1/12°

## Circulação de Meso-Escala – Retroflexão da CNB – Salinidade Superficial



# Resultados – ATL – 1/12°

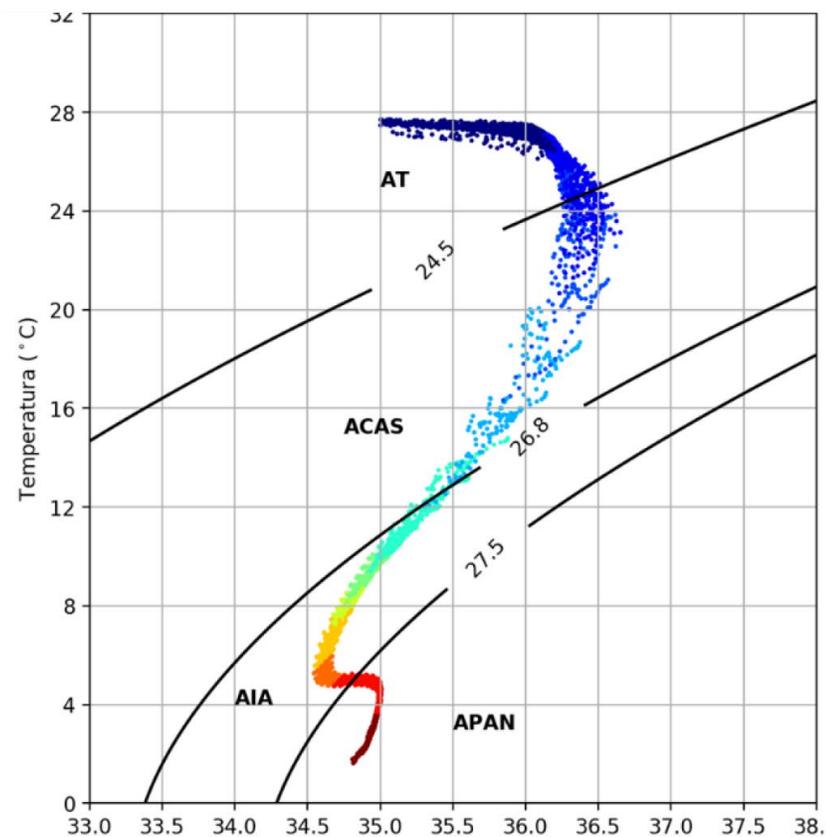
## Massas d'Água



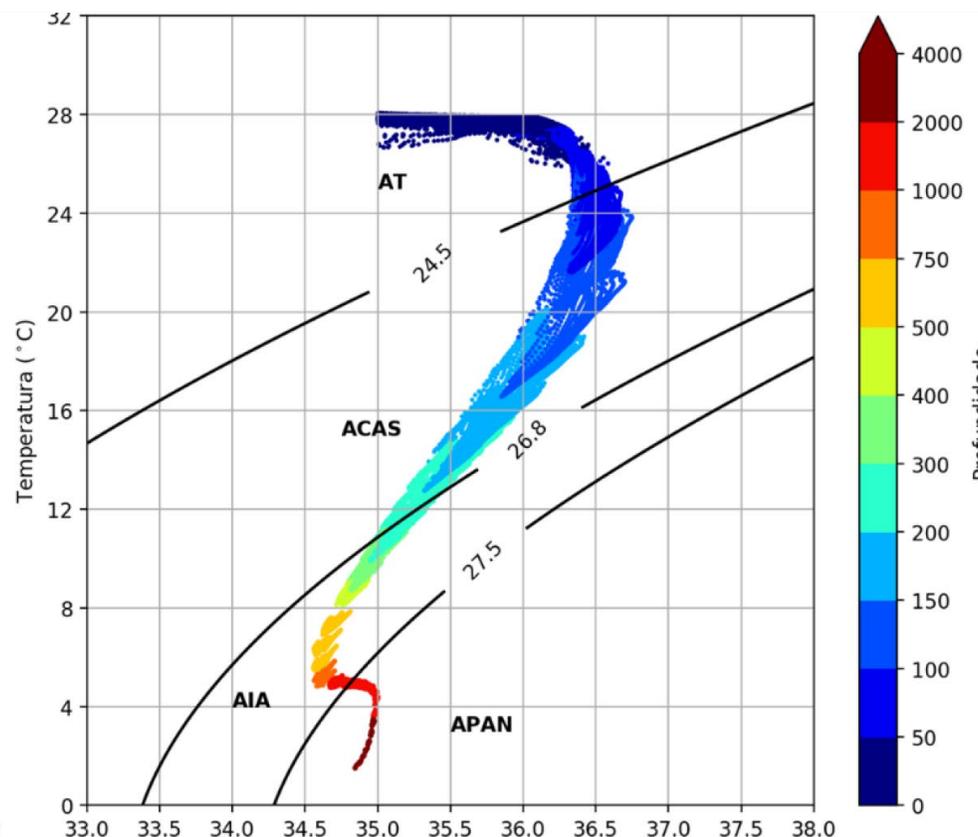
# Resultados – ATL – 1/12°

## Massas d'Água – Área Norte

### WOA18

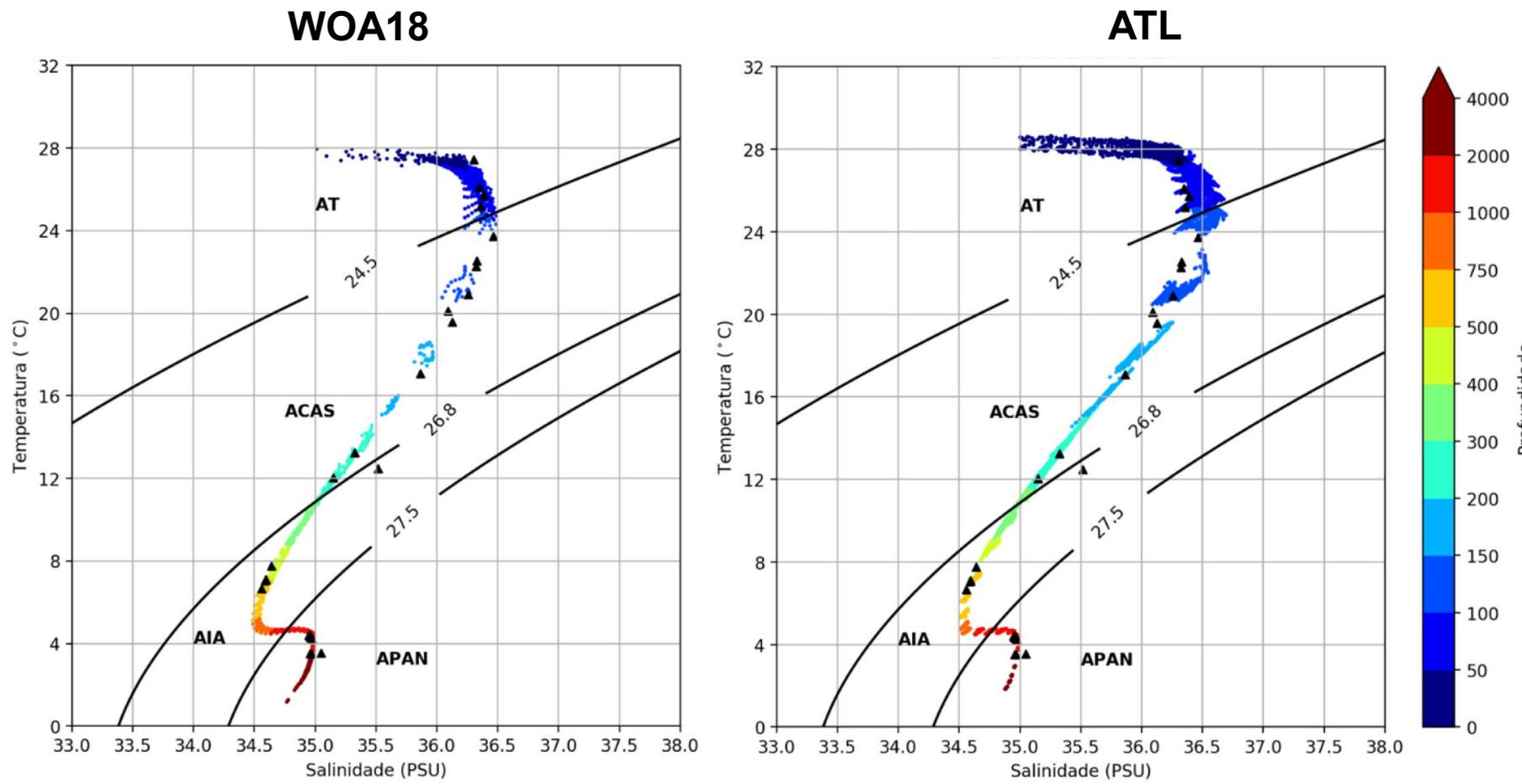


### ATL



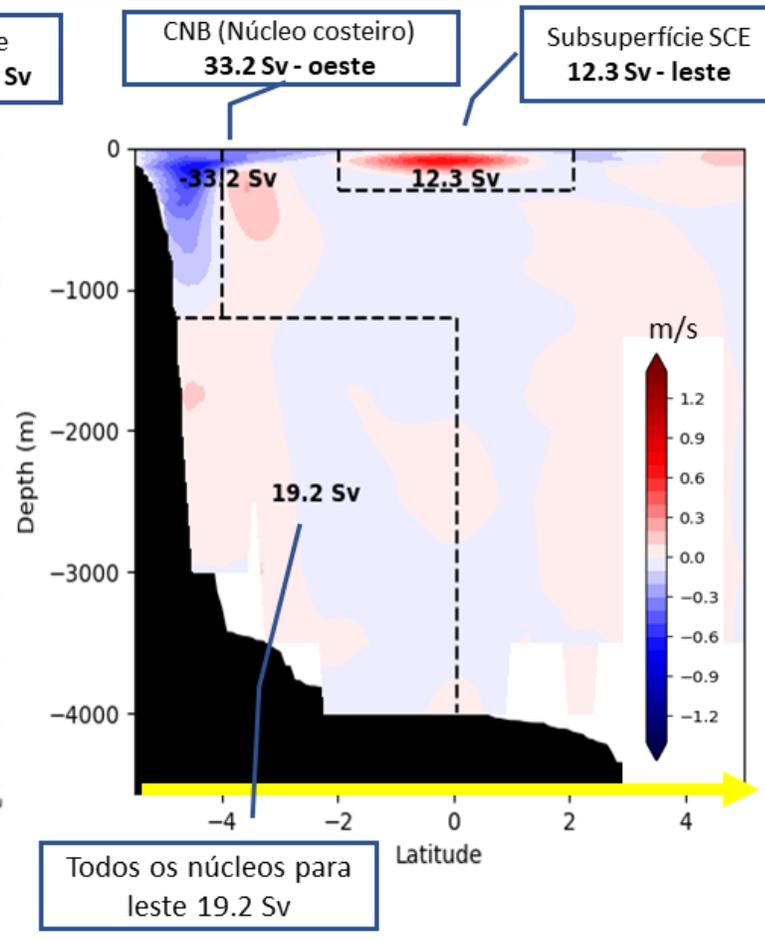
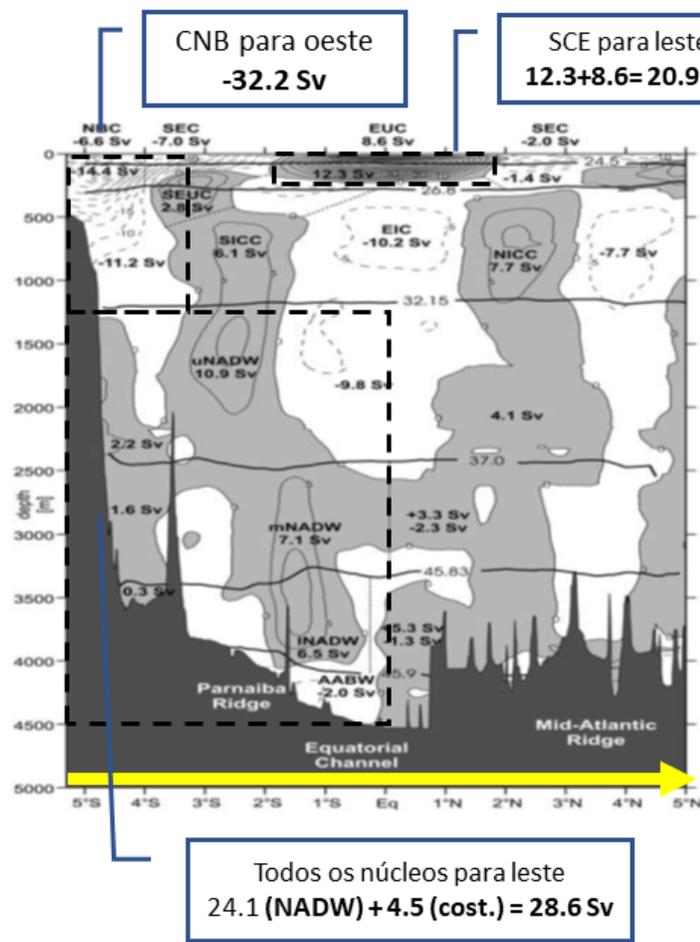
# Resultados – ATL – 1/12°

## Massas d'Água – Área Central

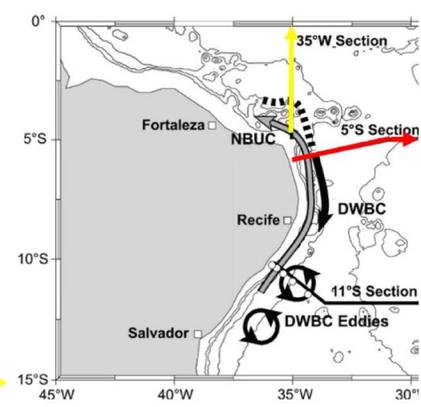


# Resultados – ATL – 1/12°

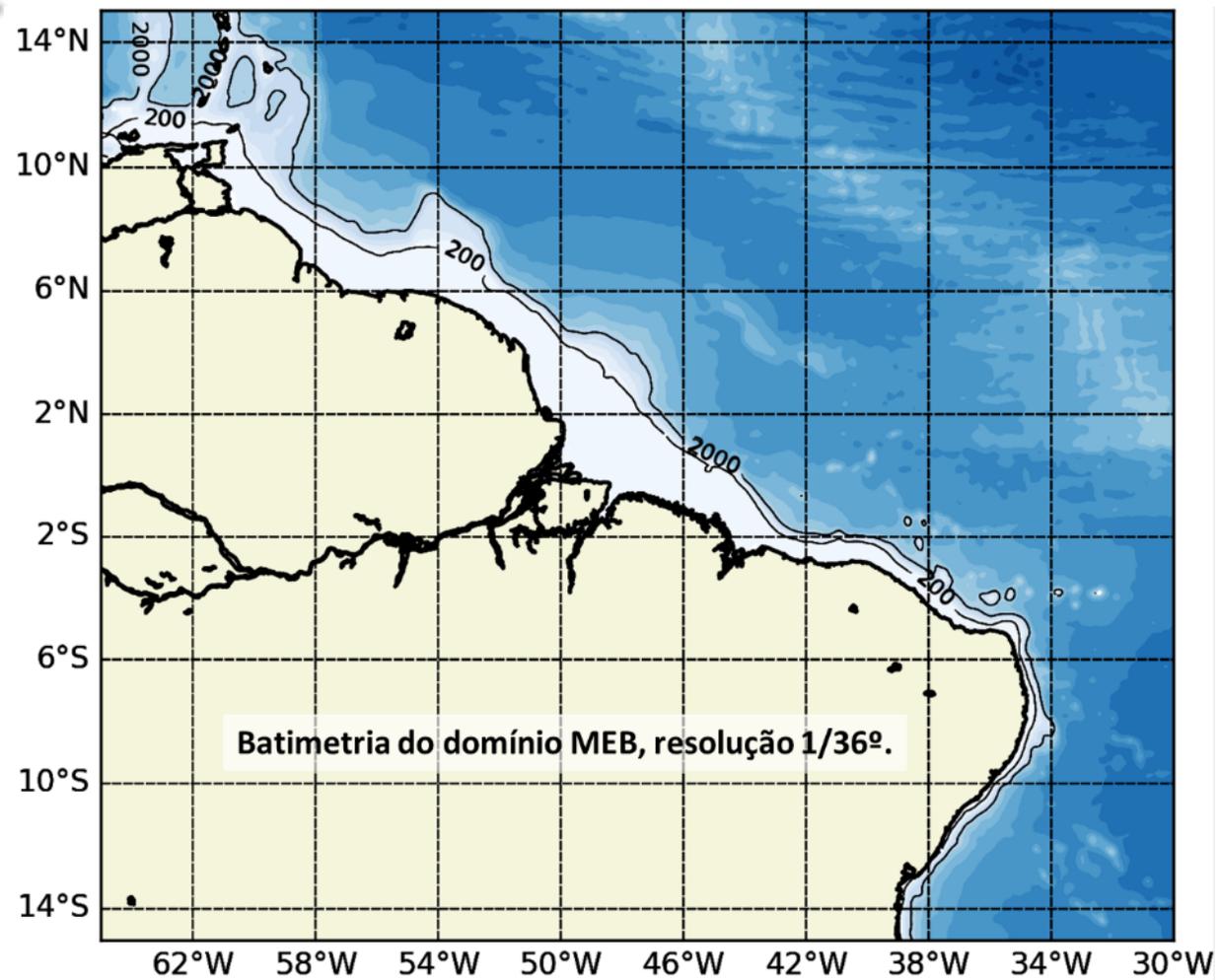
## Transporte de Massa – Seção 35W



Schott *et al.* (2005)



