

# **ANÁLISE DO EPISÓDIO DE “RECUO DO MAR” DE AGOSTO DE 2017 NA COSTA S/SE BRASILEIRA**

**ELOI MELO**

**FURG/UFSC**

**Professor (*oficialmente*) aposentado**

**PARTE I - INTRODUÇÃO**

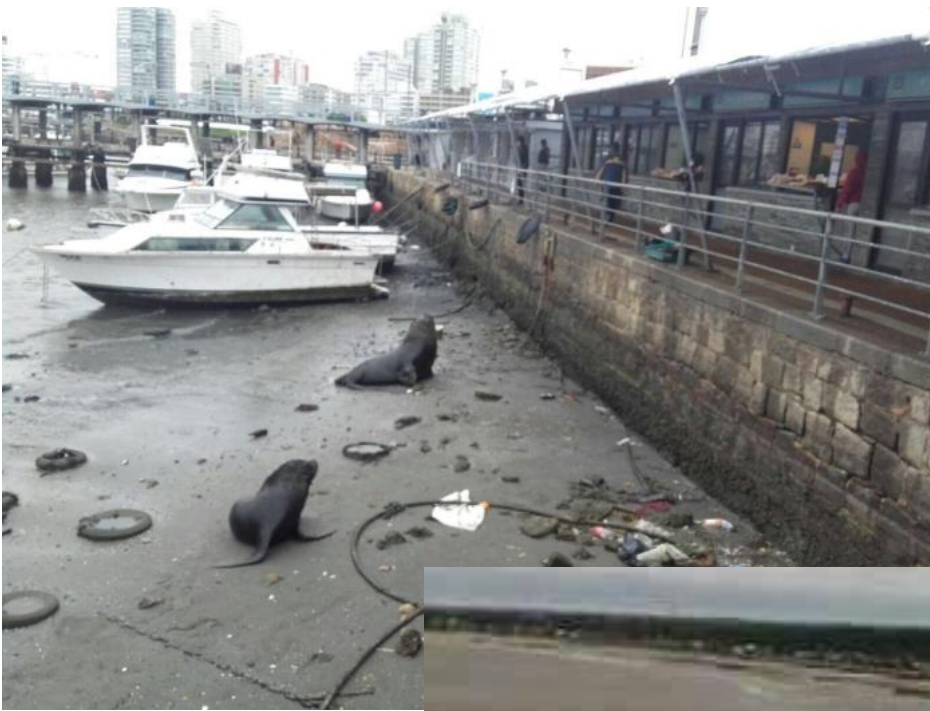
**PARTE II - ANÁLISE DO EVENTO**

**PARTE III - NOTA SOBRE A PREVISIBILIDADE DA MARÉ METEOROLÓGICA**

**OMAR Sat - Out/2017**

## PARTE I - INTRODUÇÃO

### Punta del Este, Uruguai





**Imbé, RS**



**Praia do Abrão, SC**



**Ilha Bela, SP**



**Santos, SP**



**Caraguatatuba, SP**



→ Além do rebaixamento de nível, o evento foi acompanhado por uma impressionante e rara mega-ondulação de LESTE na costa de SC



**Praia do Cardoso, Farol de Santa Marta, SC – dia 11/Ago/2017**

[ Fonte: Site WAVES ]

# **TESE**

**PROFESSOR TITULAR**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE**

## **MARÉ METEOROLÓGICA NA COSTA BRASILEIRA**

**Professor Eloi Melo Filho, Ph.D.**

**Engenharia Civil Costeira e Portuária**

**ABRIL / 2017**

**Disponível para “download” no Repositório Institucional da FURG:**  
<http://repositorio.furg.br/handle/1/7212>

**CAPÍTULO I**  
**Introdução: Conceitos Básicos, Justificativa e Objetivos** 14 pag

**CAPÍTULO II**  
**O Fenômeno na Natureza** 39 pag

**CAPÍTULO III**  
**O Fenômeno à Luz da Hidrodinâmica** 147 pag

**CAPÍTULO IV**  
**Aplicações** 58 pag

**CAPÍTULO V**  
**Considerações Finais** 9 pag

**APÊNDICES** 45 pag

**TOTAL = 328 pag** 8



## NÍVEL DO MAR NA COSTA

- MARÉ ASTRONÔMICA + “RESÍDUOS”  
conhecida - possível de ser prevista      gostaríamos de poder prever...

.

“RESÍDUOS” → Denominado aqui de “NÍVEL não-ASTRONÔMICO”  
... inclui a “MARÉ METEOROLÓGICA” mas não se restringe a ela

NÍVEL não-ASTRONÔMICO é decomposto em 3 componentes:

- Componente Sazonal
- Maré Meteorológica
- Componente Supra-Inercial ( Maré de Vento )

**DECOMPOSIÇÃO do NÍVEL não-ASTRONÔMICO**  
**Definição - Maré Meteorológica**

Identificação da Banda	Faixa de Períodos Cobertos	Banda de Frequências Correspondente
Sazonal	1 ano a 30 dias	0.0027 a 0.033 cpd.
<u>Maré Meteorológica</u>	<u>30 a 3 dias</u>	<u>0.033 a 0.33 cpd.</u>
Maré de Vento - inclui o “wind set-up/ set-down” e o “Storm Surge”	3 dias a 2 horas	0.33 a 12 cpd.

**Tabela II.3** - Identificação das bandas de frequência nas quais o nível não-astronômico foi decomposto (filtrado).

A definição exata dos limites das bandas é um tanto arbitrária uma vez que deve existir uma transição gradual entre uma banda e outra. A *maré meteorológica surge formalmente* pela primeira vez no presente trabalho e é *definida* como *flutuações de nível do mar de origem não-astronômica com periodicidade compreendida entre 3 e 30 dias.*

O limite superior da MM (30 dias) foi escolhido por ser o valor normalmente usado em estudos de mais longo termo sobre o nível do mar os quais utilizam séries do valor médio *mensal* do nível como base de dados. Já o limite inferior foi escolhido por ser a frequência que marca o início do aumento de energia do espectro do NnA como mostrado na seção anterior e também por marcar o limite da maré de tempestade. A rigor, esse limite deveria ser definido localmente em função do Período Inercial local, porém para facilitar a comparação entre sítios em diferentes latitudes, optou-se por usar um valor único fixado em *3 dias*.

## STORM SURGES

### ELEMENTS OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY

EDITORS

JOHN H. STEELE

STEVE A. THORPE

KARL K. TUREKIAN

**R. A. Flather**, Bidston Observatory, Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Hill, Prenton, UK

### Definition:

Storm surges are changes in water level generated by atmospheric forcing; specifically by the drag of the wind on the sea surface and by variations in the surface atmospheric pressure associated with storms. They last for periods ranging from a few hours to 2 or 3 days

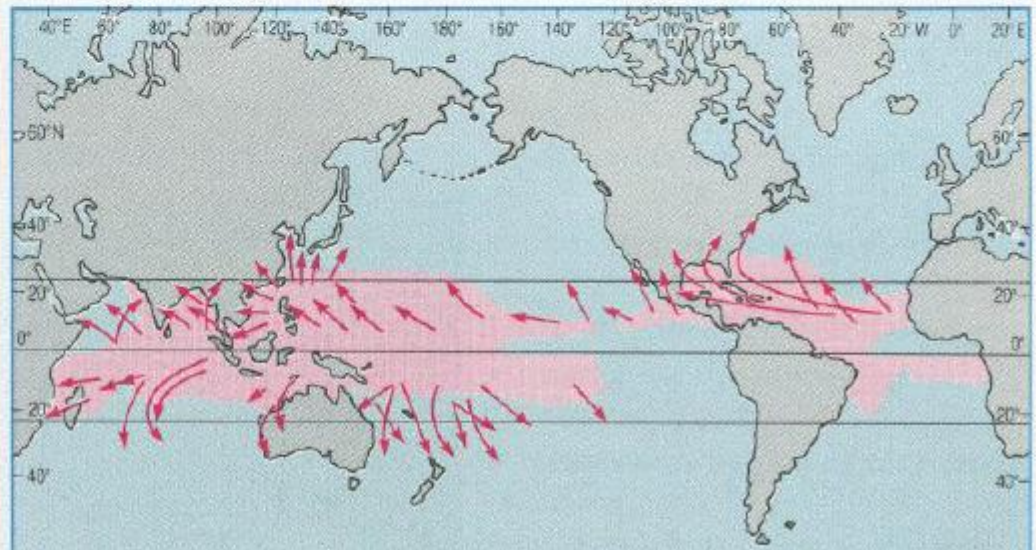
Big "Storms" → Hurricanes ... MAJOR concern in places subjected to Hurricanes ... like Miami

Brazil has NO Hurricanes !!!

... Winds in Rio are mild...

"Storms" (Extra-Tropical Cyclones) happen further South ...

Figure 2.15: Characteristic tracks followed by tropical cyclones. Initially they move westwards, but then generally curve polewards and eastwards around the subtropical high pressure centres. The red shaded regions are those areas where the sea-surface temperature exceeds 27°C in summer (September and March, in the Northern Hemispheres, respectively).

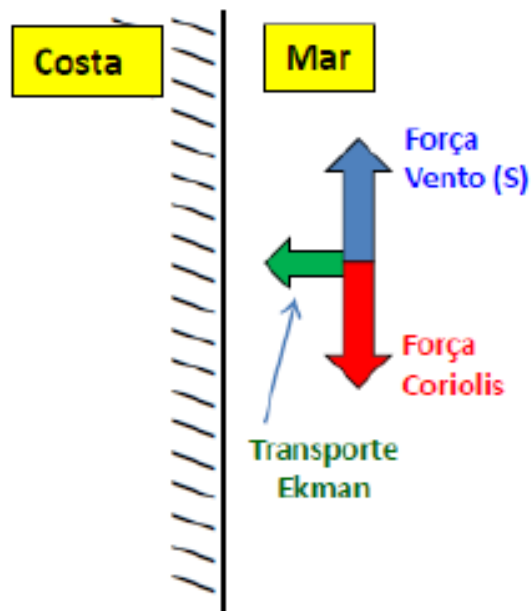


→ Vento perpendicular à costa é o principal agente motriz do fenômeno.  
→ Vento paralelo à costa participa de forma secundária.

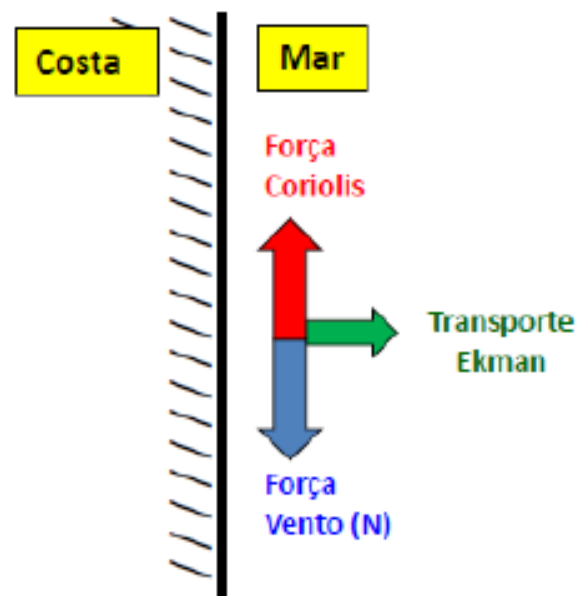
→ Vento Paralelo à Costa deve ser o Agente Motriz da Maré Meteorológica

Esquema do Mecanismo Físico para geração da Maré Meteorológica *local* na Costa S/SE brasileira pelo Vento

Maré Meteorológica POSITIVA

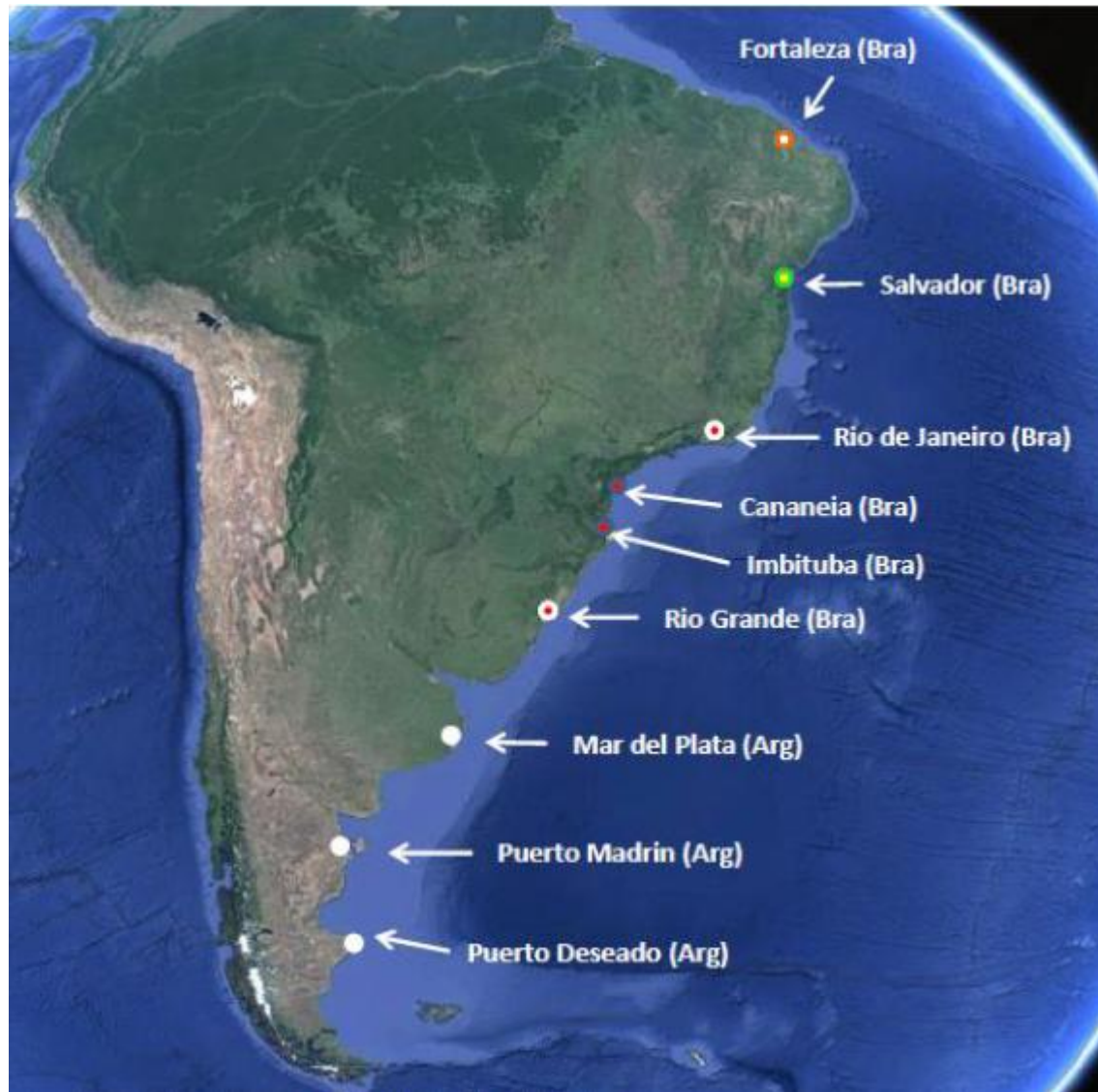


Maré Meteorológica NEGATIVA





## Análise Espaço – Temporal da Maré Meteorológica



### Conjunto #1 (dados simultâneos) Período : ano 2003

- Rio Grande (RS)
- Imbituba (SC)
- Cananéia (SP)
- Rio de Janeiro (RJ)

### Conjunto #2 (dados simultâneos) Período: Abr/2010 a Mar/2011 (1 ano)

- Puerto Deseado (Arg)
- Puerto Madryn (Arg)
- Mar del Plata (Arg)
- Rio Grande\* (Bra)
- Rio de Janeiro (RJ)

**Maré Meteorológica (MM) definida como:**

***Flutuações do nível do mar na costa de origem não-astronômica com periodicidade compreendida entre 3 e 30 dias***

**Estudo do Fenômeno na Natureza mostrou que :**

- **Análise Local *não* é suficiente para entender o Fenômeno**
- **Dados coletados em vários sítios desde a Patagonia até o Rio de Janeiro indicaram claramente que:**
  - **MM é móvel !**
  - **Sinal se desloca de Sul para Norte**
  - **Velocidade de deslocamento varia ao longo dos diferentes trechos da PC  
faixa de variação : 25 a 50 km/h**

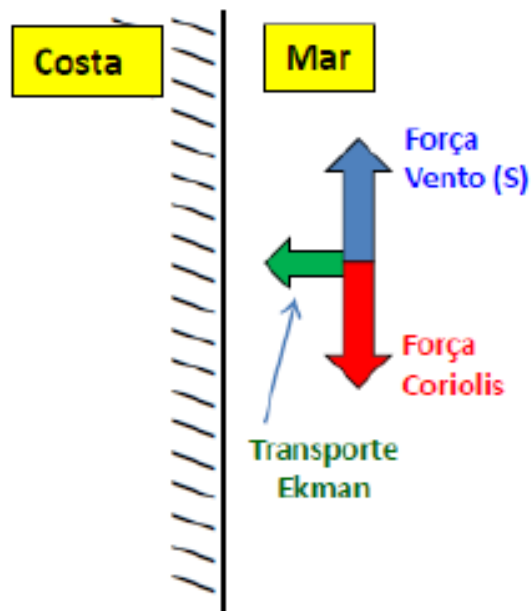
## Estudo do Fenômeno a luz da Hidrodinâmica mostrou que:

- Vento paralelo a costa atuando sobre a PC é a forçante dominante
- Vento atuando fora da PC tem efeito desprezível
- MM vem sempre acompanhada por um Corrente paralela à costa (Corrente Costeira)
- Apesar de responder diretamente a ação do vento, Corrente Costeira é geostrófica
- Atrito da Corrente Costeira com o fundo da PC controla evolução da MM
- Sem atrito, vento constante // costa poderia induzir MM que cresceria sem limite, atrito impõe um limite ao crescimento da MM
- Comprimento (finito) da Pista de Vento é o responsável pela mobilidade da MM
- Forma da PC controla a Velocidade de Deslocamento e a Amplitude da MM  
Em particular, a Largura da PC é o parâmetro chave:
  - se PC alargar → MM avança mais rápido e amplitude tende a aumentar
  - se PC estreitar → MM avança mais lentamente e amplitude tende a diminuir
- Inclinação do fundo da PC possibilita existência de “modos”:  
cada “modo” tem sua estrutura espacial e sua velocidade de propagação dados sugerem que “modo 1” domina completamente a resposta.
- MM “móvel” pode ser entendida como ondas que se propagam sobre a PC.  
→ ondas devem sua existência à rotação da Terra e tem sentido único de propagação no Hem. Sul propagam-se com a costa à esquerda (de S p/ N na costa brasileira)

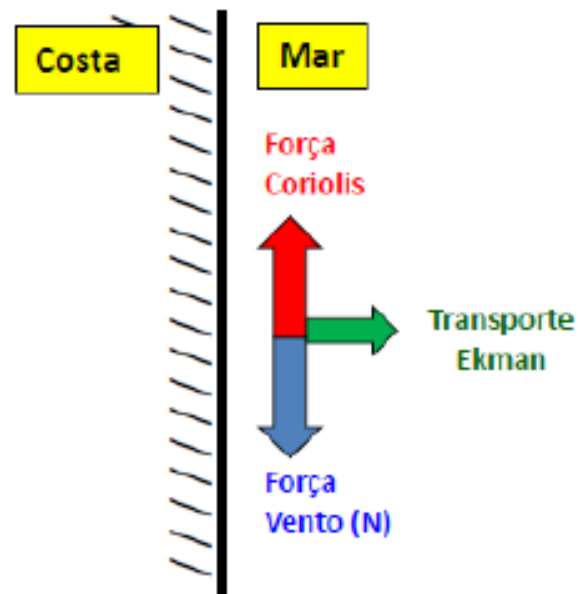
→ Vento Paralelo à Costa deve ser o Agente Motriz do Escoamento

Esquema do Mecanismo Físico para geração da Maré Meteorológica *local* na Costa S/SE brasileira pelo Vento

Maré Meteorológica POSITIVA



Maré Meteorológica NEGATIVA



Raciocínio correto porém *incompleto* por não considerar a mobilidade do fenômeno



## Porque a MM é móvel ?

A figura (III.61) mostra o balanço de massa para um vento soprando no sentido negativo de  $y$ .

