



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Douglas Fraga Rodrigues

**Circulação de baixa frequência no canal da Ilha Grande, Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2021

Douglas Fraga Rodrigues

**Circulação de baixa frequência no canal da Ilha Grande, Rio de Janeiro**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Caracterização, Diagnóstico e Evolução de Ambientes Marinhos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

R696 Rodrigues, Douglas Fraga.  
Circulação de baixa frequência no canal da Ilha Grande, Rio de Janeiro /  
Douglas Fraga Rodrigues. – 2021.  
95 f.: il.

Orientador: Alexandre Macedo Fernandes.  
Coorientador: Ramiro Joaquim de Jesus Neves  
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade  
de Oceanografia.

1. Correntes oceânicas – Modelos matemáticos – Grande, Ilha (RJ) – Teses. 2. Correntes oceânicas – Grande, Ilha (RJ) – Teses. 3. Hidrodinâmica – Teses. 4. Oceanografia física – Grande, Ilha (RJ) – Teses. I. Fernandes, Alexandre Macedo. II. Neves, Ramiro Joaquim de Jesus. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Oceanografia. IV. Título.

CDU 551.465.11(815.3)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

Data

Douglas Fraga Rodrigues

**Circulação de baixa frequência no canal da Ilha Grande, Rio de Janeiro**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Caracterização, Diagnóstico e Evolução de Ambientes Marinhos.

Aprovada em 30 de agosto de 2021.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Faculdade de Oceanografia – UERJ

Coorientador: Prof. Dr. Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Universidade de Lisboa

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Alessandro Mendonça Filippo  
Faculdade de Oceanografia – UERJ



---

Prof.ª Dra. Josefa Varela Guerra  
Faculdade de Oceanografia – UERJ



---

Prof. Dr. Afonso de Moraes Paiva  
Universidade Federal do Rio de Janeiro



---

Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2021

*In memoriam* de duas das pessoas mais incríveis que cumpriram triunfantes sua missão aqui na Terra, meu paizão, Nilton Carvalho Rodrigues, e minha vizinha, Dedier Faria Fraga.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meu sincero agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio financeiro a este projeto (processo nº E-26/201.046/2017). O presente trabalho também foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), que possibilitou a realização de intercâmbio em Portugal, a partir da modalidade de Doutorado Sanduíche (PDSE, processo nº 88881.188830/2018-01). A todos aqueles que lutam por uma Universidade pública, acessível a todos e de qualidade, pois sem vocês, este trabalho jamais seria possível.

Agradeço aos meus amigos e orientadores Alexandre Fernandes e Alessandro Filippo, que me acolheram e aceitaram este desafio. Vocês não só me ensinaram a pensar como um pesquisador, mas também me inspiraram e continuam inspirando a ser um ser humano melhor. Obrigado pela orientação firme e ao mesmo tempo leve.

Obrigado ao professor Ramiro Neves, à Lígia Pinto e a todos os colegas do MARETEC que me acolheram tão bem em Lisboa. Quase que eu não volto para o Brasil!

À professora Josefa Guerra e os professores Afonso Paiva e Marcos Gallo, por avaliarem o trabalho desde a qualificação. Vocês contribuíram de uma maneira muito rica para o amadurecimento desta tese.

Ao professor Björn Kjerfve por compartilhar seus valiosos conhecimentos e gentilmente permitir que seus dados fossem utilizados neste trabalho.

Aos meus amigos, que sempre torceram pelo meu sucesso e tornaram minha vida mais suave durante esse período. Aos amigos da UERJ e da COPPE, que estiveram presentes para ajudar e para compartilhar os bons momentos oceanográficos. À minha irmã Érika, que me inspirou a ser um oceanógrafo.

À minha esposa Carolzinha, que entrou no meu caminho como um belo presente e fez uma revolução na minha vida. Hoje eu sou mais feliz por construir uma família com a mulher da minha vida. Já temos uma filha canina, Florzinha, e que a família continue a crescer!

Agradeço especialmente à minha mãe Graça, que é um exemplo de garra, superação e companheirismo e ao meu pai Nilton, que lutou bravamente contra um câncer e conseguiu me dar a honra de assistir minha defesa e dizer: “Parabéns Dr. Douglas, Deus te abençoe. Filhão de ouro”.

Por fim, agradeço à Deus por me conceder diariamente o presente da vida!

## RESUMO

RODRIGUES, Douglas Fraga. *Circulação de baixa frequência no canal da Ilha Grande, Rio de Janeiro*. 2021. 95 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

A existência de uma circulação persistente entre as porções W e E da Baía de Ilha Grande (BIG), através do Canal da Ilha Grande (CIG), foi reportada em trabalhos das décadas de 1970 a 1990, nos quais as séries temporais de dados analisadas não ultrapassaram os 30 dias. A limitada abrangência temporal desses dados não permitiu a nenhum dos estudos pretéritos abordar sistematicamente a existência de uma corrente para E com caráter permanente ou semipermanente no CIG. Além do caráter temporal, não existe um consenso a respeito dos mecanismos responsáveis por essa corrente, dentre os quais já foram apontados o gradiente de densidade horizontal e o gradiente de pressão barotrópico, ambos estabelecidos internamente, entre as porções W e E da BIG. Neste contexto, foi conduzida no presente trabalho a análise de uma série temporal contínua, registrada nos anos de 1998 e 1999, contendo mais de 15 meses de dados de elevação do nível do mar, corrente e temperatura medidos a 12m de profundidade no píer do terminal de óleo do TEBIG (Petrobras), localizado no CIG. Com isso, determinou-se que a corrente em questão apresenta um caráter temporal permanente, considerando o período dos 15 meses analisados, com velocidade média de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$  para E. Ademais, foram conduzidos experimentos numéricos tridimensionais de alta resolução espacial, abrangendo toda a Plataforma Continental Sudeste (PCSE) até o interior das Baías de Ilha Grande e Sepetiba. Com isso, constatou-se que a corrente no CIG está associada a uma corrente costeira em subsuperfície, que por sua vez, está relacionada a uma célula de circulação ciclônica sobre a PCSE, provocada pelo ajustamento dos campos de densidade sobre a plataforma. Constatou-se também que a estrutura vertical da coluna d'água no canal é dominada pelo primeiro modo empírico, que respondeu por 96% da variância das correntes paralelas ao canal e foi relacionado à circulação provocada pelos gradientes de densidade fora da BIG. O segundo modo respondeu por 2% da variância total e foi associado ao vento sobre a plataforma adjacente à BIG.

Palavras-chave: Canal da Ilha Grande. Análise de dados. Modelagem hidrodinâmica. MOHID.

Corrente costeira.

## ABSTRACT

RODRIGUES, Douglas Fraga. *Low-frequency circulation in the Ilha Grande channel, Rio de Janeiro*. 2021. 95 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The existence of a persistent circulation between the western and eastern Ilha Grande Bay (IGB) portions, through the Ilha Grande Channel (IGC), was reported in the 1970s' to 1990s' papers, which the analyzed time series did not exceed 30 days. The data time-range limitation did not allow past studies to address the IGC eastward current's permanent or semi-permanent character. In addition to the temporal character, there is no consensus regarding the mechanisms responsible for this current. The horizontal density gradient and the barotropic pressure gradient, both internally established, between the western and eastern IGB portions were speculated. In this context, the present work analyzed a continuous time series, recorded in 1998 and 1999, containing more than 15 months of sea-level rise, current, and temperature data measured at a depth of 12m on the terminal pier of oil from TEBIG (Petrobras), located at CIG. Thus, the investigated current has a permanent temporal character, considering the 15 months analyzed, with an average eastward velocity of  $6.90 \text{ cm.s}^{-1}$ . Furthermore, high-resolution three-dimensional numerical experiments covering the entire Southeast Continental Shelf (SEPC) until the Ilha Grande and Sepetiba Bays interior were conducted. The IGC current was related to a subsurface coastal current, which makes up the continental branch of a cyclonic circulation cell over the South Brazil Bight, caused by the shelf density field adjustment. Finally, the first empirical mode accounted for 96% of the along-channel current variance and was related to circulation caused by density gradients outside the IGB. The second mode accounted for 2% of the total variance and was associated with the IGB adjacent shelf winds.

Keywords: Ilha Grande Channel. Data analysis. Hydrodynamic modeling. MOHID. Coastal current.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2 -	Malha 2D descentrada do tipo C segundo classificação de Arakawa & Lamb (1977).....	27
Figura 3 -	Esquema de grades aninhadas utilizadas nas simulações numéricas.....	29
Figura 4 -	Localização dos pontos de medição e análises das simulações numéricas.....	36
Figura 5 -	Direção predominante da corrente no CIG.....	38
Figura 6 -	Densidade espectral das séries temporais das componentes de corrente paralela e perpendicular ao CIG.....	40
Figura 7 -	Potência espectral da série temporal da componente de corrente paralela ao CIG, obtido a partir da transformada de ondaleta.....	41
Figura 8 -	Séries temporais completa, astronômica e não-astronômica da componente de velocidade paralela ao CIG.....	42
Figura 9 -	Séries temporais não-astronômicas filtradas para as bandas com períodos de até 2 dias, de 2 a 30, de 30 a 90 e acima de 90 dias, da componente de velocidade paralela ao CIG.....	43
Figura 10 -	Evolução da energia cinética durante as simulações de controle.....	44
Figura 11 -	Velocidades médias registradas no CIG e extraídas das simulações de controle no mesmo local das medições.....	46
Figura 12 -	Séries temporais medidas e simuladas da componente $u'$ e temperatura.....	47
Figura 13 -	Espectros de energia das séries da componente $u'$ , medida e simuladas.....	48
Figura 14 -	Campo médio anual das elevações do nível do mar ( $\eta$ ) e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle para um ciclo sazonal completo (entre 01/09/1998 e 01/09/1999).....	49
Figura 15 -	Correlações entre as velocidades da componente $u$ integradas na vertical, no CIG e na plataforma, a partir da costa da Ilha Grande em direção ao largo.....	50
Figura 16 -	Campos médios anual (entre 01/09/1998 e 31/08/1999) das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.....	51

Figura 17 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.....	53
Figura 18 - Porção costeira da seção vertical IG com a média anual dos resultados de temperatura, salinidade, densidade e velocidade de corrente paralela à costa obtidos a partir dos experimentos de controle.....	54
Figura 19 - Porção costeira da seção vertical IG com a média da velocidade de corrente paralela à costa para cada estação do ano, obtidas a partir dos experimentos de controle.....	56
Figura 20 - Seções transversais ao CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de controle.....	58
Figura 21 - Perfis verticais no centro do CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de controle.....	58
Figura 22 - Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento MyControle, sobre a seção IG.....	59
Figura 23 - Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento HyControle, sobre a seção IG.....	60
Figura 24 - Evolução da energia cinética durante as simulações de caso.....	61
Figura 25 - Velocidades médias registradas no CIG e extraídas das simulações de caso no mesmo local das medições.....	61
Figura 26 - Campo médio anual das elevações do nível do mar ( $\eta$ ) e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade B dos experimentos de caso para um ciclo sazonal completo (entre 01/09/1998 e 01/09/1999).....	62
Figura 27 - Correlações entre as velocidades da componente u integradas na vertical, no CIG e na plataforma, a partir da costa da Ilha Grande em direção ao largo.....	63
Figura 28 - Campos médios anual (entre 01/09/1998 e 31/08/1999) das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de caso.....	64
Figura 29 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de caso.....	65

Figura 30 - Porção costeira da seção vertical IG com a média anual dos resultados de temperatura, salinidade e velocidade de corrente paralela à costa obtidos a partir dos experimentos de caso.....	66
Figura 31 - Porção costeira da seção vertical IG com a média da velocidade de corrente paralela à costa para cada estação do ano, obtidas a partir dos experimentos de caso.....	67
Figura 32 - Seções transversais ao CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de caso..	69
Figura 33 - Perfis verticais no centro do CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de caso.....	69
Figura 34 - Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento MyCaso, sobre a seção IG.....	70
Figura 35 - Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento HyCaso, sobre a seção IG.....	71
Figura 36 - Campos médios do vento à 10 m da superfície do mar, obtidos a partir dos resultados do modelo atmosférico global ERA5, interpolados para grade A do MOHID.....	78
Figura 37 - Mapas cotidianos das componentes M2 e S2 calculados a partir dos resultados horários de elevação do nível do mar obtidos com experimento barotrópico, rodado durante o ano de 2018 com o MOHID.....	87
Figura 38 - Campos médios anuais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície e à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.....	88
Figura 39 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.....	89
Figura 40 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.....	90
Figura 41 - Campos médios anuais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície e à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.....	91

Figura 42 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.....	92
Figura 43 - Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.....	93
Figura 44 - Seção vertical auxiliar da componente u, localizada a W da Ilha Bela (IB).....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Síntese das análises conduzidas sobre as variáveis medidas no CIG.....	23
Tabela 2 -	Configuração das grades utilizadas nas simulações numéricas.....	28
Tabela 3 -	Configuração dos experimentos numéricos.....	33
Tabela 4 -	Síntese das análises conduzidas sobre as variáveis fornecidas pelas simulações do MOHID.....	35
Tabela 5 -	Constituintes harmônicas puramente astronômicas das séries temporais das componentes de corrente paralela ( $u'$ ) e perpendicular ( $v'$ ) ao CIG.....	38
Tabela 6 -	Valores médios e variâncias das componentes paralela e perpendicular ao CIG, separadas em processos astronômicos e não-astronômicos, filtrados em diferentes bandas de frequência.....	41
Tabela 7 -	Comparação estatística entre a corrente média paralela ao CIG, elevação do nível do mar ( $\eta$ ) e a temperatura obtidas a partir dos dados e dos experimentos numéricos de controle, para o período de 01/09/1998 a 01/09/1999.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACAS	Água Central do Atlântico Sul
ADI	<i>Alternate Direction Implicit</i>
BIG	Baía de Ilha Grande
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
BS	Baía de Sepetiba
CIG	Canal da Ilha Grande
CSS	Canal de São Sebastião
EOF	<i>Empirical Orthogonal Function</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ISS	Ilha de São Sebastião
OPC	Onda de Plataforma Continental
PCSE	Plataforma Continental Sudeste
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
TBIG	Terminal da Baía da Ilha Grande

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
1.1	<b>Etapa 1: Análise dos dados</b> .....	22
1.2	<b>Etapa 2: Simulações numéricas</b> .....	25
1.2.1	<u>Esquema de grades numéricas e discretização vertical</u> .....	26
1.2.2	<u>Condições iniciais e de contorno</u> .....	29
1.2.3	<u>Forçamento</u> .....	31
1.2.4	<u>Experimentos Numéricos</u> .....	32
1.2.5	<u>Análise dos Resultados</u> .....	33
2	<b>RESULTADOS</b> .....	37
2.1	<b>Análise dos dados</b> .....	37
2.2	<b>Simulações numéricas</b> .....	43
2.2.1	<u>Análise dos Experimentos de Controle [MyControle e HyControle]</u> .....	44
2.2.1.1	Velocidade e Temperatura no CIG.....	44
2.2.1.2	Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade B].....	48
2.2.1.3	Correlação entre as Velocidades no CIG e na Plataforma.....	49
2.2.1.4	Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade A].....	50
2.2.1.5	Estrutura Vertical da Coluna d'Água sobre a PCSE.....	54
2.2.1.6	Estrutura Vertical das Correntes no CIG.....	56
2.2.1.7	Balanco de Momento.....	59
2.2.2	<u>Análise dos Experimentos de Caso [MyCaso e HyCaso]</u> .....	60
2.2.2.1	Velocidade Média no CIG.....	61
2.2.2.2	Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade B].....	62
2.2.2.3	Correlação entre as Velocidades no CIG e na Plataforma.....	63
2.2.2.4	Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade A].....	63
2.2.2.5	Estrutura Vertical da Coluna d'Água sobre a PCSE.....	66
2.2.2.6	Estrutura Vertical das Correntes no CIG.....	68
2.2.2.7	Balanco de Momento.....	70
3	<b>DISCUSSÃO</b> .....	72
3.1	<b>O caráter temporal da corrente no CIG</b> .....	72

3.2	<b>A relação entre as correntes no CIG e sobre a plataforma interna.....</b>	<b>75</b>
3.3	<b>A circulação média sobre a PCSE e talude relacionada à corrente média no CIG.....</b>	<b>79</b>
	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A – Mapas Cotidais.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE B – Campos de velocidade média em superfície e a 20 m de profundidade.....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE C – Seção vertical da Ilha Bela.....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO A – Configuração do módulo <i>Geometry</i>.....</b>	<b>95</b>

## INTRODUÇÃO

A Baía de Ilha Grande (BIG) encontra-se na região da Costa Verde, no litoral S do estado do Rio de Janeiro. Apesar de estar confinada entre a serra do Mar e o oceano, abriga uma população de aproximadamente 270 mil habitantes, apresentando crescimento demográfico entre os anos de 2010 e 2015 acima da média do estado do Rio de Janeiro (SEBRAE, 2016). A região se destaca não somente por seu potencial turístico, pesqueiro e ecológico, mas também por sediar inúmeros empreendimentos imobiliários, um estaleiro de grande porte, um complexo nuclear e um terminal marítimo de petróleo, tornando-a um ambiente delicado e de difícil manejo.

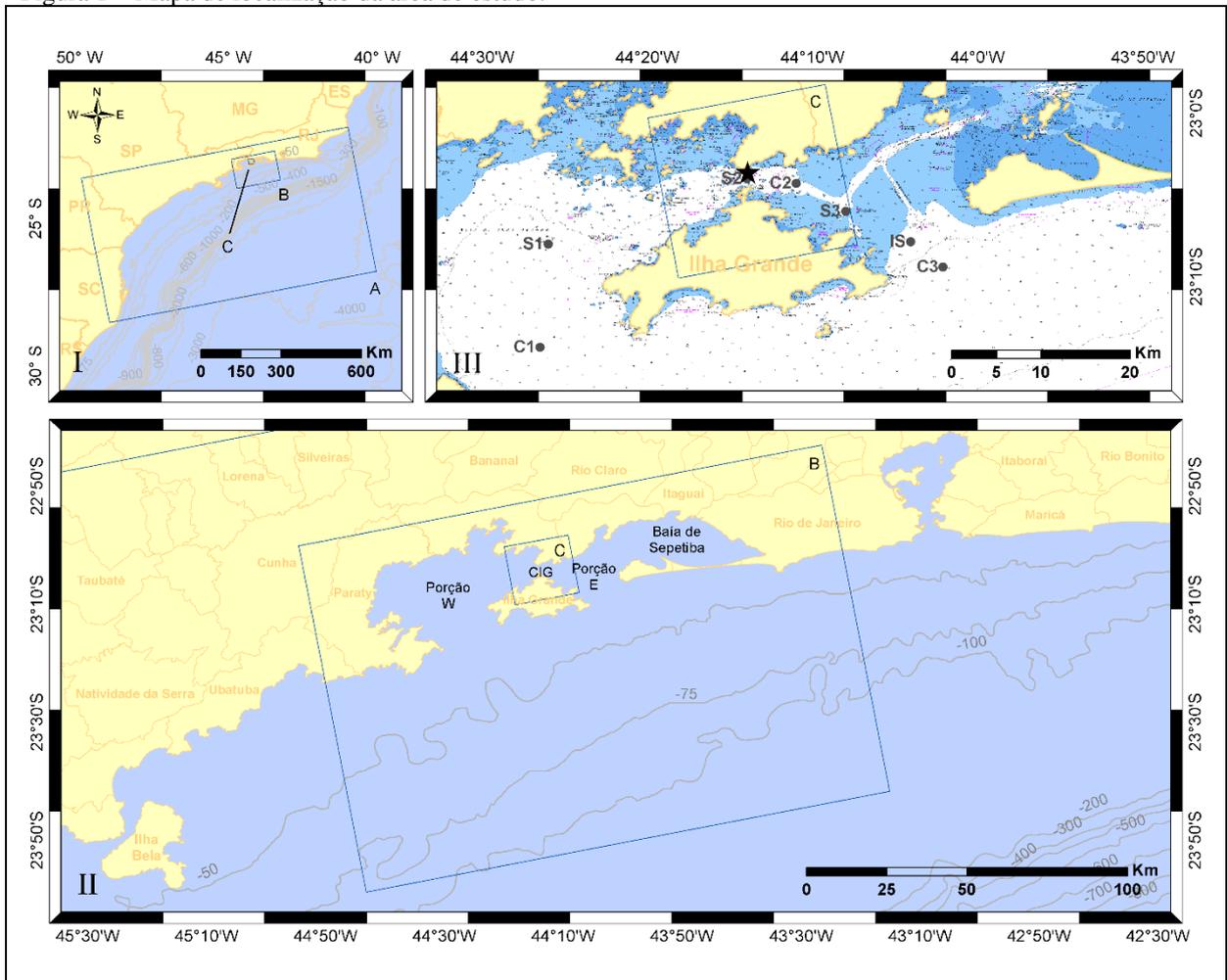
A BIG é dividida pela Ilha Grande em duas porções, uma a W e outra à E da ilha. Estas porções são conectadas pelo Canal da Ilha Grande (CIG), que apresenta profundidades de cerca de 35 metros e separa o continente da Ilha Grande, localizada ao S de seu trecho de menor largura (~ 2 km). A porção W, com profundidades em torno de 25 metros, se comunica com o oceano por uma abertura ao S, de 17 km, enquanto a porção E, com profundidade média de 15 metros, se conecta tanto ao oceano, por uma abertura de 11 km ao S, quanto com a Baía de Sepetiba (BS), por uma abertura de 8 km à E. A BS, por sua vez, é constituída por um corpo semifechado de forma afunilada em seu eixo longitudinal, que é separado do oceano pela restinga da Marambaia (Figura 1-II).

Os primeiros estudos sobre a hidrodinâmica da BIG apontaram para a presença de uma corrente para E de caráter persistente no CIG, ocorrendo durante períodos muito mais longos que o período da maré dominante e sem correlação aparente com o vento, conforme observou Signorini (1980), ao analisar dados de corrente no CIG (ponto S2 da Figura 1-III). Esses dados foram adquiridos em dois registros. O primeiro em superfície e à 10 metros de profundidade, em agosto de 1975, e o segundo próximo ao fundo, em setembro de 1977. O primeiro registro, com 12 dias de medições, apresentou velocidade média de  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  e sentido para E em ambas as profundidades medidas, ao passo que o segundo, com 4 dias de duração, apresentou fluxo médio de  $3 \text{ cm.s}^{-1}$  para sudeste junto ao fundo.

Séries temporais de perfis de temperatura e salinidade adquiridas por Signorini (1980), entre 14 e 16 de setembro de 1977, durante 25 horas em pontos a E (ponto S3) e a W (ponto S1) do CIG e durante 9 horas no próprio canal (ponto S2), revelaram uma homogeneidade horizontal abaixo dos 15 metros de profundidade. Tal homogeneidade seria possivelmente originada pela mistura da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), eventualmente presente no

fundo da baía, com águas costeiras. A presença de águas salinas e frias no fundo da BIG foi identificada por Kjerfve *et al.* (2021) entre os meses de outubro (primavera) e abril (verão). A presença da ACAS também foi identificada por Cerda e Castro (2014) no fundo da Plataforma Continental Sudeste (PCSE), ao longo da costa do Rio de Janeiro, durante o mesmo período do ano. A persistência de ventos de NE, característica deste período e favorável a ressurgência na região, induziria o deslocamento da ACAS pelo fundo da PCSE para o interior da BIG (Kjerfve *et al.*, 2021).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Legenda: I. Visão global da área de estudos com a delimitação das três grades do modelo numérico (A, B e C) em azul. II. Baías de Sepetiba e Ilha Grande e a Ilha Bela (IB) à SW. As grades B e C foram delimitadas em azul. III. Visão aproximada do Canal da Ilha Grande com a grade C delimitada em azul e carta náutica n° 1607 da DHN ao fundo. Os pontos em cinza demarcam as posições dos dados apresentados nos trabalhos de Signorini (1980): S1, S2 e S3; Ikeda e Stevenson (1982): IS; e Corrêa (1994): C1, C2 e C3. A estrela preta demarca o ponto onde os dados foram coletados no CIG.

Nota: As isolinhas batimétricas representadas em cinza nos mapas I e II foram adquiridas junto à CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/>).

Fonte: O autor, 2021.

Acima dos 15 metros de profundidade, foi verificada a presença de águas mais salinas, de origem oceânica, na porção W da BIG, em contraste com águas menos salinas na porção E, resultantes da mistura com águas de aporte fluvial provenientes da BS. Esse padrão também foi observado na distribuição superficial de densidade obtida a partir de dados de termosalinógrafo adquiridos durante 12 horas de navegação na BIG em 21 de junho de 1975 (Miranda *et al.*, 1977).

Com base nas observações descritas acima, Signorini (1980) sugeriu a existência de uma circulação ciclônica ao redor da Ilha Grande, que seria provocada pela entrada de águas mais salinas da plataforma pela porção W da BIG, formando um fluxo persistente de W para E no CIG, que se misturaria com as águas menos salinas da BS, saindo então novamente para o oceano pelo lado E da BIG. Este padrão de circulação também foi observado por Corrêa (1994) nas camadas acima dos 5 metros de profundidade. O autor analisou 24 horas de perfis de corrente, temperatura e salinidade coletados, de forma não simultânea, entre os dias 23 e 29 de janeiro de 1982 em estações a W do CIG (ponto C1 da Figura 1-III), a E (ponto C3) e uma estação próxima ao local mais estreito do canal (ponto C2). Nesta, o autor registrou velocidades para E, com intensidade média de  $30 \text{ cm.s}^{-1}$ , e constatou que o gradiente horizontal de pressão baroclínico descrito por Signorini (1980) se enfraquecia com o aumento da profundidade, até a profundidade de 20 metros onde o campo de densidade então se tornava horizontalmente homogêneo. Assim, em maiores profundidades, os fluxos de maré se sobreporiam àqueles supostamente gerados pelos gradientes de densidade.

Os resultados apresentados por Signorini (1980) e Corrêa (1994) evidenciaram que a abrangência vertical da corrente persistente para E alcançou profundidades distintas entre os períodos avaliados, referentes aos meses de agosto de 1975 e janeiro de 1982, respectivamente. Neste contexto, o trabalho de Ikeda e Stevenson (1982) contribuiu para o entendimento da estrutura vertical da coluna d'água em épocas distintas, uma vez que os autores avaliaram a estabilidade da coluna d'água na porção E da BIG (ponto IS da Figura 1-III) em duas estações do ano de 1976, sendo um mês característico de verão (fevereiro) e outro de inverno (junho). Com base em perfis de velocidade, temperatura e salinidade, adquiridos durante 18 horas sobre o regime de maré de sizígia, os autores observaram que em fevereiro, a coluna d'água se manteve mais estável do que em junho, quando houve maior ocorrência de inversões verticais de densidade associadas ao cisalhamento vertical das correntes, resultando em misturas mais acentuadas.

No intuito de avaliar a resposta dinâmica da circulação em face dos gradientes de densidade locais observados nos estudos acima descritos, Fragoso (1999) realizou dois

experimentos numéricos diagnósticos de 4 dias, com domínio restrito ao CIG, 6 camadas verticais do tipo sigma e fundo plano, onde os únicos forçantes impostos foram campos de temperatura e salinidade constantes no tempo. No primeiro experimento, o qual denominou de “caso típico”, o autor utilizou os perfis verticais medidos por Signorini (1980) como condições de contorno. No segundo experimento, denominado de “caso extremo”, foi utilizado um campo de densidades que corresponderia a presença de água oceânica na fronteira W e água doce na fronteira E. O caso típico resultou em velocidades inferiores a  $1 \text{ cm.s}^{-1}$  no CIG enquanto o caso extremo, em velocidades em torno de  $6 \text{ cm.s}^{-1}$ , ambas com sentido para E. Embora ambos os experimentos fossem tridimensionais, o autor não fez menção a estrutura vertical desses fluxos e, por fim, concluiu que somente a influência do gradiente de pressão horizontal, oriundo das diferenças de densidade no interior da BIG, seria insuficiente para garantir a persistência da circulação ciclônica descrita nos trabalhos supracitados. Alternativamente, o autor sugeriu que a corrente no canal seria induzida por um gradiente de pressão barotrópico, provocado por diferenças de elevação do nível do mar entre as porções W e E, induzidas pelo vento sobre a plataforma.

Considerando a PCSE, na porção adjacente às baías de Sepetiba e Ilha Grande, Rezende (2003) e Coelho (2008) realizaram simulações numéricas diagnósticas de 12 dias, com 15 camadas sigma, forçadas apenas com temperatura e salinidade, provenientes de uma climatologia de verão construída a partir da base de dados disponível à época no BNDO, correspondente aos meses de janeiro a março. Ambos verificaram a existência de uma célula de circulação superficial ciclônica, entre Ubatuba e Saquarema, com o ramo da corrente para sudoeste posicionada entre as isóbatas de 100 m e 200 m, chegando a até  $50 \text{ cm.s}^{-1}$  na porção mais externa da plataforma, indicando influência da Corrente do Brasil. Na plataforma interna, o ramo da corrente obtido, caracterizado por um fluxo gravitacional costeiro com sentido para nordeste, apresentou velocidades em torno de  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  até as proximidades da BIG.