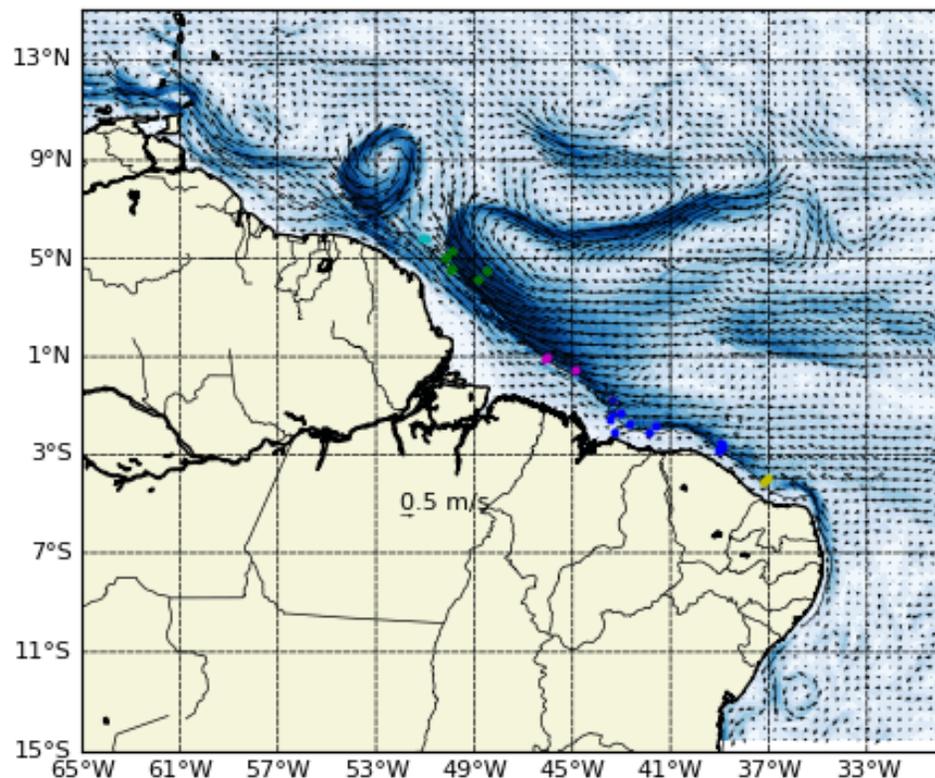
# Resultados – MEB – 1/36°



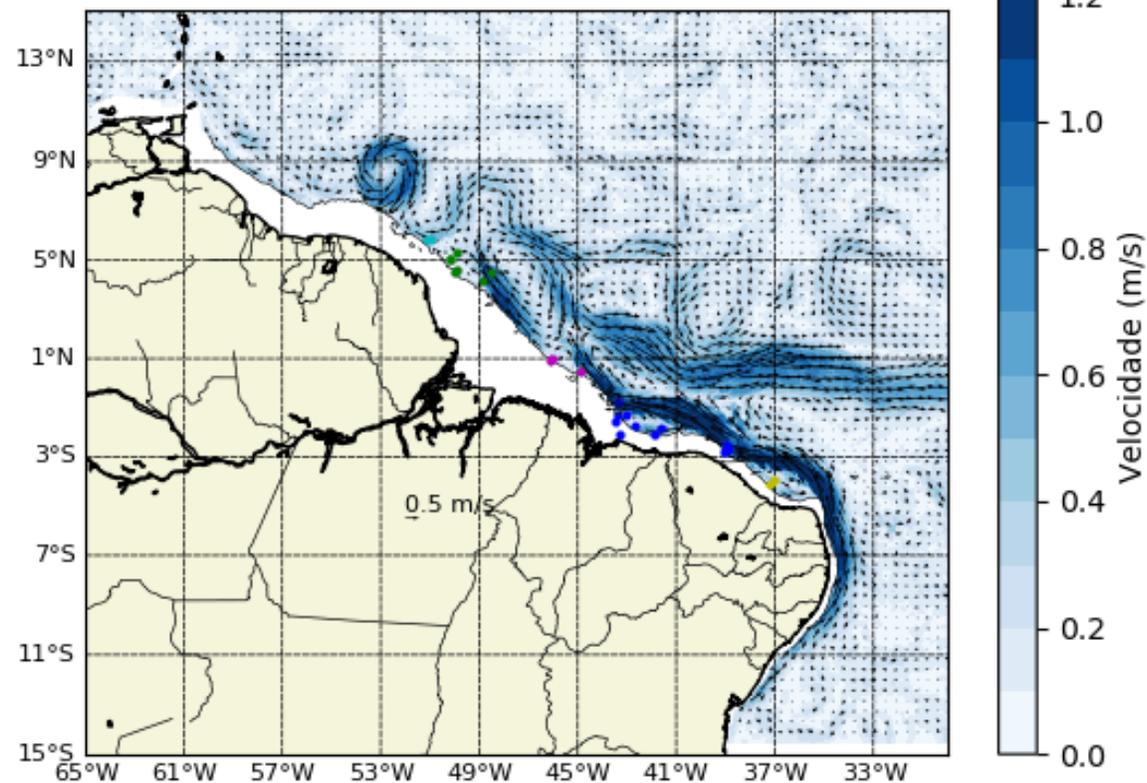
# Resultados – MEB – 1/36°

## Padrão de Circulação Superficial e Sub-superficial

Velocity MEB03 Exp07 0 m - snapshot:  
01/01/2016 00:00



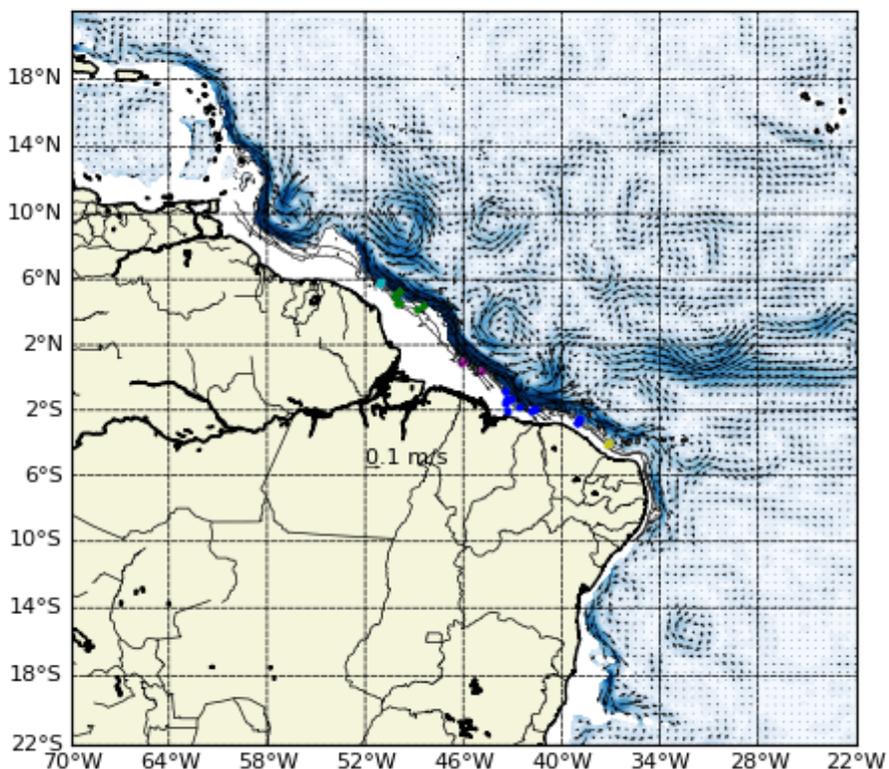
Velocity MEB03 Exp07 150 m - snapshot:  
01/01/2016 00:00



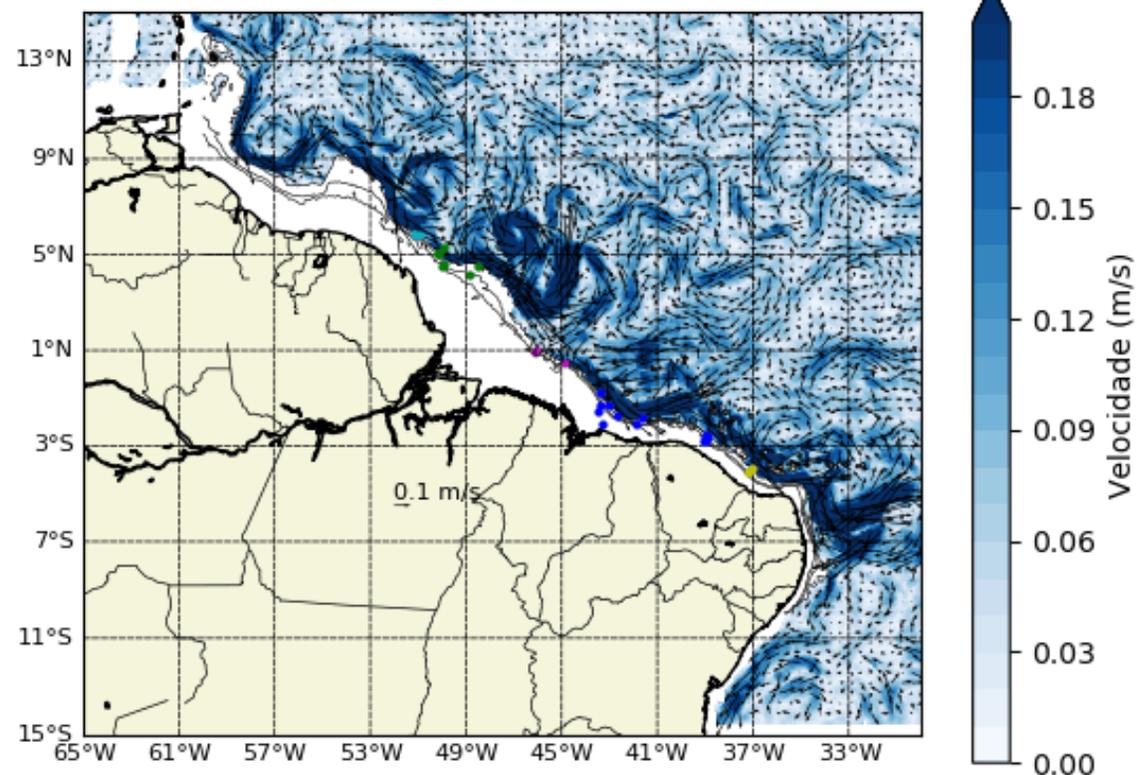
# Resultados – MEB – 1/36°

## Padrão de Circulação de Fundo

Velocity ATL01 Exp12b 2000 m - snapshot:  
01/01/2016 00:00



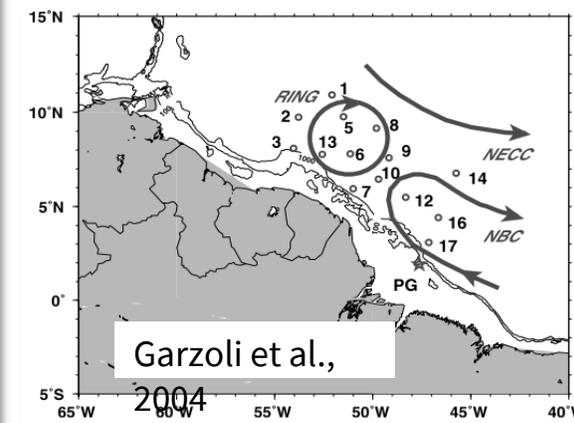
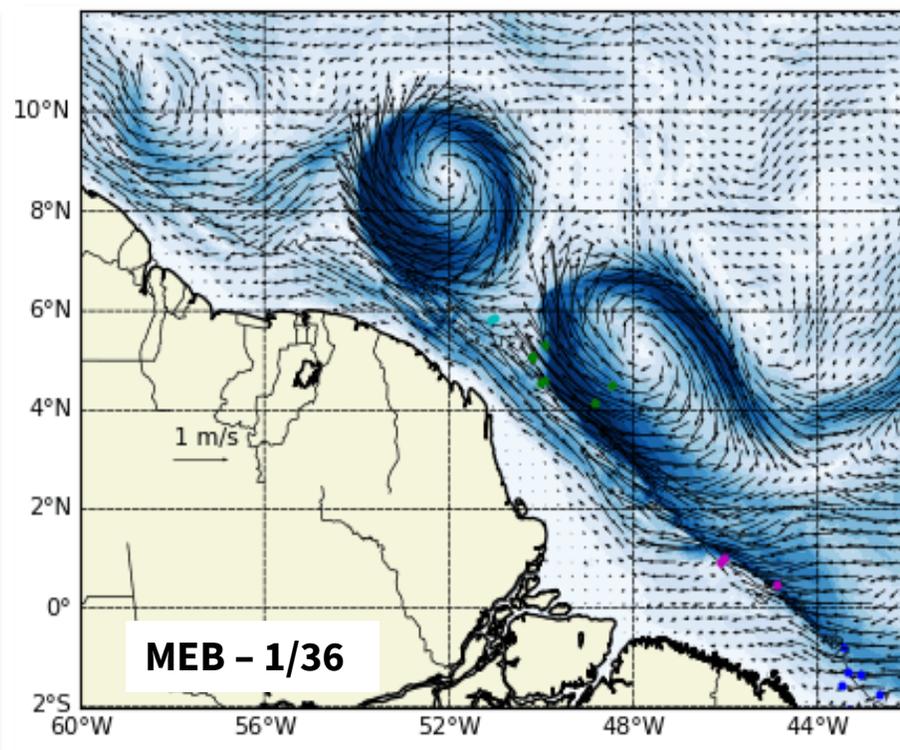
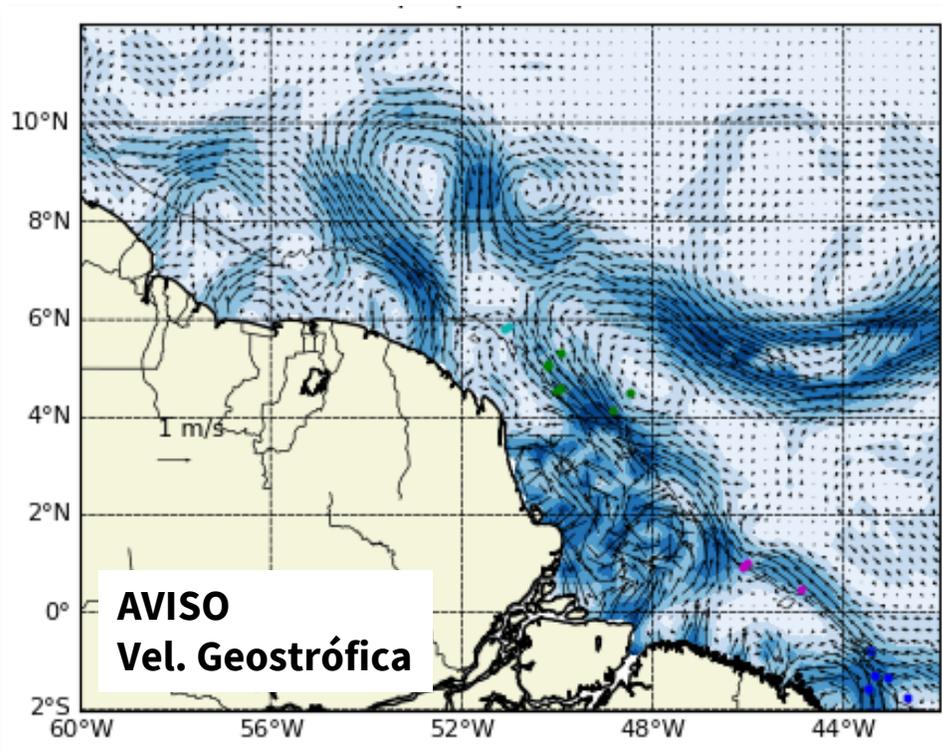
Velocity MEB03 Exp07 2000 m - snapshot:  
01/01/2016 00:00