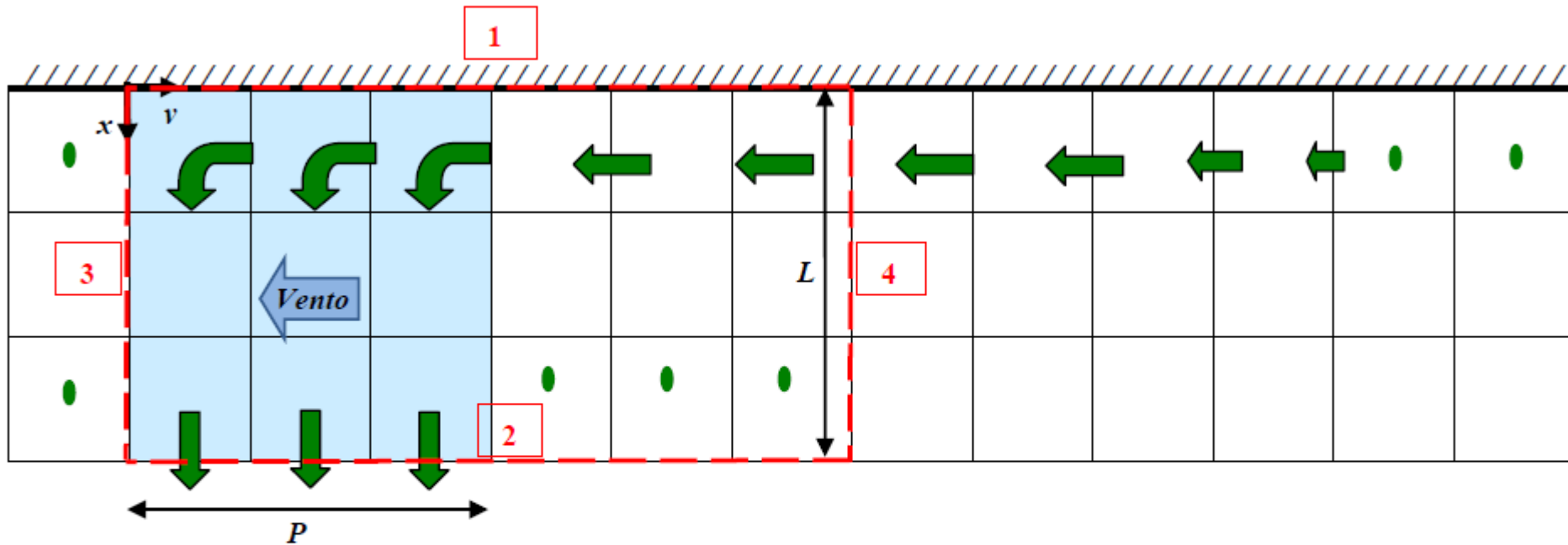
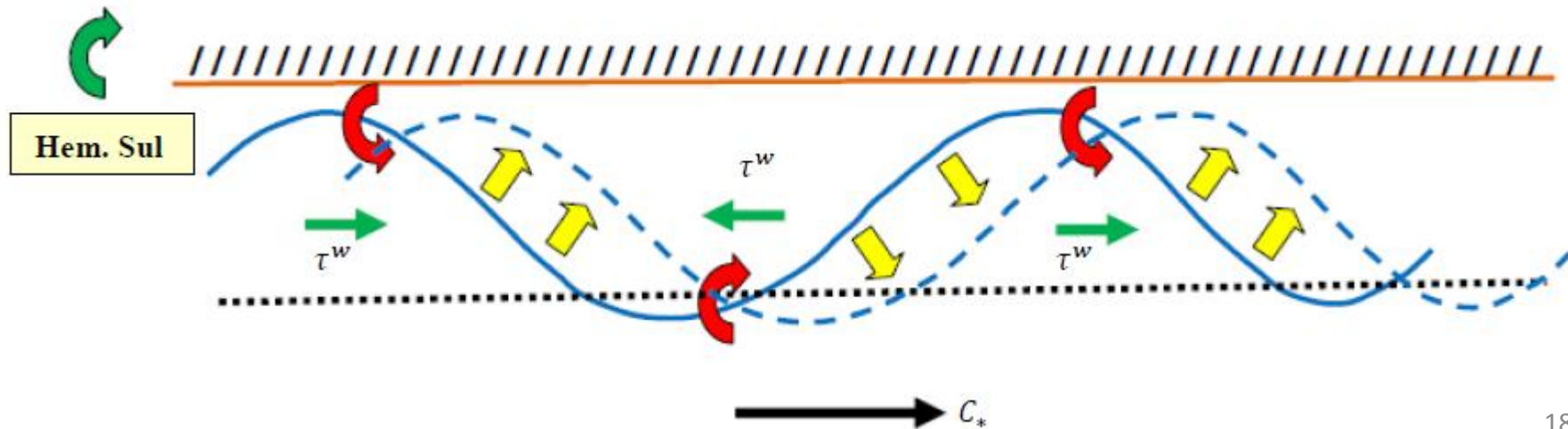
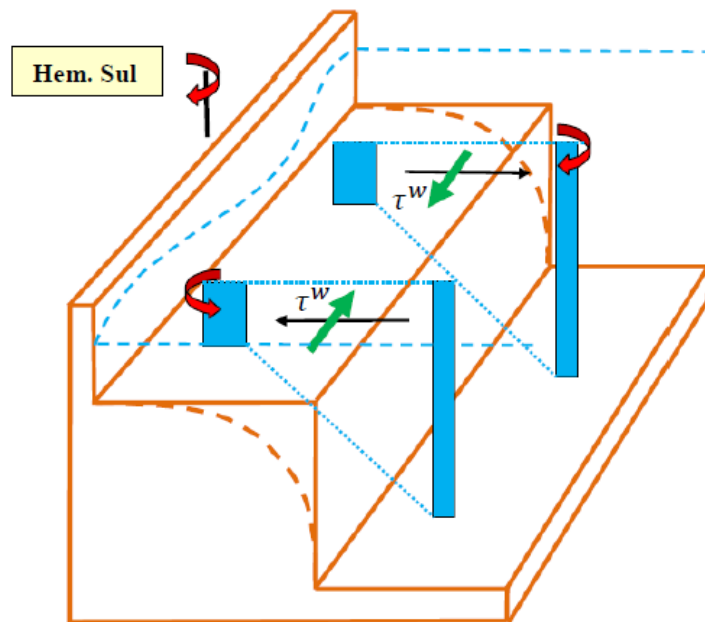


Figura III.61 - Similar a figura (III.56) para o caso de vento soprando no sentido negativo de  $y$ .

Do ponto de vista físico, observa-se que o vento agora atua no sentido de afastar a água da costa *dentro da pista* causando um rebaixamento de nível que avança progressivamente na direção de  $y > 0$ . Todas as considerações feitas para o caso de vento positivo continuam válidas nesse caso.

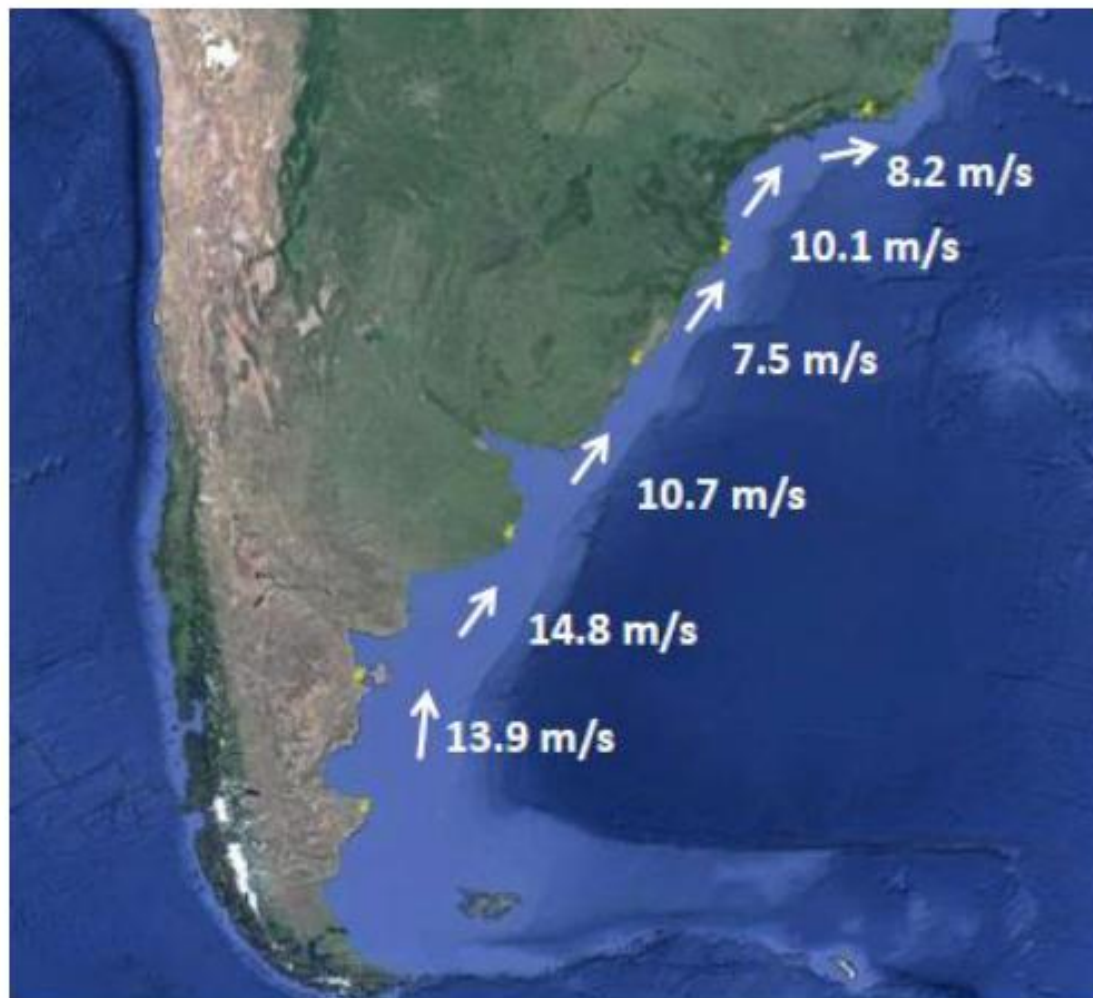
**RESPOSTA:** Porque variações de nível na costa na banda da Maré Meteorológica vão, *necessariamente*, criar correntes costeiras geostróficas que vão mover as águas ao longo da costa. Essas correntes vão transladar as oscilações de nível ao longo da costa. Como as correntes costeiras são geostróficas, o sentido das mesmas é determinado pelo hemisfério em questão.

## Porque a MM é móvel? Explicação sob a ótica da Vorticidade do Escoamento



**MM é MÓVEL !!! → “Sinal” se propaga de Sul para Norte ao longo da costa**

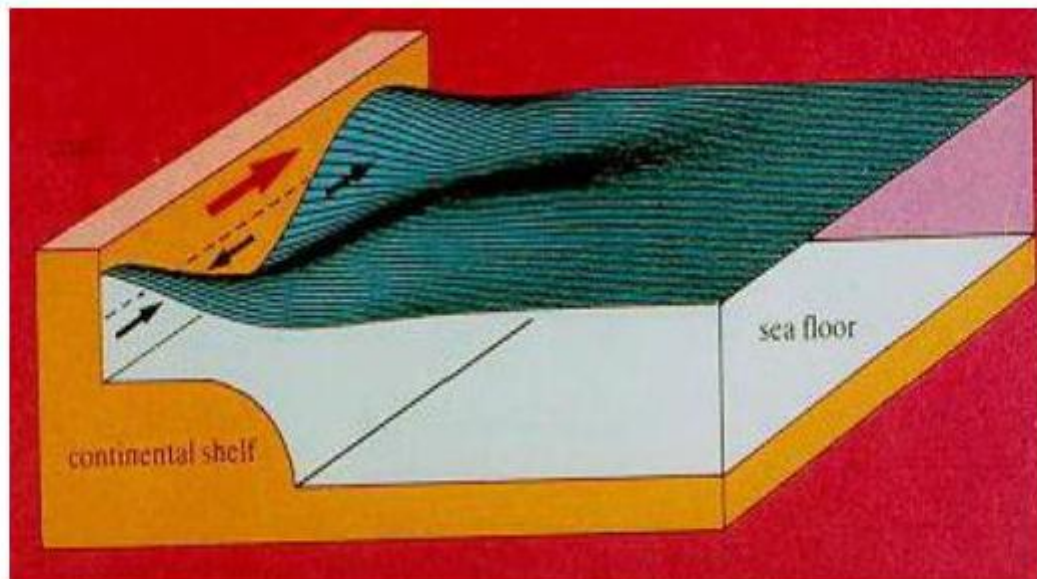
**Velocidade de Propagação da Maré Meteorológica**



## V.2.2 - Maré Meteorológica e Ondas de Plataforma Continental: uma Associação Inevitável

As perturbações *móveis* que compõem a MM podem (devem) ser interpretada como *ondas* que se movem *ao longo* da plataforma continental e que obedecem à mesma física descrita nas seções anteriores [ver figura (V.4) para uma ilustração esquemática do fenômeno]. Segundo Gill (1982) pag 409, essas ondas podem ser classificadas em 3 categorias:

- (i) Ondas de Kelvin – no caso de plataforma de profundidade constante, largura infinita e ladeada por uma parede vertical.
- (ii) Ondas de Plataforma Continental (“*Continental Shelf Waves*”) – no caso de plataforma com fundo inclinado e com águas homogêneas, e
- (iii) Ondas Costeiras Confinadas (“*Coastally Trapped Waves*”) – no caso de plataforma com fundo inclinado e com águas estratificadas.