Cavalcante (2010) verificou que a corrente gravitacional costeira supracitada, na plataforma continental adjacente as baías, pode influenciar a corrente no CIG. A autora realizou experimentos numéricos barotrópicos para os meses de fevereiro a março (verão) e para o mês de agosto (inverno) de 2001 e 2003, forçados com elevações do nível do mar provenientes do modelo global HYCOM, o qual foi aninhado ao modelo costeiro-estuarino SISBAHIA. A autora observou que a corrente costeira, descrita por Resende (2003) e Coelho (2009) na plataforma interna adjacente, não era resolvida pelo modelo global durante o verão. Contudo, ao impor uma componente de velocidade constante para E, com  $10 \text{ cm.s}^{-1}$ , na fronteira aberta do modelo costeiro, na plataforma continental, a autora obteve, no CIG, velocidades mais

próximas àquelas medidas neste canal durante o verão de 2001 (Valente *et al.*, 2001 *apud* Cavalcante, 2010).

Ademais, a autora avaliou a influência das Ondas de Plataforma Continentais (OPCs) sobre os fluxos em toda a BIG e indicou que a hidrodinâmica local apresenta uma resposta fortemente influenciada pelos efeitos dessas ondas. De forma geral, na BIG, os resultados de suas simulações apontaram para correntes mais intensas durante o inverno em comparação com o verão, o que estaria relacionado ao aumento na ocorrência e magnitude de frentes frias, uma vez que distúrbios atmosféricos produzem variações nos campos de corrente e elevação da superfície do mar (Gill & Schumann, 1974). Castro & Lee (1995) observaram oscilações de nível na plataforma sudeste do Brasil com períodos de 6 a 7 e 9 a 12 dias e Filippo *et al.* (2012) identificaram ondas se propagando para o Equador com períodos de 5 a 16 dias e amplitudes de 1 m.

A influência de forçantes meteorológicas também foi discutida por Castro (1990), que estimou um fluxo médio de  $8 \text{ cm.s}^{-1}$  para o Equador (para nordeste) no Canal de São Sebastião<sup>1</sup> (CSS), localizado 144 quilômetros a sudoeste do CIG e com características hidrodinâmicas semelhantes. O autor sugeriu que a direção predominante do escoamento poderia estar associada ao efeito superposto das passagens de frentes frias com as condições de “bom tempo”. Na plataforma sudeste brasileira, o Anticiclone do Atlântico Sul, responsável pelo “bom tempo”, quando há geração dos cavados das OPCs e fluxos associados com sentido ao polo S, apresenta ventos com velocidade média de  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , ao passo que as frentes frias, responsáveis pela formação das cristas, com fluxo resultante para o Equador, apresentam ventos médios de  $8 \text{ m.s}^{-1}$  (Stech & Lorenzetti, 1992). Neste contexto, Melo (2017) verificou uma assimetria nos valores extremos positivos do histograma composto por 12 anos de dados horários de nível do mar adquiridos no Rio de Janeiro e filtrados para a banda de frequência das OPCs.

Com base nos estudos descritos acima, observa-se que, no CIG, a literatura converge na indicação de que há um fluxo de caráter persistente para E, isto é, da BIG para a BS. Entretanto, a limitada abrangência temporal dos dados de correntes até então coletados (no máximo um mês e em diferentes períodos do ano) não permitiu a nenhum dos estudos pretéritos supracitados abordar sistematicamente a seguinte questão: existe de fato um fluxo para E com caráter residual ou médio no Canal da Ilha Grande? Neste contexto, propõe-se no presente estudo a análise de uma série temporal contínua, registrada nos anos de 1998 e 1999, contendo mais de 15 meses de dados de elevação do nível do mar, corrente e temperatura medidos a 12m de

---

<sup>1</sup> O Canal de São Sebastião separa a Ilha Bela (IB), localizada no litoral de São Paulo, do continente.

profundidade no píer do terminal de óleo do TEBIG (Petrobras), localizado no CIG, para responder essa questão. O período de 15 meses é suficiente para a resolução de processos associados as bandas suprainercial e subinercial, abrangendo também um ciclo sazonal completo.

Também permanece em aberto a seguinte questão: quais seriam os mecanismos responsáveis pela corrente para E predominante no CIG? Em relação a estrutura vertical desse fluxo, a partir dos trabalhos de Signorini (1980), Ikeda e Stevenson (1982) e Corrêa (1994), verificou-se que, durante o verão, a coluna d'água encontra-se estável e estratificada, e que a corrente persistente é mais evidente nas camadas superficiais, acima dos 5 metros, perdendo intensidade com a profundidade até eventualmente inverter seu sentido junto ao fundo, devido a influência da maré. Já no inverno, quando os processos de mistura são mais intensos, a corrente alcança níveis mais profundos, até 15 metros, sendo, abaixo disso, observada uma homogeneidade horizontal da densidade no CIG. Os trabalhos das décadas de 1970 a 1990 descritos aqui, apontaram para a importância do gradiente horizontal de densidade local, ou seja, dentro da BIG, entre suas porções W e E, causado pelas descargas fluviais, pela ação da maré e por outros eventuais processos locais.

Fragoso (1999), a partir de experimentos numéricos espacialmente limitados ao CIG, concluiu que o gradiente horizontal de densidade local seria insuficiente para sustentar a corrente para E no canal, mesmo impondo valores extremos desse gradiente nos contornos de sua simulação numérica. Embora a magnitude das correntes simuladas tenha sido pequena se comparada com as observações pretéritas, foi observado o sentido predominante para E no CIG, em concordância com as observações descritas por Signorini (1980) e Corrêa (1994).

Nesse contexto, entende-se aqui que os trabalhos de Rezende (2003) e Coelho (2008), dão luz a possibilidade de que os gradientes de densidade que, na plataforma continental interna adjacente, produziram um fluxo para E paralelo a costa, poderiam também induzir a corrente para E no CIG.

Os resultados de Cavalcante (2010) parecem reforçar o argumento de que correntes para E, na plataforma interna, poderiam ser indutoras da corrente de mesmo sentido no CIG. Neste caso, na ausência de gradientes de densidade, a imposição artificial de um fluxo de  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  sobre a plataforma continental interna, nos contornos abertos da simulação barotrópica, para o verão, gerou resultados mais compatíveis com os dados de corrente medidos no CIG, também num período de verão.

Os estudos de Cavalcante (2010), na BIG, e de Castro (1990), no Canal de São Sebastião, ressaltam a importância dos processos de plataforma sobre a hidrodinâmica em baías

estuarinas e canais. Como discutido no segundo trabalho, tal influência poderia também ser atribuída aos possíveis efeitos assimétricos das OPCs, onde as cristas, associadas a correntes mais intensas e frequentes para o Equador (inversamente ao que ocorre nos cavados), contribuiriam para o estabelecimento da corrente predominante para E. O mesmo, então, poderia se aplicar ao CIG e assim explicar a predominância da corrente para E neste canal.

Portanto, em face do exposto acima, no presente trabalho serão contemplados os seguintes objetivos:

- a) Determinar o caráter temporal da corrente com sentido predominante para E no CIG;
- b) Identificar, através do uso de um modelo numérico, os processos físicos responsáveis pela geração e manutenção da corrente em questão, tendo como principal premissa a influência dos gradientes horizontais de densidade e escoamentos a estes associados, ocorrentes na plataforma continental interna;
- c) Caracterizar a estrutura vertical da corrente no CIG em um ciclo anual, a partir das simulações numéricas validadas com uso das séries temporais de dados medidos durante 15 meses no CIG, para determinar a contribuição dos processos responsáveis através da variabilidade ao longo da coluna d'água.

## 1 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta foi dividida em duas etapas. A primeira consistiu, prioritariamente, determinação das escalas de variabilidade temporal da corrente da corrente com sentido predominante para E no CIG, a partir da análise de uma série temporal de dados medidos em um ponto do canal. Tal análise forneceu resultados que auxiliaram na configuração das simulações numéricas contempladas na etapa subsequente.

A segunda etapa por sua vez, teve como finalidade a investigação do principal mecanismo responsável pela corrente em questão, bem como de sua estrutura vertical na região do canal, por uma perspectiva espacial não restrita a um único ponto de medição, o que foi possível com o uso da modelagem numérica. A localização do ponto de medição dos dados e do domínio espacial das grades do modelo numérico são apresentadas na Figura 1.

### 1.1 Etapa 1: Análise dos dados

O conjunto de dados analisado foi gentilmente disponibilizado pelo professor Dr. Björn Kjerfve e suas informações detalhadas podem ser obtidas em Kjerfve *et al.* (2021). As séries temporais foram compostas por medições de velocidade [ $cm.s^{-1}$ ] e direção horizontal da corrente (direção magnética em convenção oceanográfica [ $^{\circ}$ ]), elevação do nível do mar [ $cm$ ] e temperatura [ $^{\circ}C$ ], adquiridas com instrumento *InterOcean S4*. O instrumento foi fixado no píer do Terminal da Baía da Ilha Grande (TEBIG) a uma profundidade média de 11,7 metros abaixo do nível médio do mar, nas coordenadas geográficas de  $23^{\circ}04'19,2''S$  e  $44^{\circ}13'30,0''W$ , onde a lâmina d'água tem cerca de 31 metros de profundidade. O píer, por sua vez, está localizado na margem continental da porção mais estreita do CIG, entre as porções W e E da BIG. A estrutura do píer não obstruiu o fluxo medido pelo sensor na direção W-E (Figura 4-III).

Os registros se iniciaram às 00:00 GMT de 7 de agosto de 1998 até às 07:00 GMT de 11 de agosto de 1999, totalizando 8864 registros horários. Após problemas de manutenção, o instrumento foi reinstalado no mesmo local às 18:00 GMT de 17 de agosto de 1999, e operou até às 18:00 de 22 de novembro de 1999, o que acrescentou mais 2329 registros horários à série.

O intervalo de 155 horas sem registros foi substituído pelo valor médio da série de cada variável medida.

As análises sobre essa série seguiram os passos sintetizados na Tabela 1. Os valores de velocidade e direção das correntes, ainda com os efeitos da declinação magnética, foram decompostos em componentes  $u_{mag}$ , alinhada com a direção E-W, e  $v_{mag}$ , alinhada à direção N-S. A declinação magnética, equivalente a  $21^\circ W$  para o ano de 1999, foi então corrigida para essas componentes através da aplicação de uma matriz de rotação (Emery & Thomson, 2001), que resultou nas componentes  $u$  e  $v$ .

Tabela 1 – Síntese das análises conduzidas sobre as variáveis medidas no CIG.

<b>Análise</b>	<b>Objetivo</b>
Cálculo das variâncias para cada direção	Determinação da direção predominante da corrente
Método harmônico	Separação dos efeitos astronômicos
FFT e Ondaleta	Determinação das principais bandas energéticas
Filtragem digital	Decomposição do sinal em diferentes bandas
Cálculo da velocidade média	Determinação da escala temporal
Cálculo da variância	Determinação da contribuição energética de cada banda

Fonte: O autor, 2021.

Para alinhar a componente  $u$  ( $v$ ) com a direção paralela (perpendicular) ao fluxo predominante no canal, as componentes de velocidade foram rotacionadas entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ , com incremento de  $1^\circ$ . O ângulo que apresentou a maior (menor) variância para a componente  $u$  ( $v$ ), equivalente a  $11^\circ$  com sentido anti-horário e alinhado com a direção do canal, foi aplicado na matriz de rotação. Por se tratar de um canal, considerou-se que a componente  $u'$ , paralela à

direção do fluxo predominante, concentrou a parcela mais significativa da energia das correntes. Tal consideração foi verificada a partir do cálculo comparativo das energias relativas, em termos das variâncias das componentes  $u$  e  $v$ , referenciadas aos eixos  $x$ ,  $y$  originais e das componentes  $u'$  e  $v'$ , referenciadas aos eixos  $x'$ ,  $y'$  rotacionados com o ângulo do fluxo predominante.

O caráter temporal da corrente investigada foi determinado a partir da avaliação das séries temporais de corrente ( $u'$  e  $v'$ ), que foram separadas em sinais contendo a contribuição de processos em diferentes escalas temporais. Os efeitos da maré astronômica foram os primeiros a serem separados das séries das componentes  $u'$  e  $v'$  completas. A separação se deu através do método harmônico (Emery & Thomson, 2001), que consistiu na aplicação das rotinas *T-Tide* (Pawlowicz, Beardsley e Lentz, 2002) para determinação da amplitude e fase das componentes puramente astronômicas semi-diurnas  $M_2$ ,  $S_2$  e  $K_2$  e diurnas  $O_1$ ,  $S_1$  e  $K_1$ . A partir dessas componentes, sucedeu-se à geração das séries temporais de maré astronômica ( $uA$  e  $vA$ ), que foram reconstruídas para o mesmo período dos dados originais, de 7 de agosto de 1998 a 22 de novembro de 1999. Por fim, as séries astronômicas ( $uA$  e  $vA$ ) foram subtraídas das séries completas ( $u'$  e  $v'$ ), resultando nas séries contendo apenas as contribuições dos processos não astronômicos, denominadas  $unA$  e  $vnA$ .

As bandas de frequência consideradas na decomposição do sinal não-astronômico foram determinadas a partir da avaliação dos picos energéticos mais significativos, identificados nos espectros de energia das séries  $u'$  e  $unA$  e com base na literatura. Segundo Melo (2017), processos não astronômicos com períodos de até 3 dias são característicos de maré de vento, os quais incluem os efeitos de *wind set-up/set-down* e *storm-surges*; processos de 3 a 30 dias são inerentes à maré meteorológica, que abrange, dentre outros, os efeitos das OPCs; e, por fim, processos com períodos acima de 30 dias são referentes à banda sazonal, de forma geral. Os espectros de energia foram estimados para um intervalo de confiança de 95% (Emery & Thomson, 2001), a partir da função FFT (*Fast Fourier Transform*) associada a uma janela de média móvel com tamanho variável.

Em complementação a análise espectral através da FFT, a não estacionaridade dos picos de energia da série não-astronômica da velocidade  $unA$  foi também avaliada a partir da análise espectral por Ondasletas (Torrence & Compo, 1998; Liu *et al.*, 2007). Essa análise permite a verificação da significância dos picos mais energéticos bem como a sua ocorrência e duração

ao longo dos quinze meses de dados fornecendo assim informações importantes para a identificação das escalas de variabilidade temporal associadas à corrente para E no CIG.

A decomposição das séries não astronômicas ( $unA$  e  $vnA$ ) em diferentes bandas de frequência foi obtida pela filtragem digital com filtros *Butterworth*. A escolha de uma função de 2ª ordem permitiu tanto a atenuação das frequências fora dos limites de corte, quanto a preservação do sinal dentro de cada banda avaliada, a saber, de até 2 (passa-alta de 2 dias), 2 a 30 (passa-banda de 2 a 30 dias), de 30 a 90 (passa-banda de 30 a 90 dias) e acima de 90 dias (passa-baixa de 90 dias). Após a aplicação dos filtros, as séries de corrente foram delimitadas entre os dias 15 de agosto de 1998 às 00:00 e 15 de novembro de 1999 às 00:00 (hora local), com o intuito de padronizar uma janela temporal de 15 meses a ser analisada e eliminar distorções causadas pelo filtro nas extremidades das séries temporais (Emery & Thomson, 2001).

A determinação das escalas temporais responsáveis por induzir a corrente para E no CIG se deu pelo cálculo das velocidades residuais de cada sinal (séries completa, astronômica e não-astronômicas decompostas em diferentes bandas de frequência), obtidas a partir do valor médio para o período de 15 meses. A variância de cada série foi calculada para todo o período, uma vez que a energia e a variância de um sinal são grandezas relacionadas (Melo, 2017).

Além das análises descritas anteriormente, os valores da componente  $u'$  foram empregados, conjuntamente aos valores de temperatura e elevação do nível do mar medidos no píer do TBIG, na avaliação dos resultados das simulações numéricas, contempladas na etapa 2.

## 1.2 Etapa 2: Simulações Numéricas

Nesta etapa, buscou-se implementar um modelo numérico tridimensional e avaliar a sua capacidade de representar as principais características hidrodinâmicas observadas no CIG. A partir disso, investigar, os mecanismos físicos responsáveis pela existência da corrente persistente para E no CIG, bem como sua estrutura vertical na região do canal.

Utilizou-se o sistema de código aberto MOHID, desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, que é arquitetado de forma modular (<http://www.maretec.org/pt/>). Cada módulo (ex: WaterProperties, Turbulence, Atmosphere, Hydrodynamic, Geometry) é responsável por gerir uma informação específica, que é encapsulada para garantir a confiabilidade do modelo. Sendo assim, a informação associada a

um dado módulo só será alterada dentro do mesmo, impossibilitando a introdução de erros por alteração indevida em outros módulos (Viana, 2017).

As simulações foram conduzidas prioritariamente com o módulo hidrodinâmico (*Hydrodynamic*), que resolve numericamente a forma primitiva tridimensional das equações do movimento, assumindo as aproximações hidrostática e de Boussinesq, através do método dos volumes finitos e discretização vertical genérica (Leitão, 2003). As equações são aplicadas explicitamente a cada volume de controle num referencial tridimensional (Neves *et al.*, 2001).

Os processos turbulentos são computados na forma de viscosidade turbulenta multiplicados pelo gradiente de velocidade (Leitão, 2003). Os coeficientes de viscosidade horizontal foram definidos em função da resolução espacial de cada grade (Tabela 2), enquanto os coeficientes de viscosidade vertical foram definidos a partir do modelo de fechamento turbulento  $\kappa$ - $\varepsilon$  (BUCHARD *et al.*, 1999; VILLARREAL *et al.*, 2005), definido no módulo acoplado GOTM (*Global Ocean Turbulence Model*).

A discretização temporal foi feita a partir do algoritmo semi-implícito ADI (*Alternate Direction Implicit*), de modo a minimizar as restrições de estabilidade. Os termos que introduzem maiores restrições de estabilidade foram discretizados implicitamente (pressão barotrópica, atrito, convecção e difusão vertical), enquanto para o restante dos termos optou-se por uma abordagem explícita (Leitão, 2003).

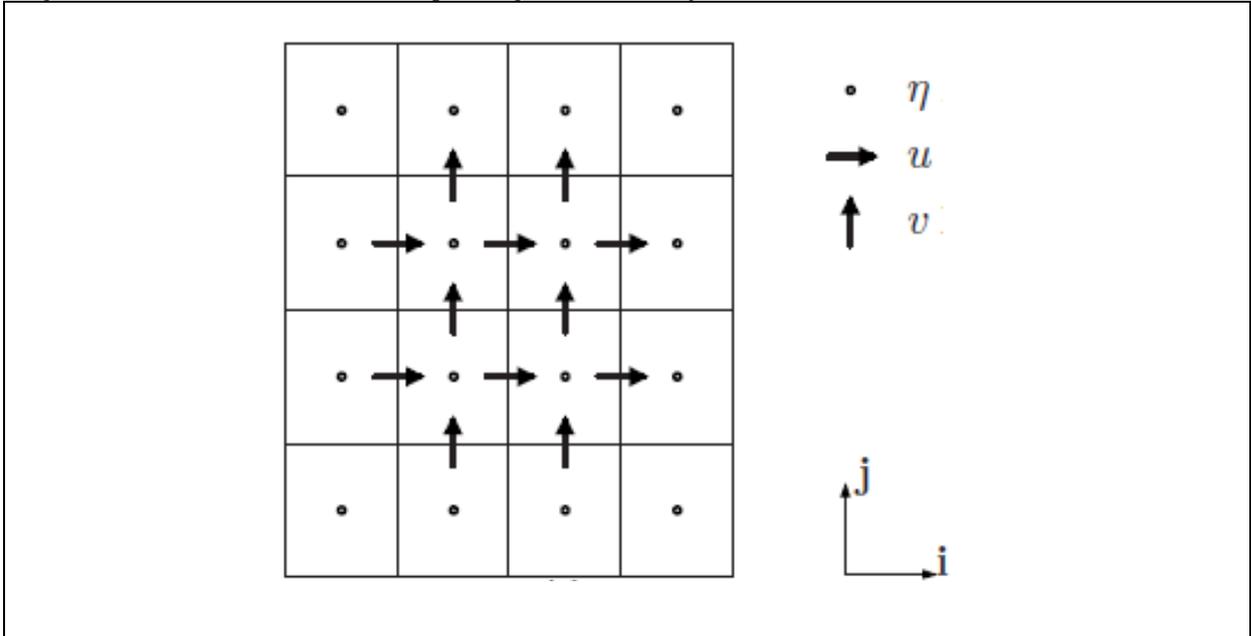
### 1.2.1 Esquema de grades numéricas e discretização vertical

A distribuição dos pontos de cálculo das propriedades hidrodinâmicas primitivas resolvidas pelo modelo se deu em uma malha ortogonal cartesiana descentrada, com apenas um grau de liberdade, que na classificação proposta por Arakawa & Lamb (1977), corresponde ao tipo C (Figura 2). Este esquema de grade minimiza o número de interpolações para o cálculo dos gradientes de pressão (barotrópico e baroclínico) e da divergência de fluxos (Leitão, 2003).

As grades numéricas foram configuradas em um esquema *downscaling*, onde processos em escalas oceânicas são propagados para as grades mais refinadas, o que permite sua representação em resoluções espaço temporais mais detalhadas e, conseqüentemente, a solução de escoamentos em sistemas com geometrias complexas. Foram utilizadas 3 grades tridimensionais, denominadas A, B e C, rotacionadas em 11° no sentido anti-horário (Figura 3), de forma com que a componente  $u$  modelada ficasse alinhada com a direção da corrente

predominante no CIG. A configuração de cada grade é apresentada na Tabela 2. A resolução espacial e a extensão da malha A foram idealizadas de forma a resolver o primeiro raio de deformação interno de *Rossby*, equivalente a ~40 km para a latitude de 23°.

Figura 2 – Malha 2D descentrada do tipo C segundo classificação de Arakawa & Lamb (1977).



Legenda:  $\eta$ : elevação da superfície livre;  $u$ : componente zonal de velocidade;  $v$ : Componente meridional de velocidade.

Fonte: Cushman-Roisin & Beckers, 2009, modificado pelo autor em 2021.

A escolha da coordenada vertical foi justificada a partir dos resultados obtidos na etapa 1. Enquanto modelos de coordenadas sigma são adequados para simulações de correntes barotrópicas e em regiões de águas rasas, onde feições topográficas exercem uma maior influência sobre os escoamentos, modelos que utilizam coordenadas isopicnais são mais adequados para regiões oceânicas profundas onde o escoamento predominante se dá ao longo das superfícies isopicnais. As coordenadas isopicnais são capazes de minimizar a difusão numérica enquanto preservam as propriedades das massas de água. Por fim, as coordenadas do tipo cartesiana, ou coordenadas Z, são capazes de lidar tanto com escoamentos barotrópicos e de águas rasas, quanto com correntes provocadas por gradientes de densidade, mesmo que o esquema de discretização não seja otimizado para nenhum desses casos (Neves *et al.*, 2000).

Neste contexto, partiu-se da premissa de que as correntes para E no CIG são geradas pelo ajustamento dos gradientes de pressão baroclínico sobre a plataforma continental e regiões oceânicas adjacentes, onde as profundidades chegam a quase 3500 metros. Entretanto, como

estas correntes podem se propagar para regiões de águas mais rasas, da ordem de 25 metros, no interior da BIG, optou-se por utilizar um esquema de coordenadas verticais do tipo Z.

Tabela 1 – Configuração das grades utilizadas nas simulações numéricas.

<b>Grade</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Discretização vertical</b>		3D [coordenadas z]	
<b>Resolução espacial</b> [ ° / m ]	0,08300 / 8255	0,01660 / 1665	0,00332 / 335
<b>Dimensões</b> [linhas x colunas]	60 x 110	60 x 90	50 x 55
<b>Passo de tempo</b> [ seg ]	120	60	3
<b>Profundidade máxima</b> [ m ]	3500	120	32
<b>Distância offshore *</b> [ km ]	410	65	x
<b>Viscosidade Horizontal</b> [ m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	500	100	20

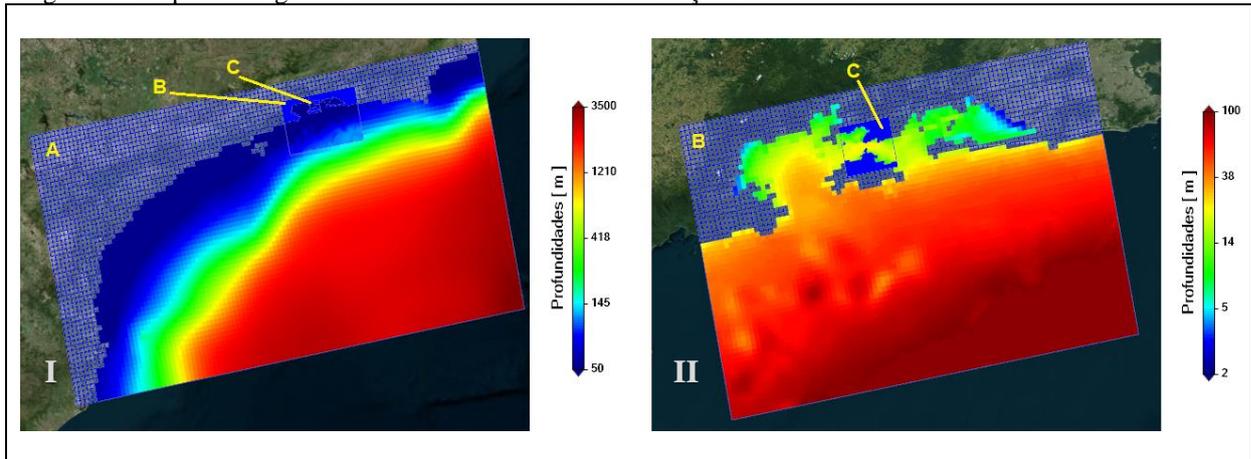
Nota: \*A distância *offshore* foi estimada pelas quantidades de linhas entre a costa da Ilha Grande e o limite S de cada grade, multiplicadas pelas respectivas resoluções espaciais.

Fonte: O autor, 2021.

A batimetria das áreas *offshore* foi composta por valores de profundidade do GEBCO, com resolução espacial de 1 minuto de arco de latitude/longitude ([www.gebco.net](http://www.gebco.net)), enquanto a batimetria da BS, da BIG e de seus arredores foi composta por digitalização das cartas náuticas 1607, 1621, 1622, 1623, 1631, 1632 e 1633 da DHN (2016) e por sondagens realizadas em alguns pontos distribuídos irregularmente sobre a região de estudo.

Os valores de profundidade foram interpolados para as grades regulares a partir de um algoritmo de triangulação fornecido pelo aplicativo OpenFlows FLOOD®, que faz uso de uma máscara para delimitar a linha de costa como contornos fechados. Posteriormente, os gradientes de profundidade foram suavizados com o algoritmo *Smooth* do pacote OpenFlows FLOOD®, com o propósito de se evitar difusão numérica em regiões de gradientes abruptos.

Figura 3 – Esquema de grades aninhadas utilizadas nas simulações numéricas.



Legenda: I – Grades A, B e C; II – Maiores detalhes as grades B e C.

Nota: Foram aplicados mapas de cores em escala logarítmica para destacar todo o intervalo de profundidades exibido no painel superior (50 a 3500 m) e inferior (2 a 100 m).

Fonte: O autor, 2021.

O atrito com o fundo ( $T_b$ ), conforme descrito por Franz *et al.* (2016), foi calculado a partir de uma formulação quadrática assumindo um perfil logarítmico de velocidade (equação 1). O parâmetro  $\rho$  refere-se à densidade da água,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $u_b$  é a velocidade horizontal no centro da célula de fundo,  $k$  é a constante de von Karman (0,4),  $z$  equivale à metade da altura da célula de fundo e  $z_0$  é a escala de atrito de fundo. O parâmetro  $z_0$  foi definido em 2.5 mm, com base na experiência em diferentes aplicações do MOHID com fundo de areia (Franz, *et al.*, 2014), que é, de maneira geral, característico da BIG (Kjerfve *et al.* 2021).

$$\vec{T}_b = \rho C_D \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (1a)$$

$$C_D = \left[ k / \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \right]^2 \quad (1b)$$

### 1.2.2 Condições iniciais e de contorno

As simulações partiram das condições de repouso e foram aquecidas por uma função rampa durante os primeiros 9 dias a partir de 01/08/1998 às 12 horas. Os resultados simulados utilizados nas análises compreenderam o período de um ciclo anual completo, entre 01/09/1998 e 01/09/1999, sendo este concomitante ao período das medições.