# Resultados – MEB – 1/36°

## Avaliação de Feições

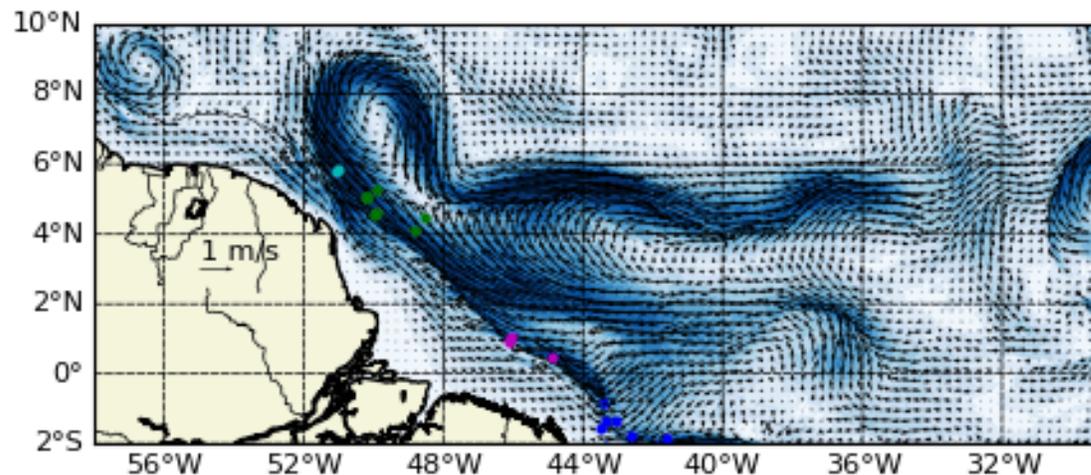
Vórtices da CNB (NBC's rings)



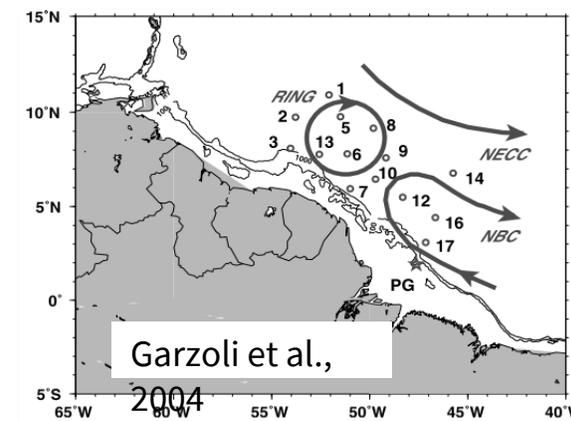
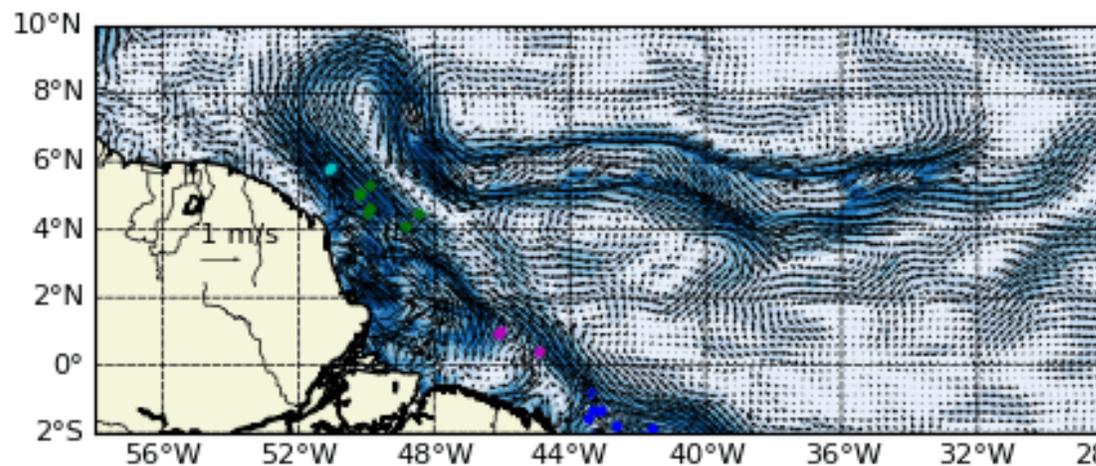
# Resultados – MEB – 1/36°

## Avaliação de Feições

MEB – 1/36



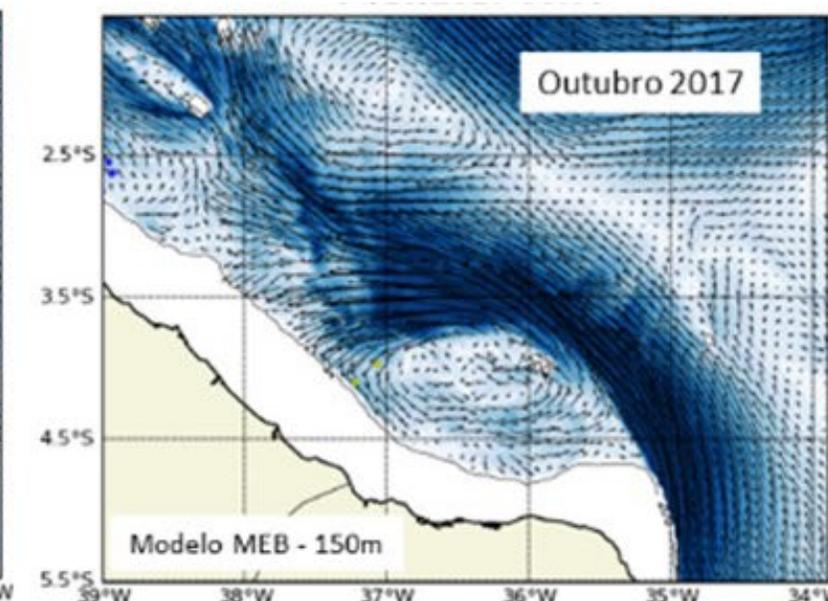
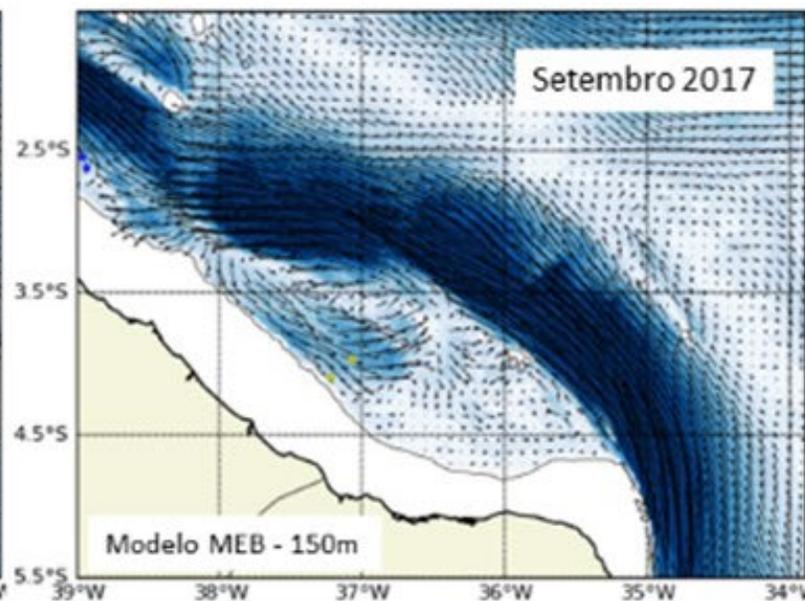
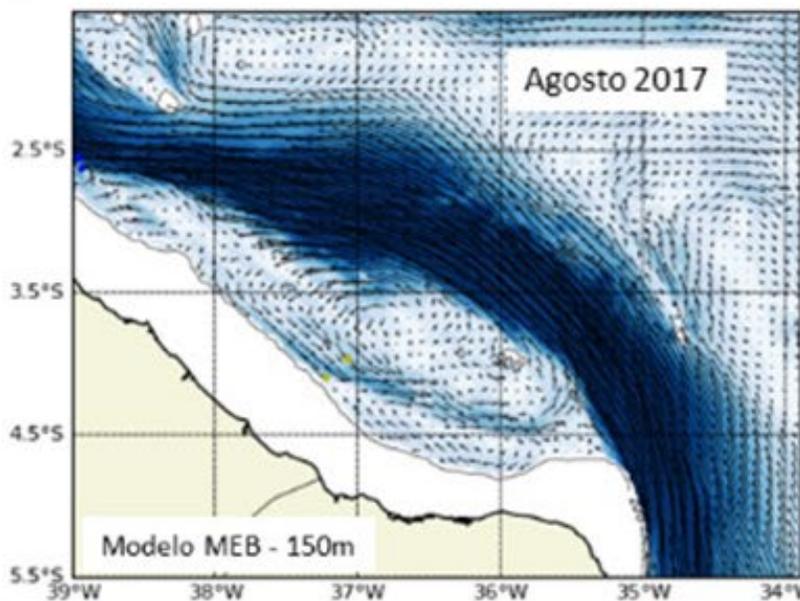
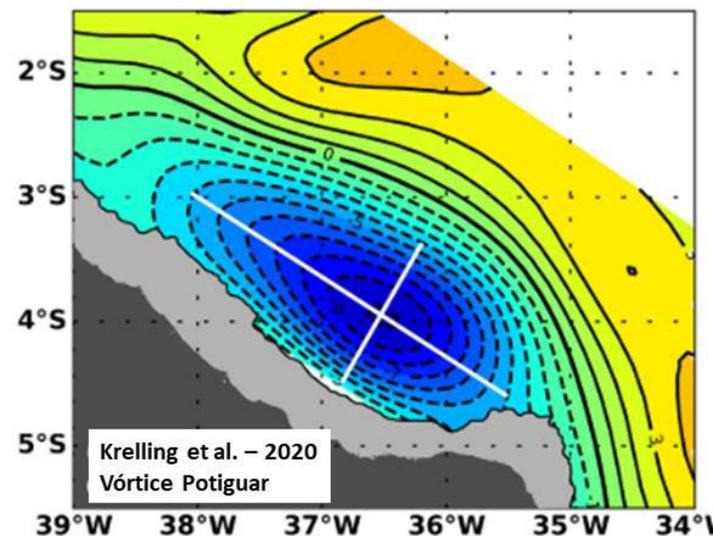
AVISO  
Vel. Geostrófica



## Resultados – MEB – 1/36°

### Avaliação de Feições

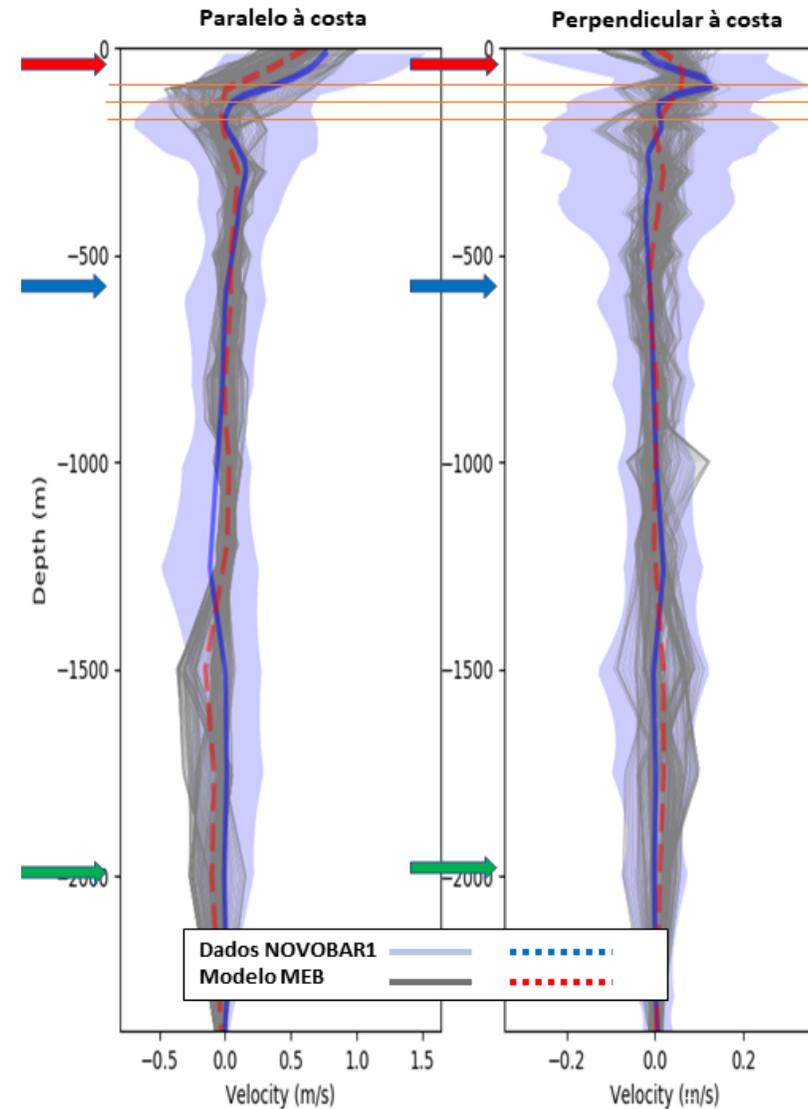
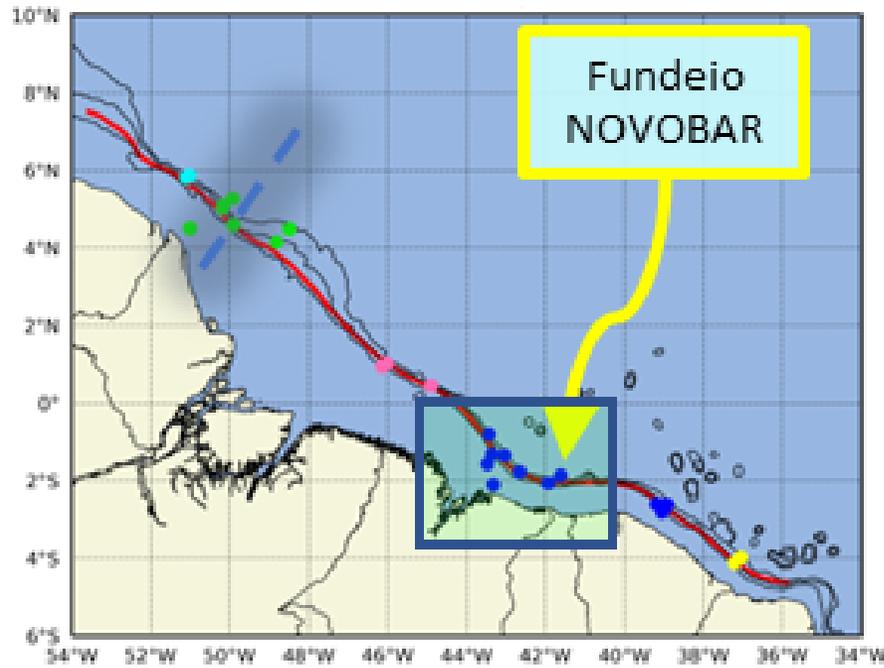
Vórtice Potiguar - vórtice anticiclônico elíptico subsuperficial com dimensões de 130km e 330km, que se estende entre as profundidades de 100m e 400m. Atinge velocidades de 0,6 m/s e é capaz de recircular cerca de 2 Sv de águas da NBUC.