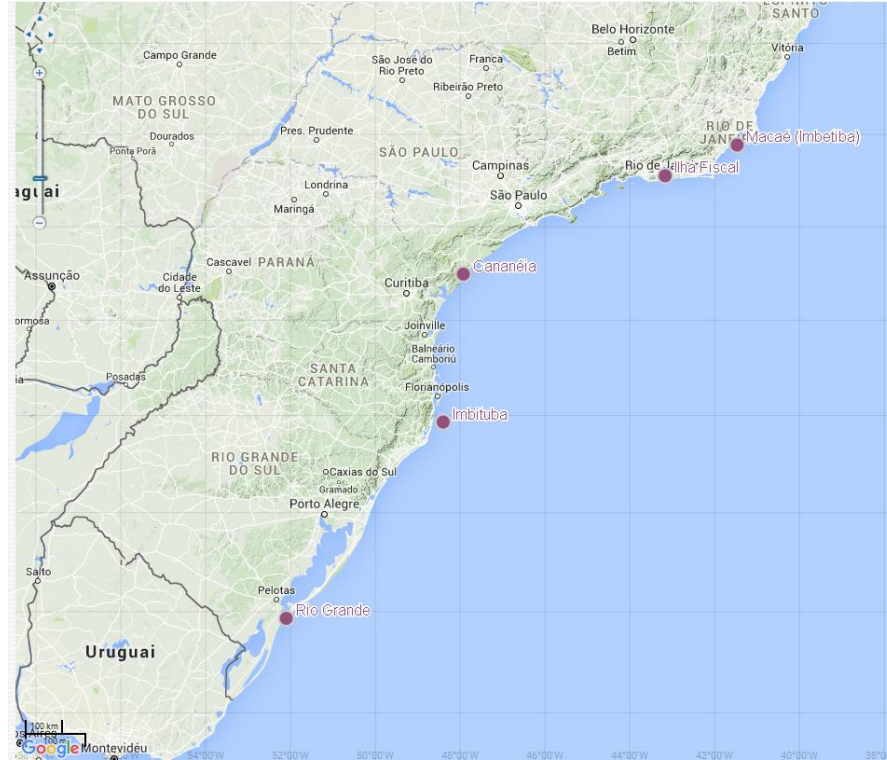




## PARTE II - ANÁLISE do EVENTO

**NÍVEL do MAR** → Usar medições de nível (simultaneas) em:

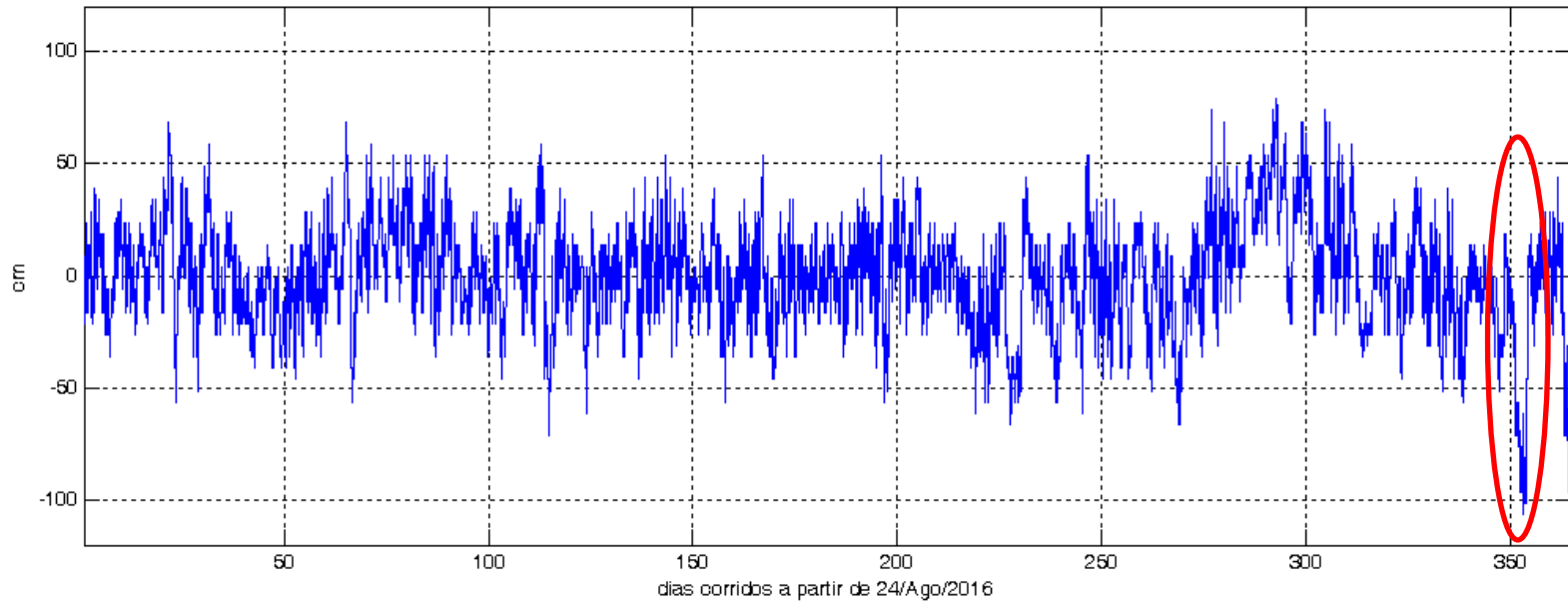
- Rio Grande, RS
- Imbituba, SC
- Ubatuba, SP
- Arraial do Cabo, RJ



**CENÁRIO METEOROLÓGICO** → Dados do ECMWF

# RIO GRANDE

## Maré “Bruta”



**OBS : Zero corresponde ao nível médio “anual” – 365 dias a partir de 24/Ago/2016**

**[ Fonte de dados: RG Pilots ]**

# RIO GRANDE

## Maré “Bruta”

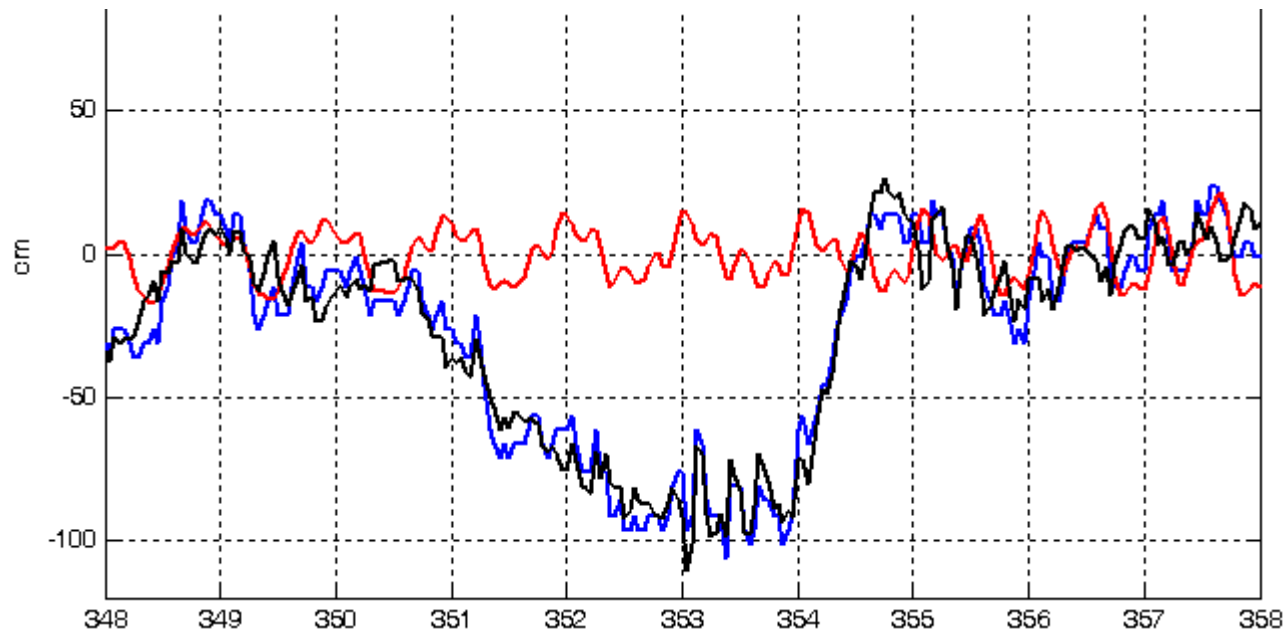


**OBS : Zero corresponde ao nível médio “anual” – 365 dias a partir de 24/Ago/2016**

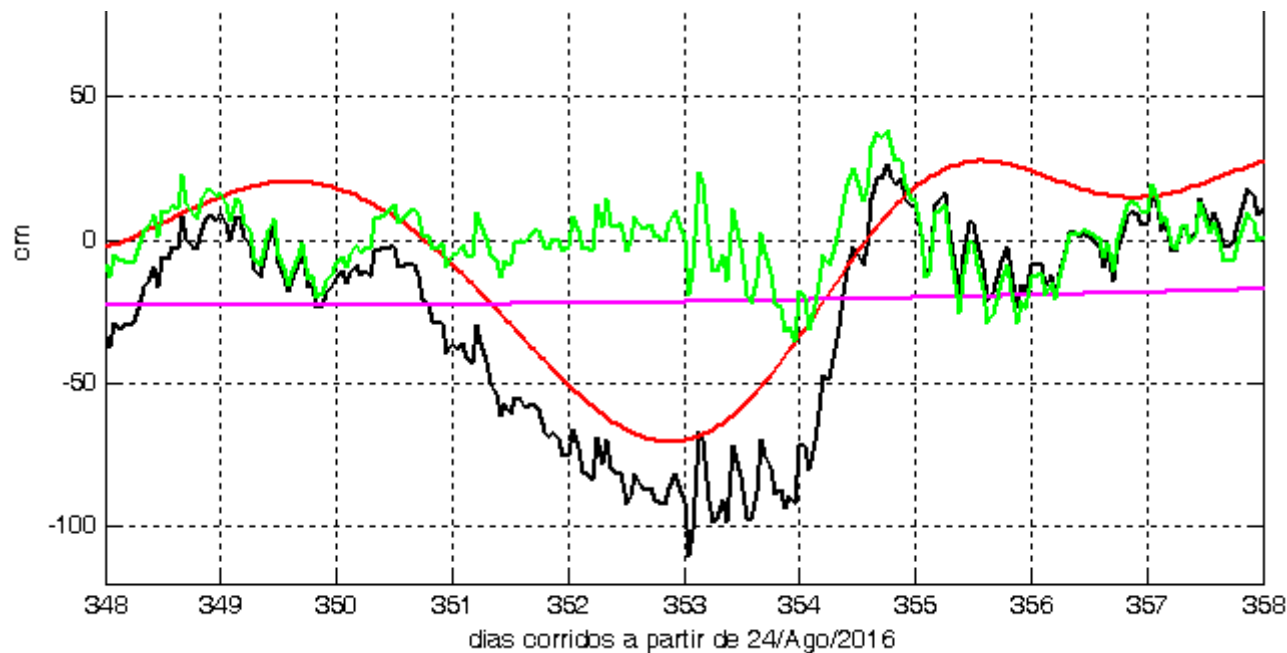
**[ Fonte de dados: RG Pilots ]**

# RIO GRANDE

- Maré Bruta
- Maré Astro
- Nível não-Astro

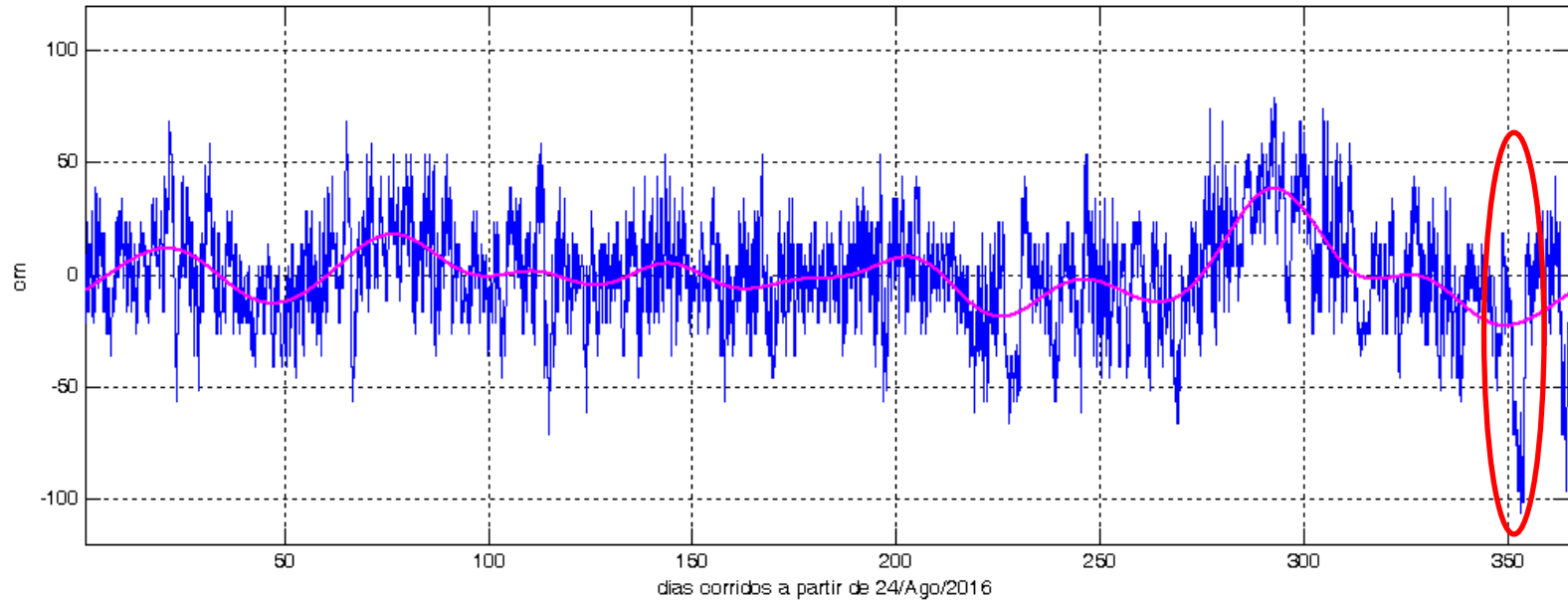


- Nível não-Astro
- Maré Meteorológica
- Comp. Sazonal
- Comp. Supra-Inercial



# RIO GRANDE

## Maré “Bruta” + Componente Sazonal



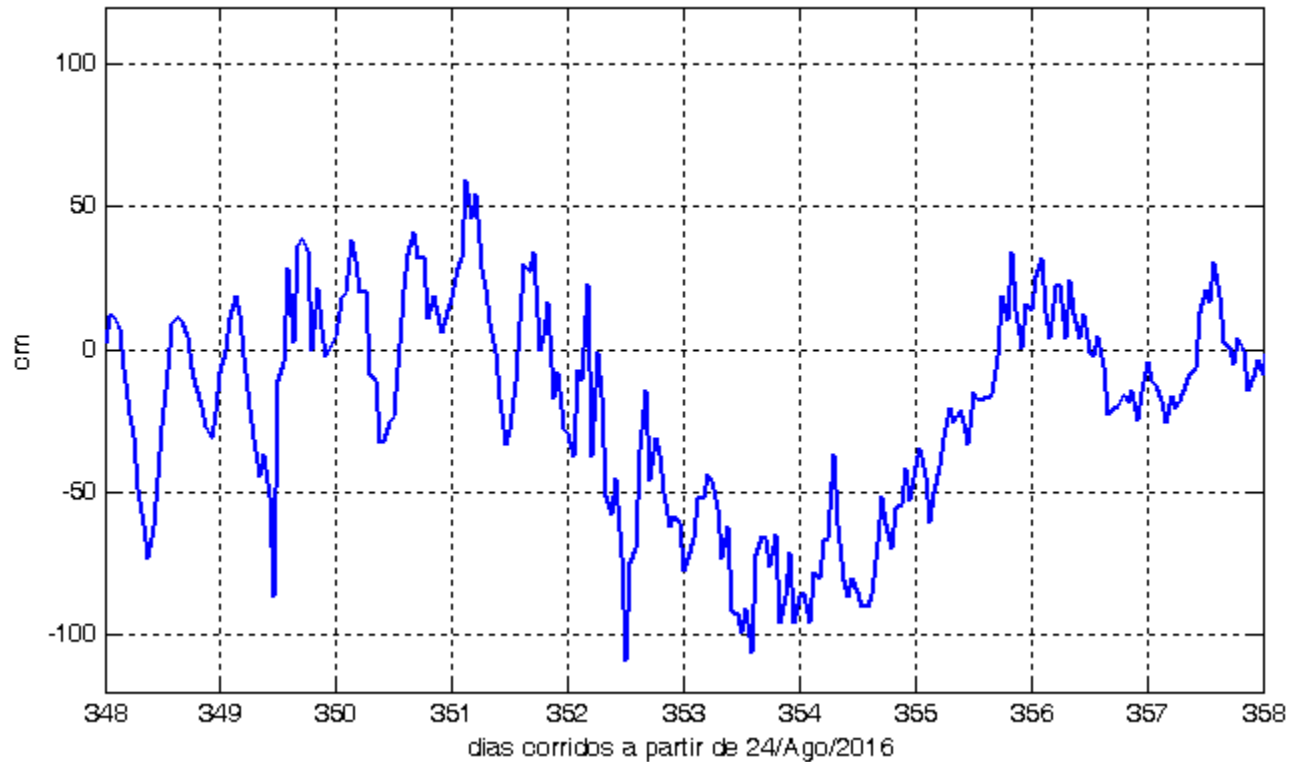
**OBS : Zero corresponde ao nível médio “anual” – 365 dias a partir de 24/Ago/2016**