As grades A, B e C apresentaram contornos abertos distintos. A primeira se estendeu desde o Cabo de Santa Marta até o cabo de São Tome e abrangeu toda a região da PCSE. Com isso, suas fronteiras à W e à N foram delimitadas pelo continente, restando as fronteiras abertas à E e à S, que receberam o forçamento dos modelos oceânicos globais MyOcean (<http://marine.copernicus.eu/>) e HYCOM (<https://www.hycom.org/>). A utilização de dois modelos oceânicos objetivou verificar se as simulações forçadas por esses modelos globais são capazes de representar, de forma coerente, a corrente investigada. As fronteiras da grade B foram delimitadas à N pelo continente e receberam nas bordas E, W e S o forçamento da grade A. A grade C foi delimitada pelo continente ao N e pela Ilha Grande ao S, restando os contornos abertos à W e à E, que foram forçados pelas variáveis resolvidas na grade B.

Nos contornos fechados foram prescritas condições de velocidade horizontal nula para os fluxos normais e condições de deslizamento (*slipping condition*) para os fluxos tangenciais. Na superfície e no fundo foram prescritas as condições de contorno de velocidade vertical nula. Nos contornos abertos foi aplicado um esquema de relaxação de fluxos (*Flow Relaxation Scheme - FRS*) sobre os campos de temperatura, salinidade e velocidade ( $u$  e  $v$ ), para evitar divergências entre os resultados simulados e a solução de referência (Martinsen & Engedahl, 1987 *apud* Franz *et al.*, 2016). A condição se deu a partir da adição de um termo no conjunto de equações, que define a evolução da propriedade, conforme descrito na equação 2.

$$P^{t+\Delta t} = P^* + (P^{ext} - P^*) \frac{\Delta t}{T_d} \quad (2)$$

A variável  $P$  representa a propriedade em questão (componente de velocidade, salinidade ou temperatura),  $P^*$  é a propriedade calculada pelo modelo,  $P^{ext}$  é o valor da propriedade na solução de referência,  $\Delta t$  é o passo de tempo do modelo e  $T_d$  é o tempo de decaimento, que aumenta gradativamente até o infinito a partir do contorno aberto em direção ao interior do domínio em uma banda de 10 células. O tempo de decaimento ( $T_d$ ) foi definido em  $10^5$  s, equivalente a aproximadamente um dia, o que corresponde ao intervalo da solução do MyOcean.

Para as elevações, foi aplicada uma condição radiacional (Flather, 1976 *apud* Leitão, 2003), onde a radiação é sempre relativa a um valor de referência da solução externa. Caso os resultados simulados tendam a divergir dessa solução, a condição vai induzir os valores calculados para o estado de referência, minimizando a introdução de erros significativos na conservação da massa global do domínio simulado (Leitão, 2003).

A prescrição das forçantes atmosféricas se deu pela interpolação bilinear dos valores de pressão atmosférica e das componentes  $u$  e  $v$  do vento, provenientes do modelo atmosférico global ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) para a camada superficial das 3 grades do MOHID. A tensão de cisalhamento do vento foi calculada internamente a partir desses valores, pelo módulo *InterfaceWaterAir*.

### 1.2.3 Forçamento

Os campos tridimensionais de temperatura, salinidade e velocidade (componentes  $u$  e  $v$ ) e o campo bidimensional de elevação da superfície do mar prescritos nos contornos abertos da grade A foram extraídos dos modelos globais MyOcean e HYCOM. Os produtos de reanálise GLOBAL\_REANALYSIS\_PHY\_001\_030 e GLBb0.08-53.X forneceram informações diárias dessas variáveis, com resolução espacial de  $0,083^\circ$  de arco de latitude/longitude. A discretização vertical do MyOcean é dada em 50 intervalos, entre 0,5 e 5730 metros de profundidade, no caso do HYCOM, a discretização contempla 40 camadas. A maré astronômica apresentou menos de 1% da variância das correntes medidas no CIG e por este motivo, seu forçamento não foi imposto nos experimentos.

As grades do MOHID (A, B e C) seguiram o mesmo padrão de intervalos de profundidade do MyOcean, de modo a minimizar os erros de interpolação linear da solução externa para o domínio modelado, na definição das condições de contorno (Franz *et al.*, 2016). Os intervalos de profundidade foram definidos no módulo *Geometry* do MOHID, a partir do arquivo de configuração *Geometry.dat*, apresentado no ANEXO A). O esquema adotado resultou em 14 camadas verticais na região do CIG.

Os campos de pressão atmosférica e velocidade do vento à 10 metros da superfície do mar (componentes  $u$  e  $v$ ) prescritos em todo do domínio superficial das grades A, B e C foram extraídos do produto de reanálise atmosférico global ERA5, que tem resolução espacial de  $0,25^\circ$  de arco de latitude/longitude e resolução temporal horária.

#### 1.2.4 Experimentos Numéricos

Os experimentos numéricos foram idealizados (Tabela 3) para reproduzir a corrente investigada no CIG em termos de sua velocidade média e variabilidade, tomando como condições de contorno oceânicas, soluções de diferentes modelos globais. Como ponto de partida, os processos considerados como potencialmente relevantes para a hidrodinâmica no CIG foram contabilizados nas simulações, que foram denominadas com o sufixo “Controle”. Com isso, a influência energética das OPCs (Cavalcante, 2010), que são, em grande parte, geradas remotamente à região da BIG (Melo, 2017), foram prescritas nos contornos abertos através da imposição dos campos de velocidade e elevação dos modelos globais. Além disso, a influência de processos atmosféricos sobre a plataforma, responsáveis por criar oscilações de nível e corrente junto à costa, principalmente a partir das condições de bom tempo e da passagem de frentes frias (Castro, 1990), também foi considerada nos experimentos de controle.

Assim, o MOHID foi forçado diariamente com campos tridimensionais de temperatura, salinidade e corrente (componentes  $u$  e  $v$ ) e campos de elevação da superfície do mar, provenientes do MyOcean e do HYCOM. As simulações forçadas com o MyOcean (HYCOM) receberam o prefixo de “My” (“Hy”). Adicionalmente a esses forçamentos, campos de pressão atmosférica e de ventos à 10 metros acima do nível do mar (componentes  $u_{vento}$  e  $v_{vento}$ ), provenientes do modelo atmosférico global ERA5, foram prescritos à superfície de todo o domínio modelado (grades A, B e C), a cada 6 horas. Com isso, correntes com variabilidade subinercial, como as de escala sinótica, foram resolvidas nos experimentos de controle, que contemplaram todos os processos subinerciais considerados relevantes, conforme as hipóteses levantadas neste trabalho.

Os experimentos de caso, que receberam o sufixo “Caso” em seus respectivos nomes, foram criados tendo com base nos trabalhos de Rezende (2003) e Coelho (2008), que simularam uma corrente para E na plataforma continental interna, adjacente à BIG. As simulações realizadas por esses autores foram forçadas apenas com campos tridimensionais de temperatura e salinidade sobre a PCSE, os quais eram provenientes de uma climatologia característica de verão. Com isso, correntes de densidade sobre a plataforma continental, assim como o fluxo da Corrente do Brasil (CB) e sua variabilidade de meso-escala, foram representados nos experimentos supracitados.

Nesse contexto, os experimentos de caso conduzidos no presente trabalho (MyCaso e HyCaso) contemplaram um problema físico simplificado, referente apenas à circulação gerada

pelos campos de densidade *offshore*. Valores de temperatura e salinidade foram impostos nos contornos abertos da grade A, a partir de campos tridimensionais diários, provenientes dos produtos de reanálise do MyOcean e do HYCOM. Com isso, buscou-se verificar se a corrente costeira simulada por Rezende (2003) e Coelho (2008) seria representada pelo MOHID, de forma permanente durante um ciclo sazonal completo e se essa corrente, estaria associada à corrente média para E no CIG.

Tabela 3 – Configuração dos experimentos numéricos.

Experimento	Forçamento	Modelo Global	Grade(s)	Objetivo
MyControle	Temperatura, Salinidade, Corrente ( $u$ e $v$ ) e Elevação da Superfície do Mar	MyOcean	A	Verificar a representatividade do modelo ao se impor os processos potencialmente relevantes para a hidrodinâmica no CIG.
	Vento	ERA5	A, B e C	
HyControle	Temperatura, Salinidade, Corrente ( $u$ e $v$ ) e Elevação da Superfície do Mar	HYCOM	A	
	Vento	ERA5	A, B e C	
MyCaso	Temperatura e Salinidade	MyOcean	A	Verificar se apenas com a imposição de campos de temperatura e salinidade, o modelo é capaz de representar uma corrente para E na plataforma adjacente à BIG e se essa corrente estaria associada a corrente média no CIG.
HyCaso	Temperatura e Salinidade	HYCOM	A	

Nota: O campo “Grade(s)” indica em quais grades as soluções dos modelos globais foram impostas.  
 Fonte: O autor, 2021.

### 1.2.5 Análise dos Resultados

Os módulos do MOHID foram configurados para registrar os resultados de forma horária. O módulo *Hydrodynamic* forneceu as componentes de velocidade da corrente ( $u$  e  $v$ ) e a elevação do nível do mar. O módulo *WaterProperties* forneceu os campos de temperatura e salinidade, e o módulo *Atmosphere* forneceu as componentes  $u$  e  $v$  de velocidade do vento a 10 metros acima do nível do mar. As análises foram efetuadas a partir dessas variáveis (Tabela 4).

A representatividade dos experimentos de controle foi avaliada a partir da comparação de uma janela temporal de 12 meses das séries temporais da temperatura, elevação do nível do mar e da componente  $u'$ , medidas no CIG, com as mesmas variáveis extraídas da célula da grade C, localizada sobre o ponto de medição. Todas as séries foram filtradas com filtro passa-baixa de 40 horas, para remover a contribuição da maré astronômica proveniente dos dados medidos, uma vez que os resultados simulados não contemplaram os efeitos astronômicos. As comparações se deram no domínio da frequência, a partir dos espectros de energia (FFT) e, no domínio do tempo, pela determinação dos seguintes parâmetros estatísticos: média, desvio padrão, correlação e RMSE (Willmott, 1981).

Inicialmente, o padrão espacial da circulação promediada verticalmente foi avaliado visualmente, em uma perspectiva local, a partir de mapas com os valores médios no tempo das variáveis simuladas na grade B. Foram gerados mapas com a média das elevações e dos campos de corrente para todo o período analisado (1 de setembro de 1998 a 1 de setembro de 1999). Posteriormente, o mesmo padrão espacial foi também avaliado em uma perspectiva regional, a partir de mapas gerados com a grade A. Para estes, além da média anual, foram gerados mapas com as médias para as quatro estações do ano compreendidas neste período, a saber, primavera (setembro a novembro de 1998), verão (dezembro de 1998 a fevereiro de 1999), outono (março a maio de 1999) e inverno de 1999 (junho a agosto de 1999).

Uma importante etapa para a compreensão dos mecanismos físicos relevantes foi verificar se as correntes paralelas à costa, sobre a plataforma adjacente à BIG, apresentaram o mesmo comportamento das correntes no CIG. Assim, as velocidades calculadas na plataforma foram correlacionadas às velocidades calculadas no canal. Para isso, foram extraídas médias verticais das séries temporais da componente  $u$  simuladas em um ponto da grade B correspondente ao canal, e em pontos localizados na plataforma, ao longo de uma seção meridional a partir da costa da Ilha Grande em direção ao largo (Figura 4-II). Cada série extraída da plataforma foi então correlacionada à série extraída no canal.

Tabela 4 – Síntese das análises conduzidas sobre as variáveis fornecidas pelas simulações do MOHID.

<b>Análise</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Variável</b>	<b>Grade(s)</b>
Comparação estatística*	Representatividade das simulações	$u, \eta$ e $t$	C
Comparação dos espectros*		$u$	
Mapas de elevação e correntes promediadas na vertical	Padrão espacial médio da circulação	$u, v$ e $\eta$	A e B
Seção meridional de correlações	Verificar a possível correlação das correntes no CIG com as correntes na Plataforma Interna	$u$	B
Seções verticais médias	Analisar a estrutura vertical da coluna d'água sobre a plataforma adjacente à BIG	$t, s$ e $u$	A
EOFs	Analisar a estrutura vertical das correntes no CIG	$u$	C
Média anual do balanço de momento	Determinar as principais forças atuantes sobre a plataforma adjacente à BIG	todas**	A

Legenda:  $u$  e  $v$  – componentes de corrente;  $t$  – temperatura;  $s$  – salinidade;  $\eta$  – elevação do nível do mar.

Nota: \* Além das variáveis descritas na legenda, inclui-se também a velocidade do vento.

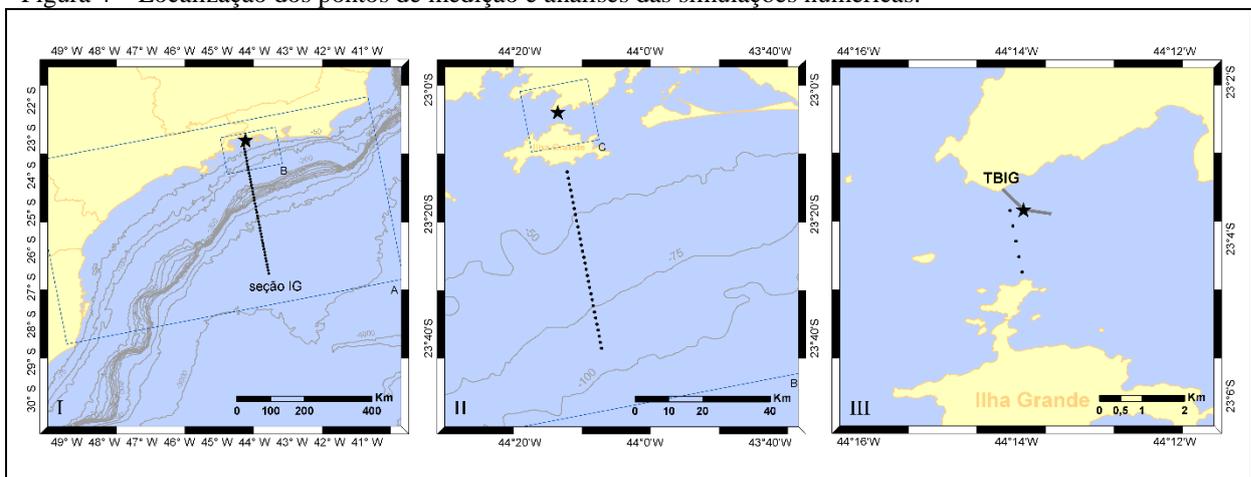
Fonte: O autor, 2021.

Após verificar que as correntes no canal apresentaram alta correlação com as correntes sobre a porção costeira da plataforma, a estrutura vertical da coluna d'água obtida a partir dos campos médios anuais de temperatura e salinidade da grade A, foi avaliada sobre os primeiros 50 km da seção IG (Figura 4-I). As seções médias anuais e sazonais da componente  $u$  também foram analisadas para a mesma seção. Em seguida, os principais modos estatísticos da estrutura vertical do escoamento no CIG foram calculados, a partir de Funções Ortogonais Empíricas (EOFs). Com isso, verificou-se o padrão vertical da coluna d'água no canal, para o período de 12 meses analisados e se este padrão se assemelhou ao padrão da porção costeira da plataforma adjacente à BIG. Partindo da premissa que existem variações na estabilidade da coluna d'água, na porção E da BIG, entre diferentes épocas do ano (Ikeda & Stevenson, 1982), verificou-se também a existência de variações da estrutura vertical das correntes no CIG, entre as estações da primavera de 1998, verão, outono e inverno de 1999. As EOFs foram aplicadas nas séries temporais médias diárias da componente  $u$  extraídas de uma seção vertical referente à grade C.

Esta seção foi composta por 5 perfis dispostos espacialmente de forma transversal ao canal, contendo, cada um, 14 camadas verticais (Figura 4-III).

Por fim, foi empregada uma análise do balanço de momento sobre a seção IG (Figura 4-I). Com isso, buscou-se compreender quais seriam os principais mecanismos físicos atuantes sobre a plataforma, que estariam associados à corrente média no CIG. O equilíbrio entre as forças atuantes nas direções paralela e perpendicular à grade A do modelo, foi avaliado através da média anual de cada termo da equação primitiva do movimento integrada na vertical. Cada termo foi calculado a partir das variáveis fornecidas pelo MOHID em cada simulação (componentes de velocidade da corrente e do vento, paralela e perpendicular à grade numérica, elevação do nível do mar, temperatura e salinidade), em um esquema de discretização de diferenças finitas. As derivadas de primeira ordem foram discretizadas em um esquema progressivo no tempo e regressivo no espaço, enquanto as derivadas espaciais de segunda ordem foram discretizadas em um esquema de diferenças centrais de segunda ordem (Cushman-Roisin & Beckers, 2009).

Figura 4 – Localização dos pontos de medição e análises das simulações numéricas.



Legenda: I – Visão geral da área de estudos com destaque para os pontos pretos, que representam as células da grade A referentes à seção Ilha Grande (IG). A delimitação das grades A e B em azul foi mantida para fins de referência; II – Visão ampliada da área de estudos com destaque para os pontos pretos, que representam as células da grade B onde as séries temporais da componente  $u$  foram correlacionadas à série extraída da mesma grade em ponto no canal, representado pela estrela preta. A delimitação das grades B e C em azul foi mantida para fins de referência; III – Visão aproximada do CIG, com destaque para o ponto representado pela estrela preta, onde os dados foram adquiridos no píer do TBIG. Os pontos pretos localizam as células da grade C do MOHID onde os perfis verticais da componente  $u$  foram extraídos para as análises com EOF.

Nota: A batimetria em cinza foi adquirida junto à CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/>).

Fonte: O autor, 2021.

## 2 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados provenientes das análises da série temporal medida no CIG em termos das correntes médias e das variabilidades de cada banda de frequência obtida. Posteriormente, os resultados alcançados com os experimentos numéricos são apresentados, bem como as análises efetuadas a partir destes.

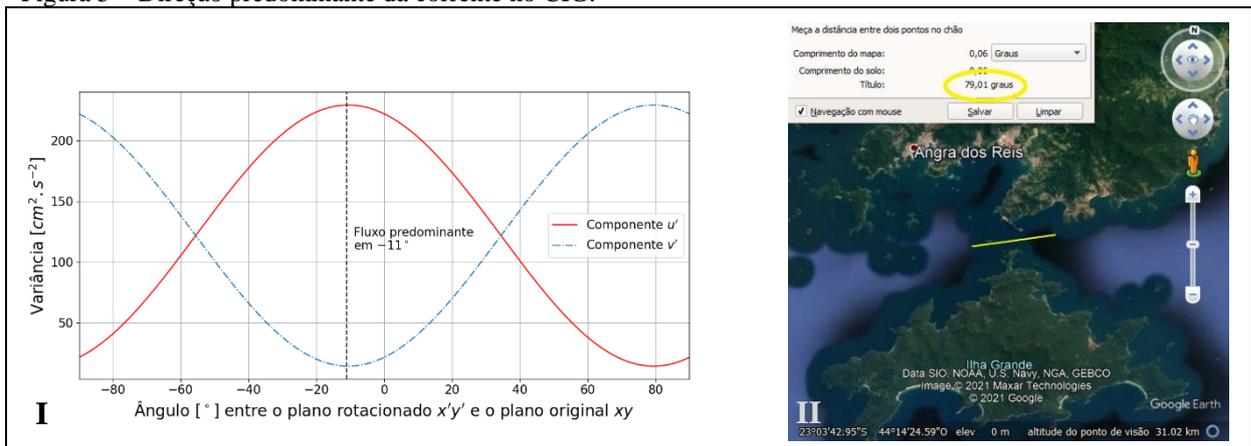
### 2.1 Análise dos Dados Medidos

As séries temporais de elevação do nível do mar, temperatura e corrente, medidas no CIG, apresentaram uma lacuna de dados entre os dias 11 de agosto de 1999 e 17 de agosto de 1999, devido a problemas relacionados à manutenção do equipamento. Os 155 registros horários referentes a esta lacuna foram preenchidos com os valores médios das séries completas, equivalentes a -0,02 cm para o nível do mar, 22,04 °C para temperatura e 6,53 e 0,46 cm.s<sup>-1</sup> para as componentes  $u$  e  $v$  da corrente, respectivamente. Os valores médios das componentes de corrente foram calculados após a correção do efeito da declinação magnética.

A direção predominante do escoamento no CIG foi estabelecida ao se rotacionar o plano cartesiano  $(x, y)$ , no qual as componentes de corrente ( $u$  e  $v$ ) foram referenciadas, em um ângulo de 11° no sentido anti-horário. Como resultado, a componente  $u'$  ( $v'$ ) rotacionada apresentou o maior (menor) valor de variância (Figura 5-I). O novo eixo de referência  $x'$  ( $y'$ ) passou a ter a orientação equivalente a 79° (349°) em relação ao N verdadeiro (Figura 5-II), logo, os valores positivos de  $u'$  ( $v'$ ) indicaram um sentido para E/ENE (N/NNO), e os valores negativos, para W/WSE (S/SSE). Para fins de simplificação da escrita, foi adotado o sentido E (N) para os valores positivos de  $u'$  ( $v'$ ), e W (S) para os valores negativos.

A componente  $u$ , foco das análises deste trabalho, respondeu por 92% da variância total das correntes e, após a rotação em 11°, a componente  $u'$ , alinhada ao escoamento predominante, passou a responder por 95% da variância total.

Figura 5 – Direção predominante da corrente no CIG.



Legenda: I – Variância das componentes  $u'$  e  $v'$  ao serem rotacionadas em relação ao eixo W-E. Ângulos positivos (negativos) equivalem à rotação do plano cartesiano no sentido horário (anti-horário); II – Direção do fluxo predominante em relação ao N verdadeiro calculado com a ferramenta de medição do Google Earth, representado pela linha amarela.

Fonte: O autor, 2021.

As constituintes harmônicas obtidas a partir das componentes  $u'$  e  $v'$ , que foram utilizadas na remoção da contribuição astronômica do sinal completo, são apresentadas na Tabela 5. As amplitudes das constituintes paralelas ao canal foram de três vezes a duas ordens de grandeza maiores que as amplitudes das constituintes perpendiculares. A constituinte harmônica  $M_2$  apresentou a maior relevância dentre os harmônicos calculados, com amplitude de  $1,11 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Tabela 5 – Constituintes harmônicas puramente astronômicas das séries temporais das componentes de corrente paralela ( $u'$ ) e perpendicular ( $v'$ ) ao CIG.

Harmônico	Período [ horas ]	Amplitude [ $\text{cm.s}^{-1}$ ]	
		$u'$	$v'$
$M_2$	12,42	1,11	0,02
$S_2$	12,00	0,96	0,13
$O_1$	25,82	0,86	0,08
$S_1$	24,00	0,77	0,27
$K_2$	11,97	0,36	0,08
$K_1$	23,94	0,32	0,08

Legenda: Constituintes harmônicas ordenadas de forma decrescente de acordo com a amplitude da componente  $u'$ .

Fonte: O autor, 2021.

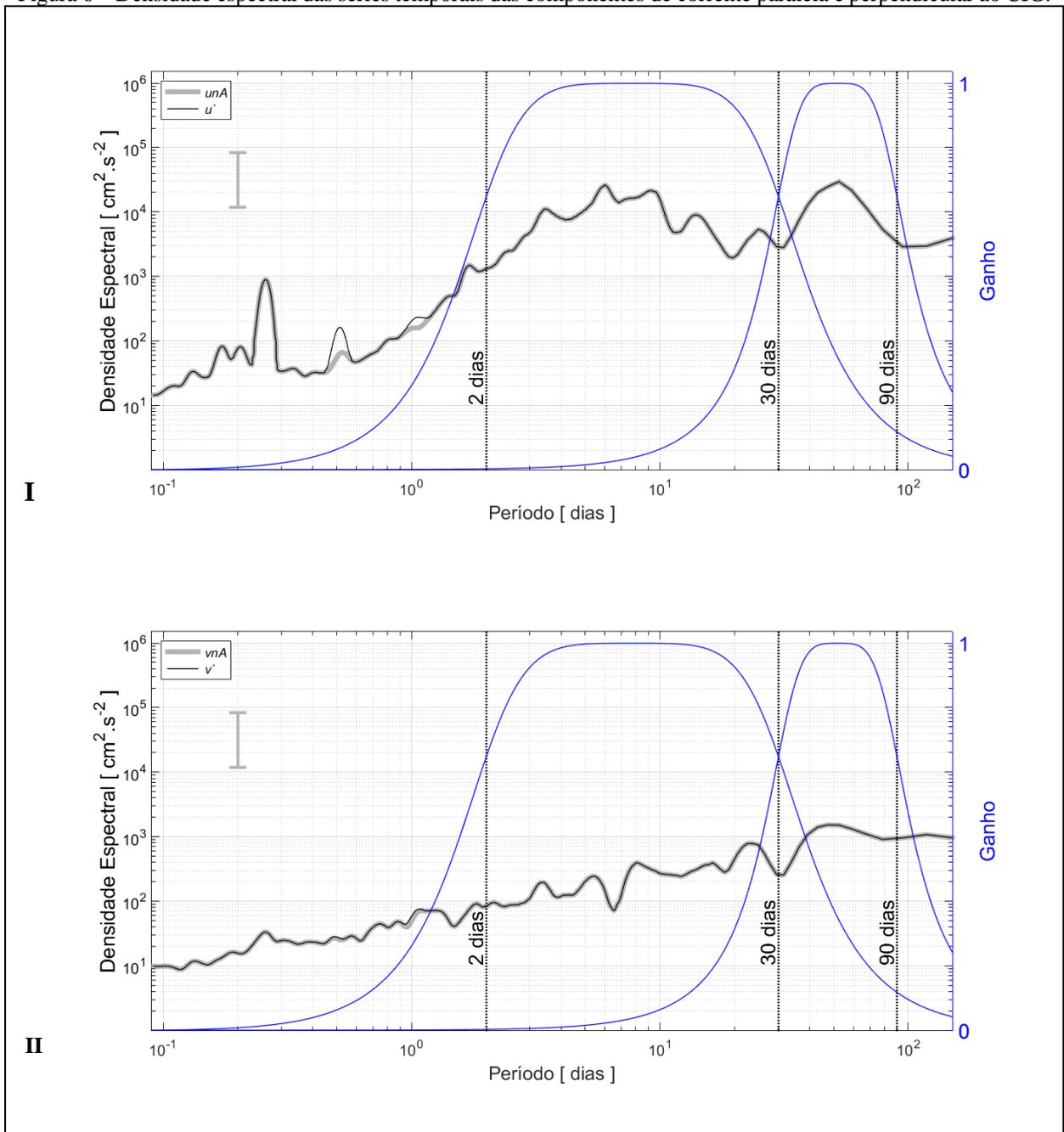
Os espectros de energia dos sinais de corrente completo e não astronômico (Figura 6), indicaram o mesmo padrão do sinal astronômico, em relação a energia das componentes

paralelas ao canal ( $u'$  e  $unA$  da Figura 6-I), que foram, no geral, uma ordem de grandeza superiores à energia das componentes perpendiculares ( $v'$  e  $vnA$  da Figura 6-II). A banda com períodos inferiores a 2 dias apresentou picos energéticos de uma a duas ordens de grandeza inferiores aos picos localizadas nos intervalos de 2 a 30 dias e de 30 a 90 dias. Os maiores picos astronômicos (não-astronômicos) de até 2 dias foram de 0,51 e 1 (0,13, 0,17, 0,20 e 0,26 e 1,08) dia. Dentre as bandas mais energéticas, de 2 a 30 dias e de 30 a 90 dias. A primeira apresentou picos não-astronômicos de 3, 5, 6, 9 e 14 dias, e a segunda banda, um pico de 52 dias.

A análise de ondaletas, na Figura 7-I, exibiu os pulsos de alta e baixa potência espectral presentes na série de dados e seus períodos associados. O espectro global (Figura 7-II) exibiu os picos presentes na escala sinótica e indicou o pico com período de 52 dias como significativo e associado a um processo não estacionário ocorrido entre os dias 153 e 263, equivalentes a 08/01/1999 e 28/04/1999. O sinal referente a banda não-astronômica de 30 a 90 dias (Figura 9-III) evidenciou que, neste período, suas amplitudes foram 65% maiores que a amplitude média do sinal, de  $2.2 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Durante os 15 meses de medição, o sinal da série temporal completa das velocidades paralelas ao CIG (Figura 8-I) oscilou em torno do valor médio de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$  (Tabela 6), resultando numa corrente residual com sentido para E no canal. Dentre as parcelas que compõem este sinal, a não-astronômica, filtrada para a banda de períodos acima de 90 dias (Figura 9-IV), apresentou oscilação em torno do valor médio, de  $6,95 \text{ cm.s}^{-1}$ , o qual foi similar ao valor médio do sinal completo, de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ . A influência deste sinal foi registrada no sinal não-astronômico completo (Figura 8-III), que apresentou velocidade média de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ . As demais porções compostas pelo sinal astronômico (Figura 8-II), e os sinais não-astronômicos filtrados para as bandas de até 2 dias (Figura 9-I), de 2 a 30 dias (Figura 9-II) e de 30 a 90 dias (Figura 9-III), oscilaram em torno do zero. Como resultado, a corrente residual dessas bandas foi nula no canal.