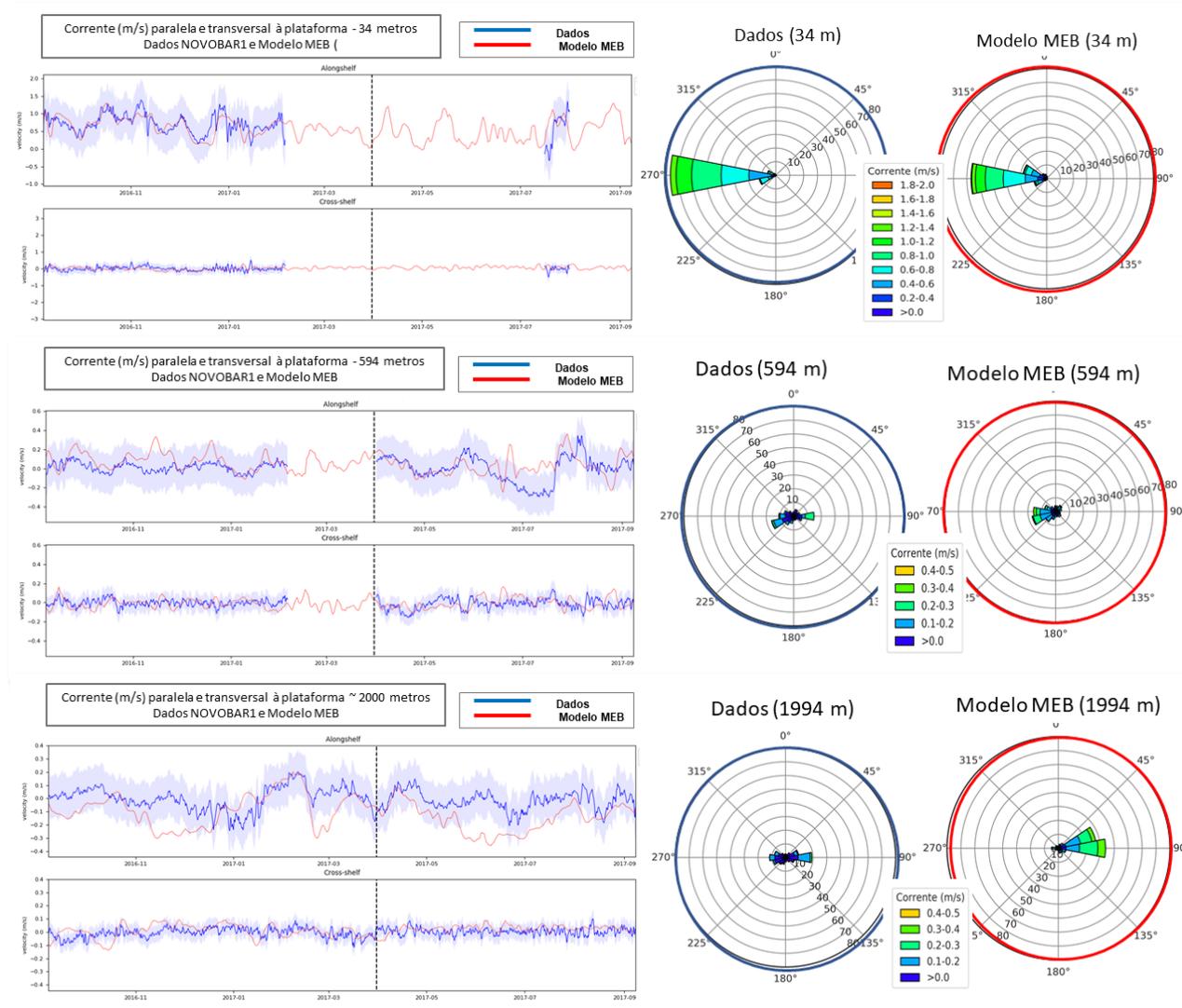
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Central

## Análise de Séries Temporais – Circulação Oceanica

Posições na bacia Barreirinha  
modelo MEB



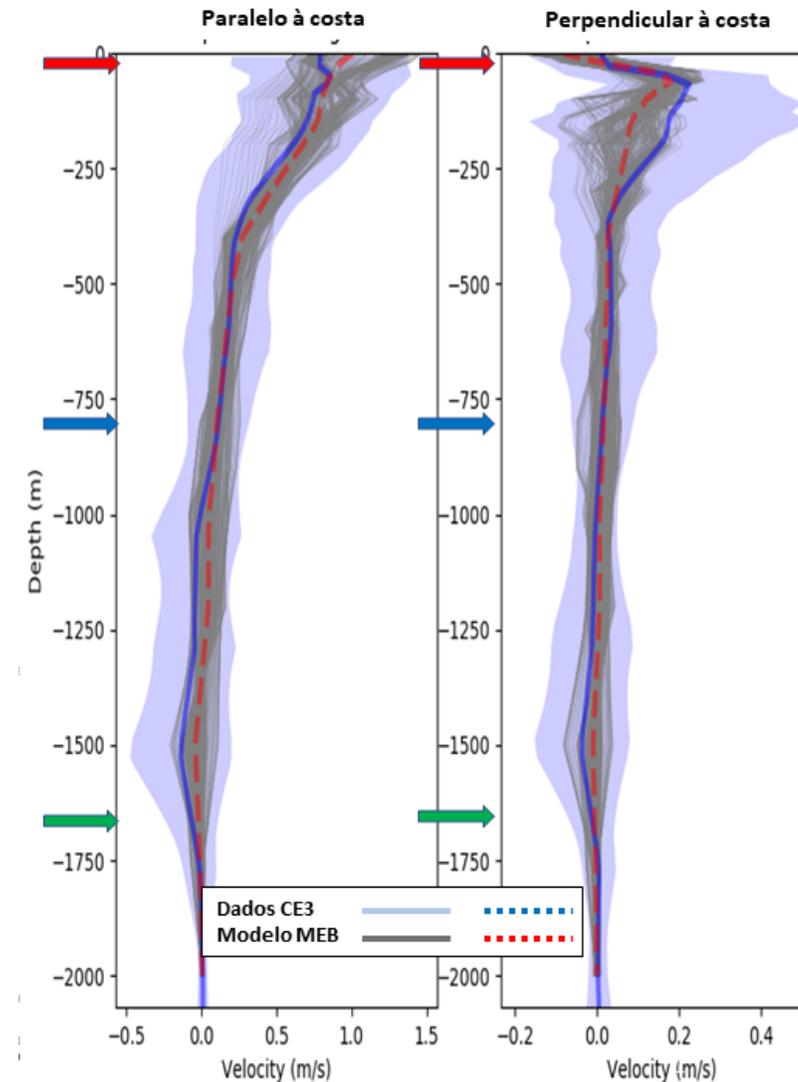
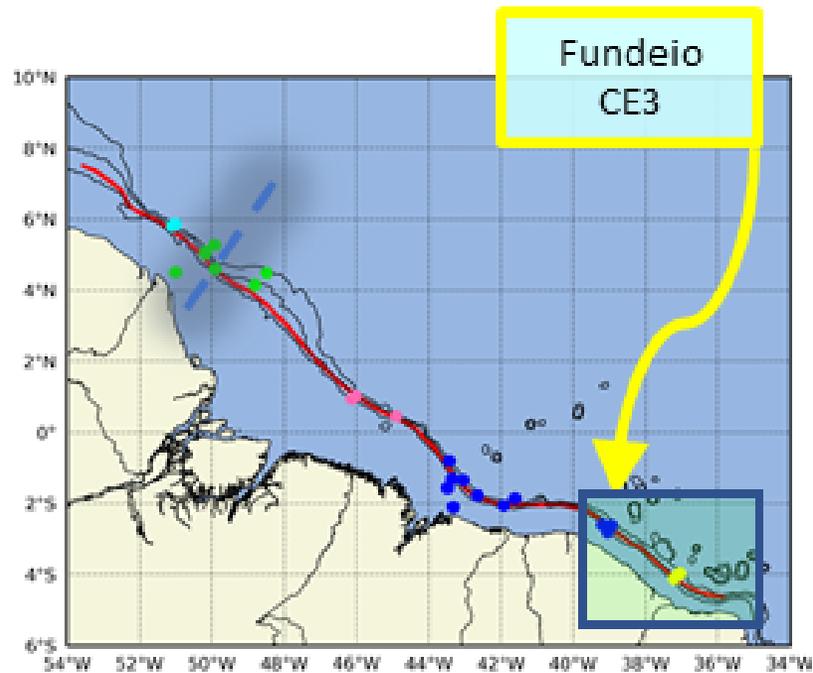
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Central



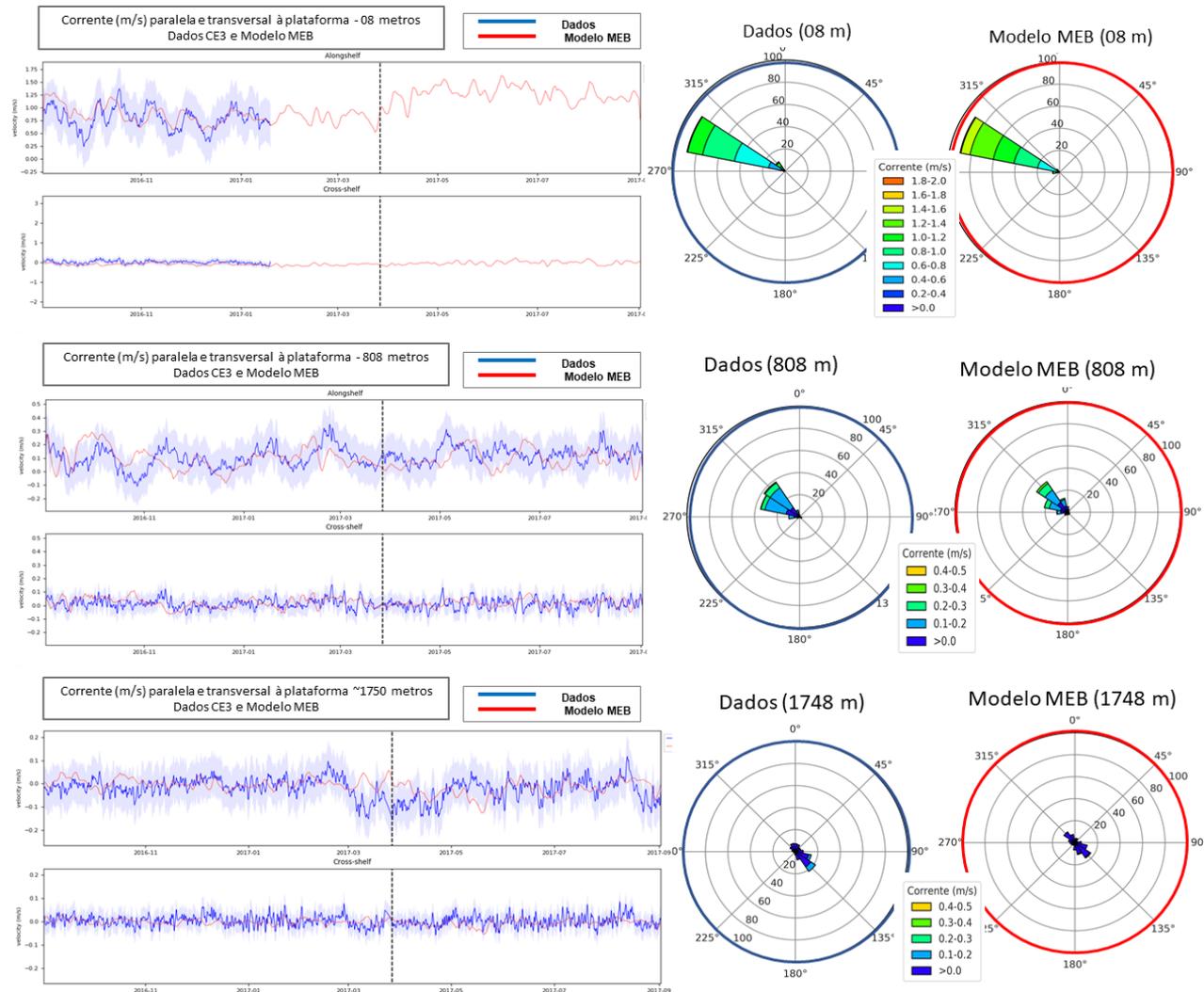
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul

## Análise de Séries Temporais – Circulação Oceanica

Posições na bacia do Ceará  
modelo MEB



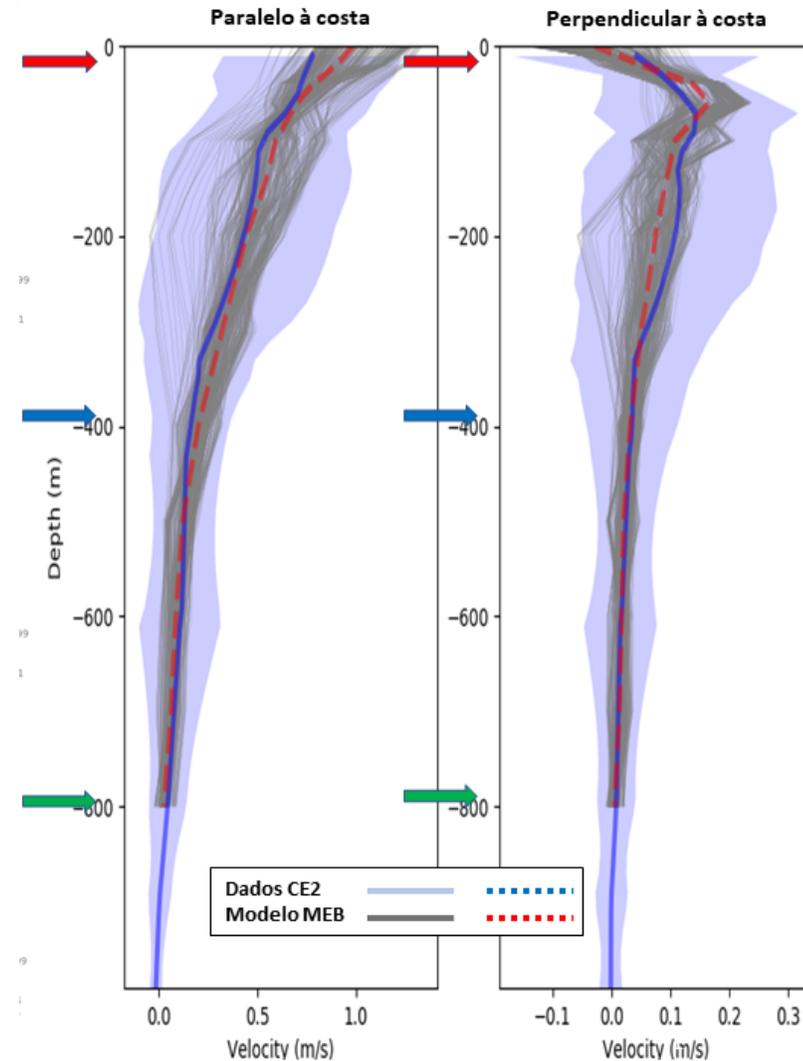
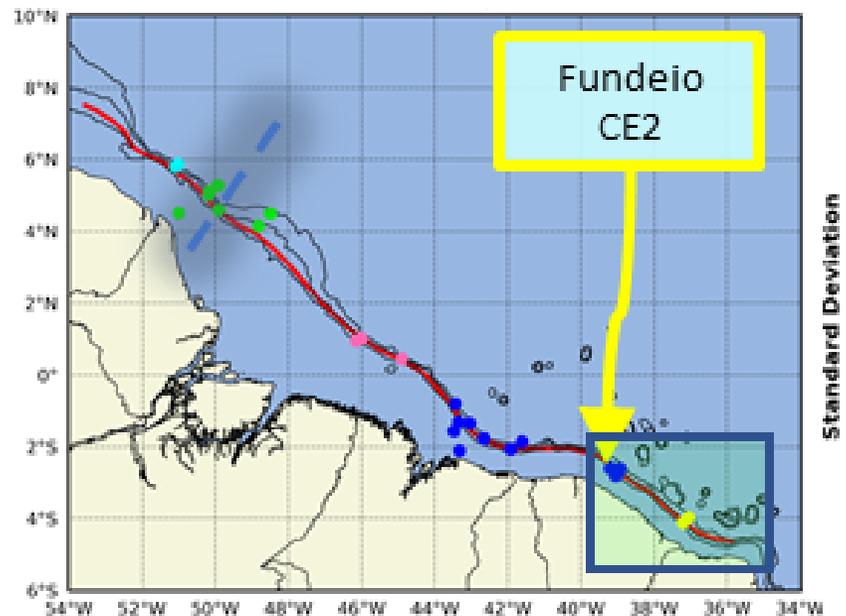
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul



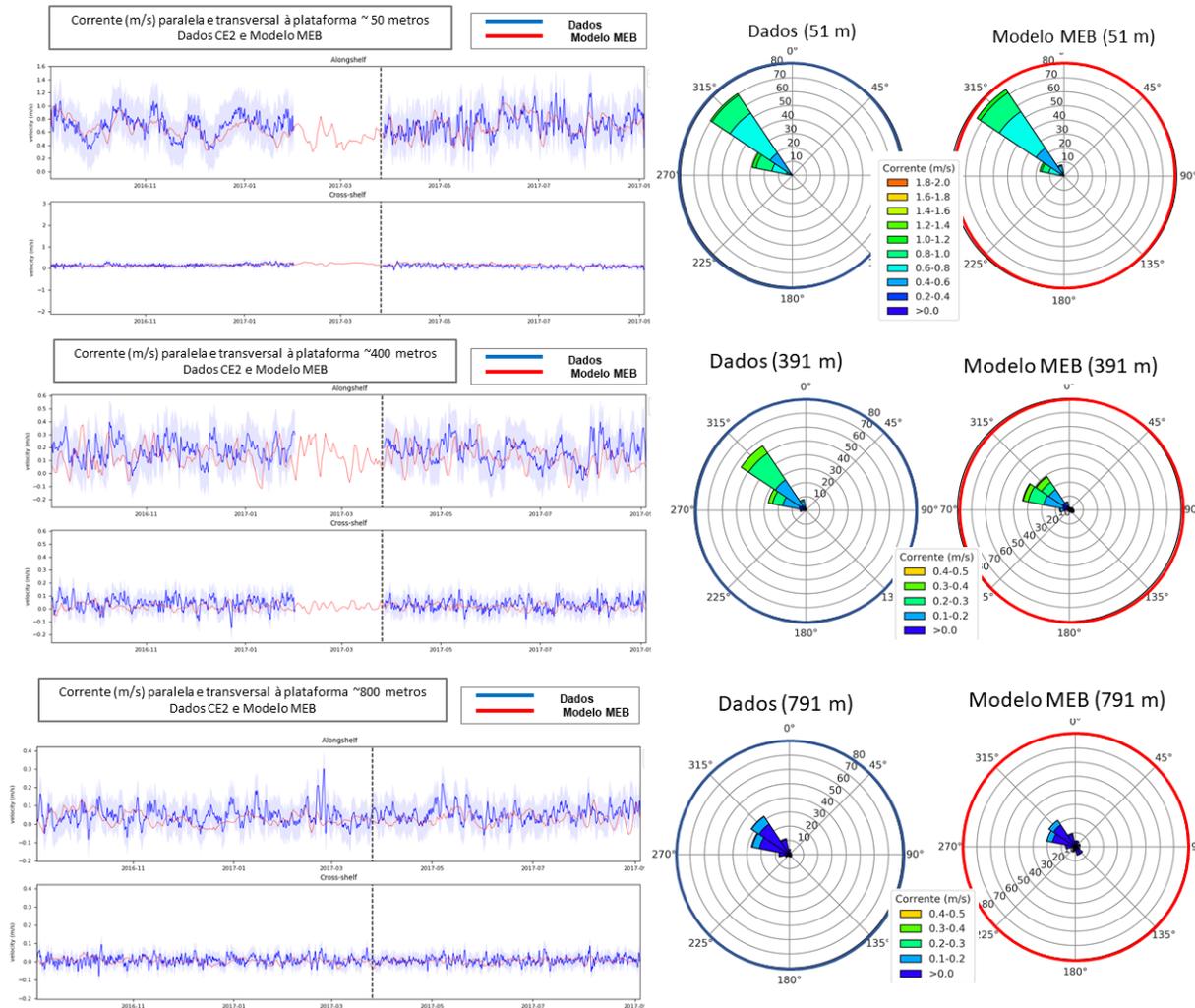
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul

## Análise de Séries Temporais – Circulação Oceanica

Posições na bacia do Ceará  
modelo MEB

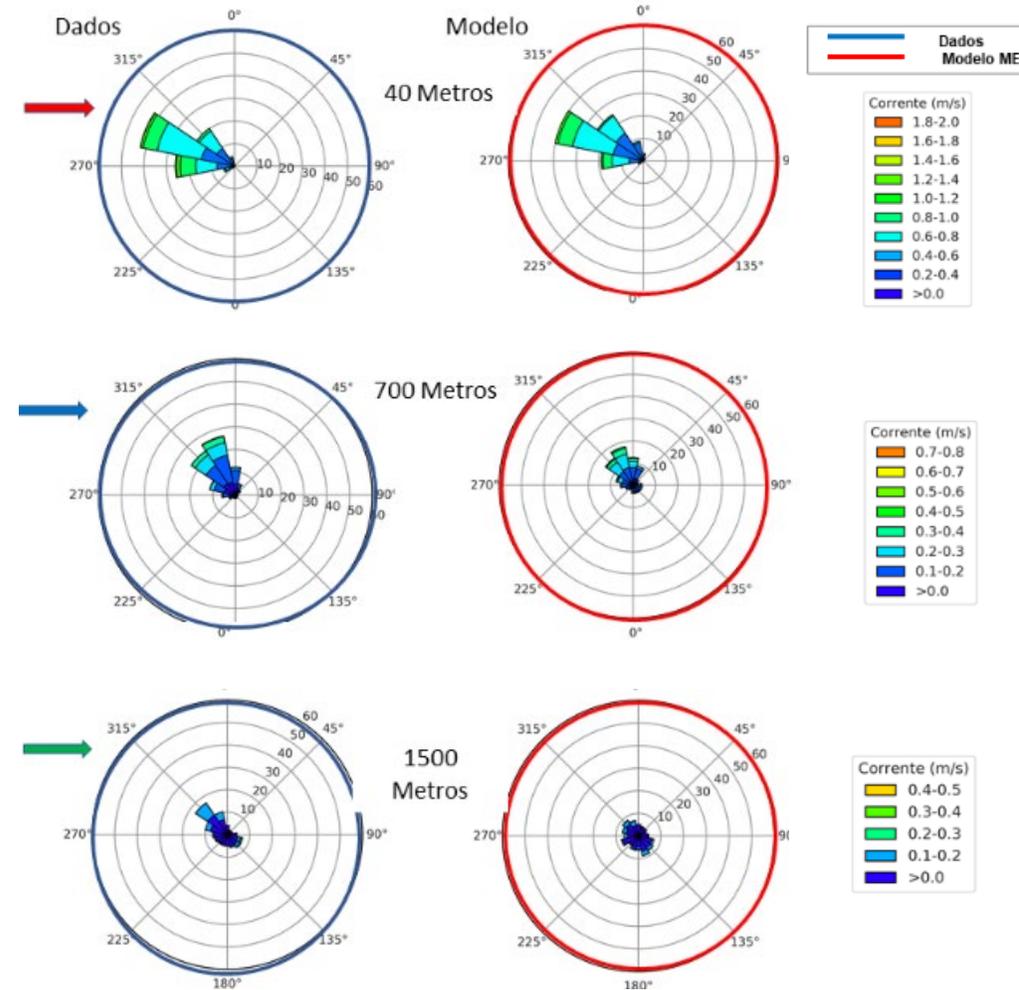
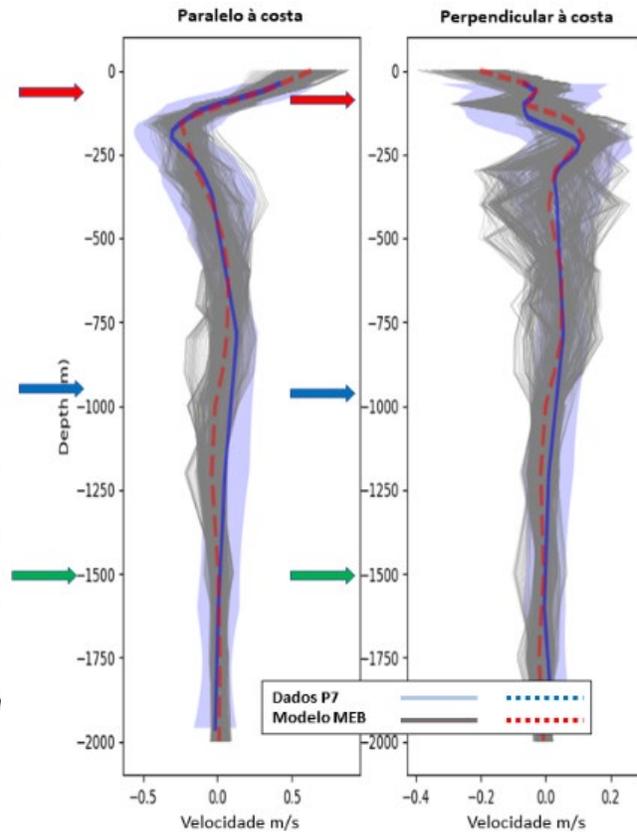
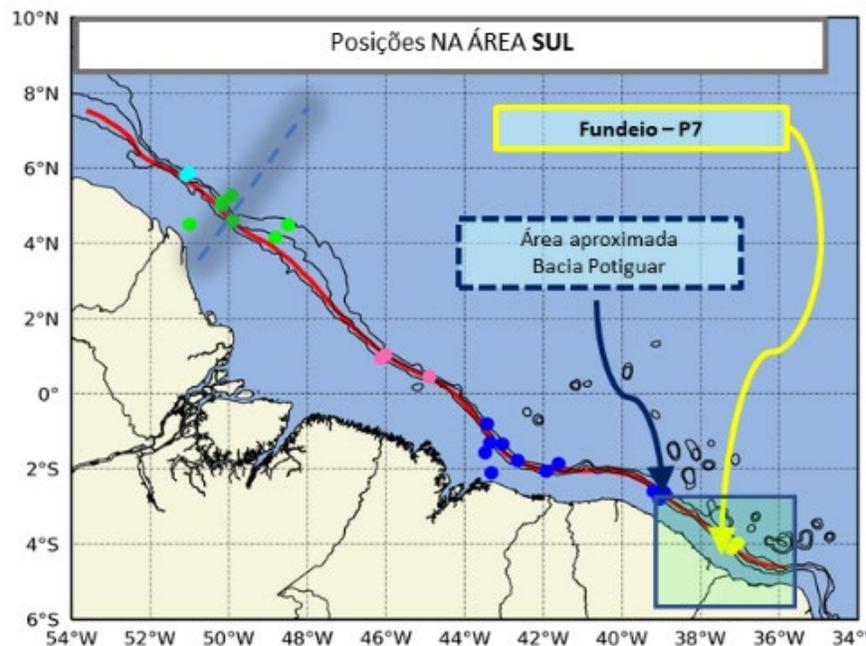


# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul



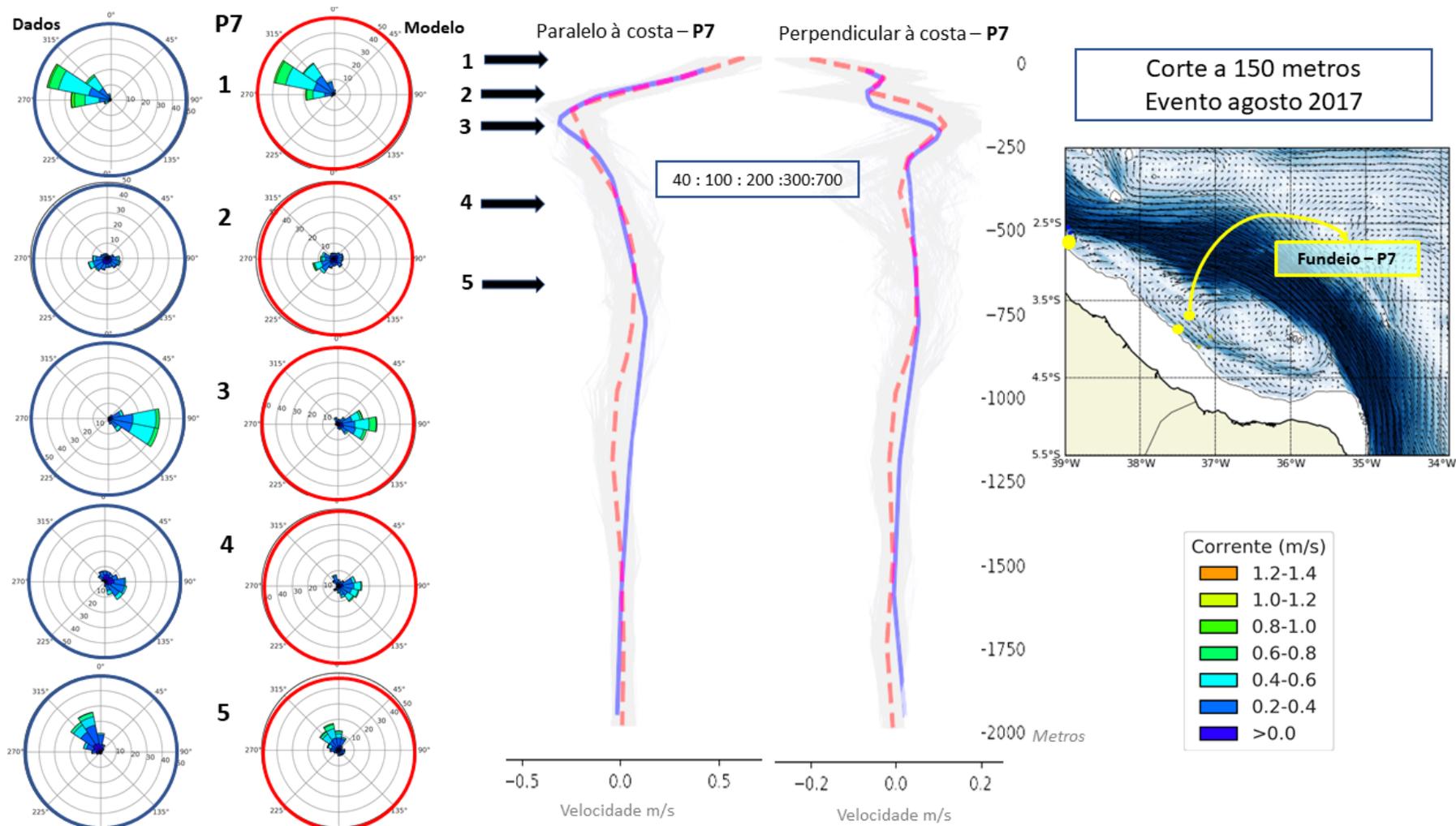
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul

## Análise de Padrões Pontuais – P7 – Vortice Potiguar



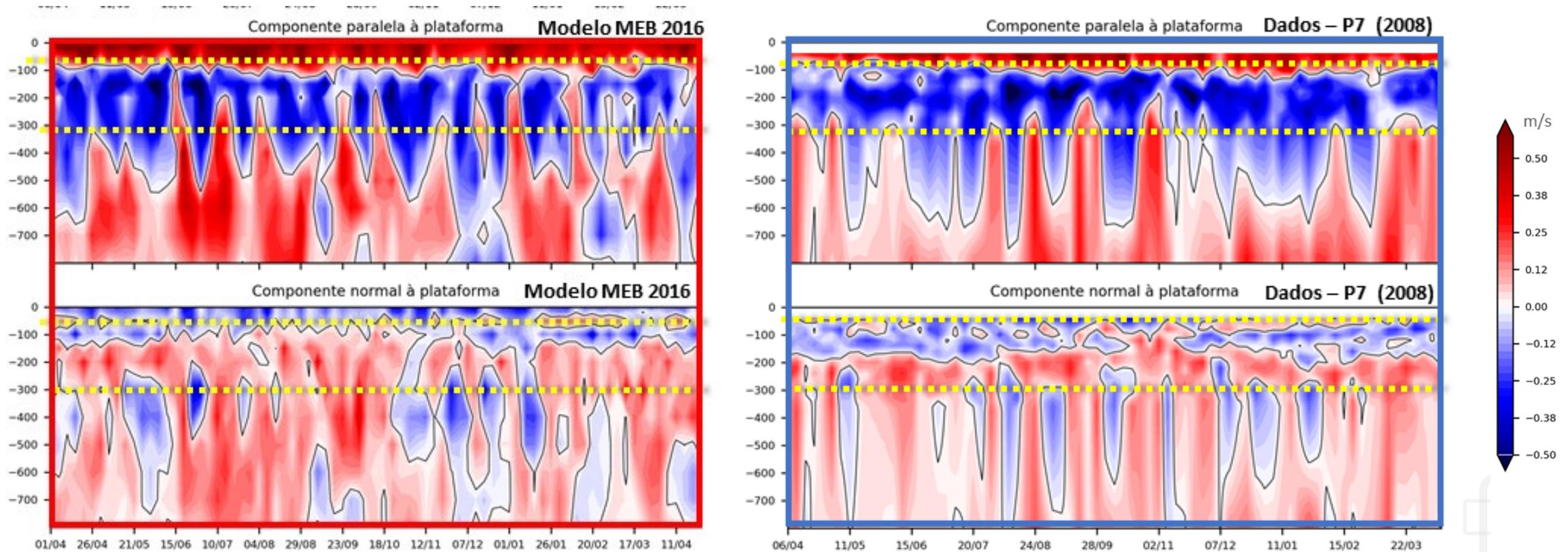
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul

## Análise de Padrões Pontuais – P7



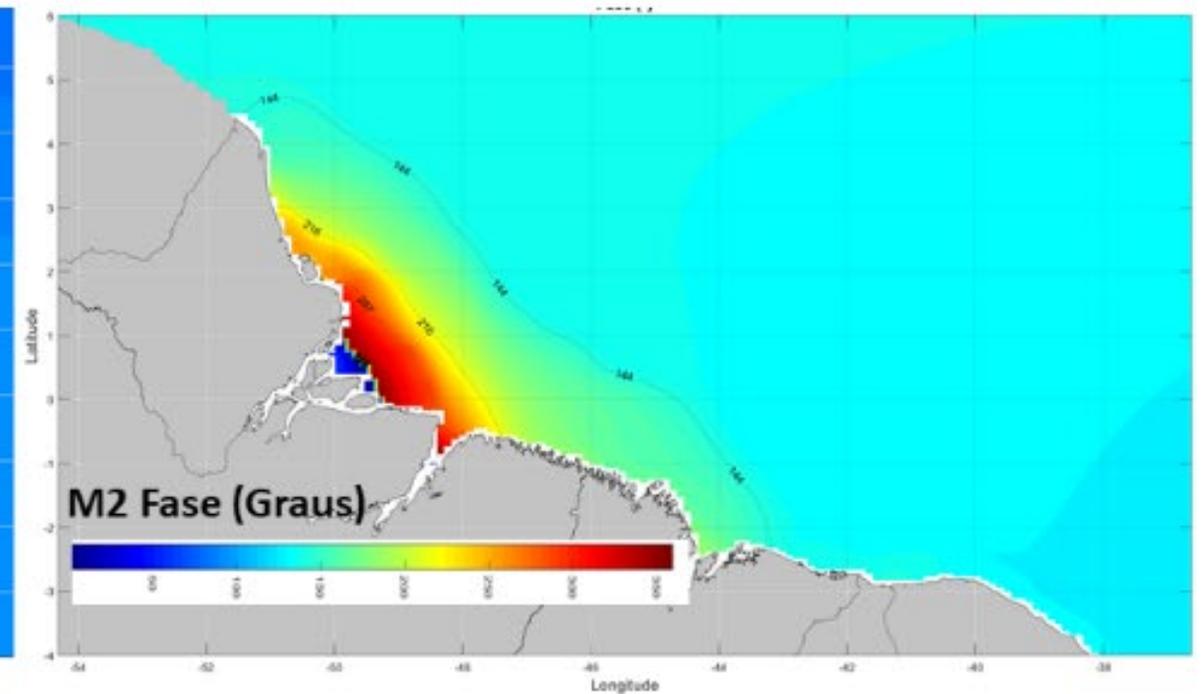
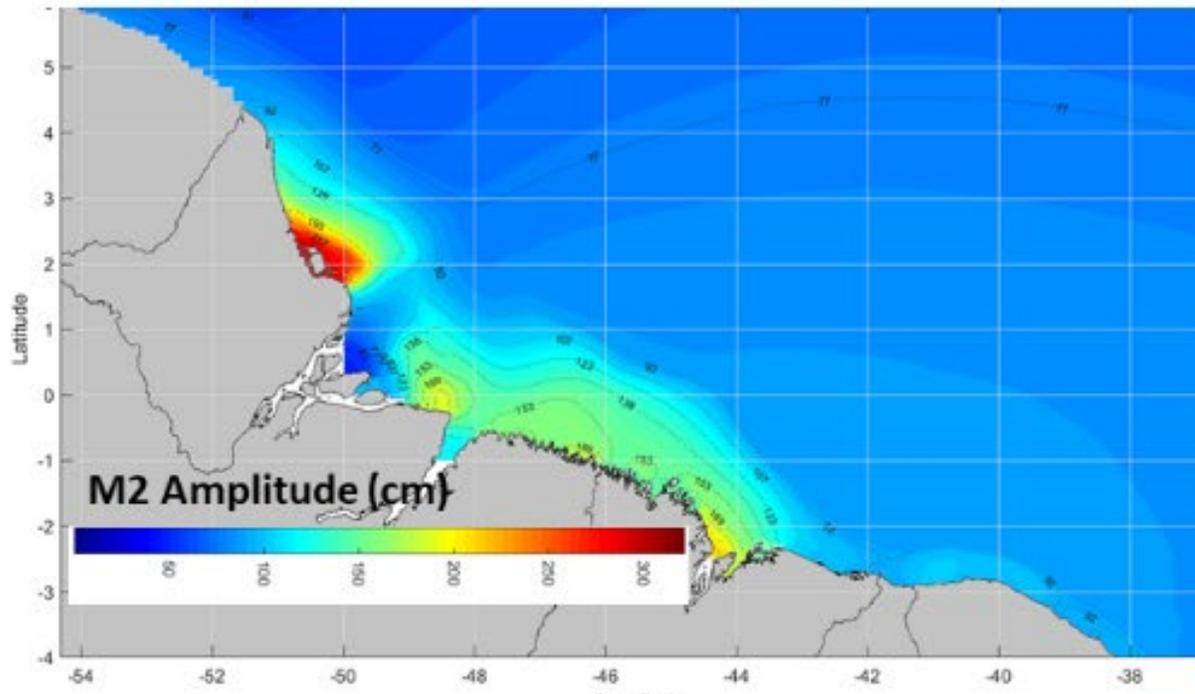
# Resultados – MEB – 1/36° - Área Sul

## Evolução temporal ao longo do perfil vertical – P7



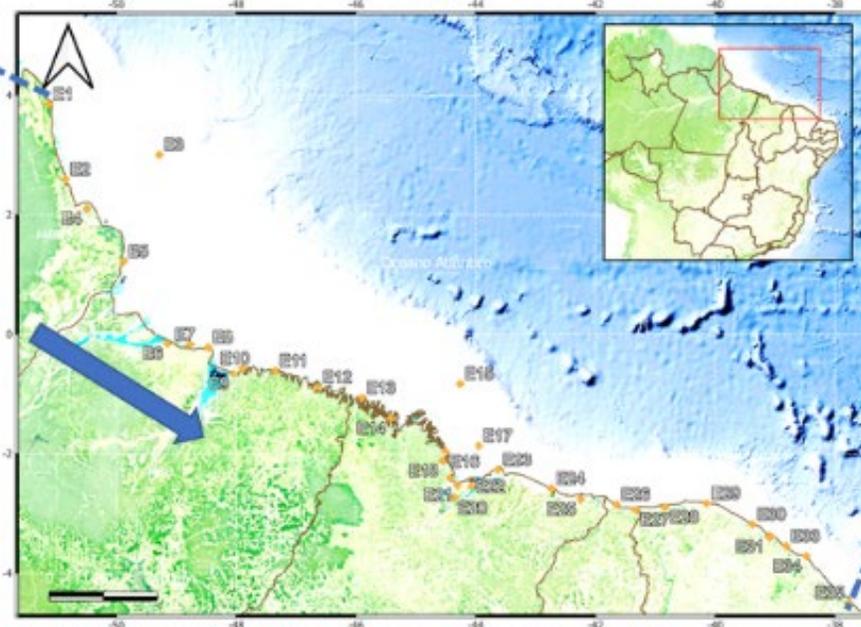
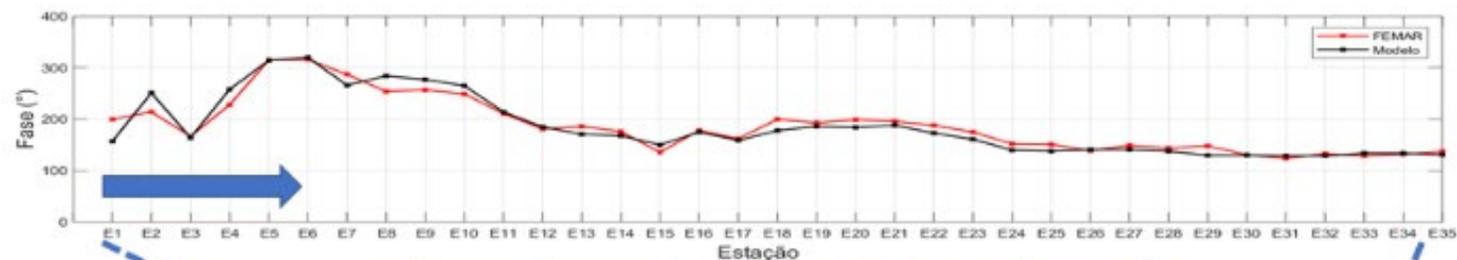
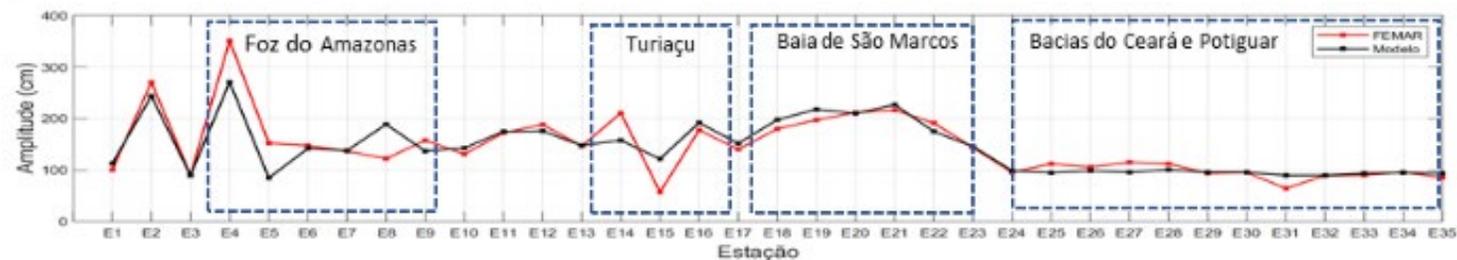
# Resultados – MEB – 1/36° - Padrão Espacial de Maré