**[ Fonte de dados: RG Pilots ]**



# IMBITUBA

## Maré “Bruta”

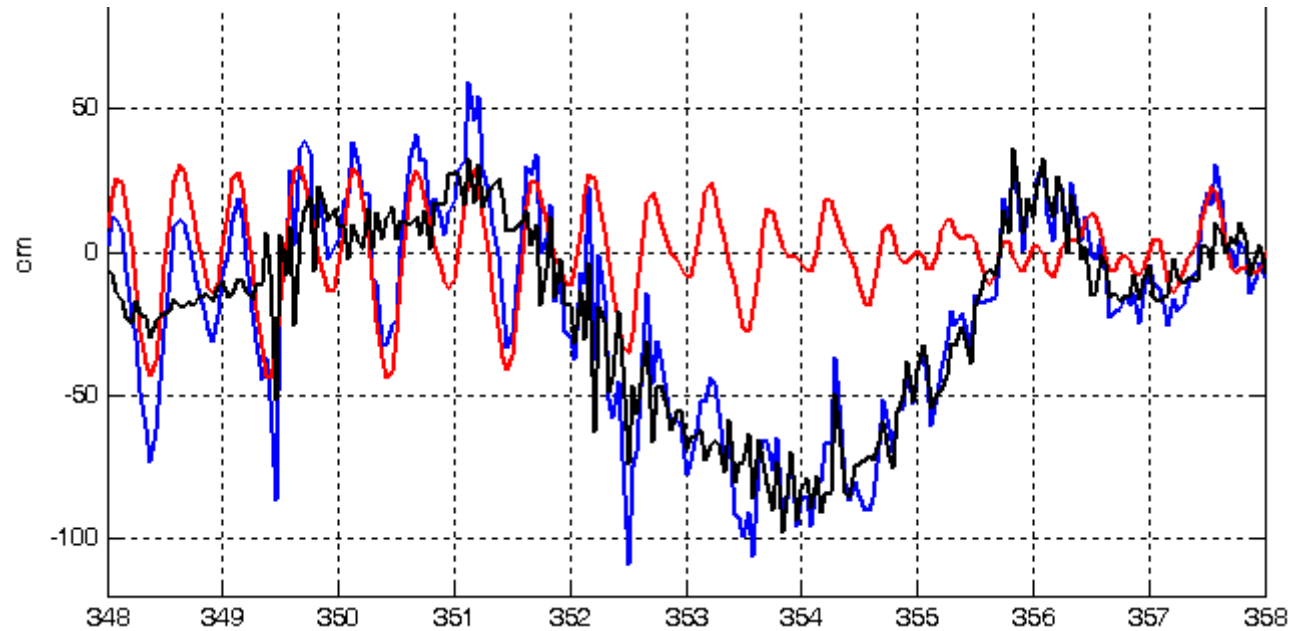


**OBS : Zero corresponde ao nível médio “anual” – 365 dias a partir de 24/Ago/2016**

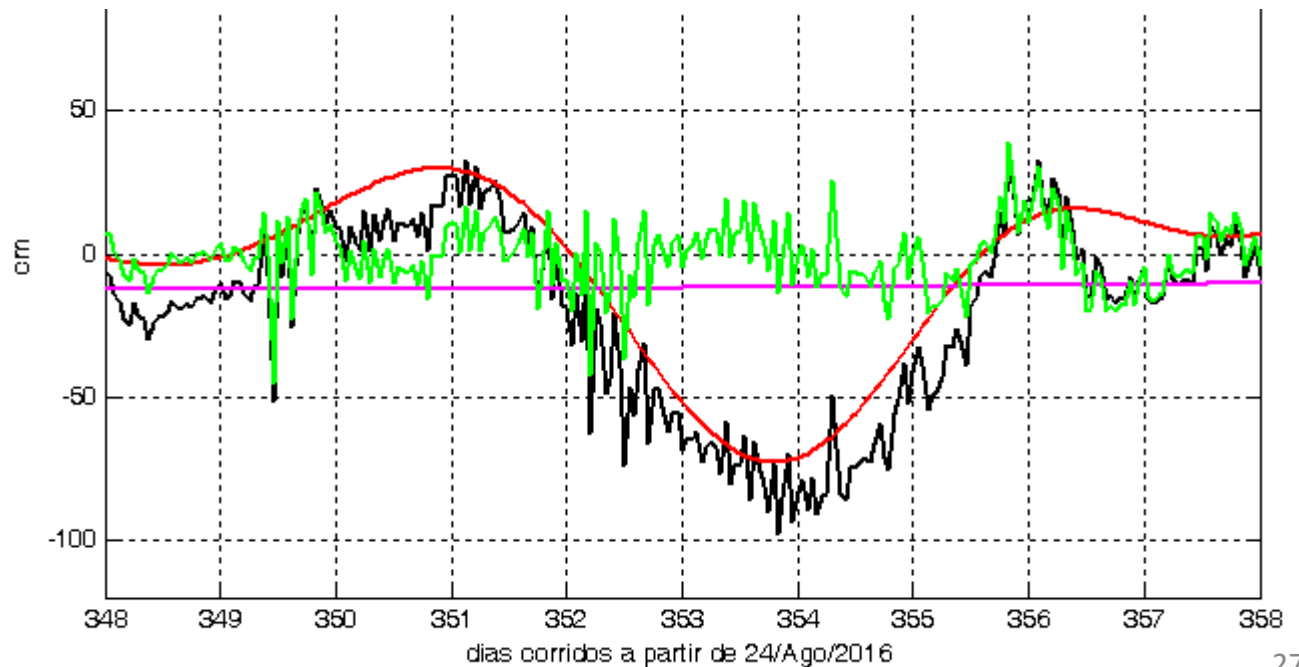
**[ Fonte de dados: EPAGRI/SC ]**

# IMBITUBA

- Maré Bruta
- Maré Astro
- Nível não-Astro

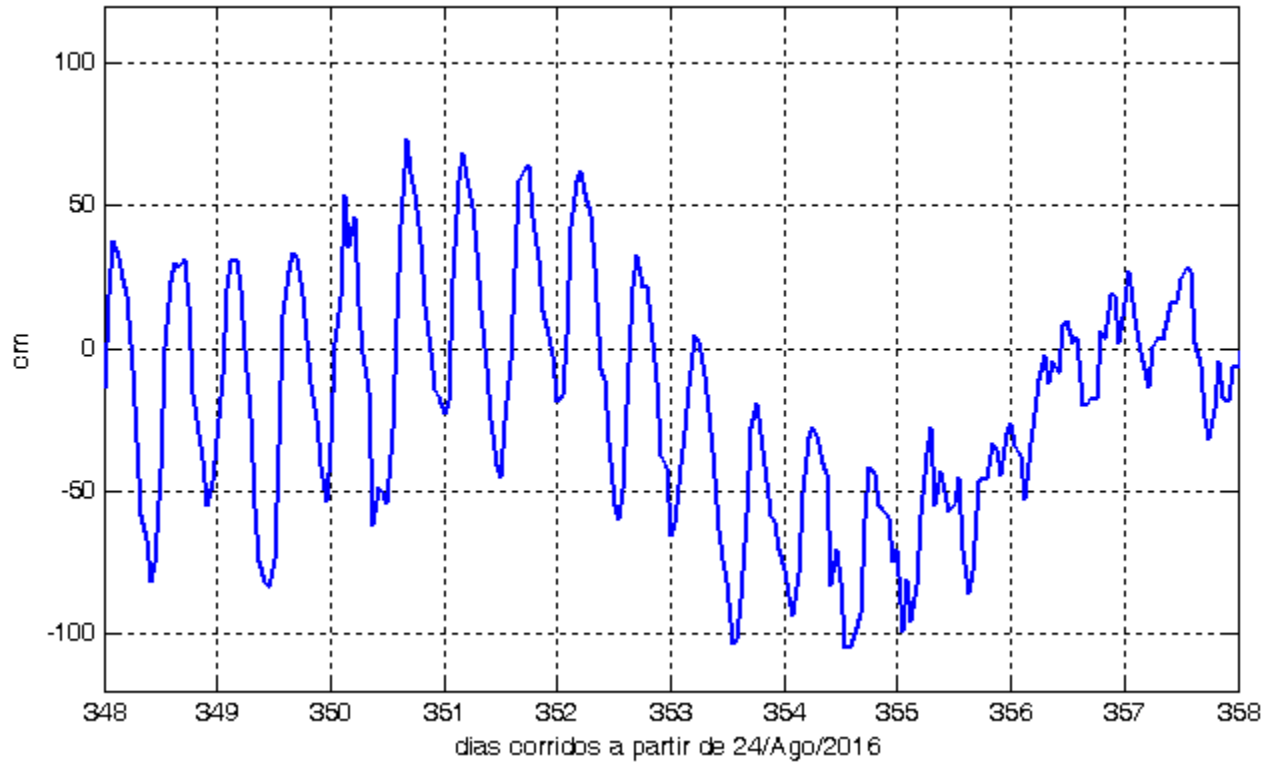


- Nível não-Astro
- Maré Meteorológica
- Comp. Sazonal
- Comp. Supra-Inercial



# UBATUBA

## Maré “Bruta”

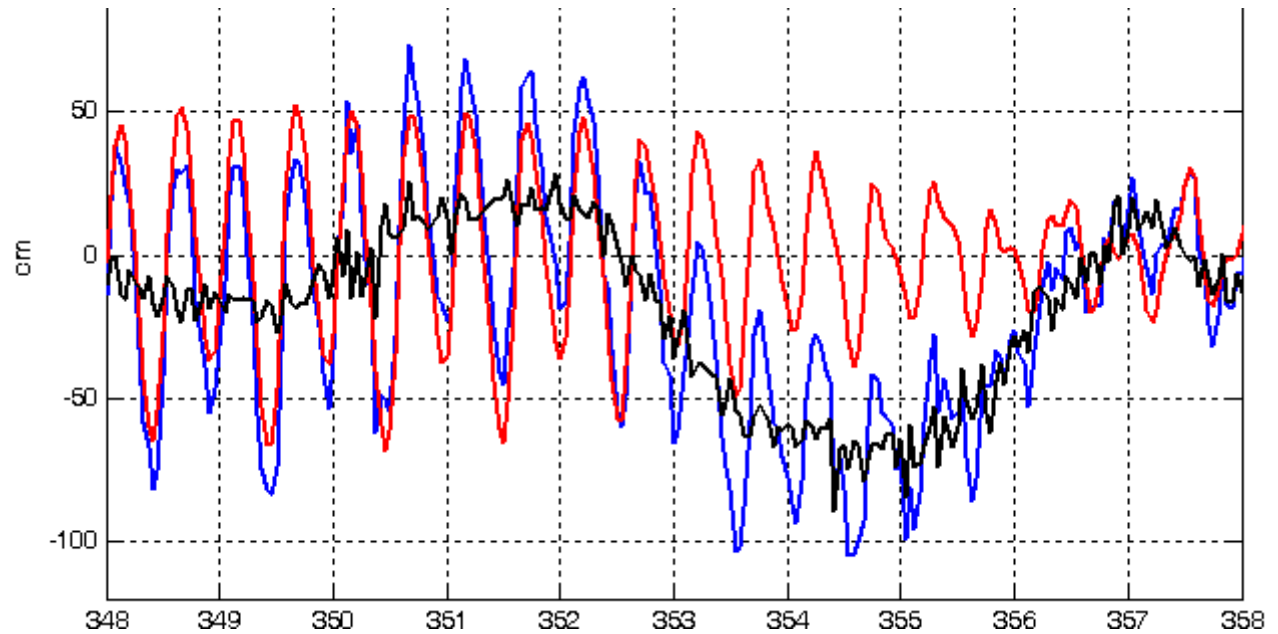


**OBS : Zero corresponde ao nível médio “anual” – 365 dias a partir de 24/Ago/2016**

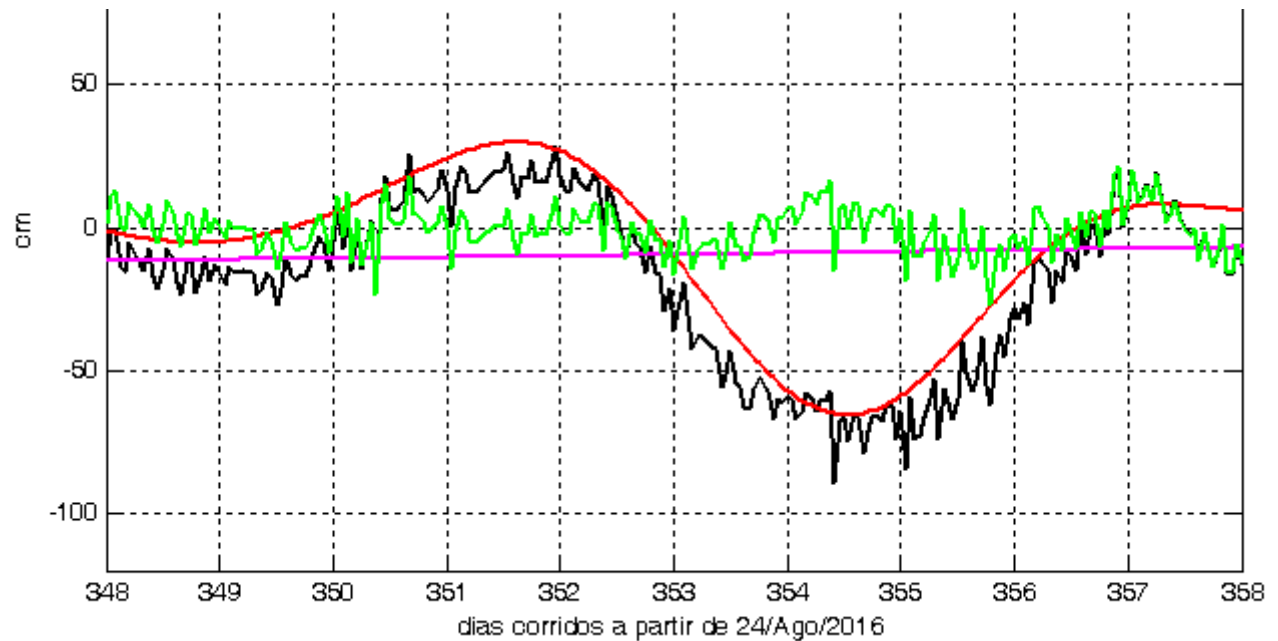
**[ Fonte de dados: GLOSS/Brasil ]**

# UBATUBA

- Maré Bruta
- Maré Astro
- Nível não-Astro

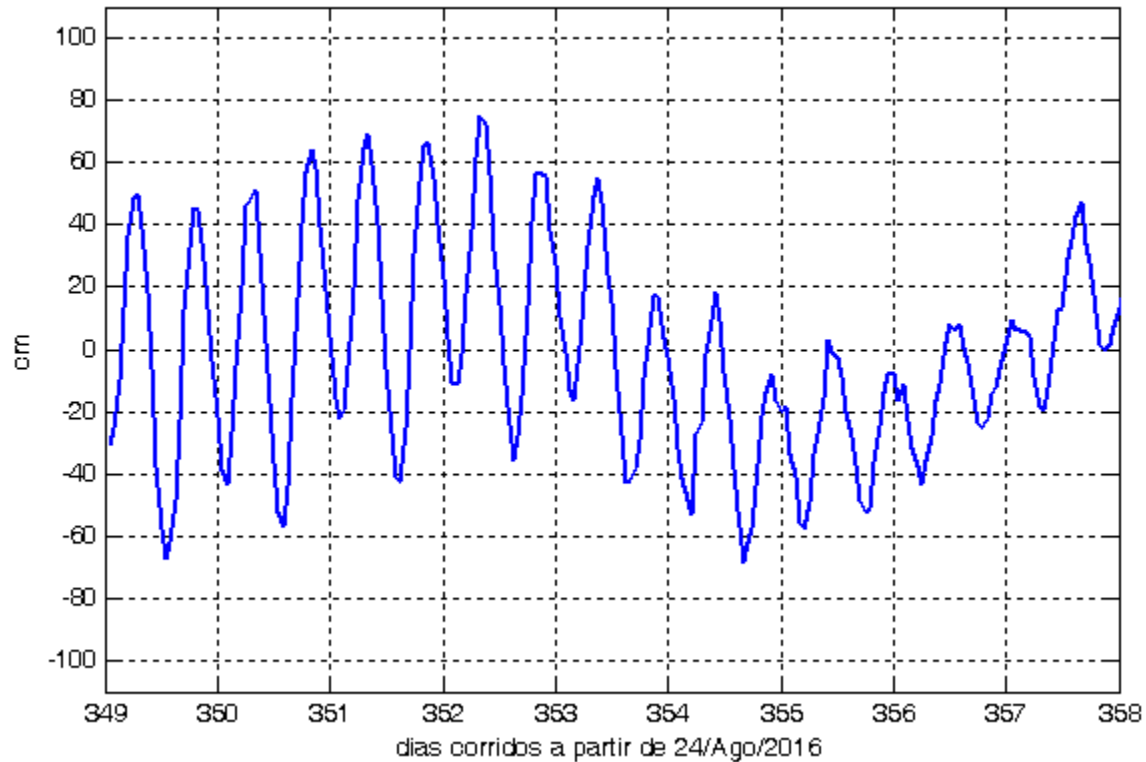


- Nível não-Astro
- Maré Meteorológica
- Comp. Sazonal
- Comp. Supra-Inercial



# ARRAIAL do CABO

## Maré “Bruta”



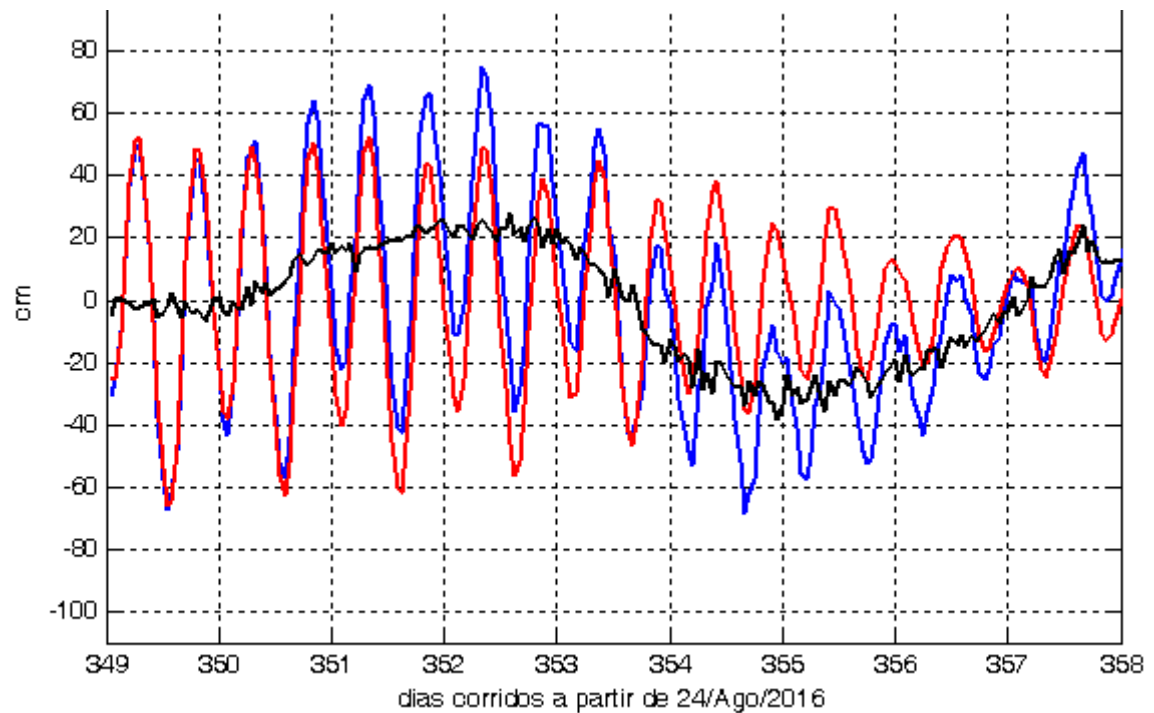
**OBS : Zero corresponde ao nível médio dos dias de medição**