Figura 6 – Densidade espectral das séries temporais das componentes de corrente paralela e perpendicular ao CIG.

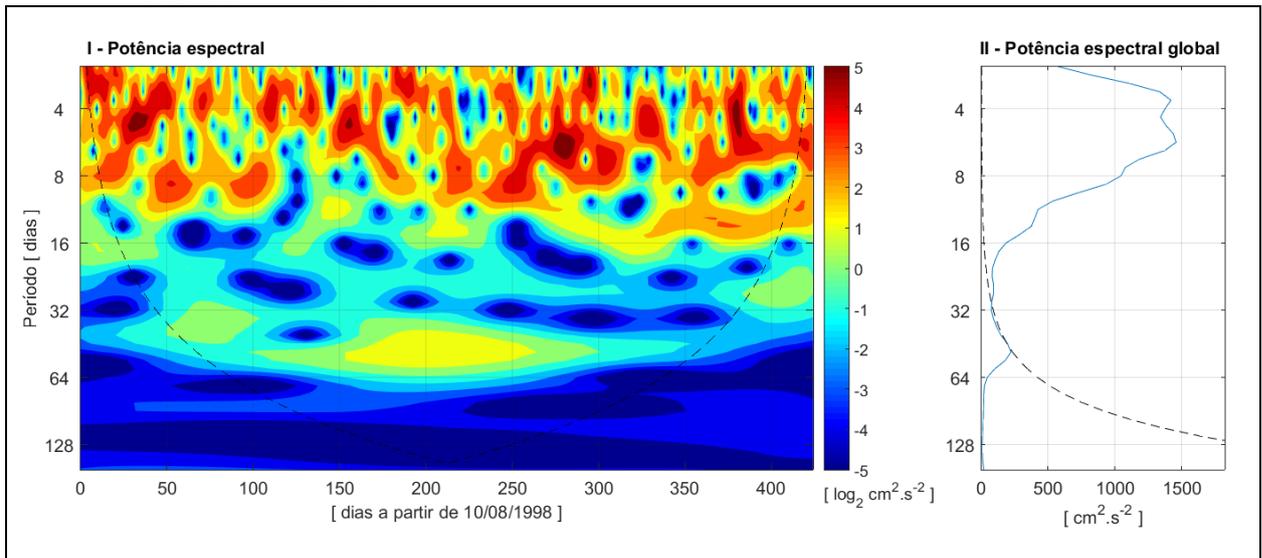


Legenda: I – Densidade espectral da componente paralela ao CIG com os efeitos da maré astronômica removidos ( $unA$ ) e com os efeitos da maré astronômica ( $u'$ ); II – Gráfico similar ao I, porém, referente a componente perpendicular ao CIG.

Nota: As funções de resposta dos filtros *Butterworth* de 2ª ordem do tipo passa-banda foram plotados em azul e os limites de corte foram representados pelas linhas verticais pontilhadas. As funções dos filtros passa-alta e passa-baixa foram omitidas dos gráficos para evitar confusão visual, uma vez que os limites de corte já foram representados. O intervalo de confiança de 95% é representado pela barra vertical cinza.

Fonte: O autor, 2021.

Figura 7 – Potência espectral da série temporal da componente de corrente paralela ao CIG, obtido a partir da transformada de ondaleta.



Legenda: I – Potência espectral em escala logarítmica de base 2 do sinal da corrente paralela ao CIG filtrado com filtro passa-baixa de 40 horas; II – Potência espectral global referente a mesma série temporal.

Nota: A linha tracejada preta indica o limite do intervalo de confiança de 95%.

Fonte: O autor, 2021.

Tabela 6 – Valores médios e variâncias das componentes paralela e perpendicular ao CIG, separadas em processos astronômicos e não-astronômicos, filtrados em diferentes bandas de frequência.

	Valor médio [cm.s <sup>-1</sup> ]		Variância [cm <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]	
	Componente paralela ao CIG	Componente perpendicular ao CIG	Componente paralela ao CIG	Componente perpendicular ao CIG
Série total	6,90	-0,75	226,22 100%	12,87 100%
Série astronômica	0,00	0,00	1,93 0,8%	0,05 0,4%
Série não-astronômica	6,90	-0,75	224,47 99,2%	12,85 99,8%
Filtro passa-alta de 2 dias	0,00	0,00	44,02 19,5%	8,33 64,7%
Filtro passa-banda de 2 a 30 dias	-0,04	0,01	152,61 67,5%	2,61 20,3%
Filtro passa-banda de 30 a 90 dias	0,00	0,01	7,82 3,5%	0,62 1,6%
Filtro passa-baixa de 90 dias	6,95	-0,76	3,40 1,5%	0,26 2,0%

Legenda: Os valores em azul representam o percentual da variância de cada parcela do sinal em relação a variância do sinal completo.

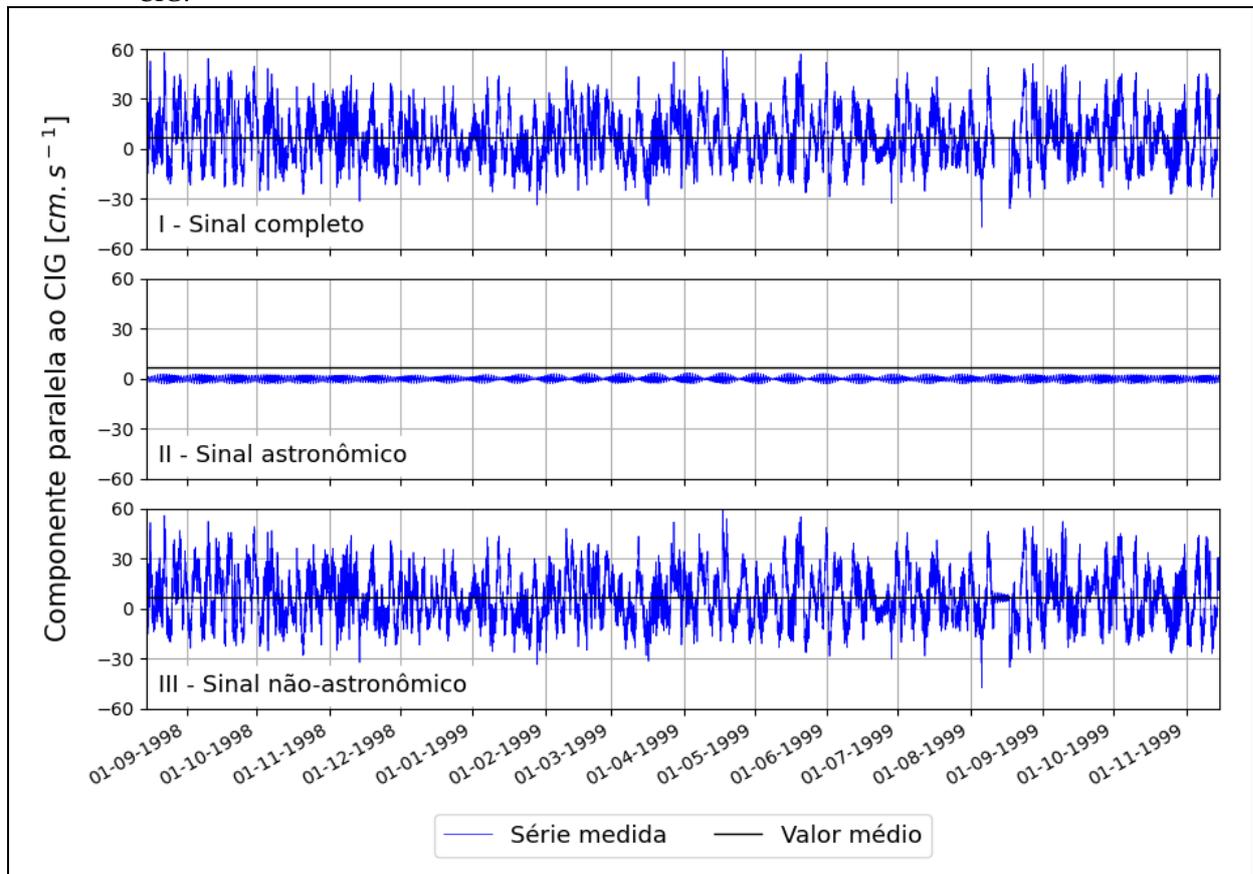
Fonte: O autor, 2021.

A componente perpendicular ao CIG apresentou um padrão similar ao da componente paralela, em relação aos valores médios de cada série estabelecida. Porém, as magnitudes observadas foram uma ordem de grandeza inferiores (Tabela 6) e o sentido predominante foi para S. Este padrão foi observado tanto no sinal completo, com velocidade média, para os 15

meses de registro de corrente, de  $-0,75 \text{ cm.s}^{-1}$ , quanto no sinal não-astronômico com períodos acima de 90 dias, que apresentou velocidade média de  $-0,73 \text{ cm.s}^{-1}$ .

A corrente residual com sentido para E se manifestou na banda não-astronômica com períodos superiores a 90 dias, referente a componente paralela ao CIG. Sua energia, em termos da variância do sinal, representou menos de 2% da variância total (Tabela 6). Em contrapartida, a banda não-astronômica de 2 a 30 dias foi a mais energética, respondendo por 67,5% da variância total. Na sequência, as bandas não-astronômica com períodos de até 2 dias responderam por 19,5%, seguida da banda não-astronômica de 30 a 90 dias (3,5%). Por fim, a banda astronômica respondeu por apenas 0,8% da variância total. Já o sinal de maior energia da componente perpendicular ao canal foi o da banda não-astronômica com períodos de até 2 dias (64,7%). Em seguida, observou-se, em termos de relevância energética, a banda não-astronômica de 2 a 30 dias (20,3%) e de períodos superiores a 90 dias (2%), a banda não-astronômica de 30 a 90 dias (1,6%) e a banda astronômica (0,4%).

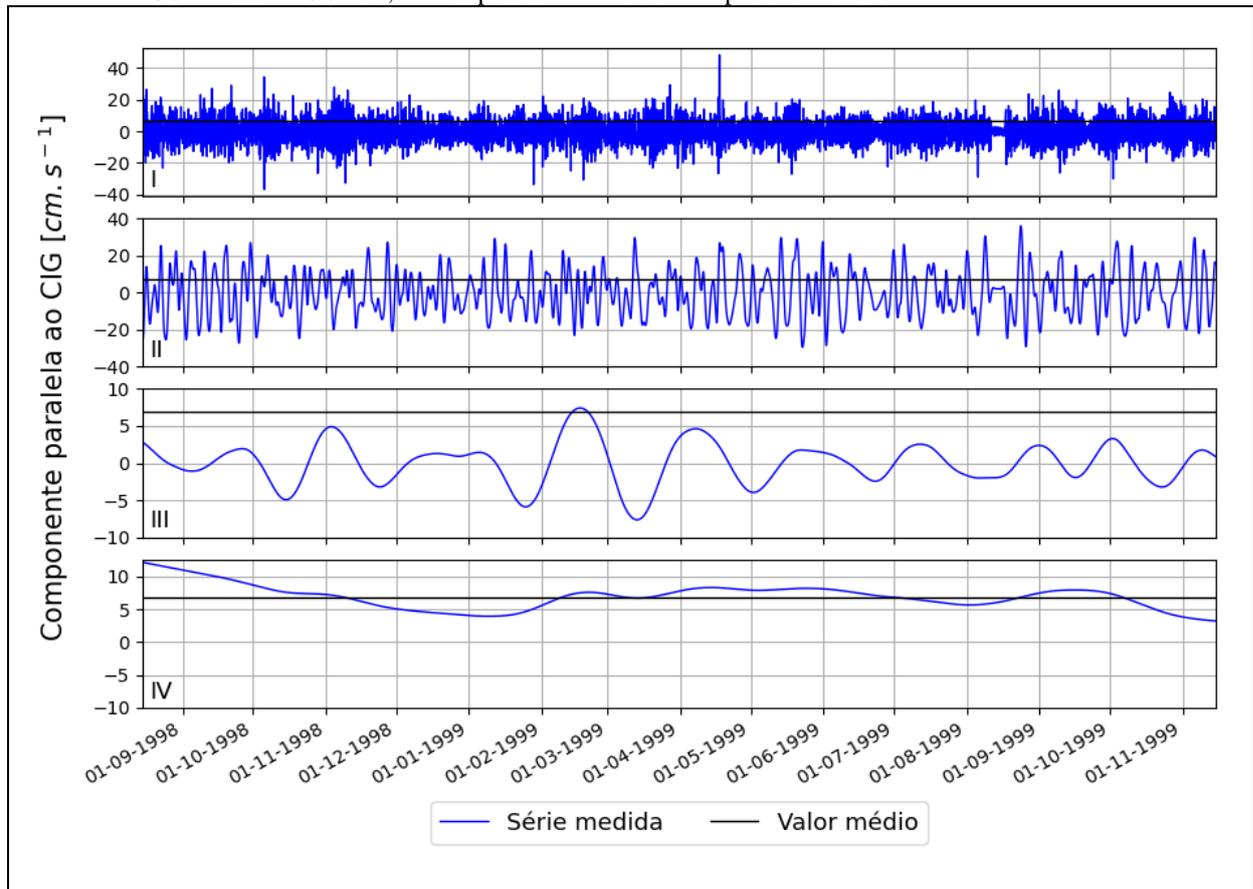
Figura 8 – Séries temporais completa, astronômica e não-astronômica da componente de velocidade paralela ao CIG.



Legenda: A linha preta em todos os gráficos representa, para fins de referência, a velocidade média de toda a série temporal da componente  $u'$ , equivalente a  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Fonte: O autor, 2021.

Figura 9 – Séries temporais não-astronômicas filtradas para as bandas com períodos de até 2 dias, de 2 a 30, de 30 a 90 e acima de 90 dias, da componente de velocidade paralela ao CIG.



Legenda: Sinais não-astronômicos filtrados com I – filtro passa-alta de até dois dias; II – filtro passa-banda de 2 a 30 dias; III – filtro passa-banda de 30 a 90 dias; IV – filtro passa-baixa acima de 90 dias. Para fins de melhor detalhamento visual dos sinais, as escalas verticais em I e II são diferentes das escalas em III e IV. A linha preta em todos os gráficos representa, para fins de referência, a velocidade média de toda a série temporal da componente  $u'$ , equivalente a  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Fonte: O autor, 2021.

## 2.2 Simulações Numéricas

A representatividade de cada simulação de controle é apresentada a seguir, em termos de sua capacidade em representar a variabilidade e a corrente média no CIG, em comparação aos dados medidos no canal. Posteriormente, os resultados de cada etapa metodológica são apresentados de maneira comparativa entre todos os experimentos. Essas etapas contemplam:

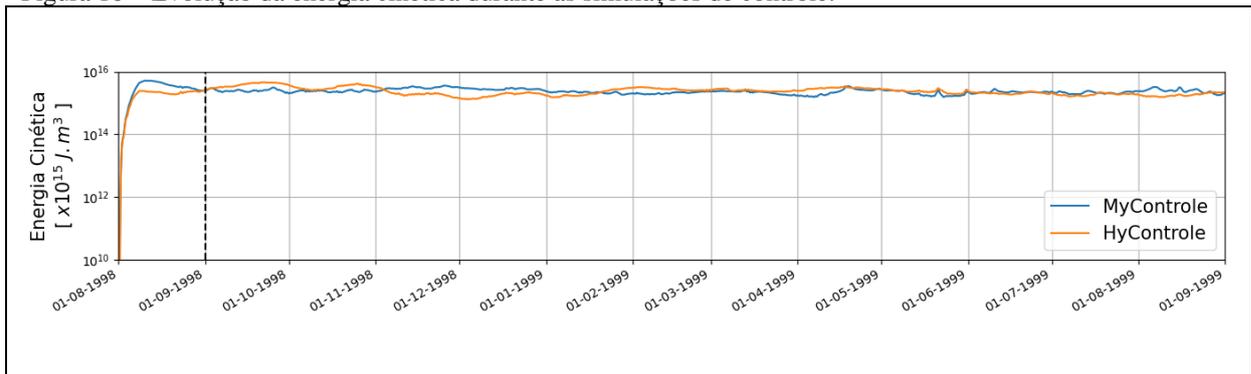
- a) O padrão espacial médio dos escoamentos integrados na vertical, referentes à BIG e adjacências (grade B);
- b) A correlação entre a corrente média no CIG e na plataforma continental adjacente;

- c) O padrão espacial (horizontal) médio dos escoamentos integrados na vertical, referentes à PCSE (grade A);
- d) A estrutura vertical média da coluna d'água na plataforma e no CIG;
- e) O balanço de momento sobre a plataforma.

### 2.2.1 Análise dos Experimentos de Controle [MyControle e HyControle]

A energia cinética de ambos os experimentos de controle (MyControle e HyControle) foi estabilizada antes do dia 01/09/1998 (Figura 10), referentemente ao início do período no qual os resultados foram analisados.

Figura 10 – Evolução da energia cinética durante as simulações de controle.



Legenda: A linha vertical tracejada marca o início do período em que os resultados foram analisados.

Fonte: O autor, 2021.

#### 2.2.1.1 Velocidade e Temperatura no CIG

Os experimentos de controle apresentaram comportamentos distintos em relação ao valor médio da corrente paralela ao CIG, que foi de  $6,84 \text{ cm.s}^{-1}$  para os dados medidos no período entre 09/01/1998 e 09/01/1999 (Tabela 7 e Figura 11). O experimento MyControle resultou em uma corrente média de  $-2,06 \text{ cm.s}^{-1}$  para o mesmo período, ou seja, com sentido para W. O outono foi a única estação que apresentou um valor médio positivo de  $0,67 \text{ cm.s}^{-1}$ , porém, subestimado em 91% em relação ao valor médio registrado no mesmo período, de  $7,23 \text{ cm.s}^{-1}$  (Figura 11). O experimento HyControle apresentou velocidade média de  $4,59 \text{ cm.s}^{-1}$ , que

foi subestimada em 33% em relação ao valor medido. O sentido para E foi observado não somente para o período dos 12 meses simulados, mas para todas as estações compreendidas nesse período (Figura 11).

A variabilidade, em termos do desvio padrão simulado, foi superestimada em 41% no experimento MyControle e subestimada em 17% no experimento HyControle. A correlação com a série de corrente medida foi de 0,73 para o experimento MyControle, e de 0,59 para o experimento HyControle. Por fim, o valor de RMSE foi 27% maior no experimento MyControle em relação ao experimento HyControle. Os parâmetros estatísticos indicaram que, de maneira geral, ambas as simulações representaram a variabilidade das correntes paralelas ao CIG de maneira satisfatória. No entanto, o fato do experimento MyControle não ter resultado em uma corrente média para E, conforme obtido com o experimento HyControle, indicou que as simulações da corrente média no CIG foram criticamente sensíveis a variações das soluções impostas nos contornos abertos.

As elevações simuladas apresentaram uma variabilidade semelhante à do dado e correlações acima de 0,5 em ambos os experimentos de controle (Tabela 7). Os valores foram superestimados até meados de abril de 1999, e subestimados a partir de maio de 1999 em diante (Figura 12-II), no que pareceu uma oscilação sazonal presente no dado que não foi representada nos experimentos de controle. Kjerfve *et al.* atribuíram 28% da variabilidade dessa oscilação a expansão estérica, 5% a variações da pressão atmosférica e 67% aos efeitos provocados por ventos de frente fria no inverno e dinâmica oceânica.

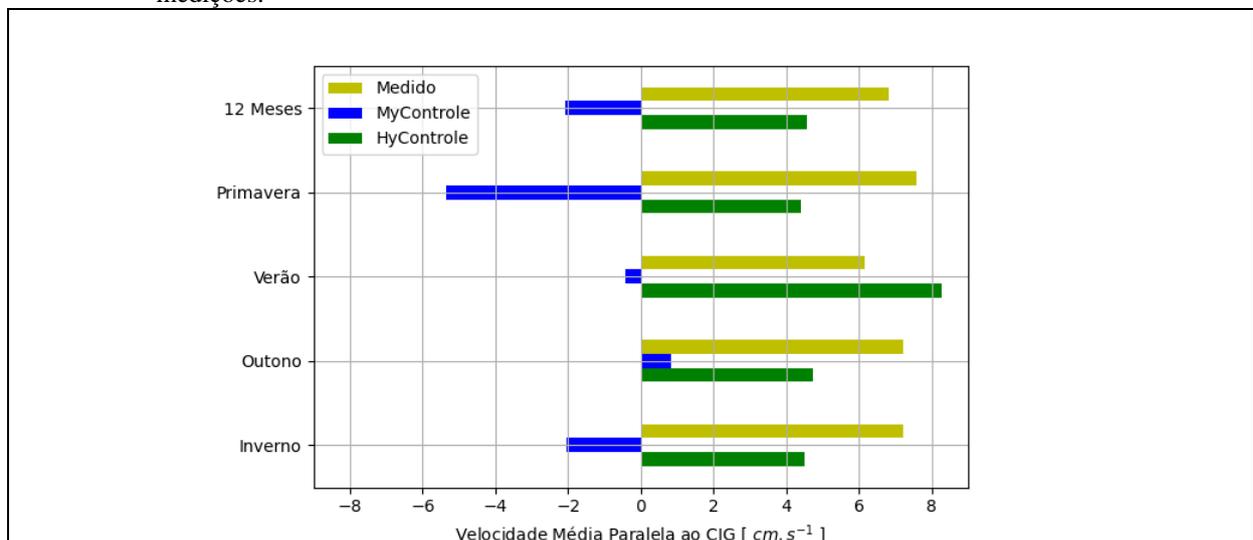
A temperatura simulada, por sua vez, não apresentou diferenças significativas entre os dois experimentos (Figura 12-II). Os valores simulados apresentaram um padrão geral similar aos medidos. Em alguns períodos observou-se que os valores simulados foram superestimados (22/10/1998 a 11/01/1999, 27/01/1999 a 05/02/1999 e 19/03/1999 a 30/04/1999) em relação aos dados. Em outros períodos (19/02/1999 a 19/03/1999), esses valores foram subestimados em relação aos dados. Os processos locais não contabilizados nas simulações, como a imposição das descargas fluviais e os fluxos de calor na superfície podem ter contribuído para essas diferenças na temperatura. No entanto, tais diferenças visuais observadas na Figura 12-II não se refletiram nas correntes simuladas (Figura 12-I).

Tabela 7 – Comparação estatística entre a corrente média paralela ao CIG, elevação do nível do mar ( $\eta$ ) e a temperatura obtidas a partir dos dados e dos experimentos numéricos de controle, para o período de 01/09/1998 a 01/09/1999.

Parâmetro Estatístico	Variável	Dados medidos	MyControle	HyControle
<b>Média</b>	<b>Componente <math>u</math></b> [ $\text{cm.s}^{-1}$ ]	6,84	-2,06	4,59
	<b><math>\eta</math></b> [ cm ]	0,20	0,30	-0,02
	<b>Temperatura</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	22,38	22,76	22,97
<b>Desvio Padrão</b>	<b>Componente <math>u</math></b> [ $\text{cm.s}^{-1}$ ]	12,84	16,00	10,69
	<b><math>\eta</math></b> [ cm ]	22,34	12,60	5,38
	<b>Temperatura</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	2,42	1,48	1,78
<b>Correlação</b>	<b>Componente <math>u</math></b>	x	0,73	0,59
	<b><math>\eta</math></b>	x	0,58	0,53
	<b>Temperatura</b>	x	0,66	0,61
<b>RMSE</b>	<b>Componente <math>u</math></b> [ $\text{cm.s}^{-1}$ ]	x	14,12	11,08
	<b><math>\eta</math></b> [ cm ]	x	18,19	20,03
	<b>Temperatura</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	x	1,86	2,04

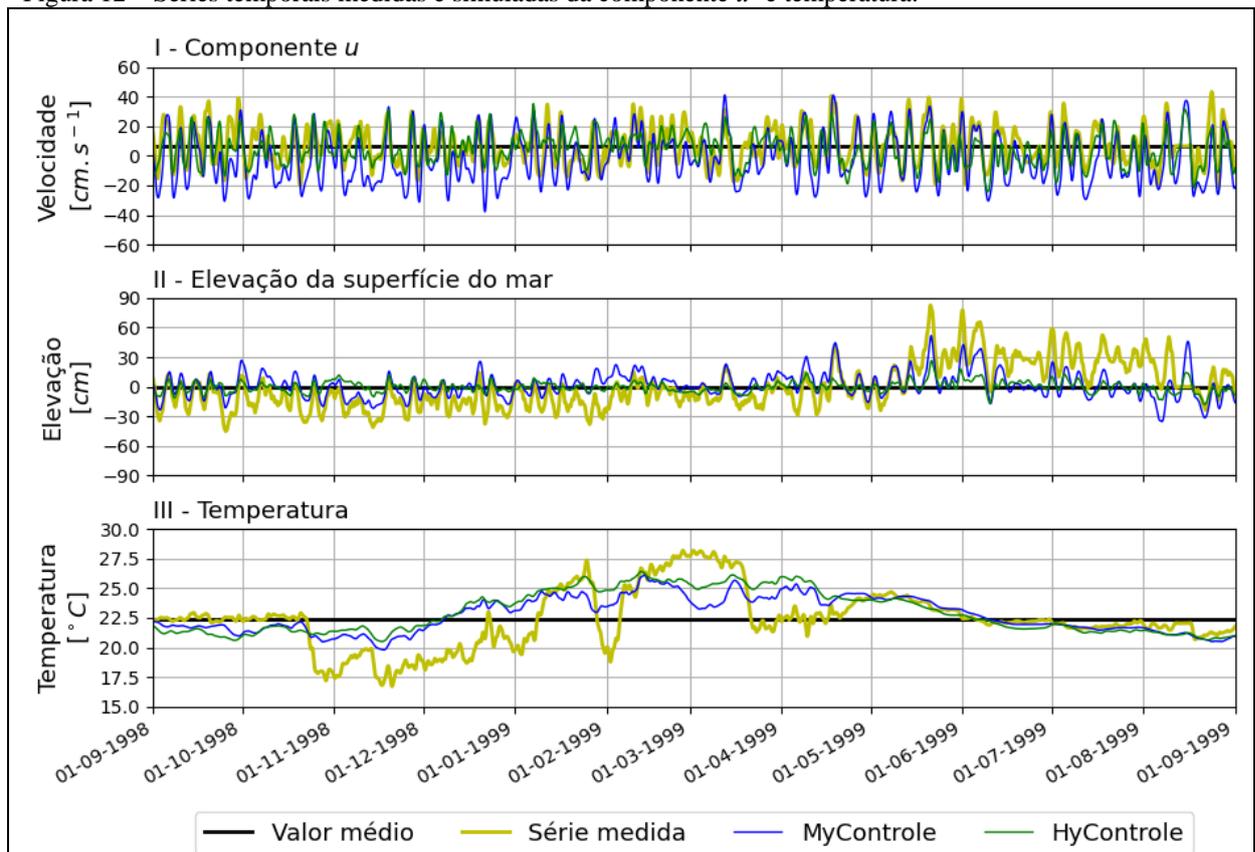
Fonte: O autor, 2021.

Figura 11 – Velocidades médias registradas no CIG e extraídas das simulações de controle no mesmo local das medições.



Fonte: O autor, 2021.

Figura 12 – Séries temporais medidas e simuladas da componente  $u'$  e temperatura.



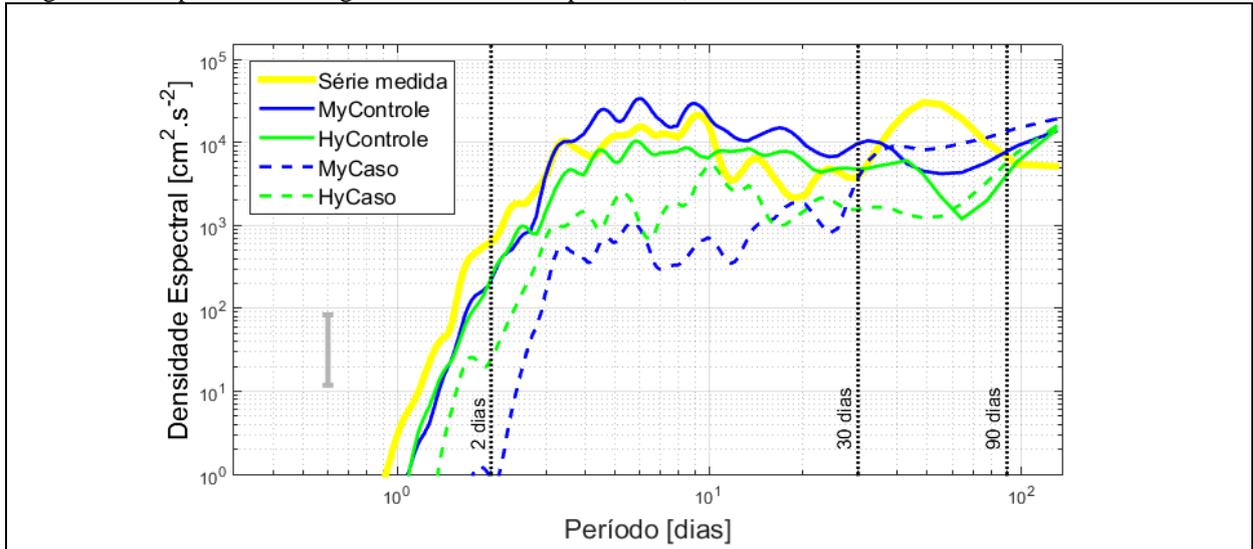
Legenda: Valores médios da componente  $u = 6,84 \text{ cm.s}^{-1}$ ;  $\eta = 0,20 \text{ cm}$ ; Temperatura =  $22,38 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Fonte: O autor, 2021.