## Variação Espacial da Componente M2

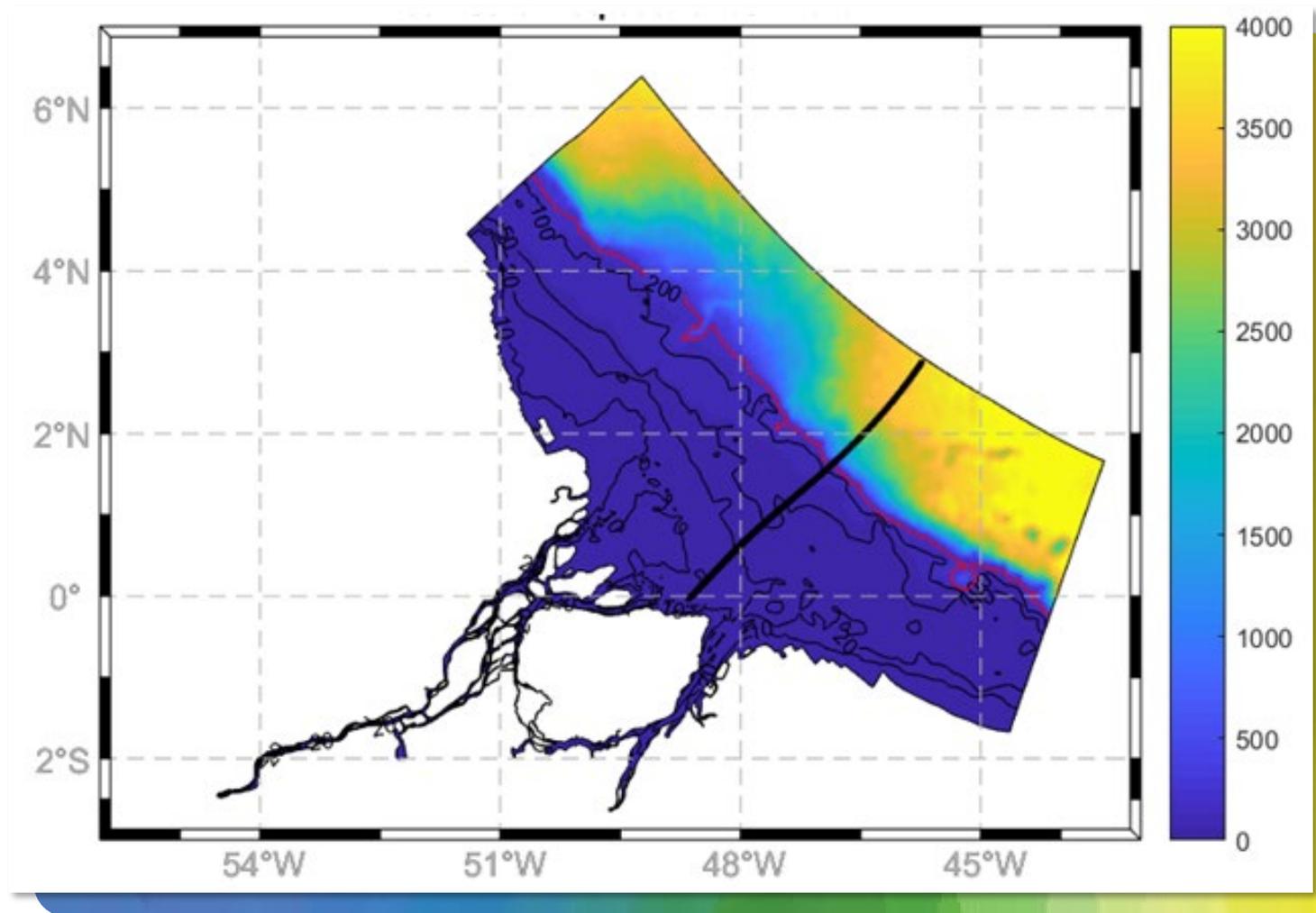


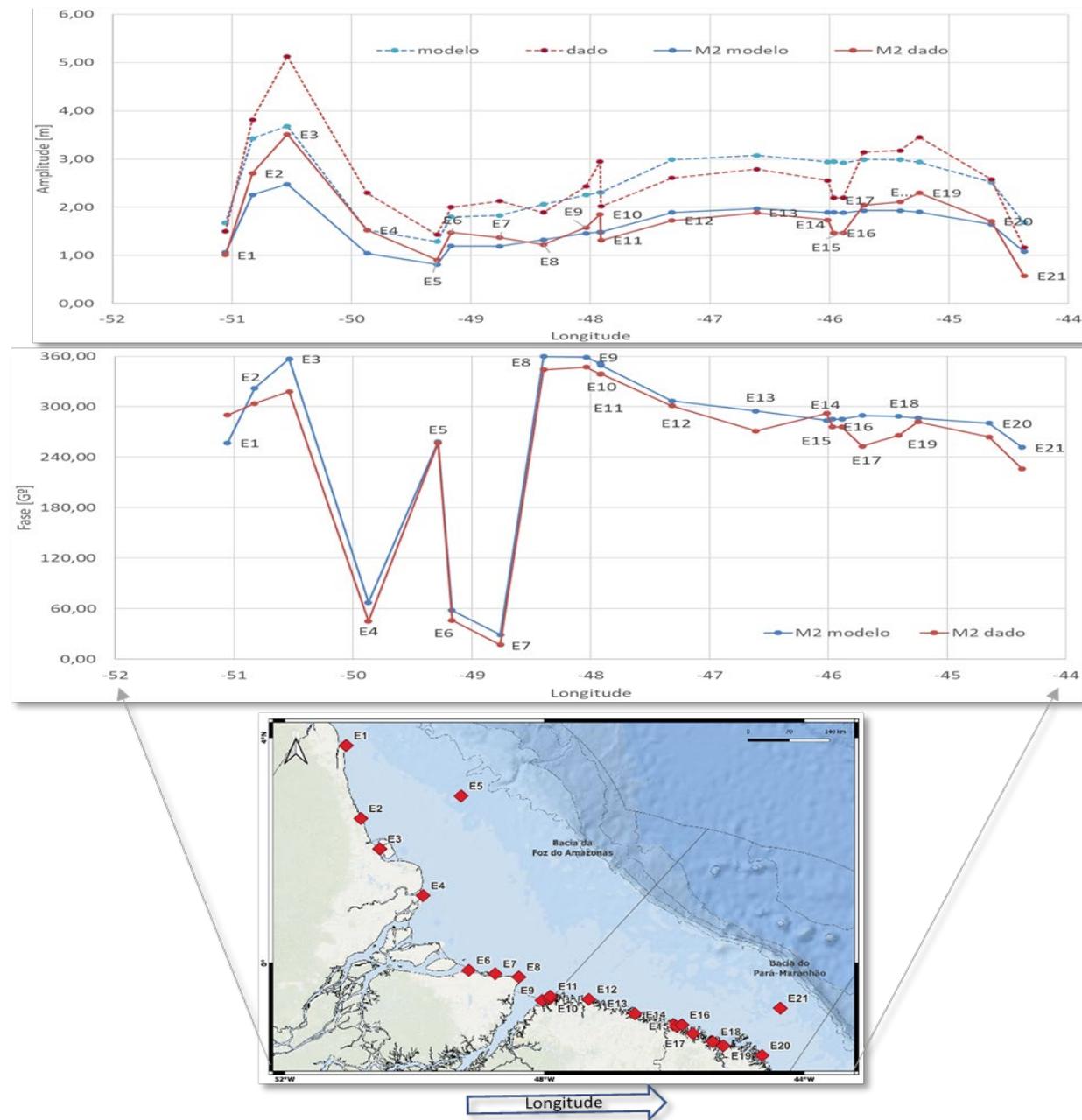
# Resultados – MEB – 1/36°

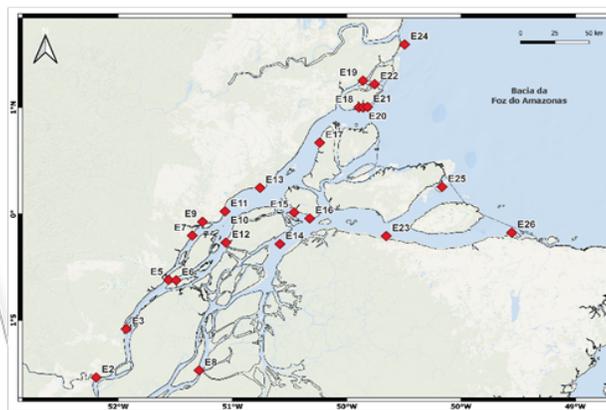
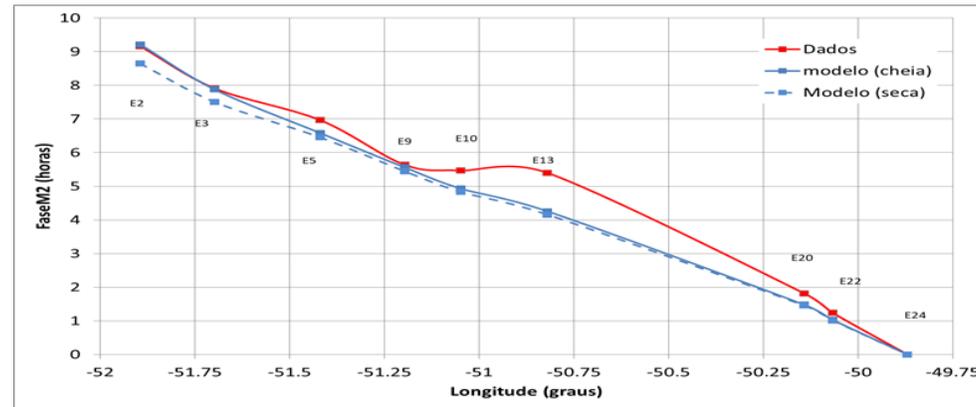
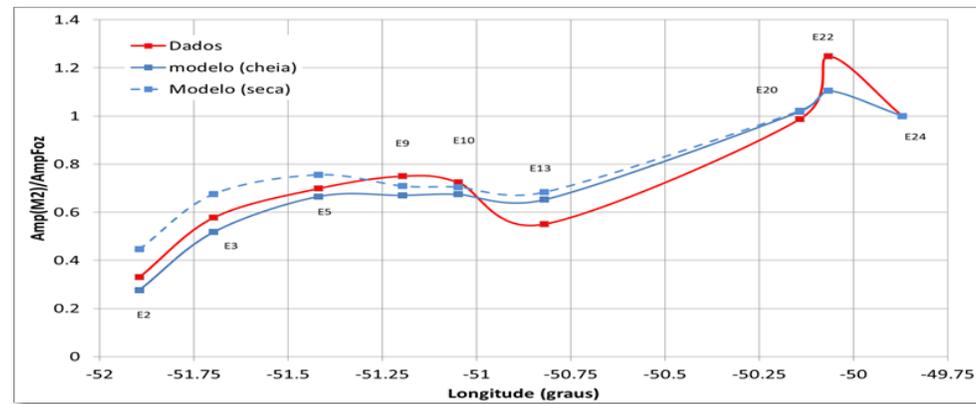
## Variação Espacial da Componente M2



# Resultados – Delft3D - FZA

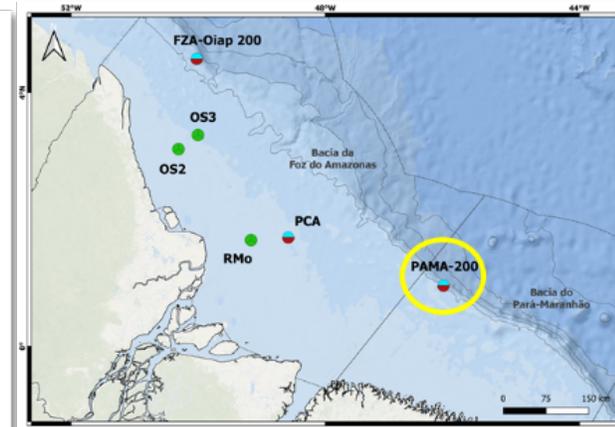
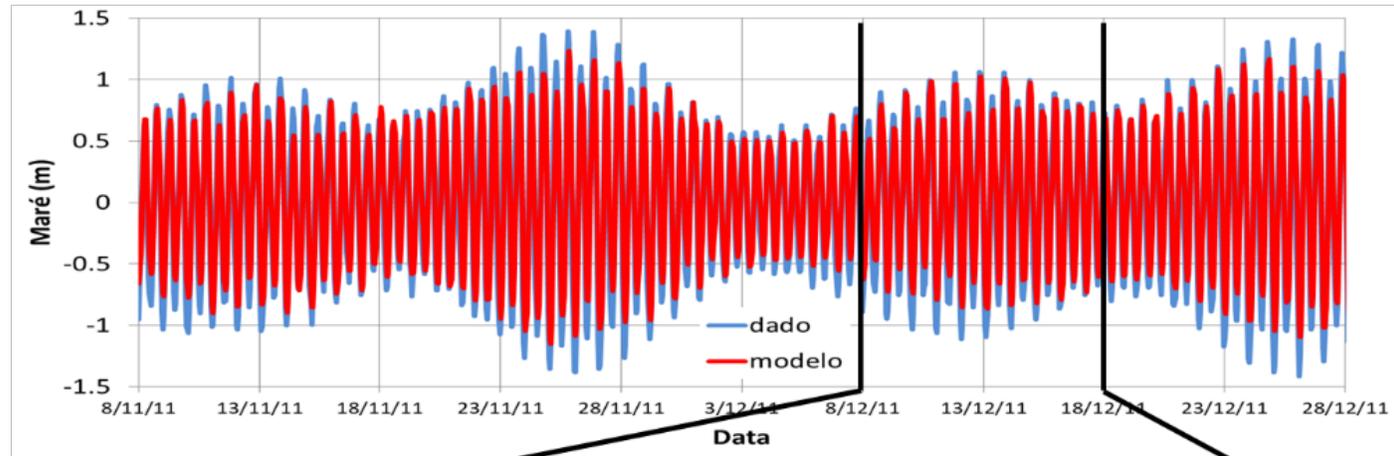




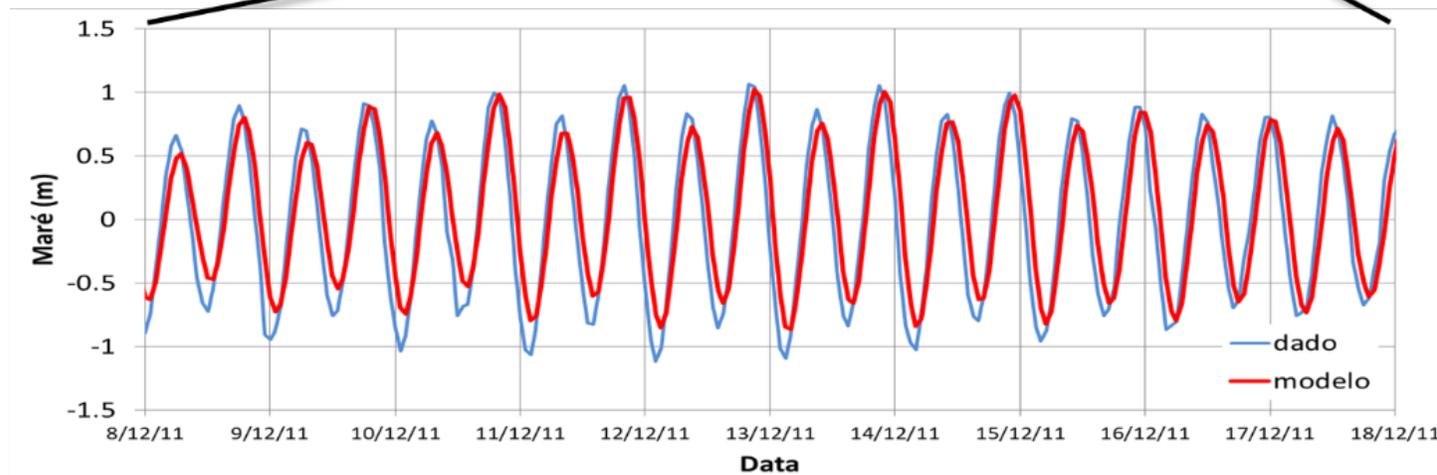


Longitude →

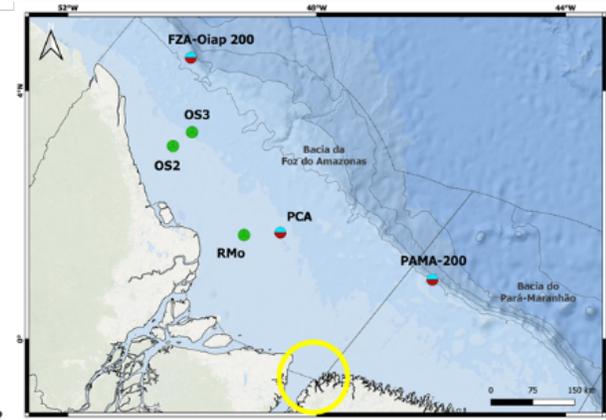
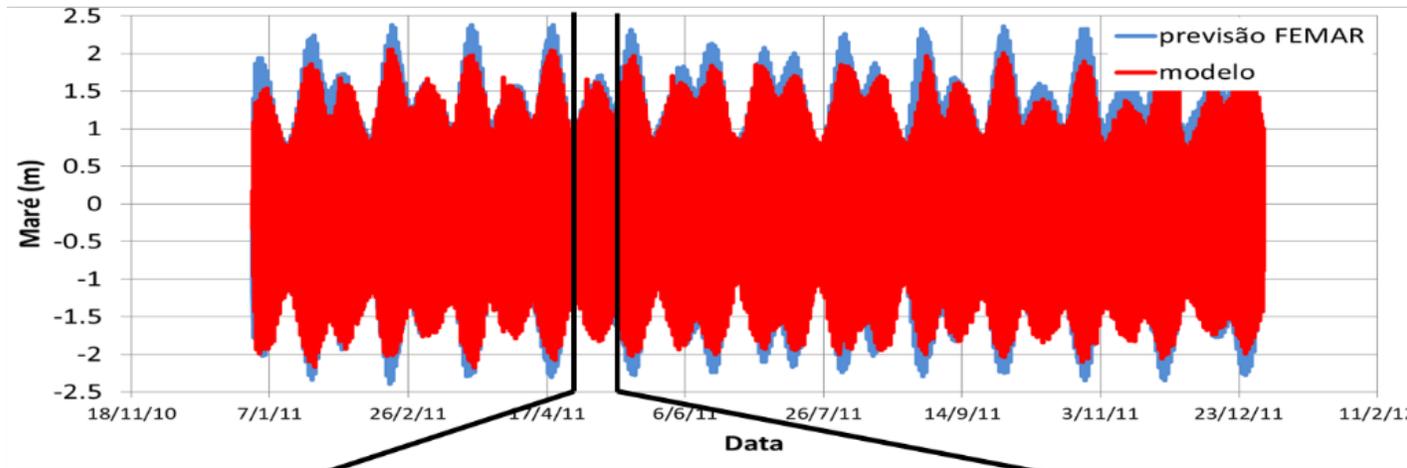
# Resultados – FZA – Avaliação Pontual de Maré