**[ Fonte de dados: IBGE ]**



## ARRAIAL do CABO

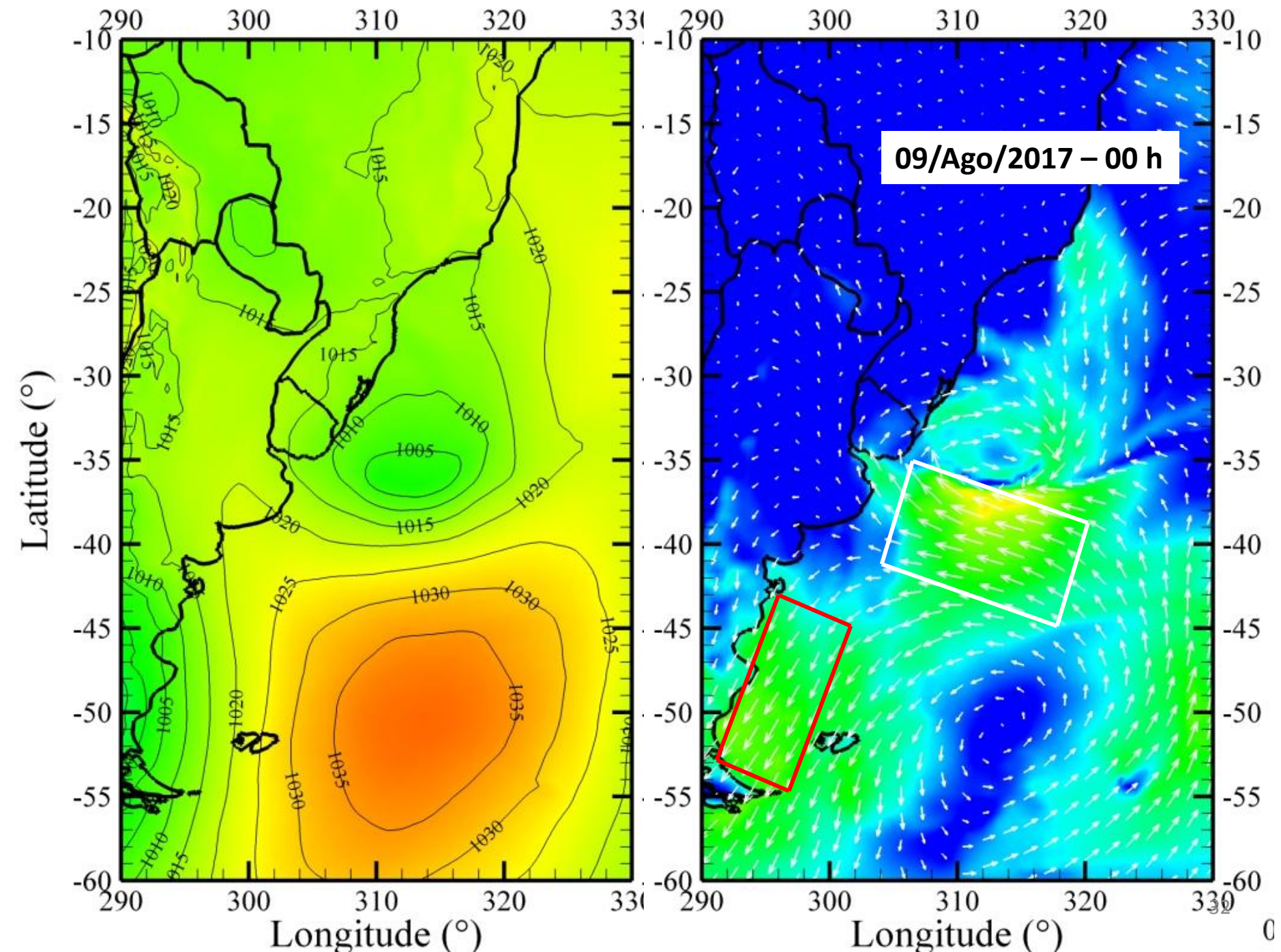
- Maré Bruta
- Maré Astro
- Nível não-Astro



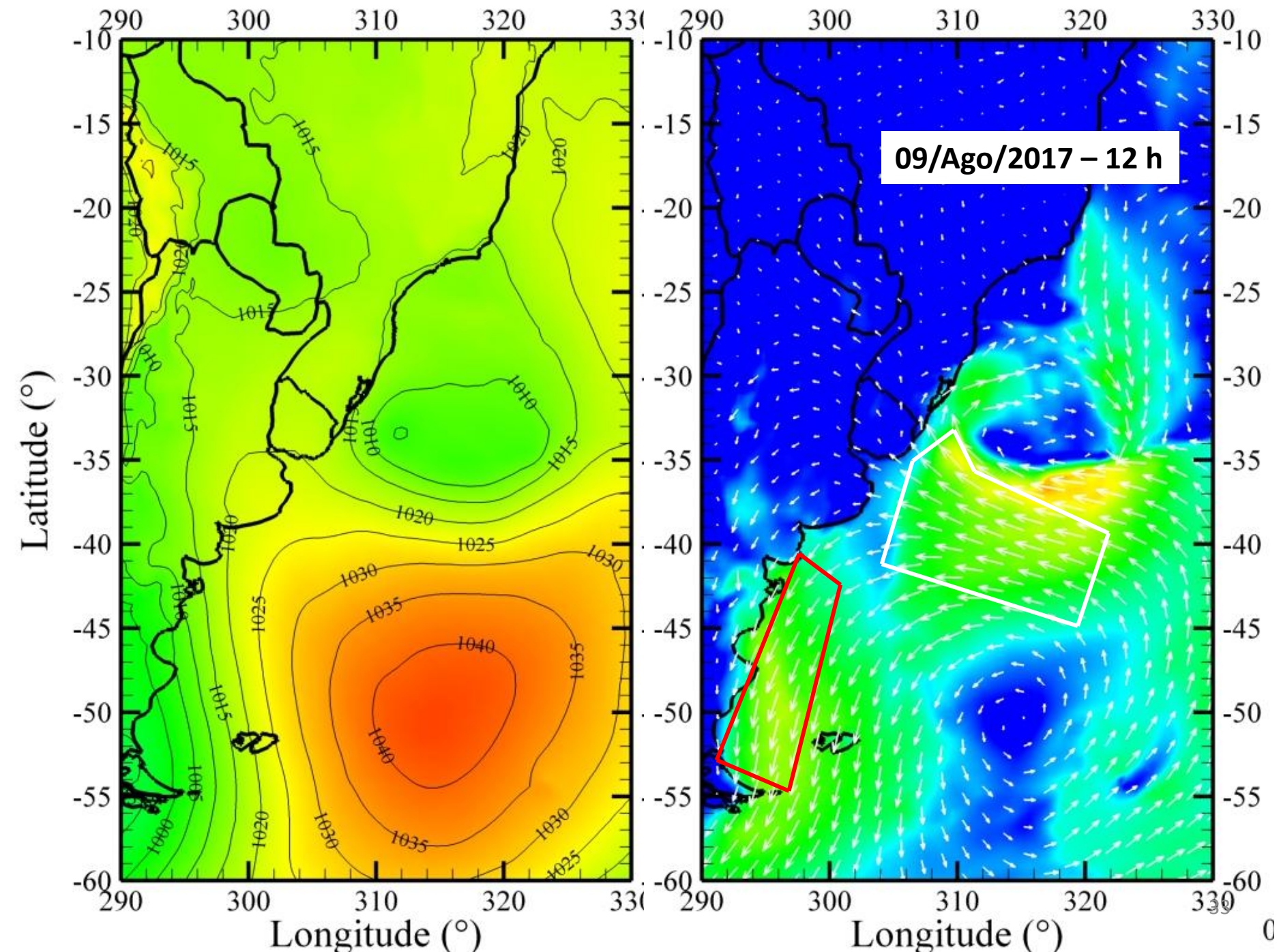
- Nível não-Astro
- Maré Meteorológica
- Comp. Sazonal
- Comp. Supra-Inercial

**Não foi possível realizar a decomposição pela curta duração dos dados**

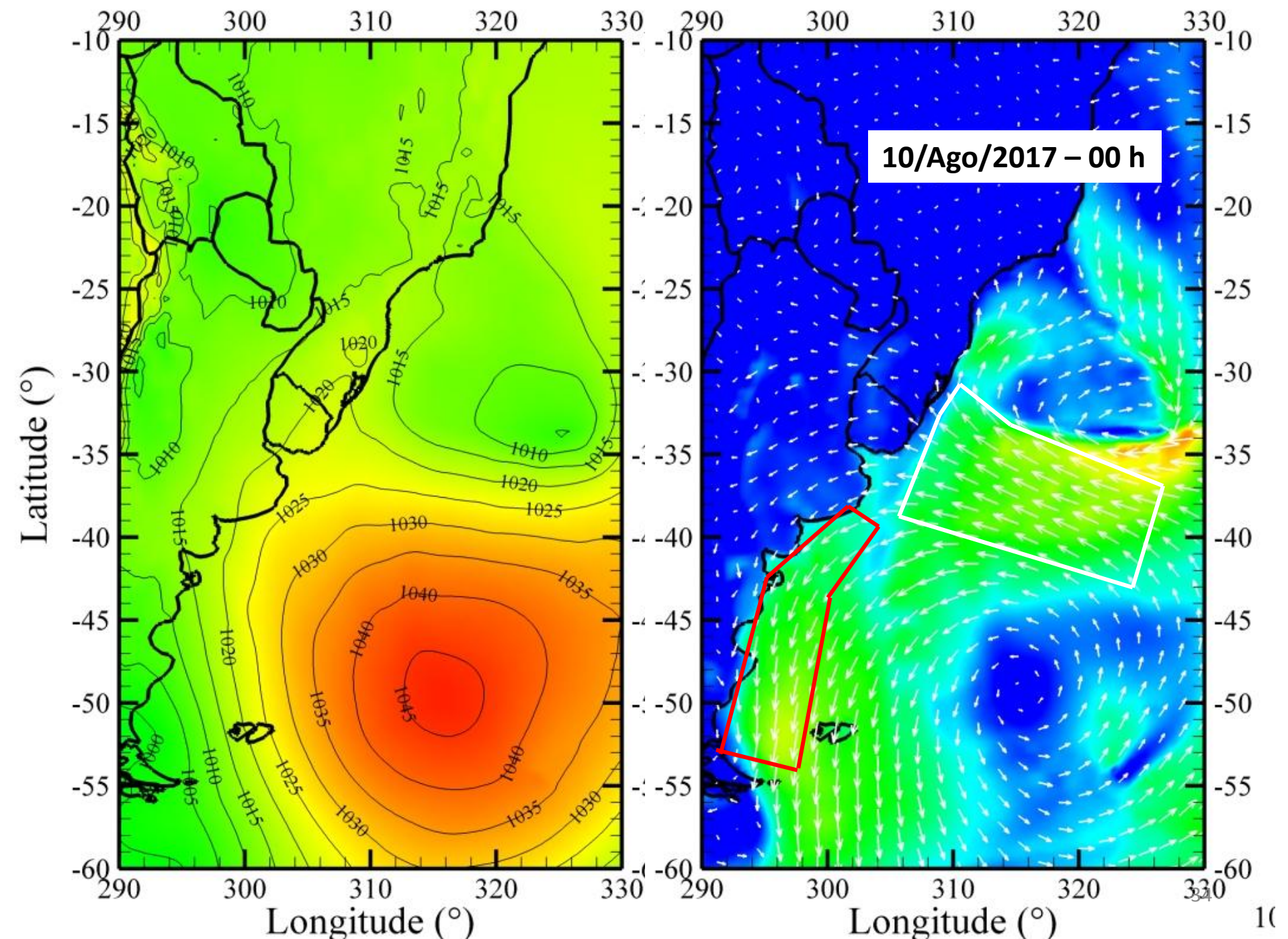
**CONCLUSÃO : Rebaixamento de Nível foi ocasionado por fatores não-astronômicos e amplamente dominado pela Maré Meteorológica**