Em termos do espectro de energia, a componente de corrente paralela ao CIG apresentou, de maneira geral, resultados similares entre os valores medidos e simulados em ambos os experimentos de controle (Figura 13). Os principais picos associados à banda de 2 a 30 dias foram representados. A exceção foi a banda de 30 e 90 dias, na qual o pico de 52 dias não foi devidamente representado nos experimentos de controle, o que não comprometeu as análises sobre a corrente para E no CIG. O experimento MyCaso apresentou densidade espectral equivalente à da corrente medida e a dos experimentos de controle, apenas a partir de períodos maiores que 30 dias. No experimento HyCaso, essa equivalência energética foi observada em períodos acima de 60 dias.

A partir das comparações com os dados medidos no CIG, constatou-se que as simulações de controle representaram os processos hidrodinâmicos mais relevantes para a região de estudo motivando assim as análises propostas, apresentadas a seguir.

Figura 13 – Espectros de energia das séries da componente  $u'$ , medida e simuladas.



Legenda: O intervalo de confiança de 95% é representado pela barra vertical cinza. As linhas pontilhadas verticais foram plotadas para fins de referência dos limites das bandas de frequência analisadas na etapa 1.

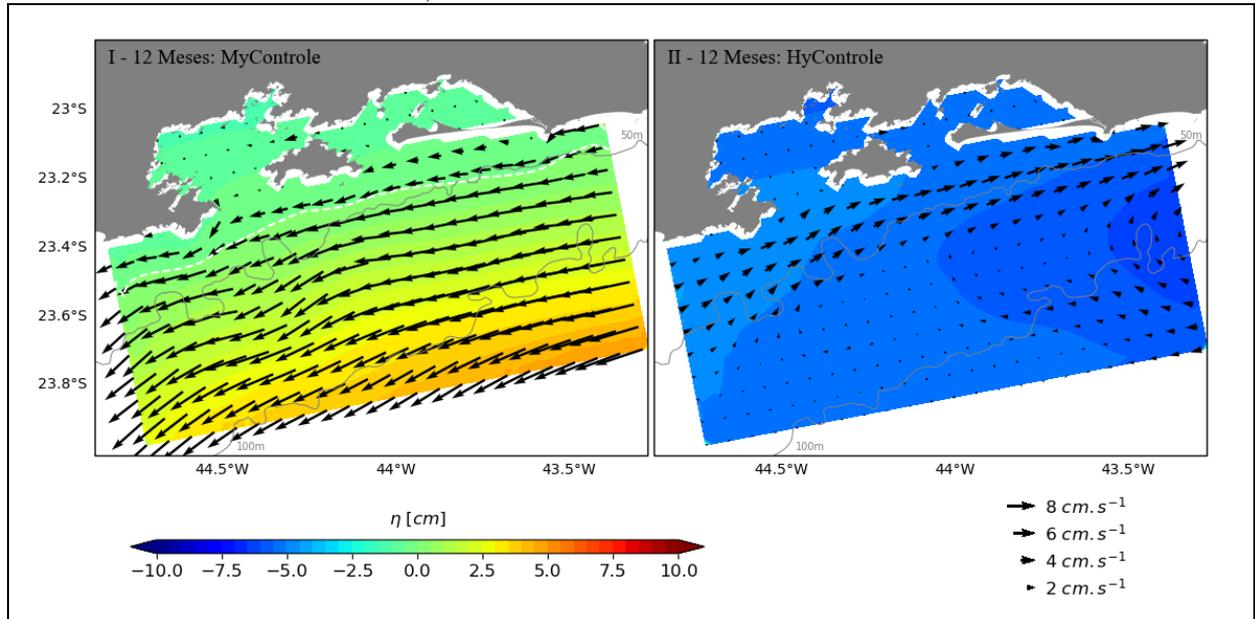
Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.1.2 Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade B]

Na Figura 14 é exibida a média anual da circulação integrada na vertical, para toda a grade B. No experimento MyControle (Figura 14 -I), as velocidades médias variaram entre 4 e 10  $\text{cm.s}^{-1}$ , com sentido para W, sobre a plataforma. No interior das baías, as velocidades foram inferiores a 1  $\text{cm.s}^{-1}$ , porém chegando a 4  $\text{cm.s}^{-1}$  no CIG. As elevações do nível do mar alcançaram valores de até 5 cm na plataforma e foram próximas a zero junto a costa e no interior das baías. No experimento HyControle (Figura 14 II), as velocidades médias foram mais intensas entre a isóbata de 50 m e a costa, com valores entre 4 e 7  $\text{cm.s}^{-1}$ , com sentido para E. No interior das baías, as velocidades foram inferiores a 1  $\text{cm.s}^{-1}$ , porém chegando a 3  $\text{cm.s}^{-1}$  no CIG. As elevações do nível do mar foram negativas, em torno de -5 cm, e oscilaram espacialmente sem um padrão definido.

A corrente média no CIG apresentou o mesmo sentido da corrente sobre a plataforma, junto à costa, tanto no experimento MyControle, quando o sentido foi para W, quanto no experimento HyControle, que apresentou sentido para E. Este fato evidenciou que a corrente média no CIG está diretamente relacionada a processos hidrodinâmicos sobre a plataforma adjacente à BIG. O alcance *offshore* dessa influência foi investigado e os resultados obtidos são apresentados na próxima seção.

Figura 14 – Campo médio anual das elevações do nível do mar ( $\eta$ ) e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle para um ciclo sazonal completo (entre 01/09/1998 e 01/09/1999).



Legenda: I (II) – Resultados da simulação MyControle (HyControle). As linhas cinzas representam as isóbatas de 50 e 100 metros.

Fonte: O autor, 2021.

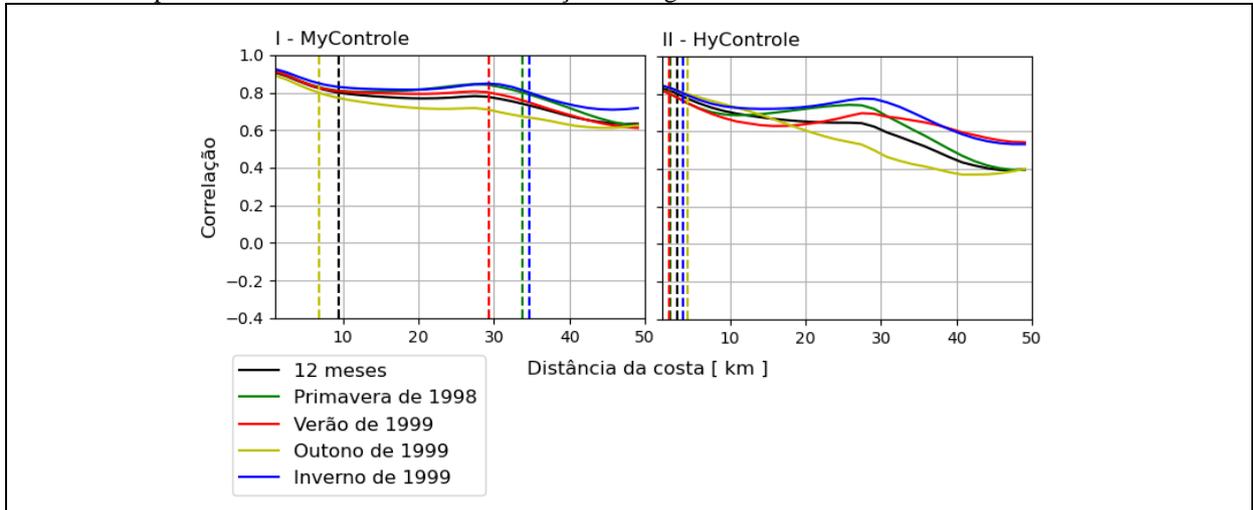
### 2.2.1.3 Correlação entre as Velocidades no CIG e na Plataforma

A Figura 15 mostra a correlação entre as correntes integradas na vertical simuladas a partir dos experimentos de controle no CIG e na plataforma adjacente à Ilha Grande, para um ciclo anual completo e para cada estação desse ciclo. No experimento MyControle (Figura 15-I), a correlação foi maior que 0,8 até a uma distância de 9 km da costa e no experimento HyControle (Figura 15-II), até a uma distância de 3 km. No experimento MyControle, a correlação acima de 0,8 foi encontrada até à distância aproximada de 35 km da costa durante a primavera e o inverno, o que caracterizou a maior distância *offshore* na qual o padrão de escoamento no CIG foi também observado sobre a plataforma adjacente à BIG. No outono, a correlação acima de 0,8 ficou restrita a uma distância de 7 km da costa.

No experimento HyControle, a correlação acima de 0,8 ficou restrita à uma distância máxima (mínima) de 4,3 km (1,9 km) durante o outono (verão), indicando que a corrente média no CIG está relacionada a uma corrente média paralela à costa, que se desloca junto ao continente, não excedendo a distância *offshore* de 5 km. Dando prosseguimento à investigação

dessa corrente costeira, o padrão da circulação média integrada na vertical é analisado a seguir para a PCSE e regiões oceânicas adjacentes.

Figura 15 – Correlações entre as velocidades da componente  $u$  integradas na vertical, no CIG e na plataforma, a partir da costa da Ilha Grande em direção ao largo.



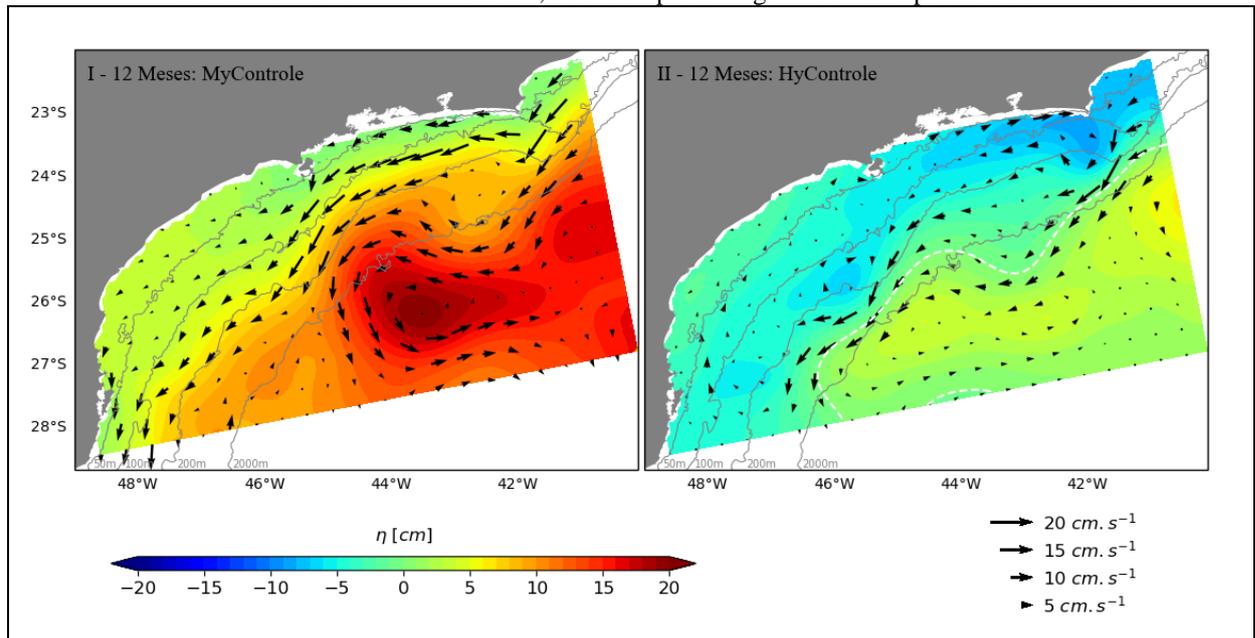
Legenda: As velocidades foram obtidas a partir da grade B dos experimentos de controle. As linhas verticais tracejadas indicam a posição no eixo  $x$  onde cada curva de correlação, relacionada a sua respectiva cor, intersecta o valor de 0,8.

Fonte: O autor, 2021.

#### 2.2.1.4 Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade A]

A média anual da circulação integrada na vertical, para toda a região da PCSE, apresentou um padrão geral similar entre os experimentos MyControle (Figura 16-I) e HyControle (Figura 16-II). A CB fluiu para SW e apresentou um meandramento típico da região, associado a feições vorticais, que ficaram mais evidentes no experimento MyControle. As elevações do nível do mar foram menores na costa em relação ao largo. No experimento MyControle, essas elevações foram de 15 a 20 cm ao largo e 1 a 2 cm próximo à costa. Já no experimento HyControle, as elevações foram em torno de 5 cm ao largo e chegaram a -10 cm junto à costa.

Figura 16 – Campos médios anual (entre 01/09/1998 e 31/08/1999) das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.



Legenda: As linhas cinzas representam as isóbatas de 50, 100, 200 e 2000 metros. A linha branca tracejada demarca a elevação do nível do mar ( $\eta$ ) igual a zero.

Fonte: O autor, 2021.

No experimento MyControle, a CB apresentou velocidades de 10 a 20  $\text{cm.s}^{-1}$  e boa parte do seu fluxo médio ocorrendo sobre a plataforma, entre as isóbatas de 200 m e 50 m, em frente à região da BIG, e, entre a isóbata de 100 m e o largo, a partir da ISS. Com isso, na região a partir da ISS, entre a isóbata de 100 m e a costa, a corrente também seguiu o sentido para SW, porém com intensidades da ordem de 1 a 4  $\text{cm.s}^{-1}$ . O experimento exibiu o meandramento ciclônico da CB ao largo de Cabo Frio (Campos, 1995), com centro localizado entre as isóbatas de 200 e 2000 m. Observa-se também a presença de um anticiclone bem definido, com centro à offshore da isóbata 2000 m, formando um padrão de dipolo vortical.

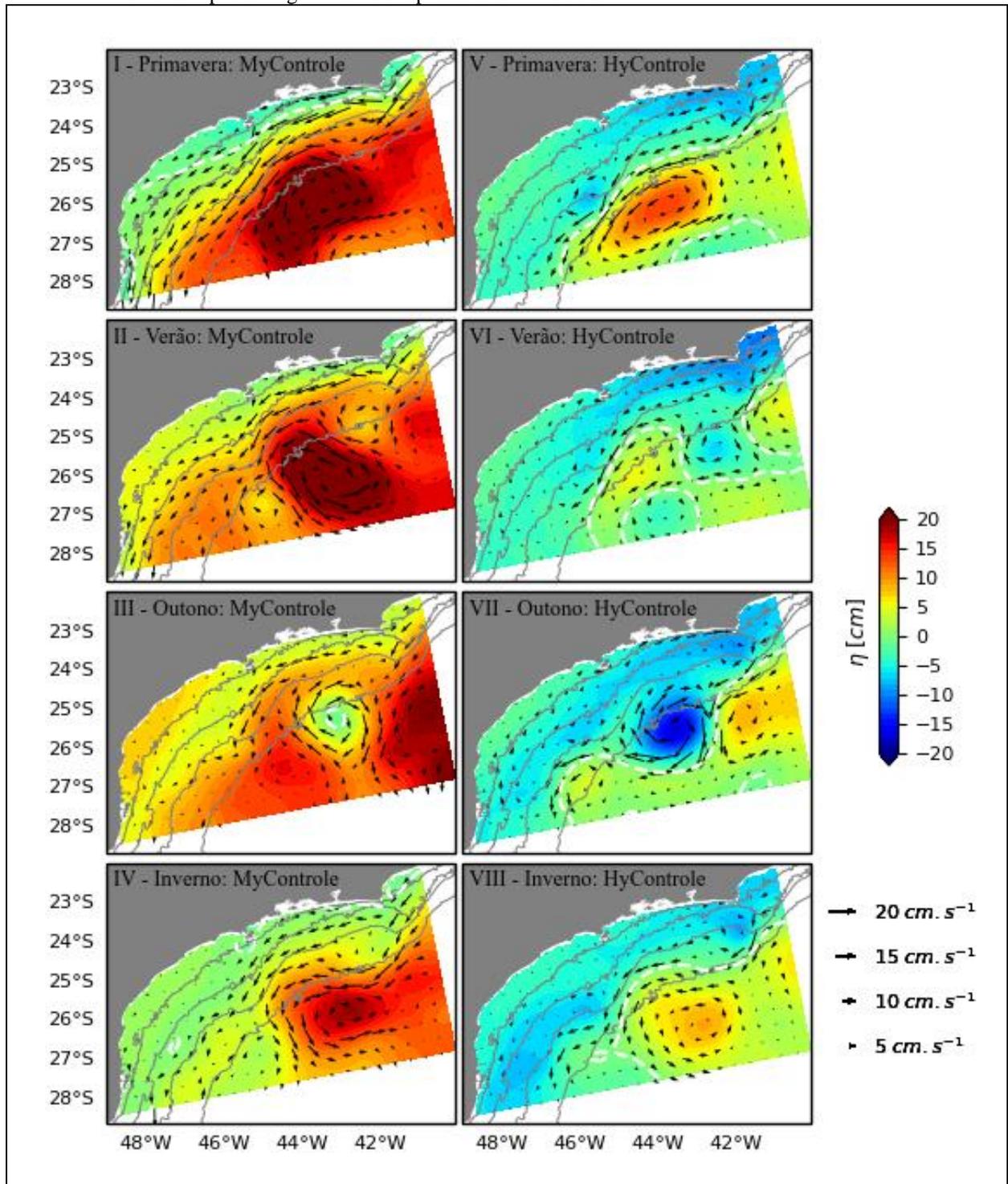
No experimento HyControle, o fluxo médio da CB foi localizado sobre as isóbatas de 200 m e 2000 m e suas velocidades foram de 5 a 15  $\text{cm.s}^{-1}$ . Entre a isóbata de 200 m e o continente foi observada uma grande célula de recirculação ciclônica sobre toda a PCSE, desde a latitude de 28°S, nas proximidades do Cabo de Santa Marta, até a longitude de 41,5°W, próximo a Cabo Frio. No ramo interno dessa circulação, junto à costa da BIG, a corrente para E/NE apresentou velocidades de até 6  $\text{cm.s}^{-1}$ . Assim como no experimento MyControle, a CB também exibiu o meandramento ciclônico ao largo de Cabo Frio (Campos, 1995), porém com centro mais deslocado para offshore. O anticiclone observado no experimento anterior não foi observado no experimento HyControle.

O padrão da circulação média se alterou ao longo das 4 estações do ano analisadas. Durante a primavera de 1998, a CB apresentou velocidades acima dos  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  no experimento MyControle (Figura 17-I), o que caracterizou as velocidades mais intensas dentre as 4 estações. Na porção interna de toda a PCSE, as velocidades também aumentaram chegando a  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  próximo à costa da Ilha Grande. No verão de 1999, o escoamento para SW, entre a isóbata de 50 m e o continente, perdeu intensidade e não ultrapassou os  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  (Figura 17-II).

Durante o outono de 1999, o vórtice ciclônico da CB ao largo Cabo Frio, entre as longitudes de  $42^\circ\text{W}$  e  $43^\circ\text{W}$ , se intensificou e se deslocou para W, sobre a posição inicial do vórtice anticiclônico observado na primavera, que perdeu intensidade e se afastou da costa (Figura 17-III). Sobre a plataforma continental, na região à W/SW da ISS, as correntes integradas na vertical, que apresentaram sentido para SW na média anual e se inverteram para NE até a uma distância de 120 km, à SW da ISS, com velocidades de 1 a  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ . No inverno de 1999, a circulação na PCSE retomou o padrão da média anual (Figura 17-IV), com a corrente entre a isóbata de 50 m e o continente voltando a apresentar sentido médio para SW, e velocidades entre 4 e  $8 \text{ cm.s}^{-1}$  nas adjacências da Ilha Grande.

No experimento HyControle, observou-se o vórtice oceânico anticiclônico no centro da grade A durante a primavera (Figura 17-V), o qual perdeu intensidade durante o verão (Figura 17-VI) e deu lugar a um vórtice ciclônico no outono (Figura 17-VII). Durante o inverno, o vórtice anticiclônico reapareceu na mesma região do vórtice observado na primavera, porém com menor intensidade (Figura 17-VIII). A célula de circulação ciclônica sobre a PCSE foi mais intensa durante o outono, quando apresentou velocidades de até  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  junto à costa da BIG. Durante a primavera e o inverno, essas velocidades não ultrapassaram os  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

Figura 17 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.



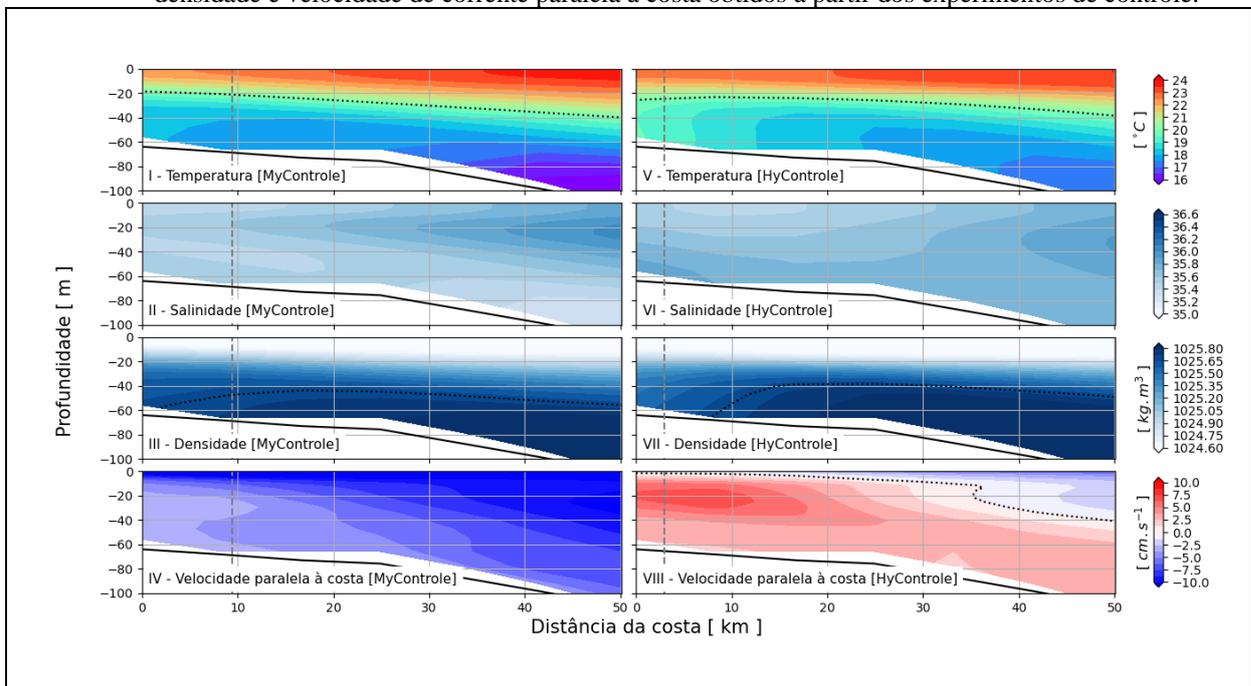
Legenda: As linhas cinzas representam as isóbatas de 50, 100, 200 e 2000 metros. A linha branca tracejada demarca a elevação do nível do mar ( $\eta$ ) igual a zero.

Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.1.5 Estrutura Vertical da Coluna d'Água sobre a PCSE

A Figura 18 mostra a porção costeira da seção IG, que permitiu a análise da estrutura vertical da coluna d'água na plataforma adjacente a BIG, de modo a fornecer elementos espaciais adicionais sobre a circulação média. A temperatura anual média (Figura 18-I e V) indicou a presença de águas quentes ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) nos primeiros 20 m de coluna d'água. Em profundidade, a Frente Térmica Profunda, que delimita a Plataforma Continental Interna (PCI) definida por Castro (1996), ficou mais evidente no experimento HyControle, até a uma distância de 25 km da costa. A salinidade (Figura 18-II e VI) foi menor que 36,2 na PCI e a densidade indicou que a ACAS atingiu uma distância mínima da costa da BIG de 3 km no experimento MyControle (Figura 18-III) e 8 km no experimento HyControle (Figura 18-VII). Seguindo o padrão da temperatura, as isopicnais foram mais inclinadas no experimento HyControle do que em MyControle.

Figura 18 – Porção costeira da seção vertical IG com a média anual dos resultados de temperatura, salinidade, densidade e velocidade de corrente paralela à costa obtidos a partir dos experimentos de controle.



Legenda: A isolinha pontilhada preta representa I e V (II e VI) – o limite superior dos valores de temperatura [ $20^{\circ}\text{C}$ ] (salinidade [ $36,2$ ]) da ACAS (Miranda, 1985); III e VII – Isopicnal referente ao limite da ACAS; IV e VIII – a velocidade de corrente nula (valores positivos [negativos] indicam sentido para E [W]). A linha tracejada cinza demarca o limite em que a correlação entre a corrente integrada na vertical sobre a plataforma interna e o CIG foi superior a 0,8 (Figura 15). Os resultados foram extraídos da grade A.

Nota: A densidade foi calculada com as rotinas EOS80 desenvolvidas em Python (Fofonoff & Millard, 1983).  
Fonte: O autor, 2021.

As velocidades superficiais paralelas à costa foram negativas em ambos os experimentos de controle, ou seja, com sentido para W. Contudo, no experimento MyControle, os valores absolutos dessas velocidades foram superiores a  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  em superfície, e se reduziram em direção ao fundo (Figura 18-IV), mantendo o sentido para W. Abaixo de 17 metros, as velocidades foram inferiores a  $3,7 \text{ cm.s}^{-1}$ , e entre os 23 m e 37 m de profundidade, essa zona de baixas velocidades alcançou uma distância de 9 km da costa. Essa distância equivale ao alcance máximo ao largo, na qual as correntes costeiras foram altamente correlacionadas ( $r > 0,8$ ) com as correntes no CIG (Figura 15-I).

Já no experimento HyControle, as correntes costeiras fluíram para W apenas acima dos 2 m de profundidade (Figura 18-VIII). Abaixo desse nível, o sentido das correntes foi para E até o fundo e observou-se um núcleo entre 14 m e 30 m de profundidade, onde as velocidades foram superiores a  $6,2 \text{ cm.s}^{-1}$ . Esse núcleo alcançou uma distância de 12 km da costa, ultrapassando os 3 km, na qual as correntes costeiras foram altamente correlacionadas ( $r > 0,8$ ) com as correntes no CIG (Figura 15-II).

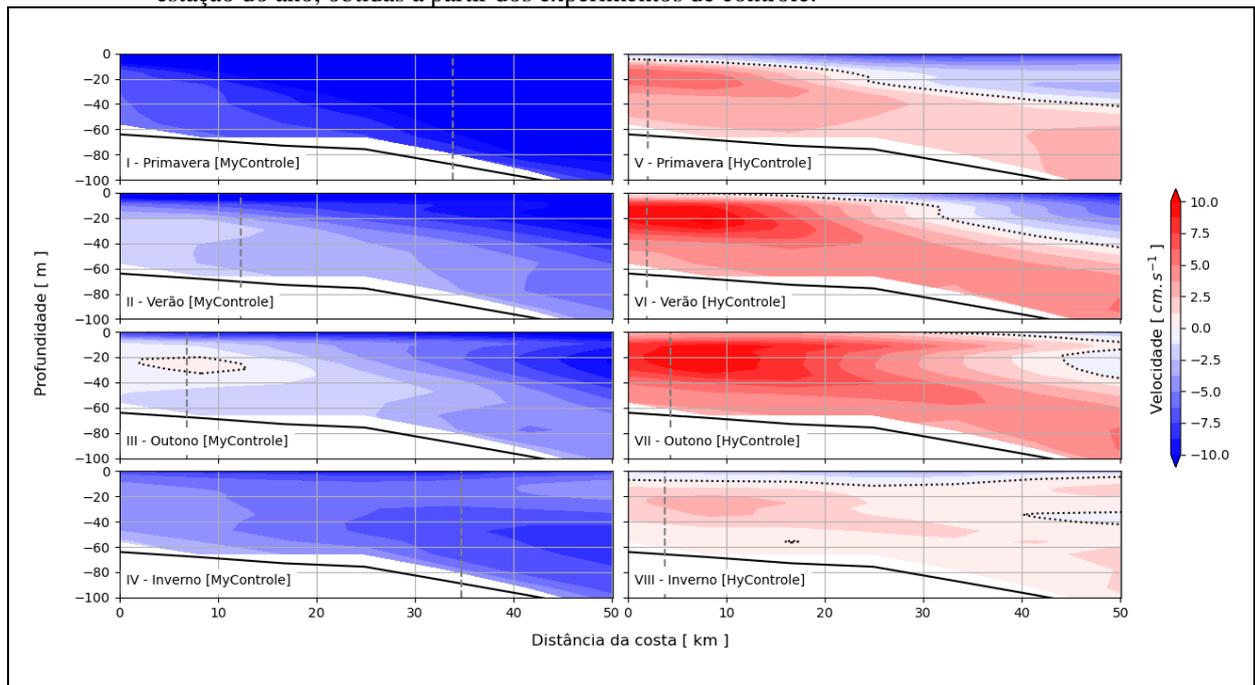
Ao se analisar a componente média paralela à costa ( $u$ ) ao longo das 4 estações simuladas, observou-se que, no experimento MyControle, as velocidades junto à costa, que apresentaram sentido para W, foram mais intensas durante a primavera, tendo sido superiores a  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  em toda a coluna d'água (Figura 19-I). No verão, essas intensidades foram observadas acima dos 10 m de profundidade (Figura 19-II). No outono, as velocidades para W ficaram restritas a profundidades inferiores a 7 m. Entre 20 m e 32 m de profundidade, ocorreu a inversão do sentido da corrente para E (sinal positivo), com intensidades inferiores a  $1 \text{ cm.s}^{-1}$ . O núcleo dessa corrente esteve centrado à uma distância de 7 km da costa (Figura 19-III). Durante o inverno, as velocidades foram superiores a  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  acima dos 10 m de profundidade (Figura 19-IV).