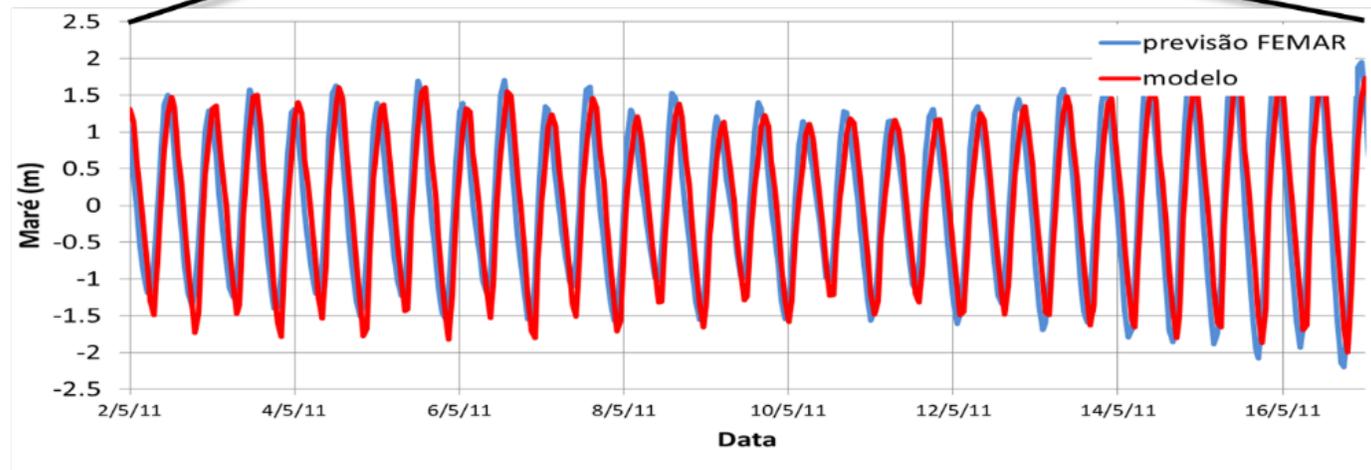
PAMA200



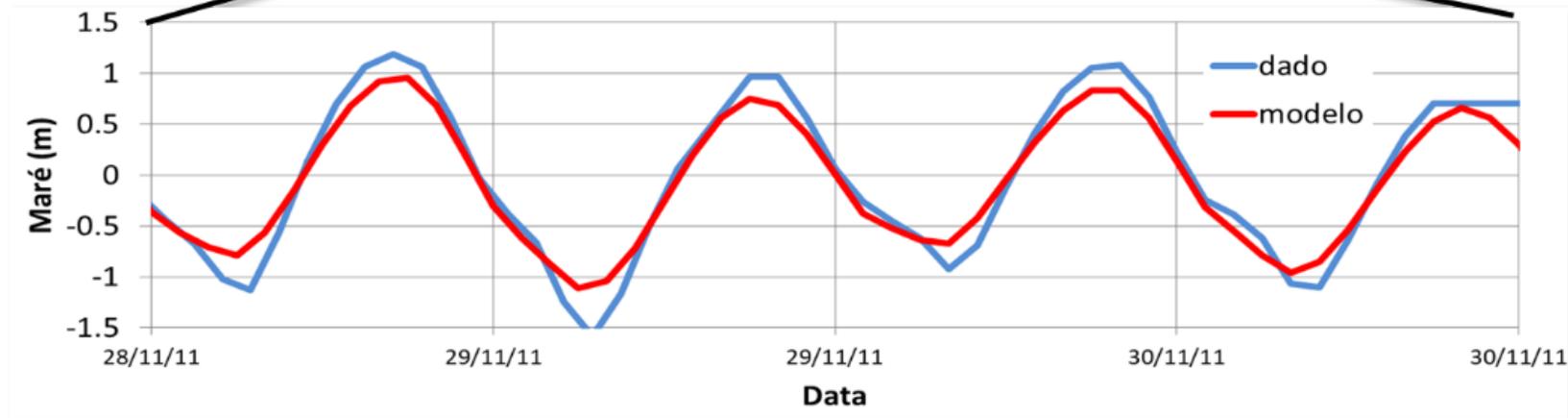
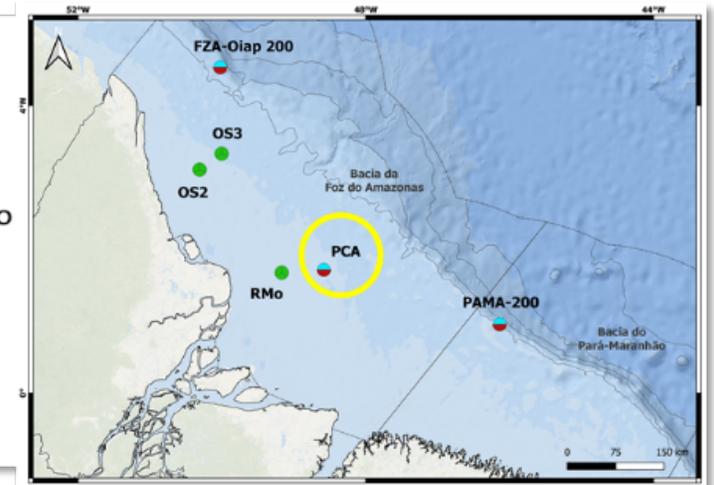
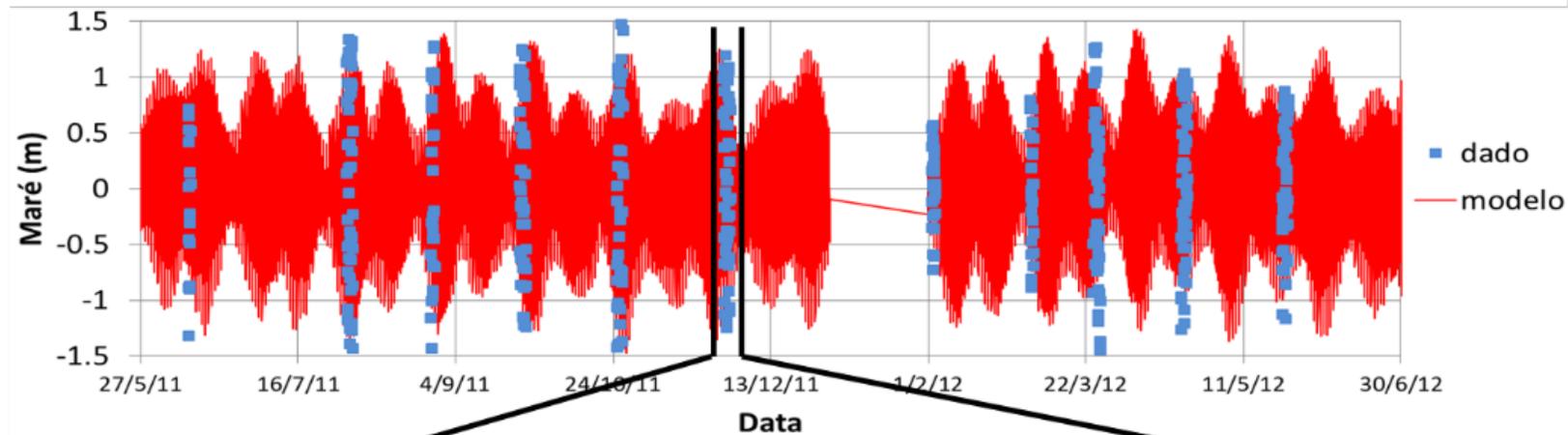
# Resultados – FZA – Avaliação Pontual de Maré



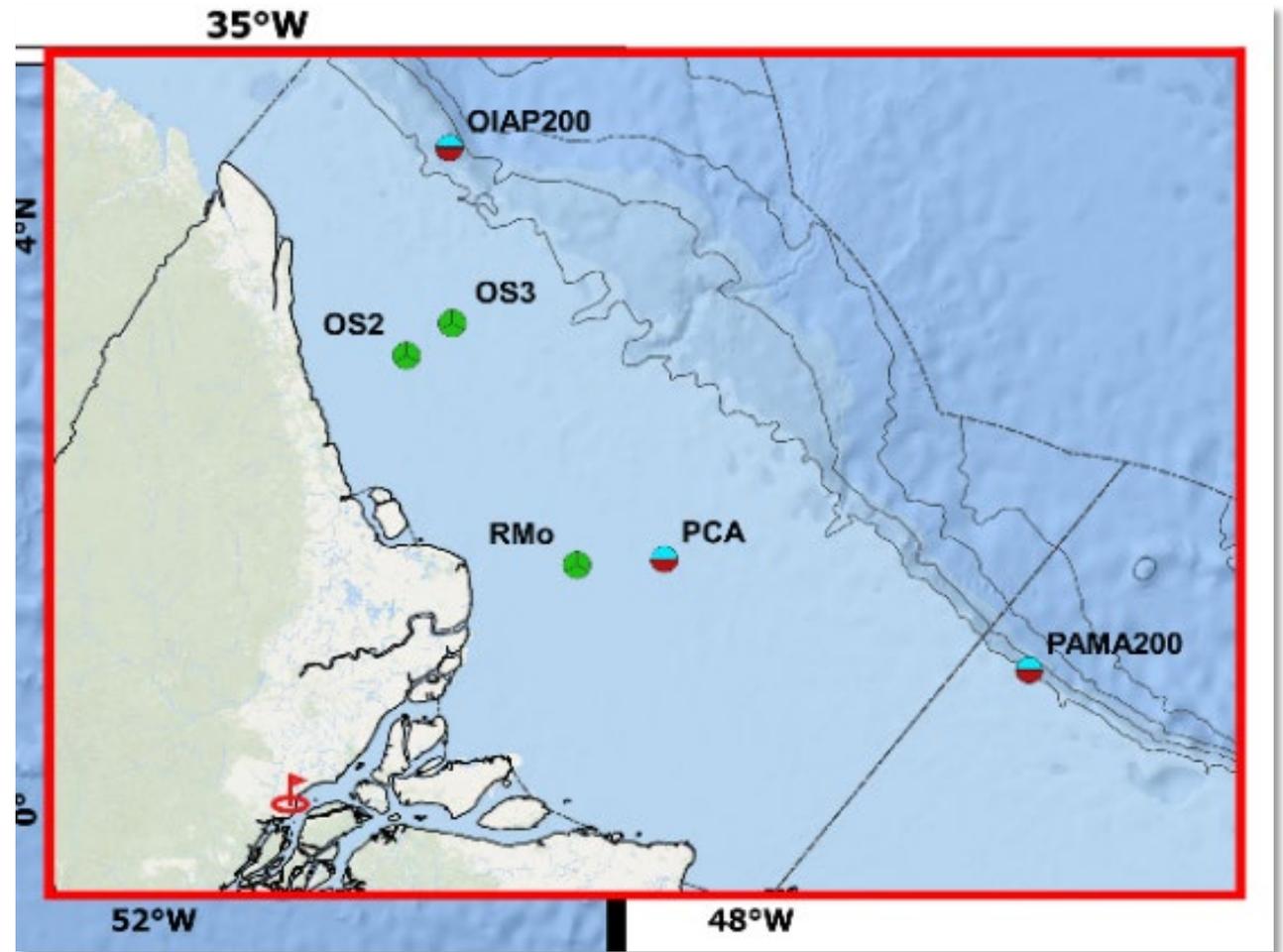
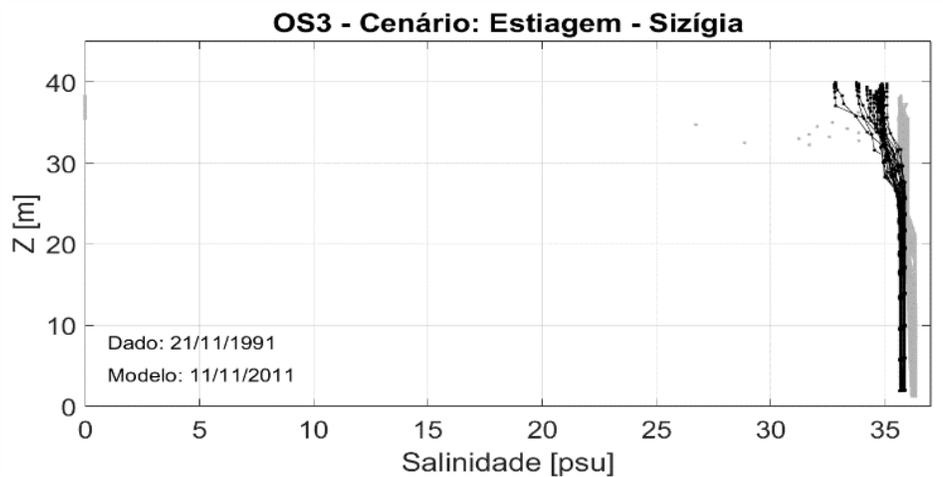
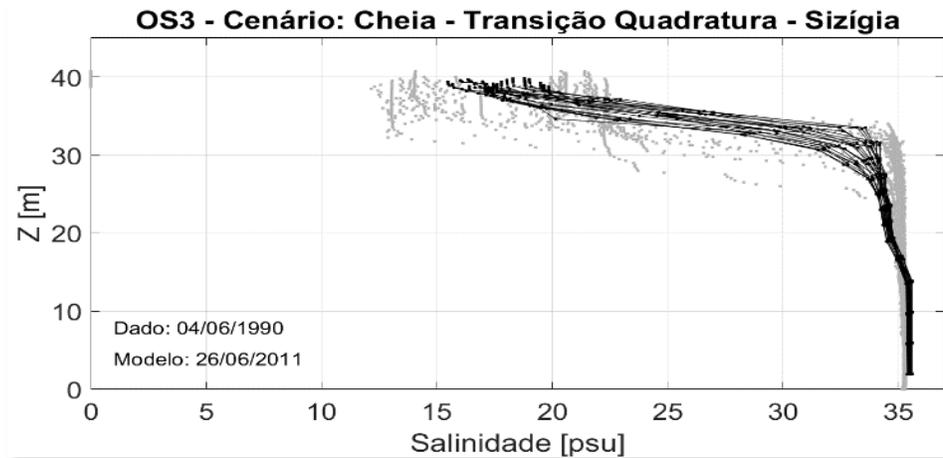
Estação FEMAR  
Machadinho



# Resultados – FZA – Elevação da Superfície



# Resultados – FZA – Perfil de Salinidade



- Representação quantitativa e qualitativa do fluxo principal da CNB;
- As variabilidades de mesoescala, emissão de vórtices e a intensificação sazonal da retroflexão da CNB;
- Datação aproximada (mensal e níveis de ocorrência sazonal) de fenômenos turbulentos;
- Representação da maré em regiões oceânicas e sobre a plataforma;
- Reprodução da estrutura espacial média vertical da circulação na área;
- Reprodução de feições de meso a pequena escala, como a Retroflexão e o vórtice Potiguar e de padrões de circulação costeira forçados por maré;
- Reprodução da estrutura termohalina no domínio e respectivas variações sazonais.
- Representação da estrutura vertical (mistura) e distribuição espacial da pluma do rio Amazonas.

- Os resultados obtidos levam a um conjunto de resultados numéricos sem precedentes na região de interesse.
- A estratégia de modelagem adotada obteve êxito na reprodução dos principais padrões de circulação oceânica presentes na região da Margem Equatorial Brasileira.
- A base hidrodinâmica final, com extensão de 10 anos, mostrou-se como uma alternativa operacional viável para estudos de licenciamento na região resultando em significativos ganhos na representação conjunta da circulação oceânica, de talude, plataforma e do estuário do rio Amazonas.



**TETRA TECH**

**Belém**

Rua Avertano Rocha, 192, sala 217 – Campina  
PA – Brasil – 66023-120 Tel: +55 91 99250 9960

**Belo Horizonte**

Av. Afonso Pena, 1500 - 5º andar – Centro  
MG - Brasil - 30130-921 Tel: +55 31 2104 2100

**Rio de Janeiro**

Av. Rio Branco, 01 - Sala 1603 – Centro  
RJ - Brasil - 20090-003 Tel: +55 21 3550 5310  
Chile – 7580110 Tel: +56 9 8229 0460

**São Paulo**

Rua Fidalga, 711 - Vila Madalena  
SP - Brasil - 05432-070 Tel: 55 11 3095 5050



Obrigado

[BRZ.contatos@tetrattech.com](mailto:BRZ.contatos@tetrattech.com)