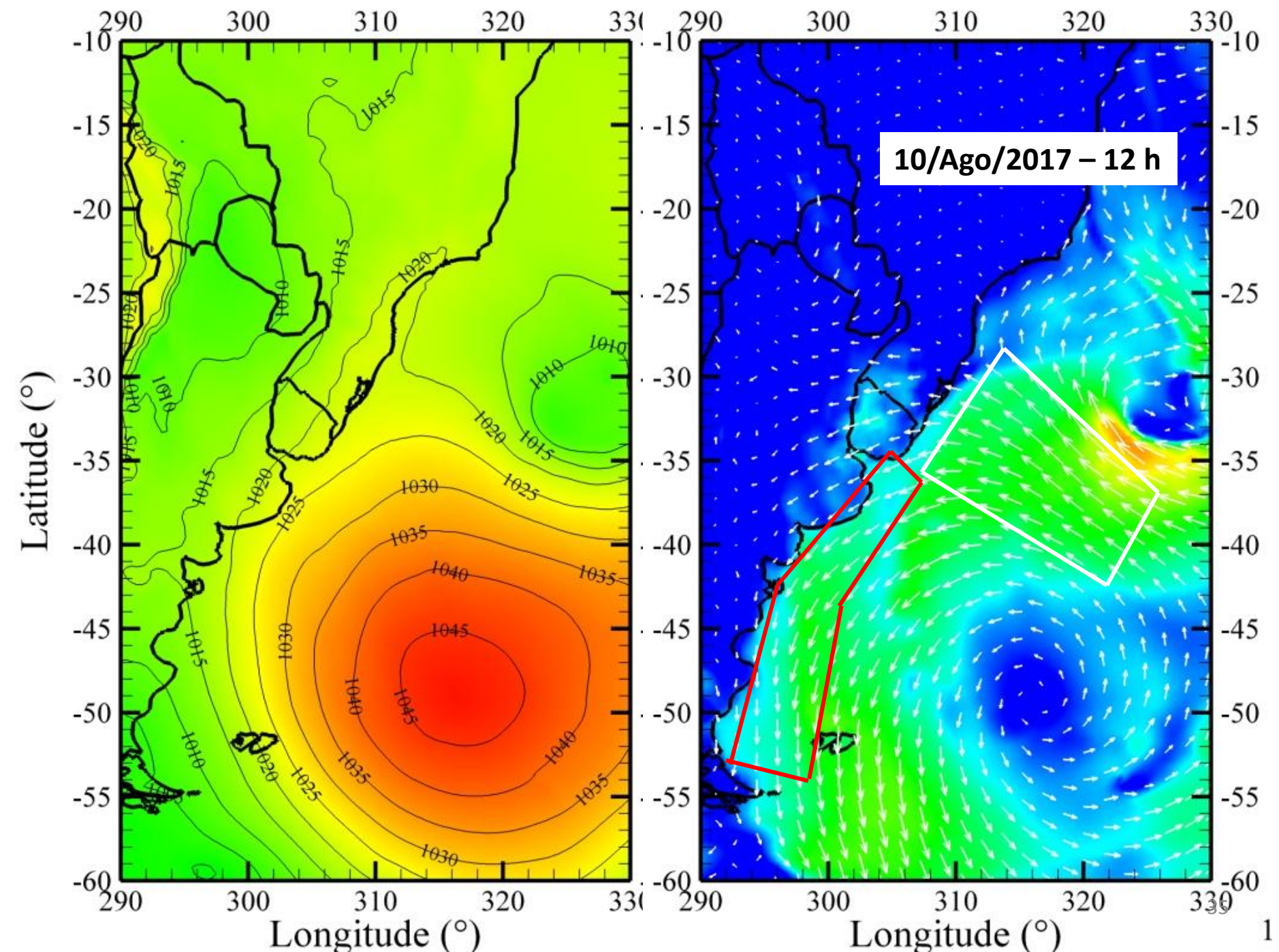




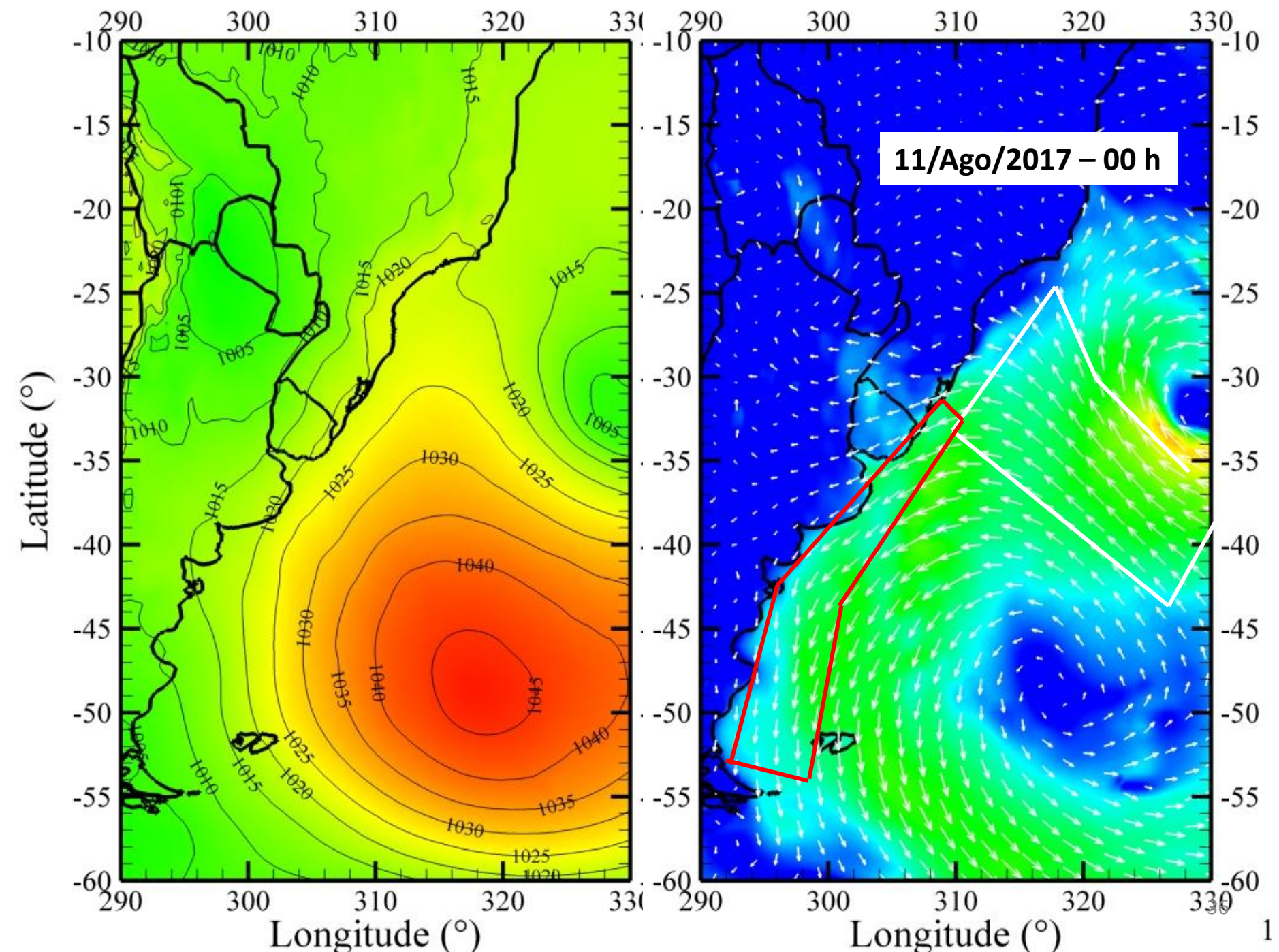




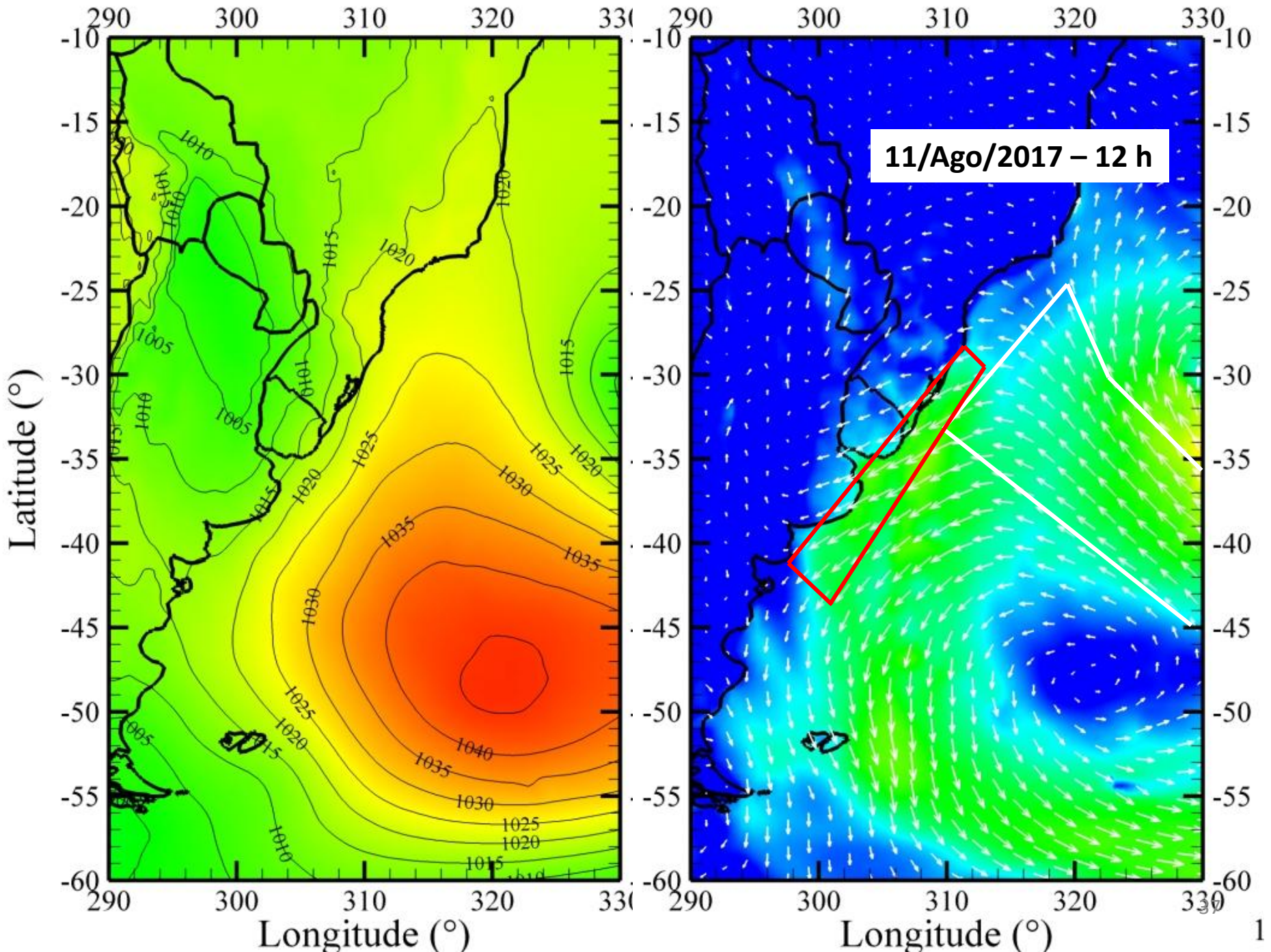




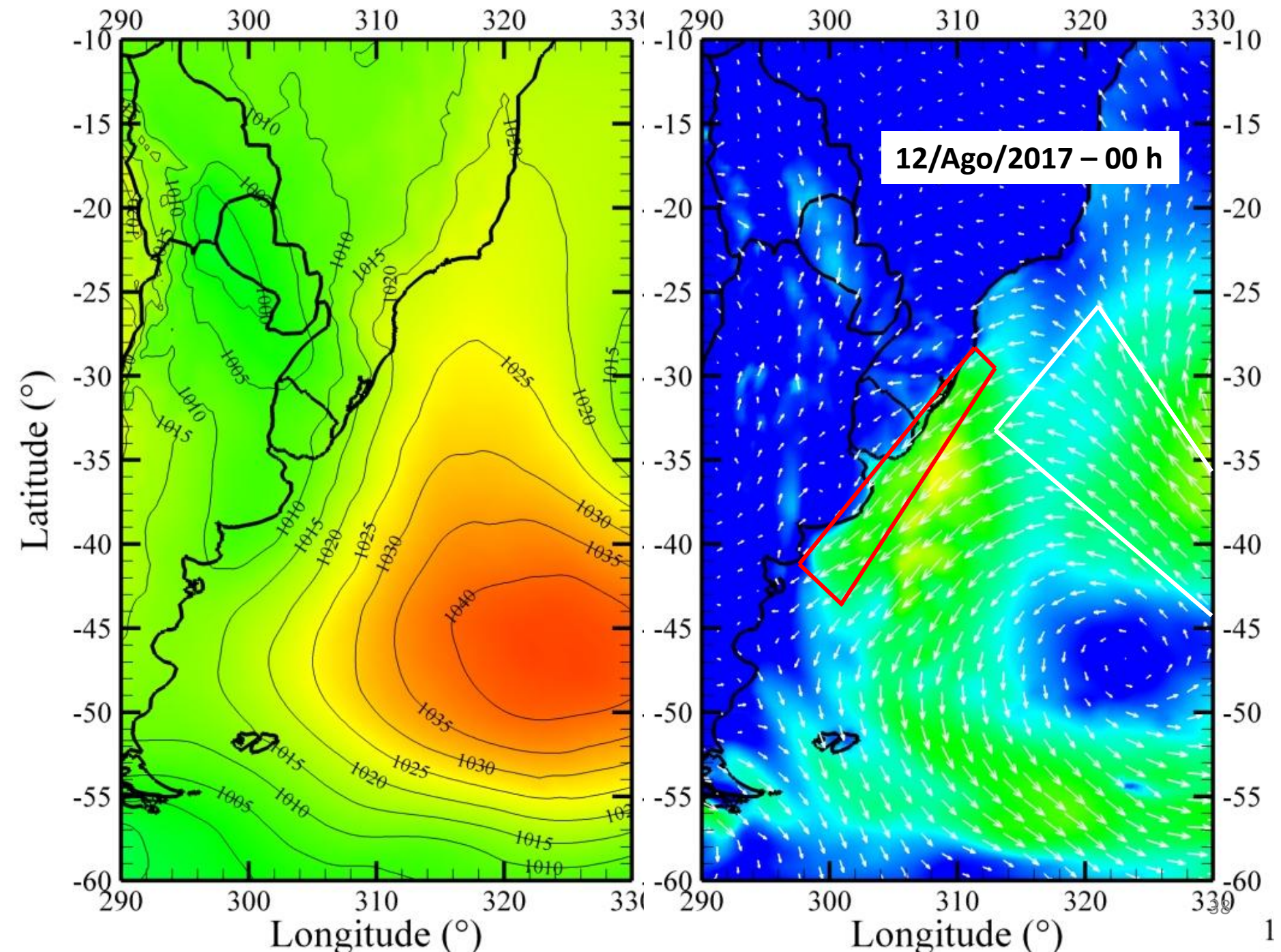




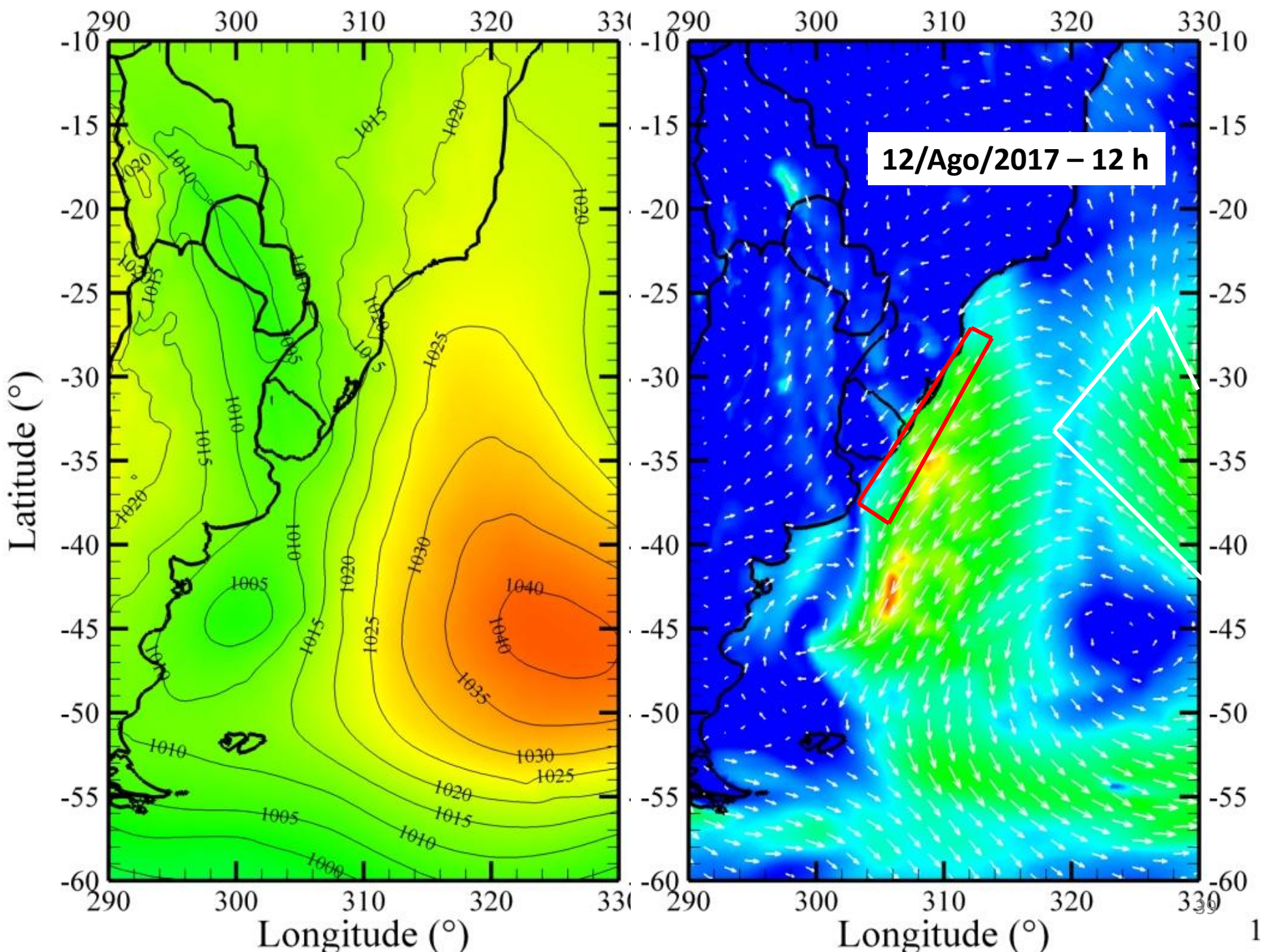




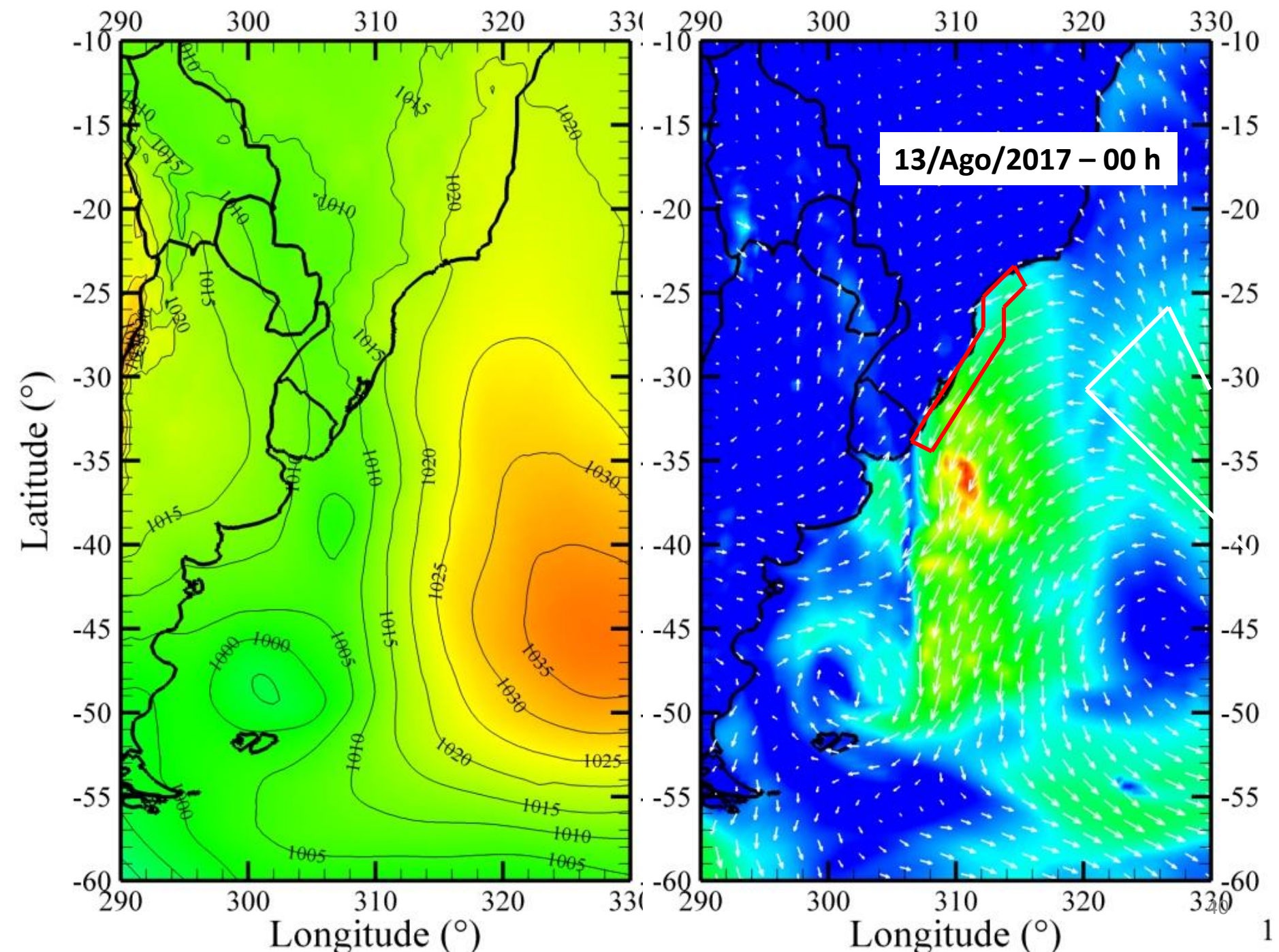




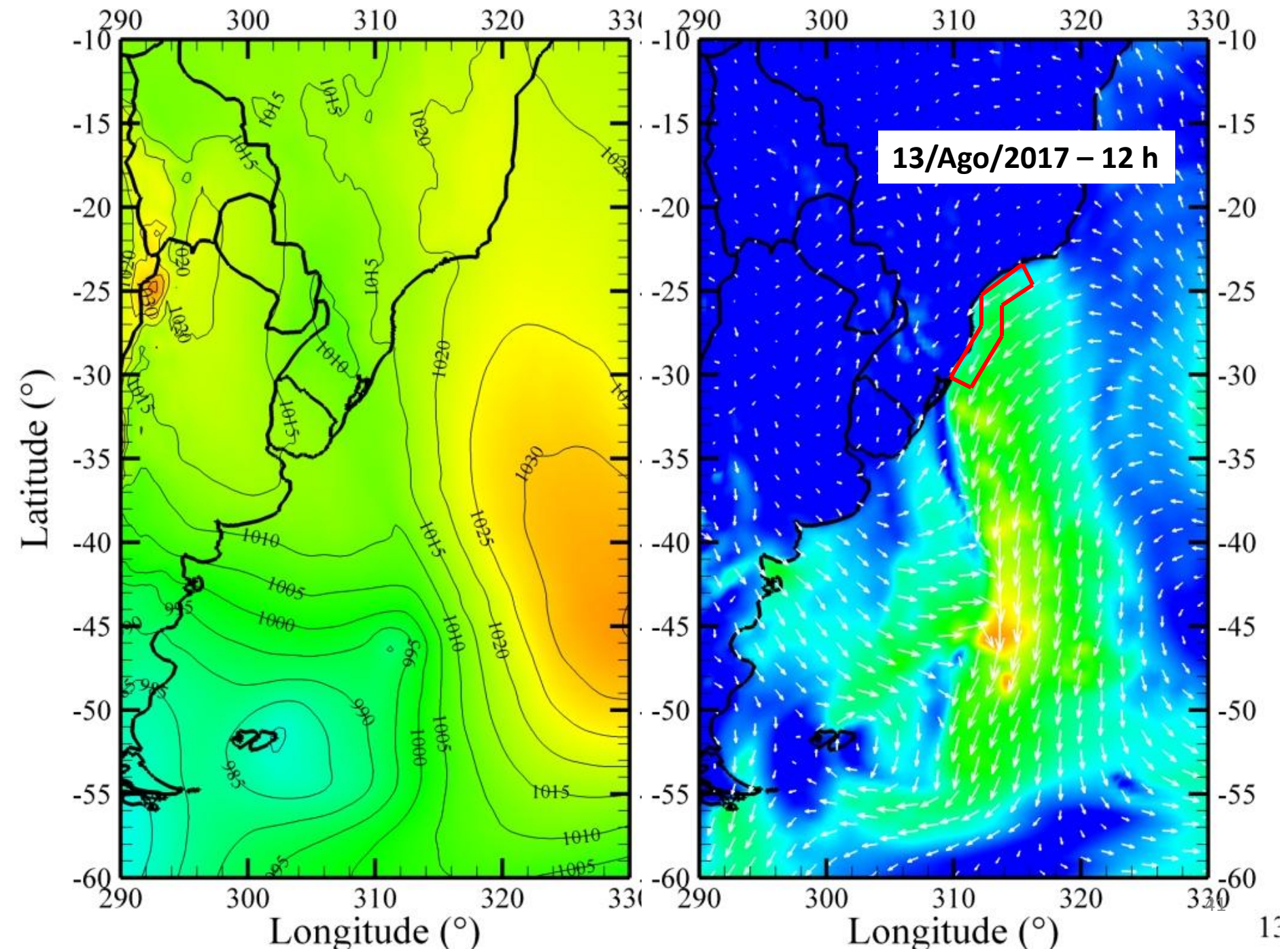




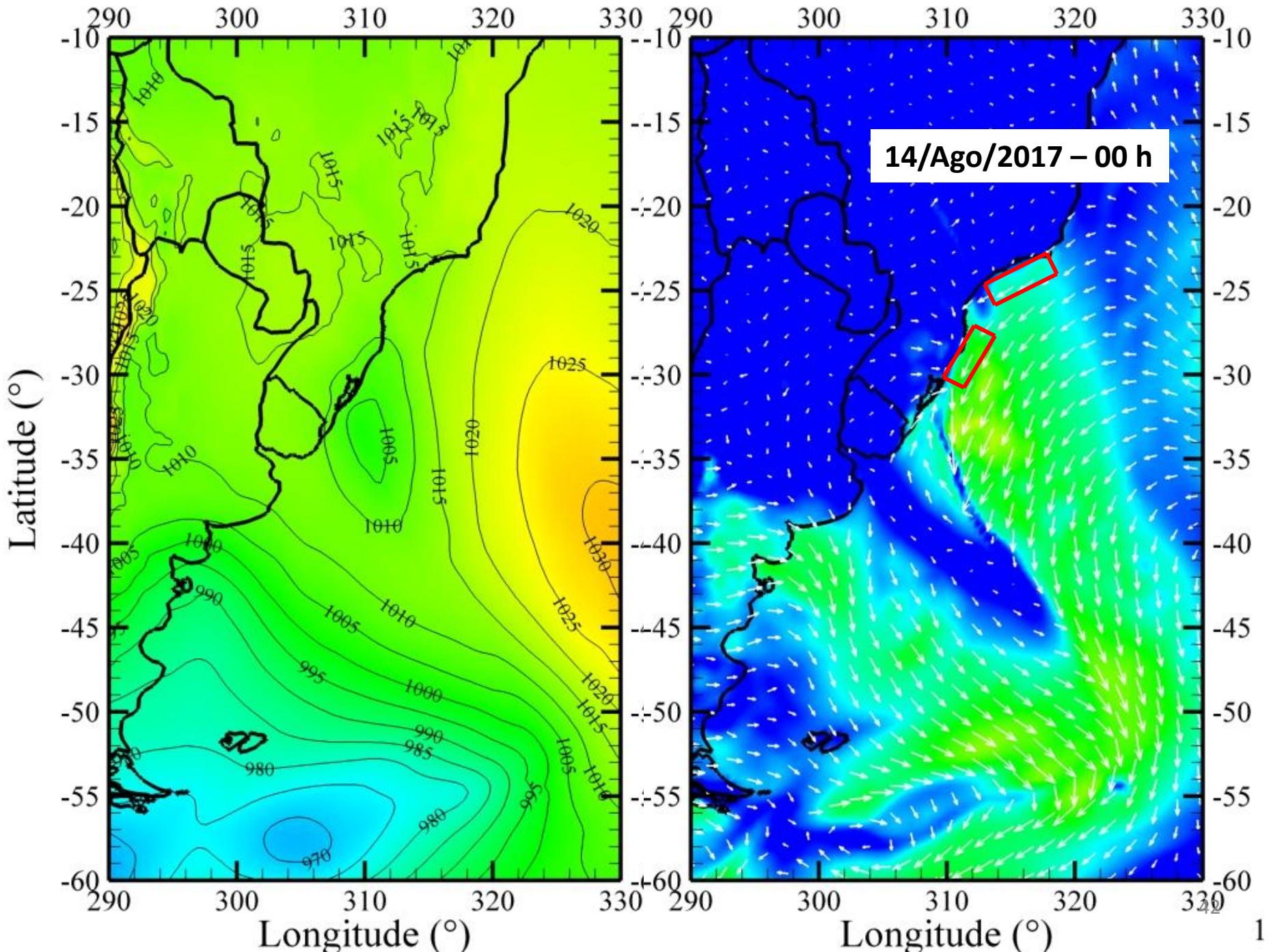




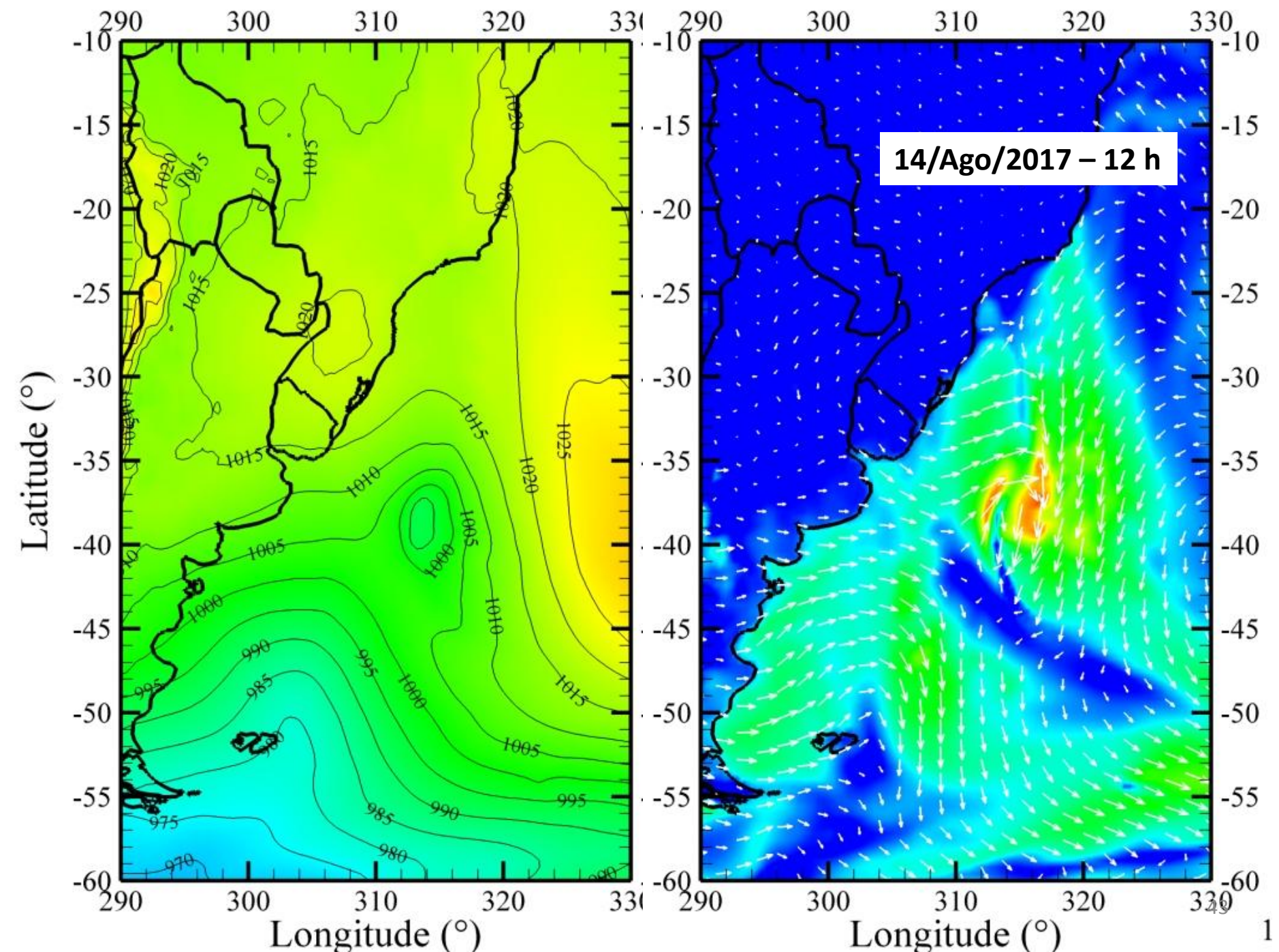




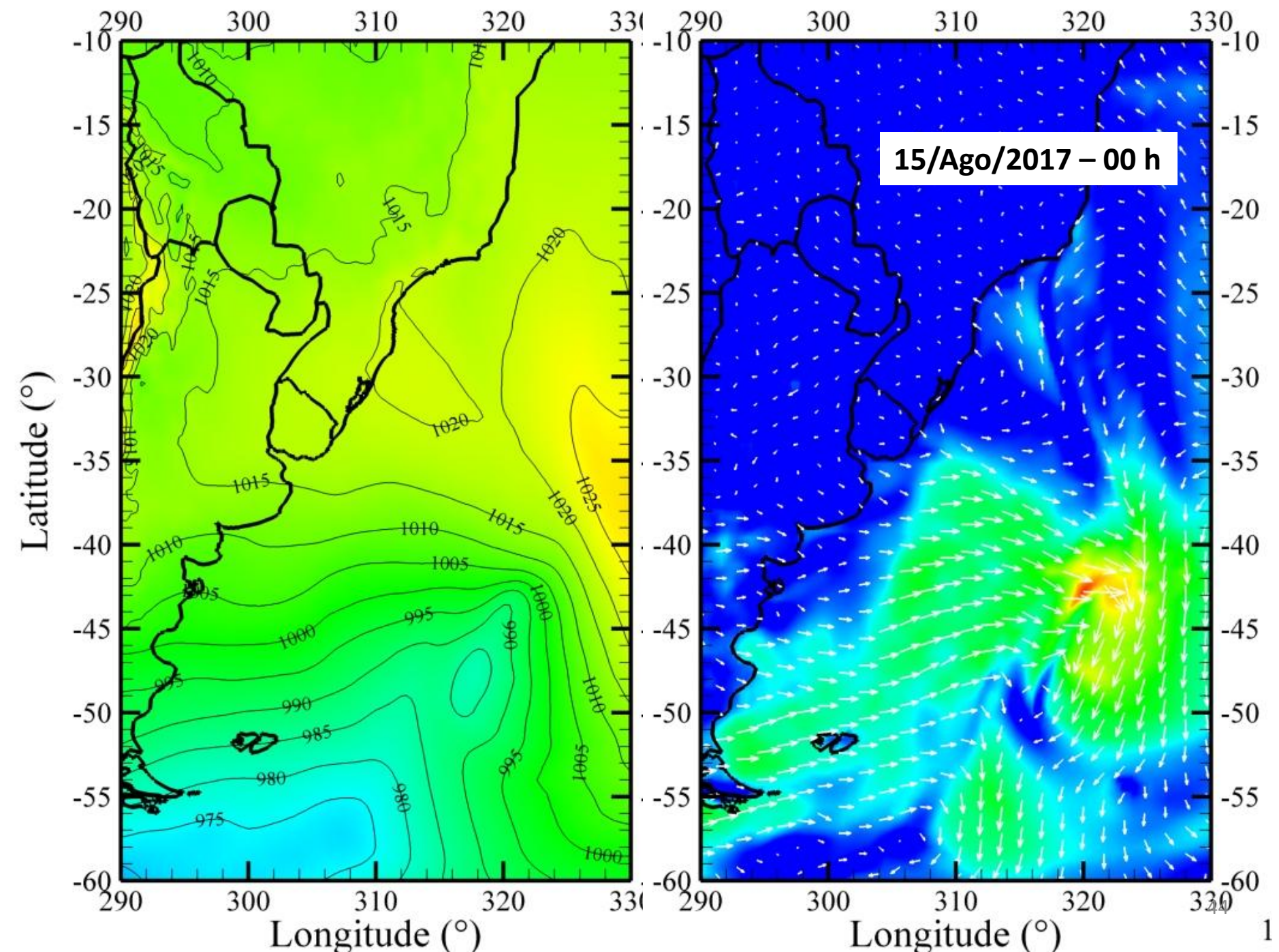






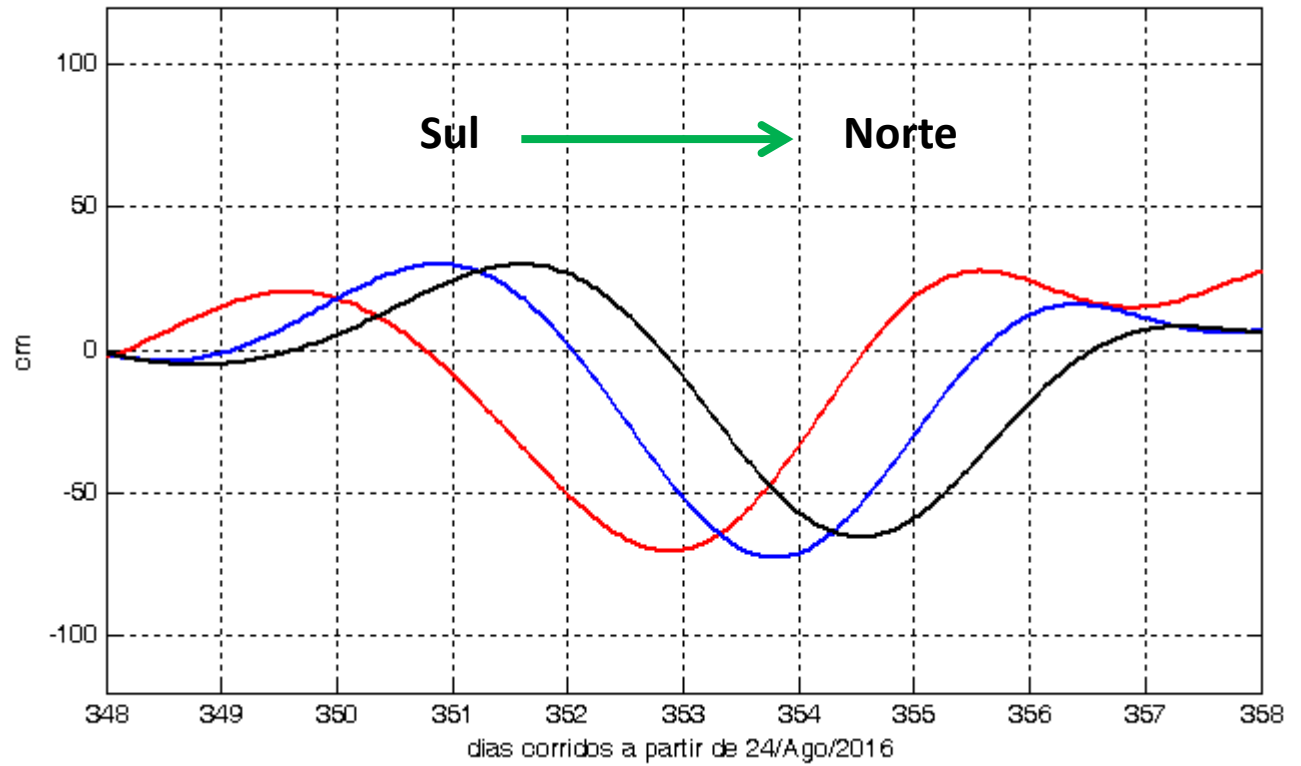






## Maré Meteorológica

- Rio Grande
- Imbituba
- Ubatuba



## PARTE III - NOTA SOBRE A PREVISIBILIDADE DA MARÉ METEOROLÓGICA

- 1 – Modelos Estatísticos
- 2 – Modelos Hidrodinâmicos Numéricos
- 3 – Modelos Hidrodinâmicos Simplificados



## Modelos Simplificados para a Maré Meteorológica no Brasil

- Modelo Tipo I – MM *Estática* com Equilíbrio Dinâmico Instantâneo entre Vento e Atrito
  - Modelo Tipo II – MM *Móvel*, sem Efeitos Remotos e com Equilíbrio Dinâmico entre Inércia, Vento e Atrito