De maneira geral, a seção IG, referente ao experimento MyControle, apresentou uma região compreendida entre a profundidade de 7 m e o fundo e entre a costa e uma distância de 15 km ao largo, onde as velocidades para W se enfraqueceram e chegaram a inverter o sentido para E. Esse fato indicou a possível existência de uma corrente costeira em subsuperfície, com sentido para E, que no experimento MyControle, foi capaz de alcançar a região da BIG apenas durante o outono.

No experimento HyControle, a velocidade média junto à costa evidenciou um núcleo em subsuperfície, com sentido para E, ao longo de todas as estações analisadas. Durante a primavera, o escoamento médio se deu para W (E) acima (abaixo) dos 5 m de profundidade. O núcleo da corrente para E foi localizado entre 13 m e 26 m e apresentou velocidades em torno

de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  (Figura 19-V). No verão (Figura 19-VI) e no outono (Figura 19-VII), as velocidades médias junto à costa foram para E em toda a coluna d'água e a intensidade em seu núcleo foi superior à  $9 \text{ cm.s}^{-1}$ . Durante o inverno, as velocidades acima (abaixo) dos 7 m apresentaram sentido para W (E). O núcleo da corrente costeira para E foi o menos intenso dentre todas as estações, com velocidades médias variando entre 2 e  $3 \text{ cm.s}^{-1}$  (Figura 19-VIII).

Figura 19 – Porção costeira da seção vertical IG com a média da velocidade de corrente paralela à costa para cada estação do ano, obtidas a partir dos experimentos de controle.



Legenda: A isolinha pontilhada preta representa a velocidade de corrente nula (valores positivos [negativos] indicam sentido para E [W]). A linha tracejada cinza demarca o limite em que a correlação entre a corrente integrada na vertical sobre a plataforma interna e o CIG foi superior a 0,8 (Figura 15). Os resultados foram extraídos da grade A.

Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.1.6 Estrutura Vertical das Correntes no CIG

A estrutura vertical das correntes simuladas no CIG a partir dos experimentos de controle foi decomposta em termos de seus principais modos empíricos, permitindo a comparação com a estrutura vertical das correntes sobre a plataforma junto à costa e sua potencial influência sobre o canal. No experimento MyControle (HyControle), o primeiro modo concentrou 98% (96,5 %) da variância das correntes paralelas ao canal ao longo dos 12 meses simulados. Este modo apresentou um padrão em camada única em ambos os experimentos de

controle, com todos os valores negativos (com sentido para W) no experimento MyControle (Figura 20-I), e positivos, com sentido para E, e no HyControle (Figura 20-II). De maneira geral, as velocidades foram máximas em superfície ( $-4 \text{ cm.s}^{-1}$  em MyControle e em  $4 \text{ cm.s}^{-1}$  HyControle) e decaíram próximas ao fundo ( $-2 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $2 \text{ cm.s}^{-1}$  respectivamente).

Em termos de distribuição transversal das correntes, os maiores valores absolutos foram encontrados na parte central do canal, e se reduziram em direção às margens, onde as profundidades são menores e os efeitos de atrito com o fundo, assim como do atrito lateral, tendem a se tornar mais importantes.

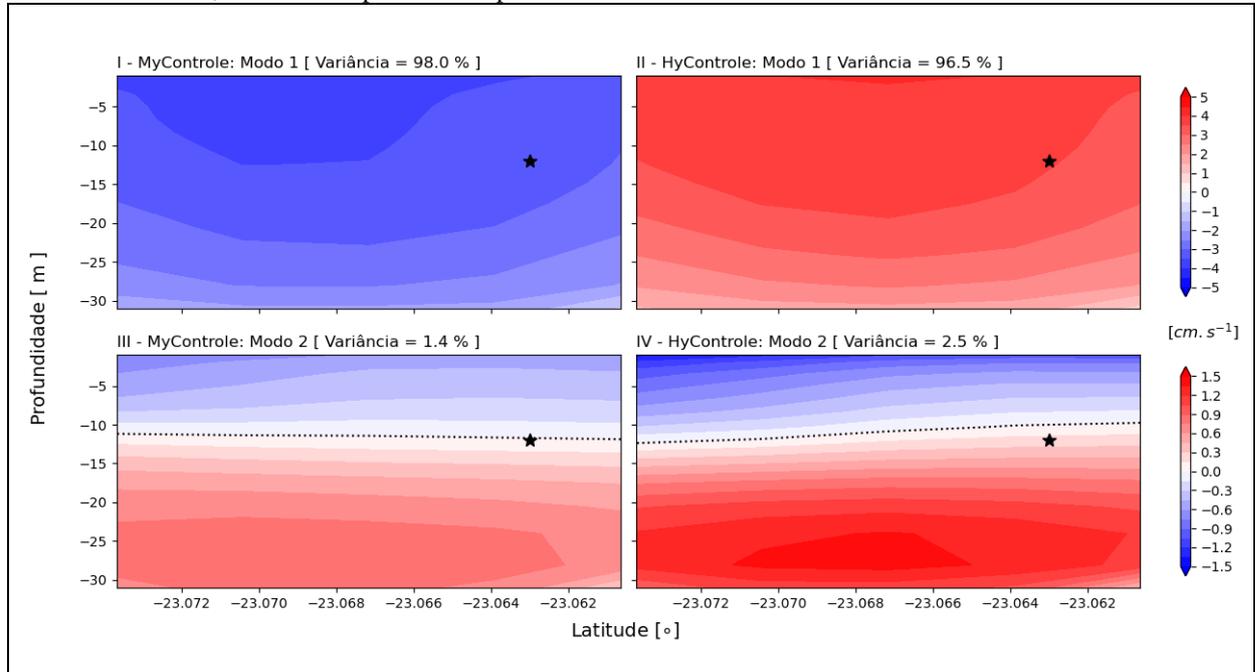
O padrão em camada única foi verificado para o primeiro modo empírico de todas as estações do ano simuladas em ambos os experimentos (Figura 21). As correntes foram mais intensas durante a primavera no experimento MyControle (Figura 21-II), quando apresentaram velocidades de  $-8 \text{ cm.s}^{-1}$  em superfície e  $-4 \text{ cm.s}^{-1}$  próximo ao fundo. No experimento HyControle, as maiores velocidades foram observadas no verão (Figura 21-III), quando ultrapassaram os  $8 \text{ cm.s}^{-1}$  em superfície e os  $3 \text{ cm.s}^{-1}$  nas proximidades do fundo. As correntes menos intensas associadas ao primeiro modo empírico, referentes ao experimento MyControle, ocorreram durante o outono, quando foram praticamente nulas e inferiores às velocidades do segundo modo (Figura 21-IV). No experimento HyControle, as correntes menos intensas ocorreram no inverno (Figura 21-V), sendo inferiores a  $1 \text{ cm.s}^{-1}$ .

O segundo modo empírico concentrou apenas 1,4% da variância durante os 12 meses simulados no experimento MyControle (Figura 20-III) e 2,5% no experimento HyControle (Figura 20-IV). O perfil médio característico desse modo apresentou um padrão em duas camadas, com velocidades semelhantes em ambos os experimentos de controle, ao longo de todas as estações. A velocidade média em superfície foi de  $-0,8 \text{ cm.s}^{-1}$ , ou seja, com sentido para W, e de  $1,1 \text{ cm.s}^{-1}$  (para E) próximo ao fundo (Figura 21-I) em ambos os experimentos controle. A inversão do sentido das correntes ocorreu em 12 m de profundidade.

Ao longo das quatro estações simuladas, o padrão do perfil do segundo modo não se alterou e apresentou variações apenas nas magnitudes das velocidades. Essas foram mais intensas em superfície durante a primavera (Figura 21-II), chegando a  $-1,7 \text{ cm.s}^{-1}$  no experimento MyControle e  $-2,7 \text{ cm.s}^{-1}$  em HyControle. Próximo ao fundo, as maiores velocidades ocorreram no verão em MyControle ( $1,4 \text{ cm.s}^{-1}$ ) e na primavera em HyControle ( $2,4 \text{ cm.s}^{-1}$ ). As menores velocidades ocorreram no inverno em ambos os experimentos de controle (Figura 21-V), sendo menores que  $0,4 \text{ cm.s}^{-1}$  abaixo dos 6 m de profundidade. Cabe ressaltar que no experimento MyControle, as velocidades absolutas abaixo dos 15 metros no

outono ( $0,8 \text{ cm.s}^{-1}$  para E), foram superiores às do primeiro modo ( $0,5 \text{ cm.s}^{-1}$  para W), indicando a predominância do segundo modo nesta estação.

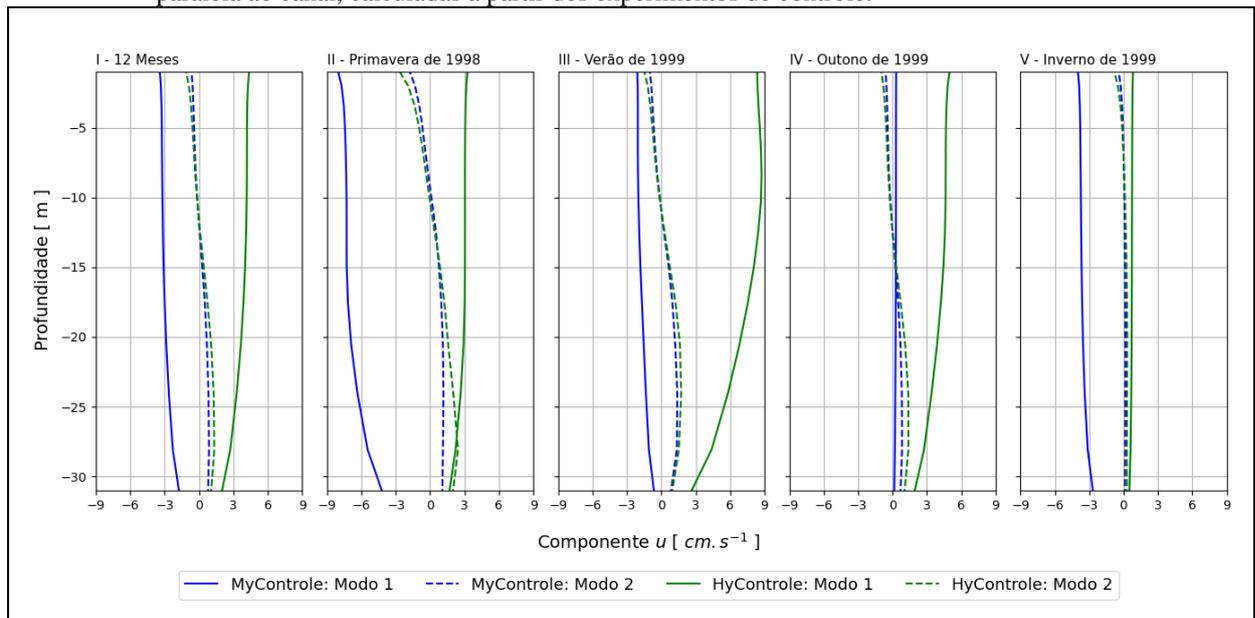
Figura 20 – Seções transversais ao CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de controle.



Legenda: As seções transversais foram calculadas para os 12 meses analisados. A estrela preta demarca o ponto onde os dados foram coletados no CIG. As velocidades positivas (negativas) indicam sentido da corrente para E (W) e a isolinha pontilhada demarca a profundidade onde a velocidade é nula.

Fonte: O autor, 2021.

Figura 21 – Perfis verticais no centro do CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de controle.



Legenda: Os perfis verticais foram calculados para os 12 meses analisados e para cada estação do ano no mesmo período. As velocidades positivas (negativas) indicam sentido da corrente para E (W).

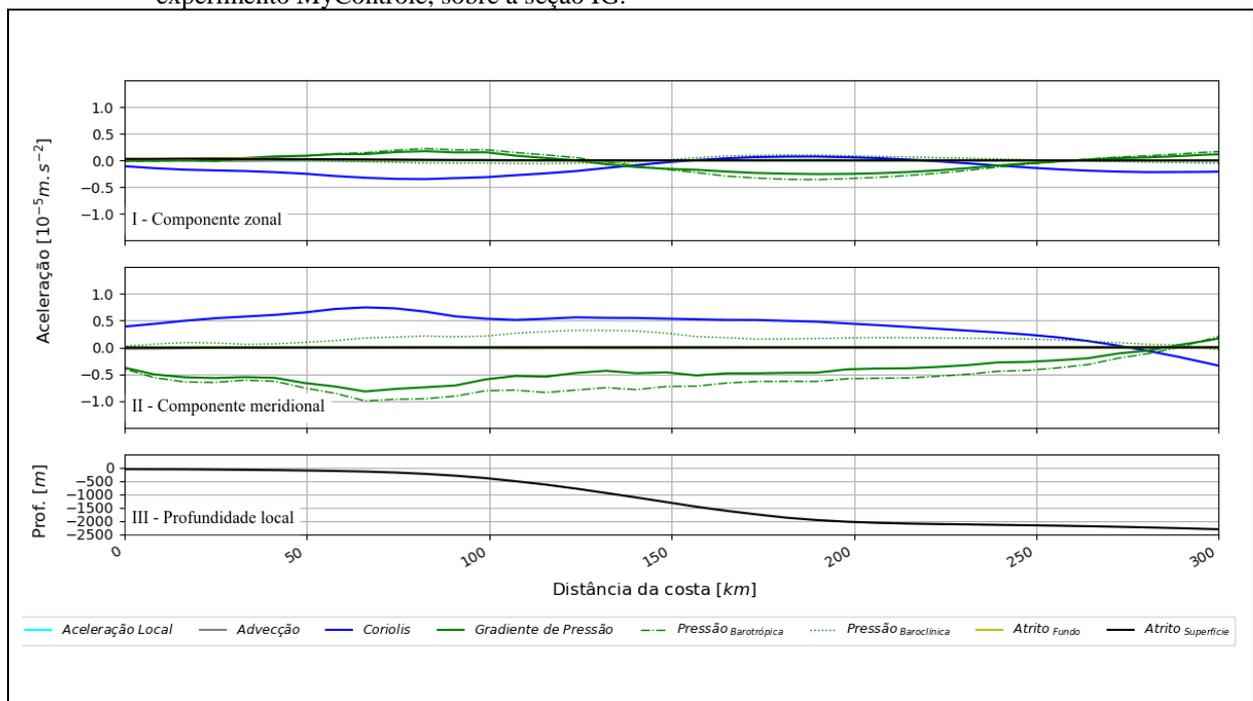
Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.1.7 Balanço de Momento

As análises de balanço de momento sobre a seção IG auxiliaram na determinação dos principais processos físicos relacionados às correntes médias sobre a plataforma, que por sua vez, foram relacionadas às correntes no CIG, conforme constatado nas correlações apresentadas na Figura 15. No experimento MyControle, as amplitudes dos termos na direção meridional (Figura 22-I) foram de 50% a 80% maiores que na direção zonal (Figura 22-II). Como a direção meridional das grades do MOHID não estava completamente alinhada com a direção perpendicular à linha de costa, observou-se um resíduo do balanço de momento na direção zonal.

O balanço Geostrofico foi dominante em primeira ordem, com uma corrente média resultante para W/SW até a uma distância de 230 km da costa, em profundidades superiores a 2000 m (Figura 22-III). A componente barotrópica do gradiente de pressão predominou sobre o gradiente de pressão total, mas a partir dos 50 km da costa, a componente baroclínica passou a exercer maior influência sobre o gradiente total, atenuando os efeitos da componente barotrópica em 20-35%.

Figura 22 – Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento MyControle, sobre a seção IG.

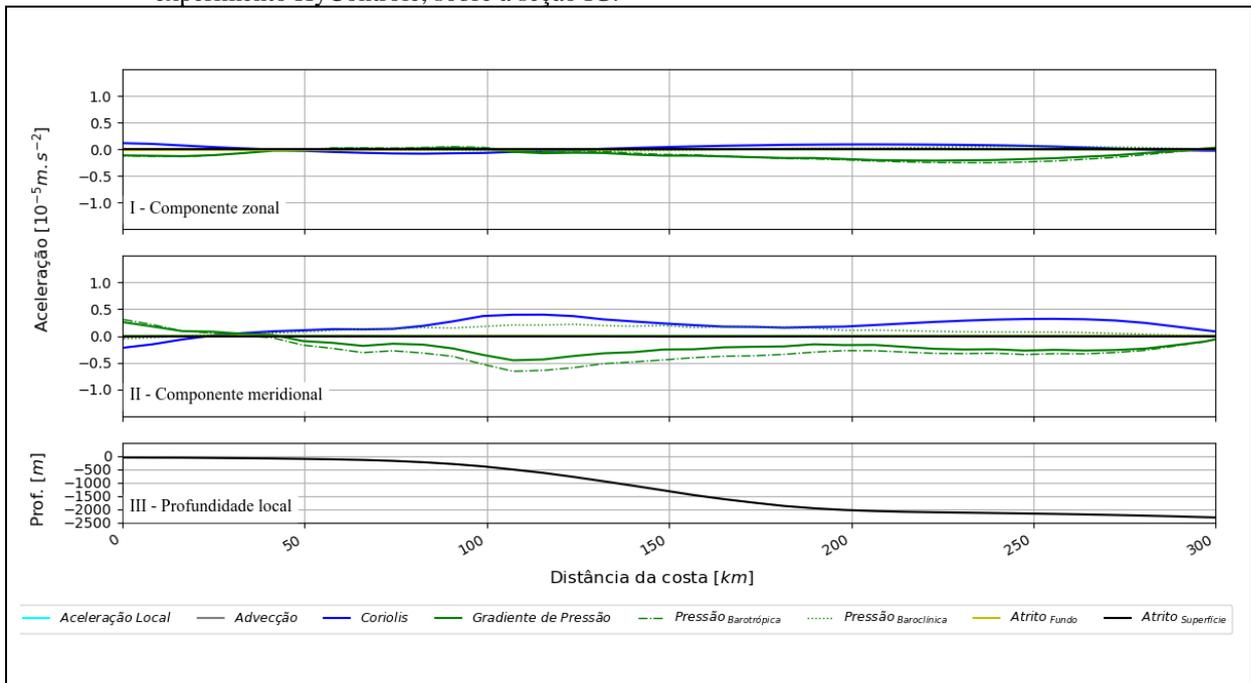


Legenda: Os valores positivos na componente zonal (meridional) indicam aceleração com sentido para E (N) e valores negativos para W (S).

Fonte: O autor, 2021.

No experimento HyControle, as amplitudes dos termos na direção meridional (Figura 23-I) foram até uma ordem de grandeza superiores que na direção zonal (Figura 23-II). O balanço Geostrofico foi novamente dominante, com componente barotrópica do gradiente de pressão predominando sobre o gradiente de pressão total e a componente baroclínica atenuando os efeitos da componente barotrópica em até 30%, a partir dos 50 km da costa. Contudo, a corrente média resultante deste balanço apresentou sentido para E/NE, até a uma distância de 30 km da costa, onde a profundidade local é de 80 m (Figura 23-III). A partir deste ponto em direção ao largo, os termos predominantes do balanço de momento (Aceleração de Coriolis e Aceleração do Gradiente de Pressão) inverteram o sentido, o que resultou numa corrente média para W/SW.

Figura 23 – Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento HyControle, sobre a seção IG.



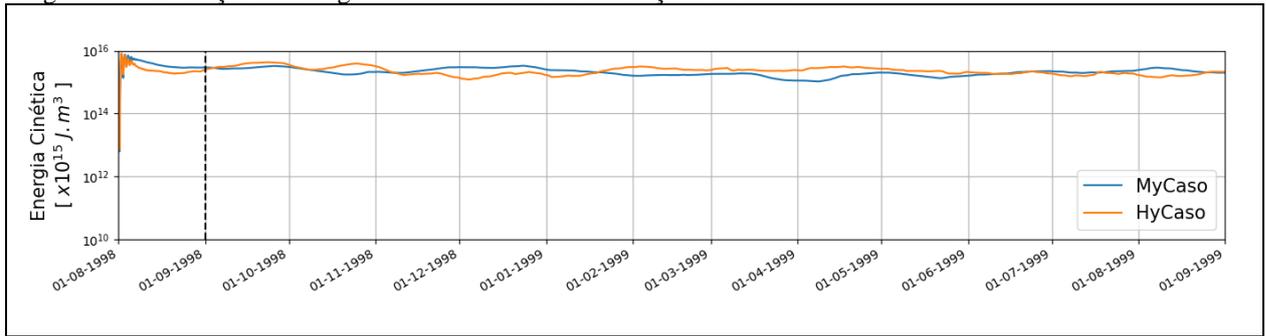
Legenda: Os valores positivos na componente zonal (meridional) indicam aceleração com sentido para E (N) e valores negativos para W (S).

Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2 Análise dos Experimentos de Caso [MyCaso e HyCaso]

A energia cinética de ambos os experimentos de caso foi estabilizada antes do dia 01/09/1998 (Figura 24), referente ao início do período na qual os resultados foram analisados.

Figura 24 – Evolução da energia cinética durante as simulações de caso.



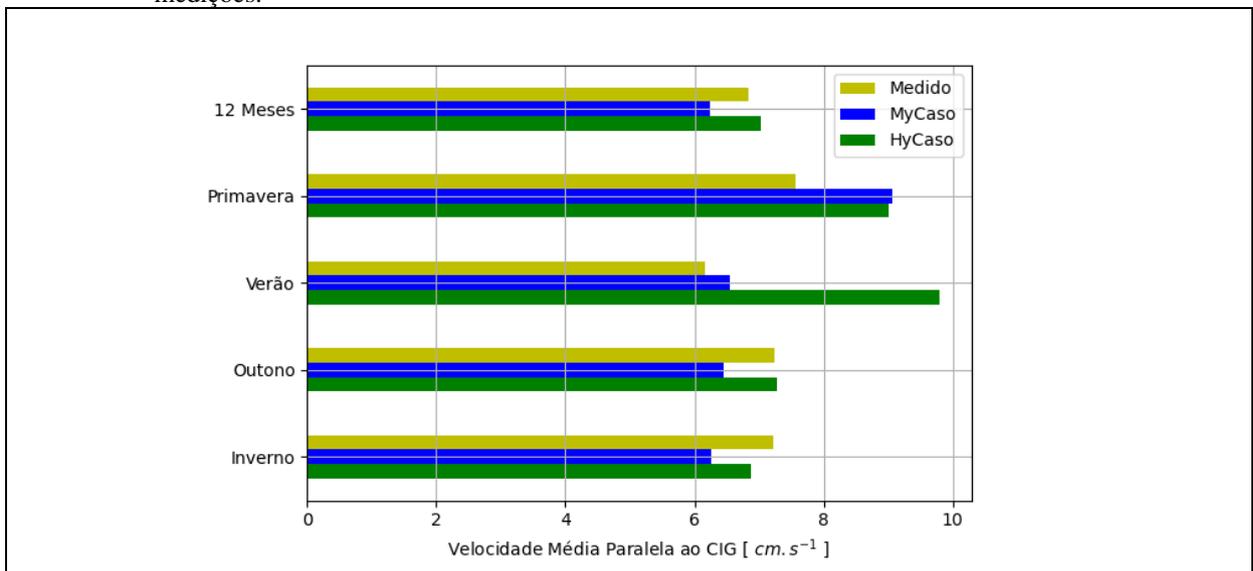
Legenda: A linha vertical tracejada marca o início do período em que os resultados foram analisados.

Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2.1 Velocidade Média no CIG

Os experimentos de caso apresentaram valores médios da corrente paralela ao CIG semelhantes entre si e ao dado medido (Figura 25). O sentido para E foi observado não somente para o período dos 12 meses simulados, mas para todas as estações compreendidas nesse período. A maior discrepância foi observada no período de verão, referente ao experimento HyCaso, onde a velocidade média simulada foi 60% superior à velocidade medida. No geral, mesmo tendo sido configurados com uma física simplificada, ambos os experimentos de caso representaram a corrente média no CIG de maneira adequada, fato que não ocorreu com o experimento MyControle.

Figura 25 – Velocidades médias registradas no CIG e extraídas das simulações de caso no mesmo local das medições.

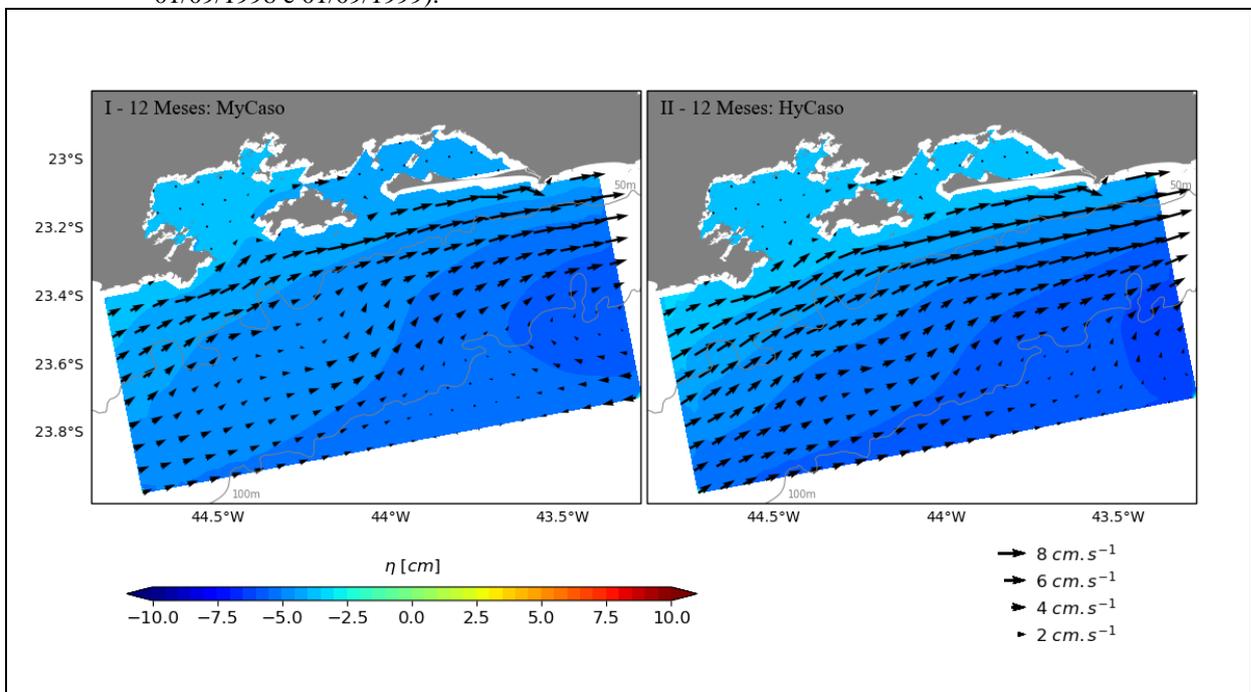


Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2.2 Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade B]

A média anual da circulação integrada na vertical, para toda a grade B apresentou, de maneira geral, o mesmo padrão espacial nos experimentos MyCaso (Figura 26-I) e HyCaso (Figura 26-II). As velocidades médias em ambos os experimentos de controle foram mais intensas entre a isóbata de 50 m e a costa, com valores entre 4 e 8  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , e sentido para E. No interior das baías, as velocidades foram inferiores a 1  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , chegando a 5  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  no CIG. As elevações do nível do mar foram negativas, em torno de -5 cm. A corrente média no CIG apresentou o mesmo sentido da corrente sobre a plataforma junto à costa, que foi para E. Este fato evidenciou que a corrente média no CIG, mesmo que proveniente de simulações forçadas apenas com campos de temperatura e salinidade, está diretamente relacionada a processos hidrodinâmicos que ocorrem fora das baías, sobre a plataforma adjacente à BIG. Cabe ressaltar que as características observadas na grade B dos experimentos de caso foram semelhantes às do experimento HyControle (Figura 14-II).

Figura 26 – Campo médio anual das elevações do nível do mar ( $\eta$ ) e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade B dos experimentos de caso para um ciclo sazonal completo (entre 01/09/1998 e 01/09/1999).



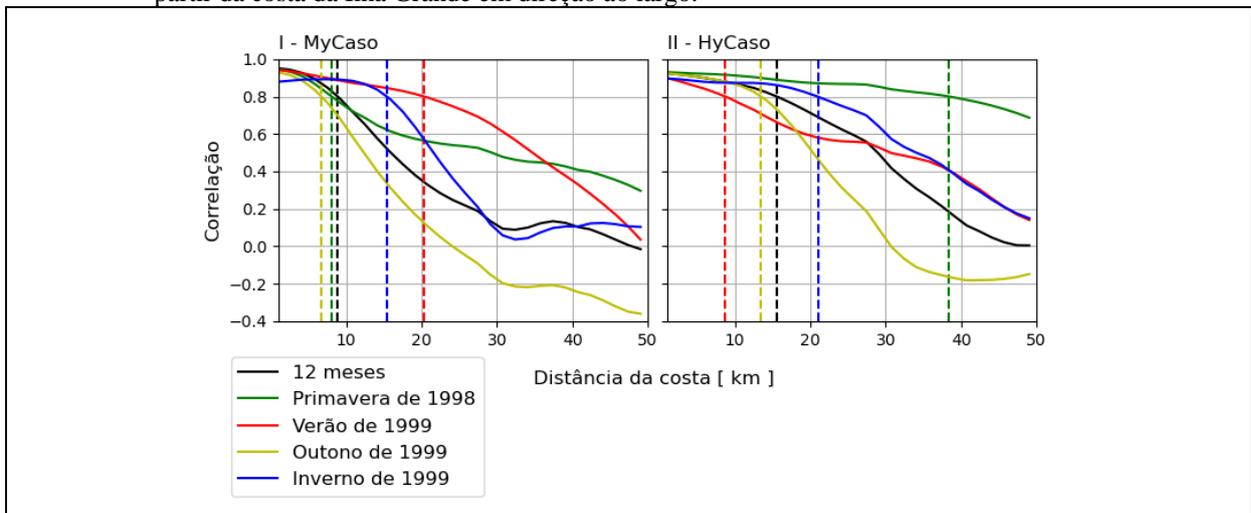
Legenda: I (II) – Resultados da simulação MyCaso (HyCaso). As linhas cinzas representam as isóbatas de 50 e 100 metros.

Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2.3 Correlação entre as Velocidades no CIG e na Plataforma

A correlação entre as correntes no CIG e na plataforma adjacente à Ilha Grande, para um ciclo anual completo, foi maior que 0,8 até a uma distância de 9 km da costa no experimento MyCaso (Figura 27-I) e até a uma distância de 15,5 km no experimento HyCaso (Figura 27-II). Sazonalmente, para o experimento MyCaso, a correlação acima de 0,8 foi encontrada até à distância aproximada de 20 km da costa durante o verão, o que caracterizou a maior distância *offshore* na qual o padrão de escoamento no CIG foi também observado sobre a plataforma adjacente à BIG. No outono, a correlação acima de 0,8 ficou restrita a uma distância de 6,7 km da costa, o que caracterizou o menor alcance *offshore* do padrão de circulação observado no CIG. No experimento HyCaso, a correlação acima de 0,8 ficou restrita à uma distância máxima de 38,4 km durante a primavera e mínima de 8,7 km durante o verão.

Figura 27 – Correlações entre as velocidades da componente  $u$  integradas na vertical, no CIG e na plataforma, a partir da costa da Ilha Grande em direção ao largo.



Legenda: As velocidades foram obtidas a partir da grade B dos experimentos de caso. As linhas verticais tracejadas indicam a posição no eixo  $x$  onde cada curva de correlação, relacionada a sua respectiva cor, intersecta o valor de 0,8.

Fonte: O autor, 2021.

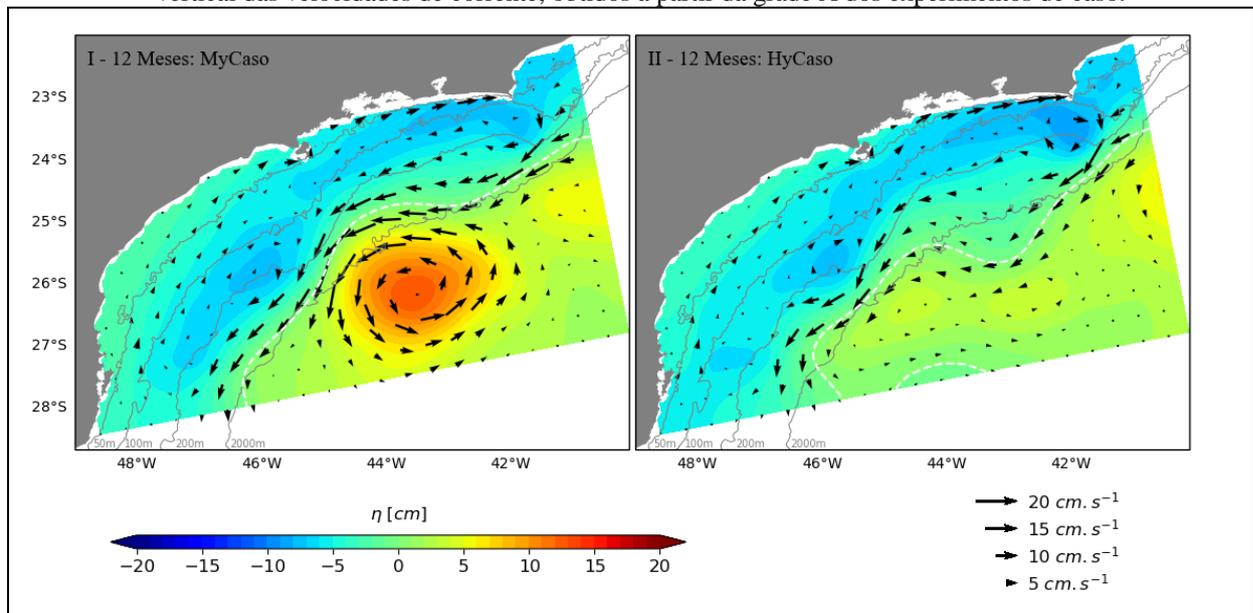
### 2.2.2.4 Campos de Velocidade Média Integrada na Vertical [Grade A]

A média anual da circulação integrada na vertical para a grade A apresentou, em ambos os experimentos de caso, a mesma célula de recirculação ciclônica sobre a PCSE, que havia

sido observada no experimento HyControle (Figura 16-II). Ou seja, a imposição apenas dos campos de temperatura e salinidade foi suficiente para possibilitar tal representação. A CB fluiu para SW com velocidades de até  $15 \text{ cm.s}^{-1}$ , entre as isóbaras de 200 m e 2000 m. O padrão das elevações da superfície do mar também foi similar nos dois experimentos de caso, assim como no experimento HyControle.

A diferença visual mais marcante entre os experimentos de caso foi a presença, no experimento MyCaso (Figura 28-I), de um vórtice oceânico anticiclônico bem definido, entre as longitudes de  $42^\circ\text{W}$  e  $45^\circ\text{W}$  e as latitudes de  $24,5^\circ\text{S}$  e  $27,5^\circ\text{S}$ . O núcleo desse vórtice apresentou uma elevação de 12 cm e seu diâmetro total foi equivalente a 300 km. O experimento HyCaso (Figura 28-II) não apresentou essa feição vortical na média anual.

Figura 28 – Campos médios anual (entre 01/09/1998 e 31/08/1999) das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de caso.



Legenda: As linhas cinzas representam as isóbaras de 50, 100, 200 e 2000 metros. A linha branca tracejada demarca a elevação do nível do mar ( $\eta$ ) igual a zero.

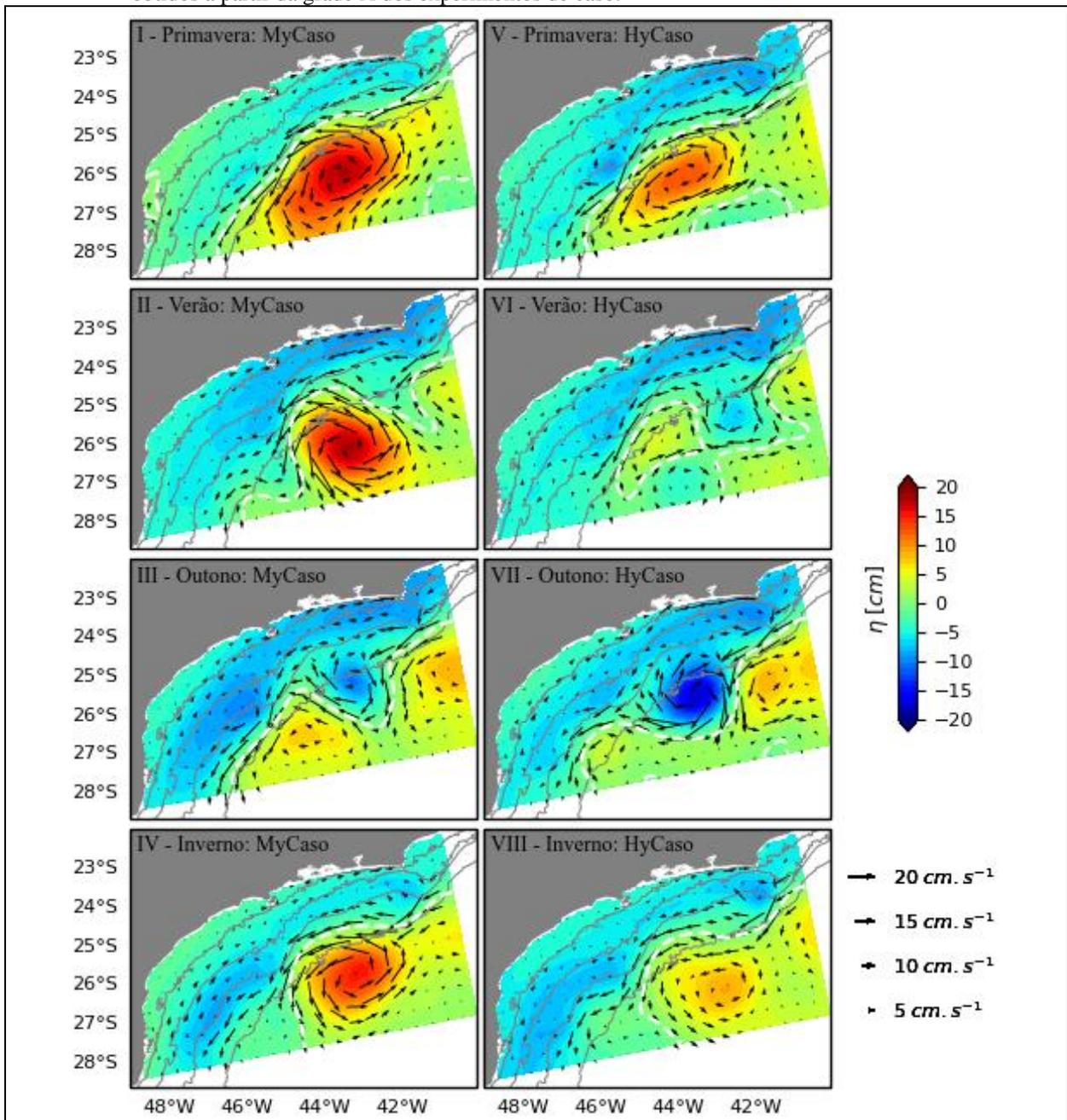
Fonte: O autor, 2021.

O padrão da circulação média referente à célula de recirculação ciclônica sobre a PCSE não se alterou ao longo das 4 estações do ano analisadas em ambos os experimentos de caso. As velocidades mais intensas ao longo da costa da BIG foram observadas na primavera, quando atingiram velocidades de até  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  (Figura 29-I e Figura 29-V).

A principal diferença observada entre os experimentos MyCaso e HyCaso referiu-se à intensidade do vórtice localizado em águas oceânicas. Quando este apresentou movimento ciclônico, sua intensidade foi maior no experimento HyCaso. Quando o movimento foi anticiclônico, sua intensidade foi maior no experimento MyCaso. Com isso, tanto na primavera,

quanto no inverno, o vórtice anticiclônico foi mais intenso no experimento MyCaso (Figura 29-I e Figura 29-IV), do que no experimento HyCaso (Figura 29-V e Figura 29-VIII). No verão, o vórtice anticiclônico, que aparece bem definido no experimento MyCaso (Figura 29-II), não ficou tão evidente no experimento HyCaso (Figura 29-VI). Já no outono, o vórtice ciclônico apareceu com maior intensidade no experimento HyCaso (Figura 29-VII), do que no experimento MyCaso (Figura 29-III).

Figura 29 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e da média vertical das velocidades de corrente, obtidos a partir da grade A dos experimentos de caso.



Legenda: As linhas cinzas representam as isóbatas de 50, 100, 200 e 2000 metros. A linha branca tracejada demarca a elevação do nível do mar ( $\eta$ ) igual a zero.

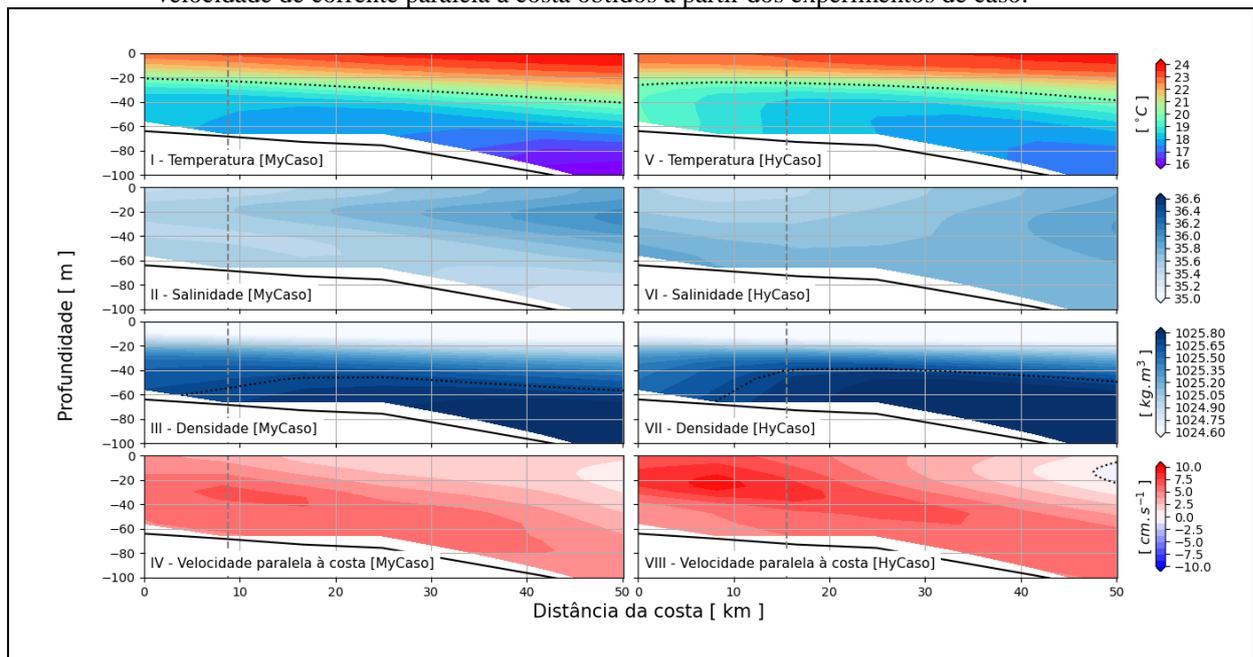
Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2.5 Estrutura Vertical da Coluna d'Água sobre a PCSE

As médias anuais das seções de temperatura (Figura 30-I e V), salinidade (Figura 30-II e VI) e densidade (Figura 30-III e VII), não apresentaram diferenças significativas para as seções dos experimentos de controle. Observou-se que a ACAS chegou a uma distância mais próxima da costa da Ilha Grande no experimento MyCaso em relação ao experimento HyCaso.

As velocidades paralelas à costa foram positivas em toda coluna d'água de ambos os experimentos de caso, ao contrário do que se observou nos experimentos de controle, que apresentou velocidades negativas em toda a coluna d'água (em superfície) no experimento MyControle (HyControle). O núcleo da corrente para E apresentou velocidades máximas de  $6,3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  no experimento MyCaso (Figura 30-IV) e  $9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  em HyCaso (Figura 30-VIII).

Figura 30 – Porção costeira da seção vertical IG com a média anual dos resultados de temperatura, salinidade e velocidade de corrente paralela à costa obtidos a partir dos experimentos de caso.



Legenda: A isolinha pontilhada preta representa I e V (II e VI) – o limite superior dos valores de temperatura [ $20^{\circ}\text{C}$ ] (salinidade [ $36,2$ ]) da ACAS (Miranda, 1985); III e VII – Isopicnal referente ao limite da ACAS; IV e VIII – a velocidade de corrente nula (valores positivos [negativos] indicam sentido para E [W]). A linha tracejada cinza demarca o limite em que a correlação entre a corrente integrada na vertical sobre a plataforma interna e o CIG foi superior a 0,8 (Figura 27). Os resultados foram extraídos da grade A.

Nota: A densidade foi calculada com as rotinas EOS80 desenvolvidas em Python (Fofonoff & Millard, 1983).

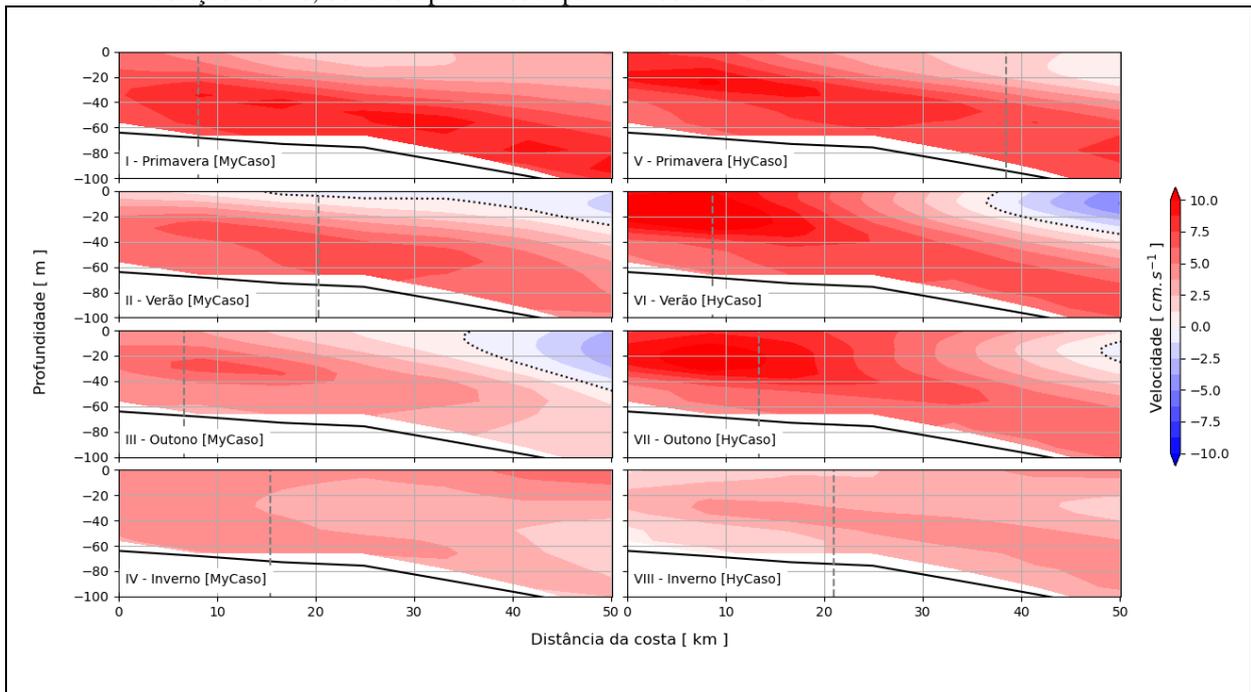
Fonte: O autor, 2021.

Ao se analisar a componente média paralela ( $u$ ) ao longo das 4 estações simuladas, observou-se que, de maneira geral, as velocidades para E foram mais (menos) intensas na primavera (no inverno) em ambos os experimentos de caso.

No experimento MyCaso, as velocidades foram superiores a  $7,5 \text{ cm.s}^{-1}$  em profundidades maiores que 25 m, durante a primavera (Figura 31-I). No verão (Figura 31-II) e durante o outono (Figura 31-III), as velocidades foram superiores a  $6 \text{ cm.s}^{-1}$ , sendo que no outono, o núcleo da corrente se encontrou confinado a uma distância máxima de 20 km da costa. No inverno (Figura 31-IV), as velocidades foram de  $5 \text{ cm.s}^{-1}$  em toda a coluna d'água, até a uma distância de 15 km da costa.

No experimento HyCaso, as velocidades foram superiores a  $9 \text{ cm.s}^{-1}$  durante a primavera (Figura 31-V), o verão (Figura 31-VI) e o outono (Figura 31-VII), o que configurou correntes mais intensas do que as obtidas no experimento MyCaso para as mesmas estações. Já no inverno (Figura 31-VIII), as velocidades foram inferiores a  $3 \text{ cm.s}^{-1}$ , ou seja, menos intensas que no experimento MyCaso.

Figura 31 – Porção costeira da seção vertical IG com a média da velocidade de corrente paralela à costa para cada estação do ano, obtidas a partir dos experimentos de caso.



Legenda: A isolinha pontilhada preta representa a velocidade de corrente nula (valores positivos [negativos] indicam sentido para E [W]). A linha tracejada cinza demarca o limite em que a correlação entre a corrente integrada na vertical sobre a plataforma interna e o CIG foi superior a 0,8 (Figura 27). Os resultados foram extraídos da grade A.

Fonte: O autor, 2021.

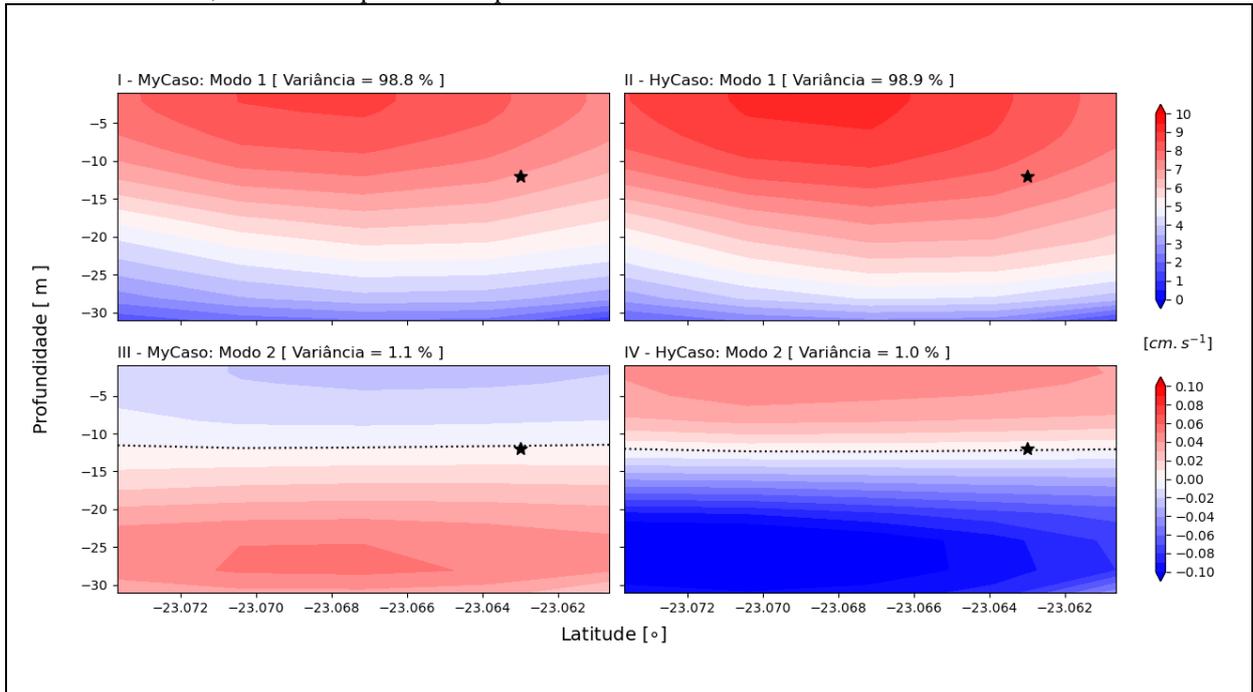
### 2.2.2.6 Estrutura Vertical das Correntes no CIG

Nos experimentos de caso, o primeiro modo empírico das correntes paralelas ao CIG concentrou 98,8% e 98,9 % da variância das correntes paralelas ao canal ao longo dos 12 meses simulados em MyCaso (Figura 32-I) e HyCaso (Figura 32-II) respectivamente. Este modo apresentou um padrão em camada única com todos os valores positivos em ambos os experimentos de caso. As velocidades foram máximas em superfície, chegando a  $8 \text{ cm.s}^{-1}$  na parte central do canal em MyCaso e a  $9 \text{ cm.s}^{-1}$  em HyCaso. Próximo ao fundo, as velocidades foram de  $1 \text{ cm.s}^{-1}$  nos dois experimentos de caso. Em termos de distribuição transversal das correntes, os maiores valores absolutos foram encontrados na parte central do canal, e se reduziram em direção às margens.

O padrão em camada única foi verificado para o primeiro modo empírico de todas as estações do ano simuladas (Figura 33), com intensidades semelhantes entre os experimentos de caso, à exceção do verão (Figura 33-III). Nesta estação, as correntes em superfície chegaram a  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  no experimento MyCaso e a  $14 \text{ cm.s}^{-1}$  em HyCaso. As correntes menos intensas foram obtidas durante o inverno (Figura 33-V), não ultrapassando os  $3,6 \text{ cm.s}^{-1}$  ( $2,4 \text{ cm.s}^{-1}$ ) no experimento MyCaso (HyCaso).

O segundo modo empírico concentrou apenas 1,1% da variância durante os 12 meses simulados no experimento MyCaso (Figura 32-III) e 1% no experimento HyCaso (Figura 32-IV). O perfil médio característico desse modo apresentou um padrão em duas camadas, com velocidades duas ordens de grandeza inferiores às do primeiro modo. No experimento MyCaso, o sentido da corrente média em superfície foi para W e se inverteu para E a partir dos 11,8 m de profundidade. O inverso ocorreu no experimento HyCaso, onde as velocidades apresentaram sentido para E em superfície e se inverteram para W a partir dos 12,3 m de profundidade. Ao longo das 4 estações simuladas, o padrão do perfil do segundo modo empírico apresentou velocidades próximas a zero, em comparação as velocidades do primeiro modo (Figura 33).

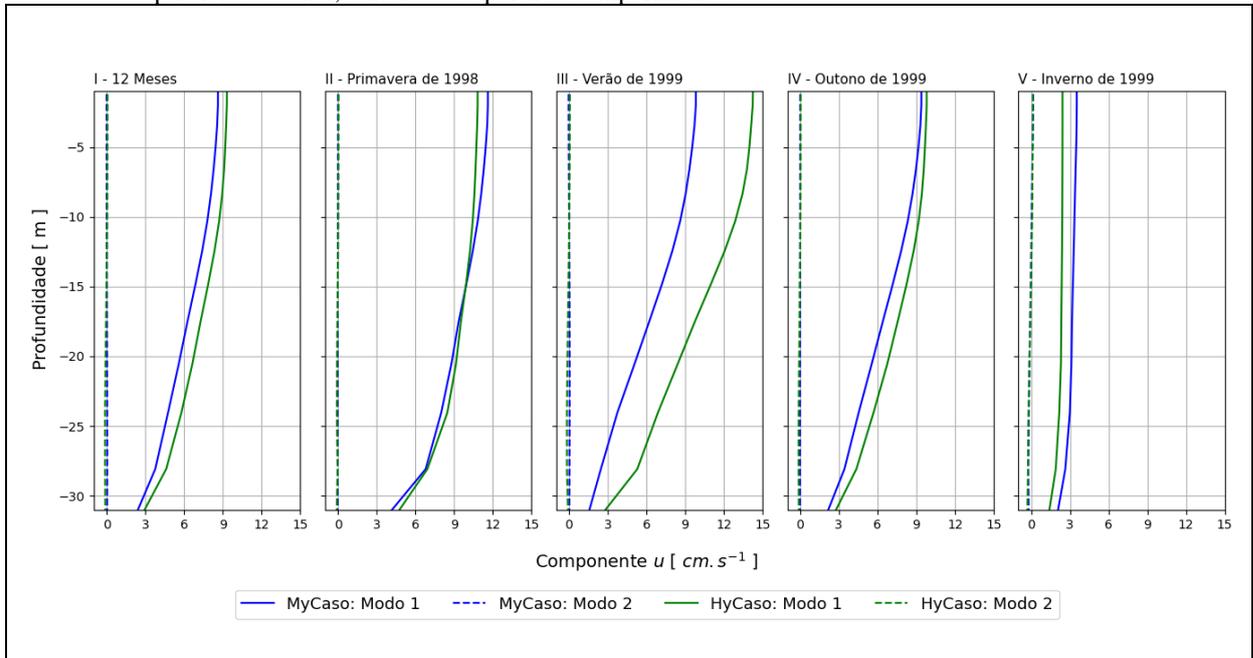
Figura 32 – Seções transversais ao CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de caso.