  - Modelo Tipo III – MM *Móvel*, com Efeitos Remotos e com Equilíbrio Dinâmico entre Inércia, Vento e Atrito
- 
- Modelo Tipo IV – MM tipo “*Ondulação*” com Taxa de Transformação Constante

- MM é determinada a partir da Corrente Costeira (  $V$  ) associada

→ Eq. Momentum na dir. paralela à costa determina  $V$  em função do Vento e do Atrito :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y^W - \tau_y^B}{\rho h}$$

→ Com (  $V$  ) determinado, Geostrofia determina a MM :

$$\eta_o = \frac{C_*}{g} V_o$$

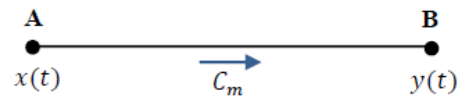
## Modelo Tipo IV – MM tipo “Ondulação” com Taxa de Transformação Constante

Assim, o modelo considera que a MM na costa S/SE brasileira pode ser prevista num determinado local a partir do conhecimento da amplitude da MM num sítio mais a Sul e da velocidade (média) de propagação da mesma entre os dois pontos. Adicionalmente, o modelo admite que a MM vai ser transformada durante a propagação e, ainda, que a taxa de transformação vai se manter *constante*, independentemente das condições locais de vento e pressão atmosférica.

Esse tipo de modelo é totalmente baseado em medições de campo e não envolve (explicitamente) teorias hidrodinâmicas. O modelo, obviamente, requer informações sobre a componente remota da MM obtida de medições num sítio a Sul do ponto de interesse e, também, de medições da MM prévias (e simultâneas às do sítio a Sul) feitas no próprio local as quais serão usadas para a determinação da velocidade de propagação e da taxa de transformação.

O método é bastante simples e será descrito a seguir.

Consideremos dois pontos **A** e **B** localizados num determinado trecho de costa sujeito a uma MM que se move sobre a plataforma continental adjacente com velocidade  $C_m$  no sentido de **A** para **B**, conforme ilustrado na figura abaixo.



Os funções  $x(t)$  e  $y(t)$ , indicadas na figura, correspondem às MM's observadas nos pontos **A** e **B**, respectivamente.

Partindo da ideia que fundamenta o modelo, é possível interpretar a MM no ponto **B** [ $y(t)$ ] como sendo uma versão defasada e (linearmente) modificada da MM no ponto **A** [ $x(t)$ ]. Com isso, a seguinte relação entre as MM's nos dois sítios pode ser estabelecida:

$$y(t) = \alpha x(t - \tau_o) \quad (\text{IV. 19})$$

onde  $\alpha$  é um coeficiente (*constante*) global de transformação (a princípio, de atenuação ou amplificação) e  $\tau_o$  é a defasagem que maximiza a correlação entre os sinais, ambos a ser determinados a partir dos dados,

De acordo com Bendat e Piersol (2003) pg 117, o coeficiente de transformação entre os dois “sinais” é dado por:

$$\alpha = \rho_{xy}(\tau_o) \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (\text{IV. 20})$$

Onde,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  correspondem a raiz quadrada do valor médio quadrático de  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $\rho_{xy}$  é a função de covariância cruzada normalizada entre os dois sinais.

## **Modelo Tipo IV – MM tipo “*Ondulação*” com Taxa de Transformação Constante**

O primeiro aspecto a se considerar é que o modelo Tipo 4 é, em essência, semelhante ao modelo Tipo 3 pois, como neste último, a MM no ponto inicial é propagada com velocidade  $C_m$  até o ponto final. A diferença jaz no fato de que o modelo Tipo 4 admite uma taxa de transformação da MM *constante* ao passo que no Tipo 3 essa taxa é variável e determinada em função das forçantes atmosféricas e do atrito ao longo da pista. Os resultados levemente superiores do modelo Tipo 4 em relação ao Tipo 3 podem ser explicados pelo seguinte:

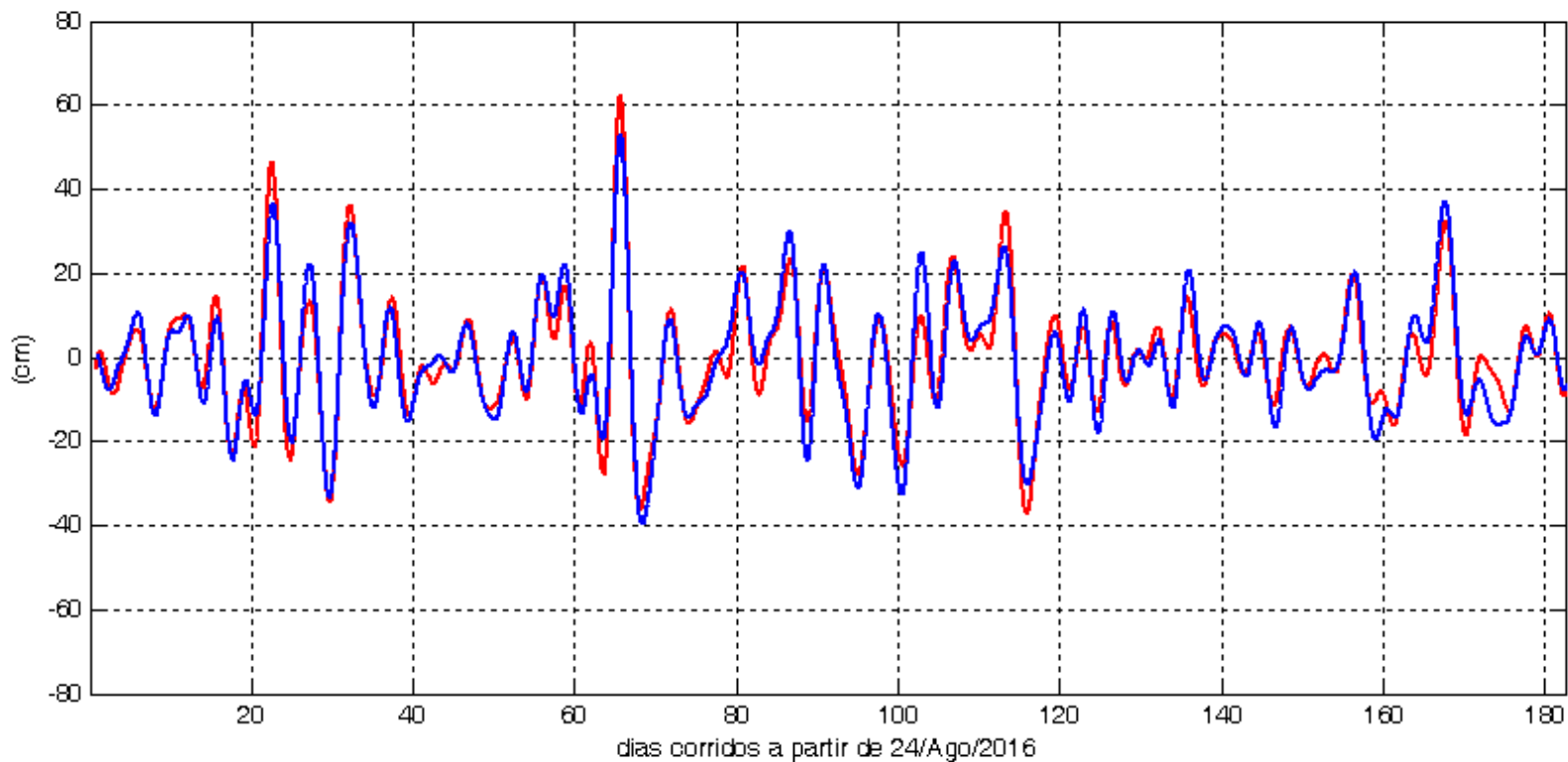
Primeiramente, como as medições de MM são horárias, o modelo Tipo 4 tem resolução igualmente horária. Essa característica permite definir a MM no ponto inicial da pista no modelo Tipo 4 de maneira mais precisa do que no modelo Tipo 3, pois, como visto, a resolução do campo de vento de 6 horas do NCEP/NOAA forçou uma adaptação do comprimento da pista o qual introduziu um pequeno erro na prescrição da MM no ponto inicial no modelo Tipo 3.

Em segundo lugar, como o modelo Tipo 4 não usa nenhuma informação sobre os ventos ao longo da pista, o modelo fica imune a eventuais imprecisões nesse importante parâmetro. Aparentemente, o que poderia ser uma deficiência parece ter se transformado numa vantagem. Isso pode ser explicado pelo comportamento geral do vento de tornar-se mais ameno a medida que se adentra em território brasileiro. O uso de uma taxa de atenuação constante obtida dos dados parece capturar essa atenuação geral do vento de forma surpreendentemente precisa vindo daí a qualidade da previsão obtida.

Entretanto, observando atentamente os resultados do modelo Tipo 4, verifica-se que em várias situações ainda há erros residuais que, certamente, tem relação com a hipótese de uma MM com transformação com taxa constante entre os dois sítios, uma questão que não tem como ser aperfeiçoada. É opinião desse autor que uma melhora na prescrição do campo de vento (incluindo um aumento de resolução temporal) tornaria o modelo Tipo 3 mais preciso do que o Tipo 4.

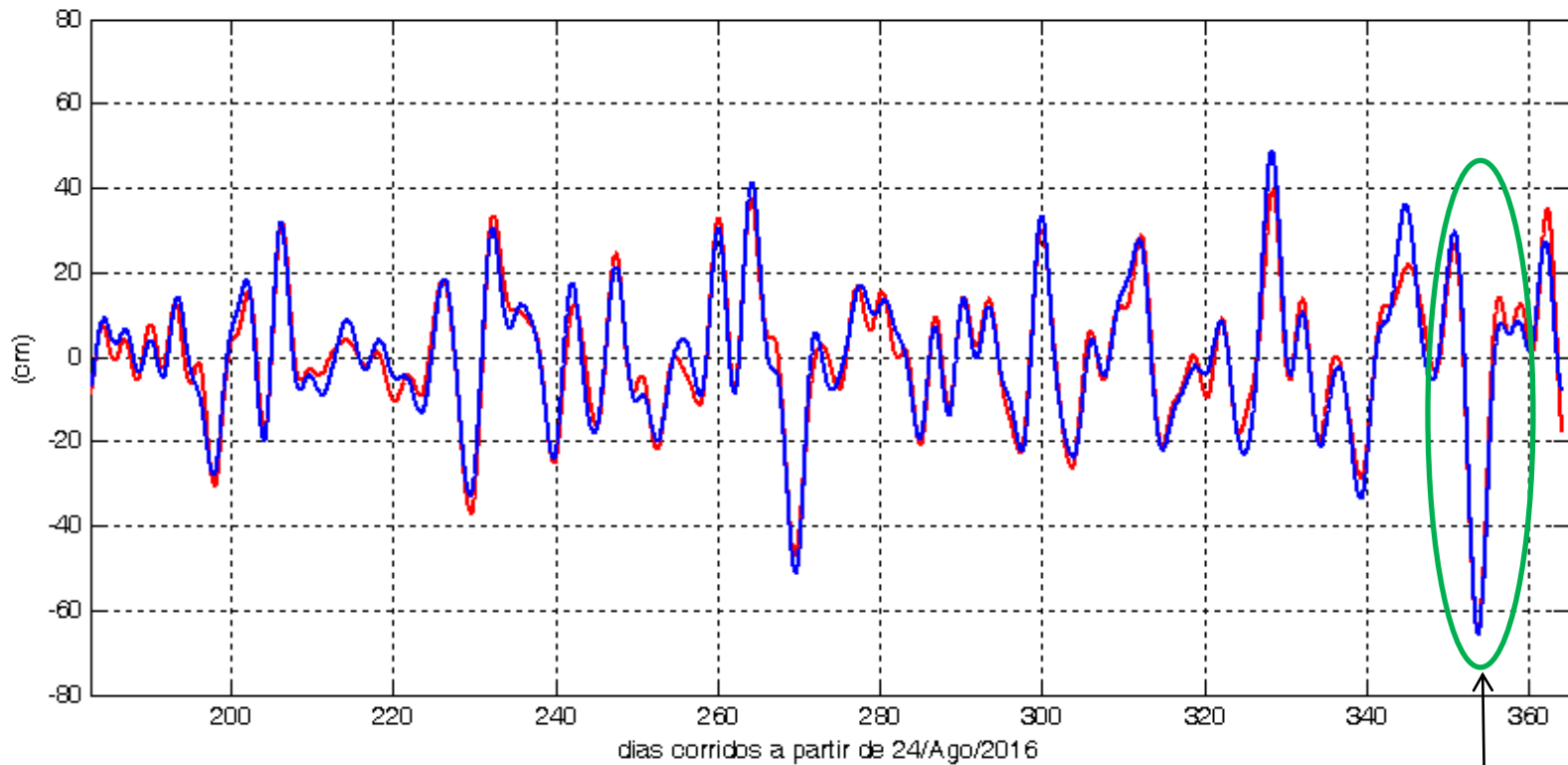
# Aplicação do Modelo Tipo IV para previsão da MM em Ubatuba a partir da MM em Imbituba

Modelo x Observações



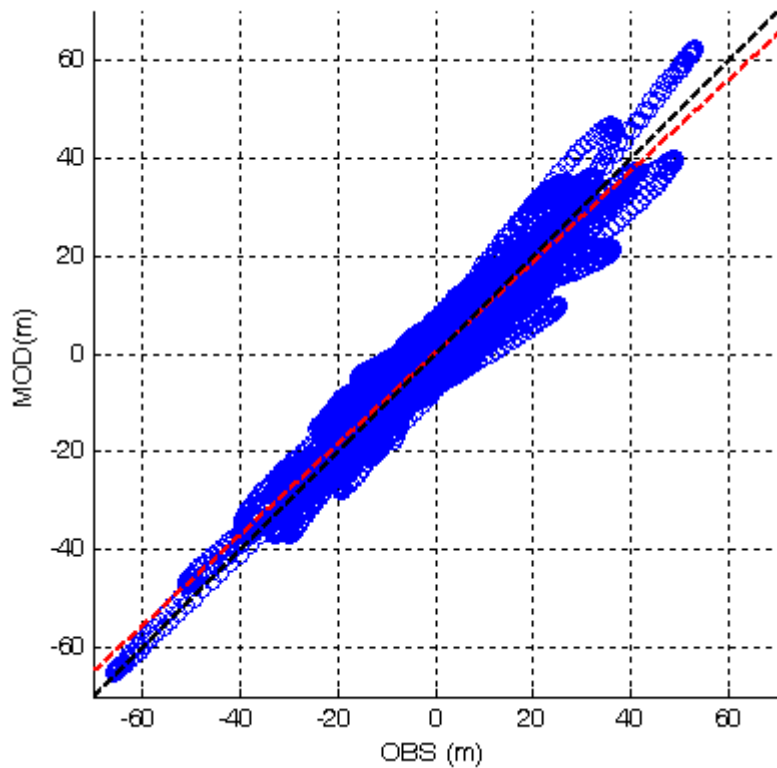
1º Semestre

## Modelo x Observações



2º Semestre

Evento  
"Recuo do Mar"



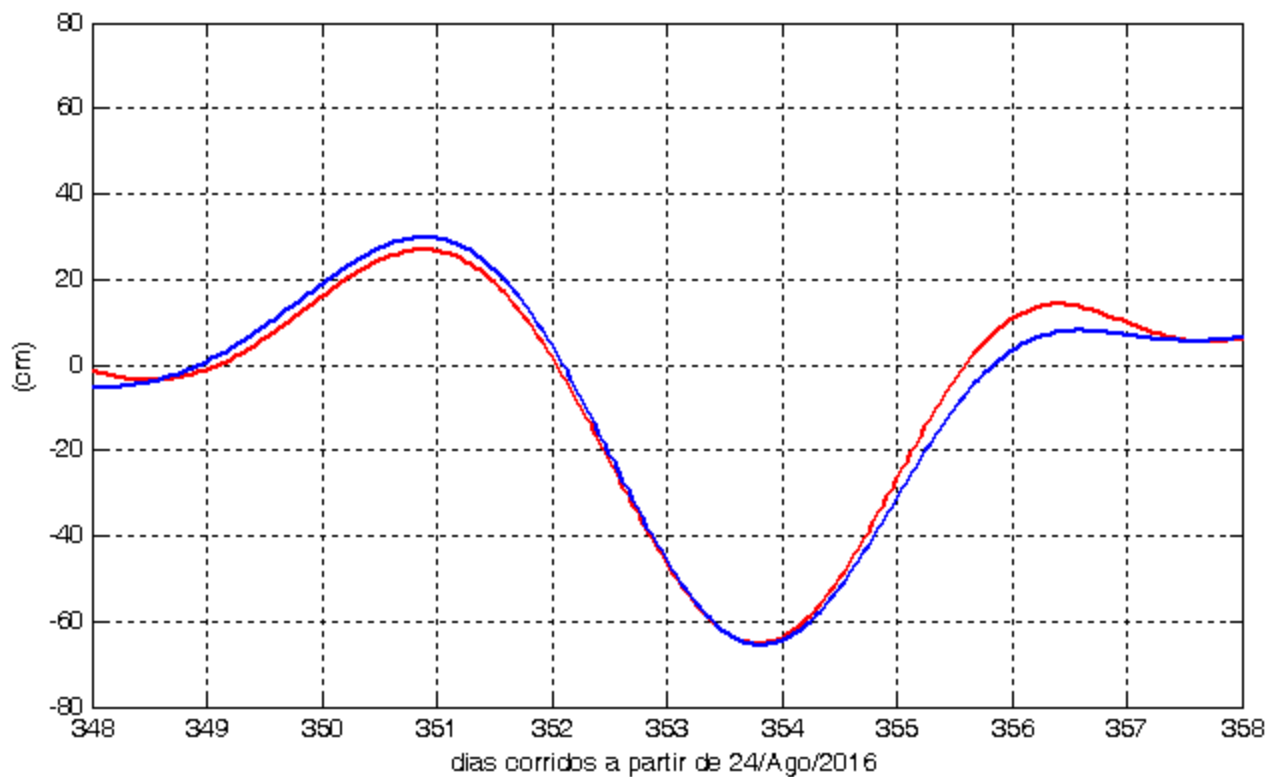
**Tempo de antecipação = 17 h**  
**Coef. de transformação = 0.897**

**Coef. Correlação = 0.964**  
**Coef. Determinação = 0.930**  
**RMSE = 4.0 cm**  
**Incl. Reta Regressão = 0.93**  
**Des. Padrão Modelo = 14.7 cm**  
**Des. Padrão Medições = 15.3 cm**

**[ Avaliação – conto anual ]**



## Previsão do Modelo Tipo IV para a MM no Evento de “Recuo do Mar”



**Modelo** x **Observações**