Legenda: As seções transversais foram calculadas para os 12 meses analisados. A estrela preta demarca o ponto onde os dados foram coletados no CIG. As velocidades positivas (negativas) indicam sentido da corrente para E (W) e a isolinha pontilhada demarca a profundidade onde a velocidade é nula.

Fonte: O autor, 2021.

Figura 33 – Perfis verticais no centro do CIG dos principais modos empíricos da componente de velocidade paralela ao canal, calculadas a partir dos experimentos de caso.



Legenda: Os perfis verticais foram calculados para os 12 meses analisados e para cada estação do ano no mesmo período. As velocidades positivas (negativas) indicam sentido da corrente para E (W).

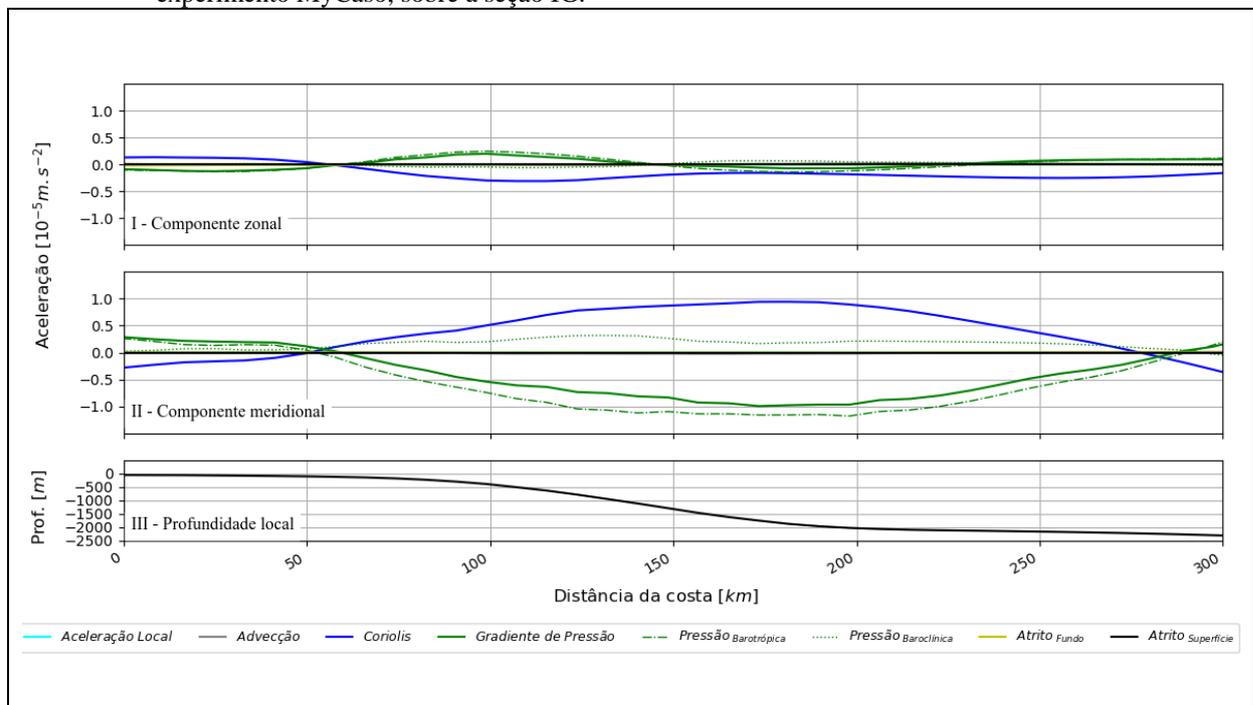
Fonte: O autor, 2021.

### 2.2.2.7 Balanço de Momento

Nos experimentos de caso, as amplitudes dos termos do balanço de momento na direção meridional (Figura 34-II e Figura 35-II) foram de 50% a uma ordem de grandeza maiores que na direção zonal (Figura 34-I e Figura 35-I). Tomando a direção meridional como referência, foram observadas duas porções bem definidas ao longo da seção IG. A primeira foi localizada até a uma distância de 50 km ao largo e apresentou uma corrente média resultante para E. A segunda porção foi localizada entre 50 km e 280-300 km da costa e apresentou uma corrente média resultante para W, característica da CB.

O experimento MyCaso apresentou amplitudes dos termos na porção costeira 40% inferiores às amplitudes dos termos obtidos com o experimento HyCaso. Na porção referente à CB, os termos em MyCaso foram de 60% a 80% maiores do que os termos em HyCaso. A partir dos 60 km da costa em direção ao largo, a componente baroclínica do gradiente de pressão exerceu maior influência sobre o gradiente de pressão total, assim como observado nos experimentos de controle, atenuando os efeitos da componente barotrópica em até 20%.

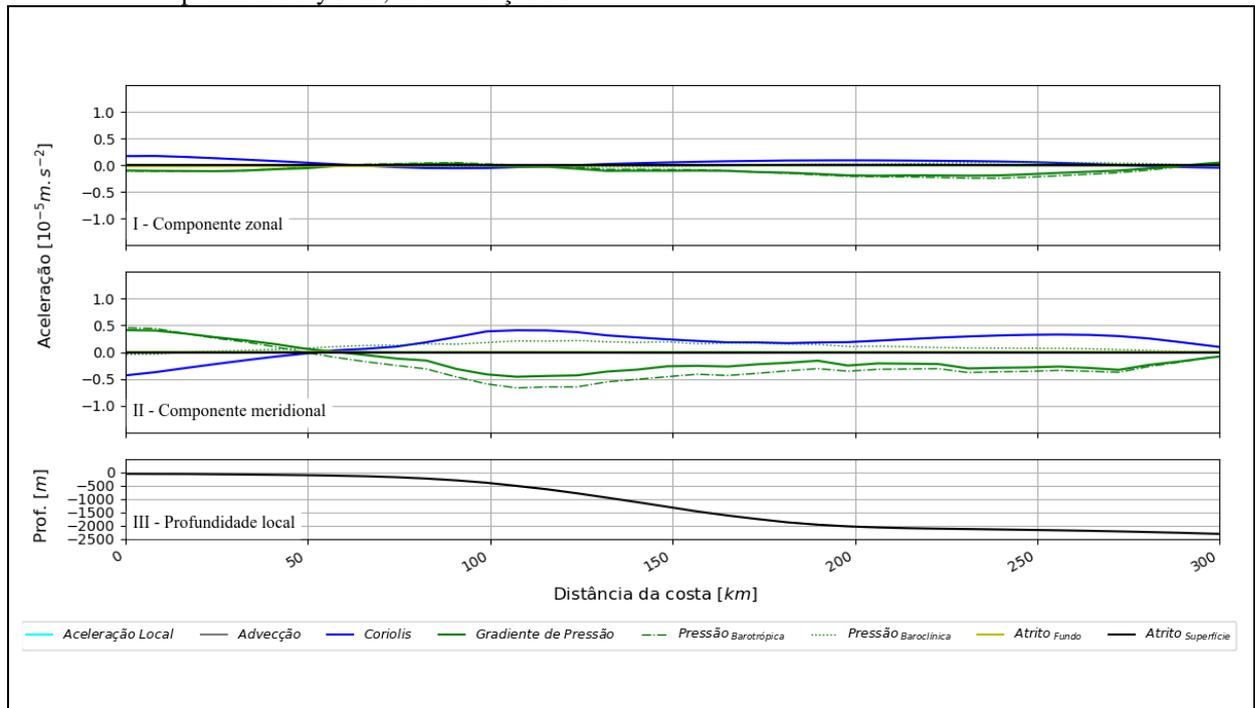
Figura 34– Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento MyCaso, sobre a seção IG.



Legenda: Os valores positivos na componente zonal (meridional) indicam aceleração com sentido para E (N) e valores negativos para W (S).

Fonte: O autor, 2021.

Figura 35 – Média anual do balanço de momento obtido a partir dos resultados da grade A referentes ao experimento HyCaso, sobre a seção IG.



Legenda: Os valores positivos na componente zonal (meridional) indicam aceleração com sentido para E (N) e valores negativos para W (S).

Fonte: O autor, 2021.

### 3 DISCUSSÃO

As discussões a seguir se deram inicialmente, em termos do caráter temporal da corrente para E observada no CIG. Os aspectos gerais dos dados medidos foram abordados com ênfase nas análises da componente da corrente paralela ao canal. A relação entre a circulação no CIG, que, conforme evidenciado nos resultados dos experimentos numéricos, está diretamente ligada a corrente sobre a plataforma interna adjacente é discutida na sequência. Por fim, são discutidos os aspectos referentes a determinação dos mecanismos responsáveis pela corrente média sobre a plataforma interna adjacente à BIG em conexão com a circulação geral observada na região, da porção interna da plataforma até o talude continental.

#### 3.1 O caráter temporal da corrente no CIG

Os dados adquiridos no CIG durante 15 meses possibilitaram análises detalhadas sobre as escalas temporais de variabilidade, não contempladas em trabalhos pretéritos. Como resultado, essas análises forneceram novos elementos acerca da circulação no canal.

Primeiramente, com relação a direção da corrente média no CIG, constatou-se que 95% (5%) da variância das correntes medidas no CIG se concentrou na direção paralela (perpendicular) ao canal, referente à componente  $u'$  ( $v'$ ). Este padrão foi observado tanto nos sinais  $u'$  e  $v'$  completos quanto nos respectivos sinais decompostos com uso do método harmônico. Analogamente, a contribuição astronômica da componente paralela foi uma ordem de grandeza superior à da componente perpendicular. Tal constatação se deu em termos das constituintes harmônicas puramente astronômicas (que não levam em conta efeitos de águas rasas ou climatológicos), calculadas a partir de  $u'$  e  $v'$ , e também foi evidenciada pelos respectivos espectros de energia dessas componentes. O mesmo padrão foi observado nos espectros do sinal não-astronômico. Portanto, a maior parcela da energia das correntes, seja relacionada a processos astronômicos ou não-astronômicos, foi concentrada na direção paralela ao canal, como era esperado para um escoamento canalizado. Tal fato justificou o maior detalhamento dado às análises da componente  $u'$ .

Considerando-se a influência da maré astronômica, sobre a corrente média ( $u'$ ) em questão, constatou-se que todas as constituintes harmônicas puramente astronômicas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,

$K_2$ ,  $O_1$ ,  $S_1$  e  $K_1$ ) apresentaram amplitudes inferiores a  $1,1 \text{ cm.s}^{-1}$ . As correntes de maré responderam por apenas 0,8% da variância total do escoamento. Castro (1996), observou que a corrente de maré paralela à costa, sobre a PCSE nas proximidades da BIG, respondeu por 10% da variância total das correntes medidas. Simulações numéricas de alta resolução realizadas neste trabalho, em condições barotrópicas e forçadas apenas com a maré, indicaram que uma atenuação da energia das correntes astronômicas no CIG ocorre devido à forma como a onda de maré se propaga para o interior da BIG. Os mapas cotidianos das constituintes  $M_2$  e  $S_2$  apresentados no APÊNDICE A mostram que a onda de maré incide de maneira oblíqua sobre as entradas W e, posteriormente, E da BIG com uma pequena defasagem. Com isso, a propagação da maré em direção ao CIG se dá por ambos os lados do canal e a sobreposição dessas ondas, observada na porção E próxima ao canal, gera um efeito destrutivo que atenua a energia das correntes de maré nessa porção. No entanto, é necessário um conjunto maior de evidências para confirmar tal hipótese. Ademais, as velocidades associadas a maré astronômica oscilaram em torno do valor médio do sinal, que foi igual a zero. Quando promediada por 15 meses, a velocidade foi nula e não resultou em uma componente residual para E no CIG.

Os processos não-astronômicos associados às velocidades de corrente paralelas ao CIG abrangeram um amplo espectro de frequências. Por este motivo, sua avaliação se deu de forma compartimentada em diferentes bandas. Para a banda de frequências com períodos de até dois dias, observou-se oscilações de 3 horas, associadas por Corrêa (1994), à ressonância com o vento. As oscilações com período de 4 horas, identificadas neste trabalho, também foram identificadas por Ikeda e Steverson (1982), porém, esses autores não apontaram o seu mecanismo gerador. Movimentos com período de 4,8 horas foram atribuídos, por Signorini (1980) e por Corrêa (1994), a seiches internos no sistema de baías BIG-BS. Por fim, o pico energético de 6,24 horas, que apareceu nos espectros dos sinais  $u'$  e  $unA$ , foi relacionado por Signorini (1980), Corrêa (1994) e Kjerfve *et al.* (2021), a seiches que ocorrem em todo o sistema BIG-BS. No último, os autores também encontram oscilações do nível do mar com período quarto-diurno nos dados adquiridos no TBIG, mas ao contrário da corrente, atribuíram essas oscilações à componente não astronômica  $M_4$  da maré.

As correntes relacionadas a banda não-astronômica de até dois dias responderam por 19,5% da energia total do escoamento, em termos de sua variância. As velocidades associadas à essa banda oscilaram em torno de zero. Assim como ocorreu com os processos astronômicos, a promediação dessas oscilações por 15 meses não resultou em uma componente de corrente residual para E no CIG. Na direção perpendicular ao canal, a banda até dois dias respondeu por 64,7% da variância total. Levando em conta que a componente  $v$  está alinhada com a direção

perpendicular à costa, é possível relacionar a alta energia observada nos dados de corrente aos efeitos do vento local, uma vez que processos como *wind set-up/set-down* e *storm-surges* apresentam períodos de até 3 dias (Melo, 2017).

A banda de frequência da componente de corrente não-astronômica com períodos de 2 a 30 dias foi a mais energética na direção paralela, respondendo por 67,5% da variância total, e foi satisfatoriamente representada nos experimentos de controle. Os picos de 3,4, 5,6 e 8,7 dias, identificados no espectro, estão em concordância com aqueles observados por Castro & Lee (1995), Filippo *et al.* (2012) e Melo (2017), referentes às oscilações do nível do mar sobre a plataforma continental adjacente a BIG. Estes autores atribuíram tais oscilações à passagem de OPCs na plataforma, que se propagam paralelamente a costa em sentido ao Equador. Por outro lado, essa banda também contém grande parte da variabilidade do vento local paralelo a costa. Kjerfve *et al.* (2021) encontraram picos energéticos de 6-8 dias no CIG e os relacionaram a eventos meteorológicos.

Em uma das hipóteses aqui propostas, foi sugerido que o escoamento residual para E no CIG estaria associado ao efeito assimétrico da propagação das OPCs sobre a plataforma. Tal assimetria se daria como resultado do efeito superposto dessas ondas que são originadas remotamente pela geração de sistemas frontais e ciclones na região sul do Brasil, conforme foi detalhado no capítulo introdutório. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que, de fato, os efeitos das OPCs foram relevantes para as correntes observadas no CIG, em termos energéticos. Porém, os espectros das velocidades obtidas com os experimentos de Caso, onde não há presença das OCPs, indicam que essas ondas não contribuíram em termos da corrente residual para E. Adicionalmente, a banda de frequência que respondeu pelas oscilações relacionadas às OPCs apresentou um valor médio para a corrente de  $-0,04 \text{ cm.s}^{-1}$ , ou seja, com sentido para W e, portanto, esta hipótese foi descartada.

A série temporal de 15 meses de correntes medidas no CIG permitiu, pela primeira vez, a identificação de um pico energético com período centrado em 52 dias. A banda não-astronômica de 30 a 90 dias, que contém este pico, respondeu por 3,5% da variância total da componente  $u'$ . O espectro de ondaletas permitiu constatar que esta energia não foi relacionada a um processo estacionário, mas a um evento que ocorreu, aproximadamente, entre os dias 08/01/1999 e 28/04/1999. Além disso, esta banda também apresentou uma oscilação em torno do valor médio, que foi igual a zero. Logo, sua contribuição não foi capaz de gerar uma componente residual para E no CIG. Especula-se aqui que este processo possa estar relacionado à pulsos oscilatórios da Corrente do Brasil em mesoescala. Oscilações com período de 65 dias, relacionadas ao transporte da CB, foram correlacionadas às elevações no interior da Baía de

Guanabara (Pita, 2019), que se localiza a apenas 100 km à E da BIG. Apesar deste processo não ser o responsável pela corrente média que constitui o objeto da presente tese, seus aspectos e potenciais impactos sobre a circulação no CIG devem ser aprofundados em trabalhos futuros. Vale ressaltar que ambos os experimentos de controle não reproduziram esse pico, o que, de certo modo, sugere que o mesmo está associado a um processo transiente e, possivelmente, de difícil captação pelos modelos numéricos.

A banda não-astronômica com períodos acima de 90 dias, respondeu por apenas 1,5% da variância total da componente paralela ao CIG. Já as velocidades oscilaram em torno do valor médio da série nessa banda, equivalente a  $6,95 \text{ cm.s}^{-1}$ . O fato desse valor ser muito próximo ao das velocidades residuais referentes à série temporal completa e do sinal não-astronômico completo (ambos de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ ), sugere que a corrente residual para E possa estar associada a mecanismos físicos típicos dessa banda de frequências. Por outro lado, a filtragem aplicada as séries temporais para separação do sinal nas diferentes bandas de frequência é um procedimento linear e a velocidade residual observada na análise dos dados pode ser fruto de não linearidades em processos que operam em frequências mais altas e que assim, não seriam filtrados, permanecendo como resíduos na banda de menor frequência (90 dias). Contudo, os espectros de energia das correntes simuladas nos experimentos de caso (Figura 13), onde foram geradas correntes para E no CIG, apresentaram energias equivalentes às das correntes medidas apenas nas frequências com períodos acima dos 90 dias. Logo, é plausível que a corrente investigada não seja, predominantemente, resultado de processos com menores períodos, mas sim do ajustamento (baroclínico) dos campos de densidade, que ocorrem em períodos maiores, compatíveis com os da banda em questão.

### 3.2 A relação entre as correntes no CIG e sobre a plataforma interna

Os experimentos de controle permitiram a avaliação da circulação proveniente dos forçantes admitidos como mais relevantes para a dinâmica do CIG. Já os experimentos de caso possibilitaram a avaliação da circulação ao se considerar apenas a variação dos campos de temperatura e salinidade sobre a PCSE e o oceano adjacente. Em todos os experimentos numéricos, observou-se que as correntes no CIG foram altamente correlacionadas às correntes costeiras sobre a PCI ( $r > 0,8$ ). Isso indica que os processos responsáveis pela corrente média no CIG não ocorrem no interior da BIG. Tal fato revela uma perspectiva diferente tendo em

vista que, na literatura pretérita, estudos sobre a potencial existência de uma corrente permanente no CIG foram realizados com foco em processos locais, tais como o efeito de descargas fluviais e do vento.

Os experimentos de controle realizados neste estudo apresentaram algumas diferenças marcantes. Os resultados da simulação HyControle foram compatíveis com a magnitude e o sentido para leste observado para a corrente média no CIG durante todo o período simulado. No entanto, no experimento MyControle, o sentido para E foi observado apenas durante o outono. O alcance *offshore* da corrente costeira, determinado a partir das correlações entre as velocidades no CIG e na PCI, variou entre os experimentos de controle, e também ao longo das estações do ano, ficando restrito a menores distâncias da costa durante o verão e a primavera (2 km) e distâncias ligeiramente maiores durante o outono e o inverno (4 km), no experimento HyControle. Tal fato está, qualitativamente, em concordância com o mecanismo proposto por Castro (1996) que sugere uma subdivisão da plataforma continental sudeste, a norte de São Paulo, em porções interna, média e externa, com base na migração sazonal das frentes termohalinas existentes na região. No verão e na primavera, a Frente Térmica Profunda (FTP) está bem próxima a costa, devido às intrusões da ACAS, e assim a plataforma continental interna, delimitada pela FTP, apresenta espessura mais reduzida. Já no outono e no inverno, os ventos na região não são tão favoráveis às intrusões da ACAS e, com isso, a FTP se desloca para offshore, aproximando-se da Frente Halina de Superfície (FHS) e aumentando assim a espessura da PCI. Já no experimento MyControle, a corrente costeira, sobre a plataforma interna, ficou mais restrita a menores distâncias da costa durante o outono (7 km). No verão a distância foi de 30 km e na primavera e inverno, as distâncias foram em torno de 35 km.

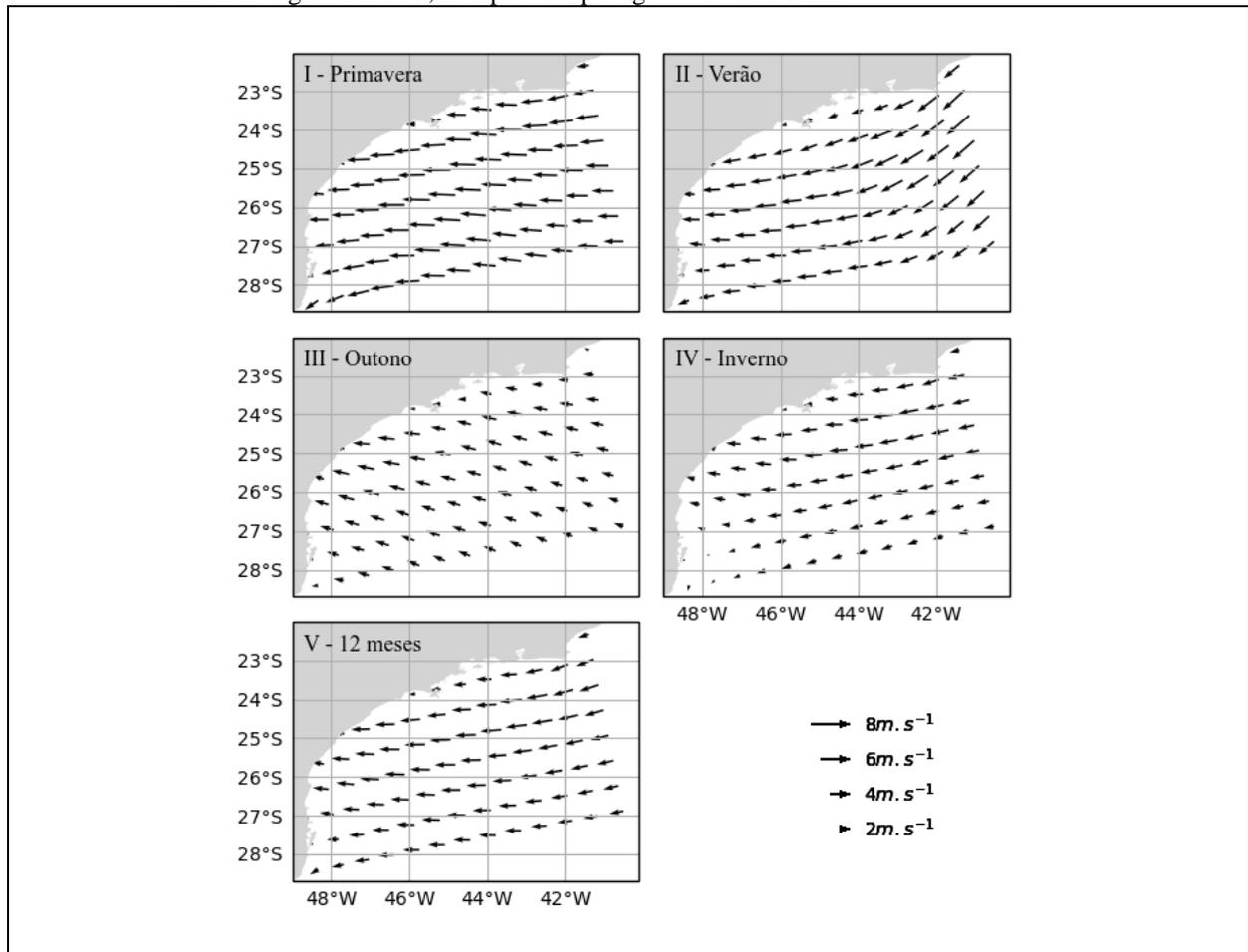
A média anual do balanço de momento sobre a seção IG apontou a predominância do equilíbrio geostrófico sobre os demais termos calculados. Nesse equilíbrio, a componente barotrópica do gradiente de pressão foi predominante na composição do gradiente de pressão total, o que evidencia sua importância para a circulação em questão. Entretanto, todo esse processo teve como origem o ajustamento baroclínico dos campos de temperatura e salinidade, conforme indicaram os experimentos de caso. Esses experimentos também mostraram que os campos de densidade impostos nos contornos da grade numérica, fora da BIG, foram, por si só, suficientes para produzir uma corrente costeira média que resultou em um escoamento para E no CIG, com velocidades médias compatíveis às registradas através das medições no canal.

A estrutura vertical da corrente média paralela à costa na PCI apresentou notáveis diferenças entre os experimentos. Nos experimentos de caso, essa corrente foi positiva em toda a coluna d'água, ou seja, com sentido para E, durante todo o período simulado. No experimento

HyControle, a corrente também apresentou sentido para E, em toda a coluna d'água, durante o outono e, em quase toda a coluna d'água, nas demais estações ano, onde uma fina camada superficial foi observada com velocidades para W. Já o experimento MyControle apresentou a corrente na plataforma interna com sentido para W em toda a coluna d'água, com exceção apenas do outono, onde um núcleo de velocidades para E foi observado em subsuperfície. Essas variações na coluna d'água, observadas para os experimentos de controle, podem ser visualizadas no APÊNDICE B, onde os mapas das velocidades médias anual e sazonal, referentes à grade B, são mostrados separadamente para a superfície e a profundidade de 20 m. Ao se plotar uma seção vertical auxiliar, à sudoeste da seção IG, próxima a Ilha Bela, São Paulo (APÊNDICE C), constatou-se, para o experimento MyControle, a presença da corrente costeira para E na maior parte da coluna d'água, em todas as estações do ano. Ou seja, esse experimento também indica a existência de uma corrente subsuperficial costeira com sentido para E, na PCI, porém, sem intensidade suficiente para alcançar a região adjacente à BIG.

A imposição do vento pode ter contribuído para a inversão das correntes, nos experimentos de controle, em comparação aos experimentos de caso. A média anual do vento imposto apresentou um padrão definido por ventos de primeiro quadrante (N-E), com velocidades entre 4 e 6  $\text{m.s}^{-1}$  (Figura 36-V). Esses ventos estão relacionados ao sistema da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Dottori & Castro, 2018), que ocorrem durante todo o ano. A intensidade desses ventos é maior no verão e menor no outono, o que justificaria o aparecimento do núcleo da corrente costeira para E, no experimento MyControle, e a ausência da corrente superficial para W no experimento HyControle, durante o outono. Esse argumento é reforçado pelo trabalho de Rezende (2003), que verificou a eficiência do vento de NE, o qual, ao ser imposto em uma simulação forçada, originalmente, apenas com campos de temperatura e salinidade, reverteu o sentido da corrente costeira de E para W. Cerda & Castro (2014) também observaram essa componente do vento paralela à costa, favorável a um transporte de Ekman com sentido *offshore*, que favorece uma corrente geostrófica para W. De maneira geral, o domínio do vento de NE foi observado ao longo da primavera (Figura 36-I), do verão (Figura 36-II) e do inverno (Figura 36-IV), quando as velocidades foram superiores a 7  $\text{m.s}^{-1}$ . No outono (Figura 36-III), as direções médias se alteraram e os ventos passaram a ser de E/SE, com intensidades entre 2 e 4  $\text{m.s}^{-1}$ . Estes valores estão em concordância com a climatologia de Da Silva *et al.* (1994), que indicou atividade mínima do vento durante o outono.

Figura 36 – Campos médios do vento à 10 m da superfície do mar, obtidos a partir dos resultados do modelo atmosférico global ERA5, interpolados para grade A do MOHID.



Legenda: Campo médio referentes aos meses de I – Primavera de 1998; II – Verão de 1999; III – Outono de 1999; IV – Inverno de 1999; V – 12 meses simulados, entre setembro de 1998 e agosto de 1999.

Fonte: O autor, 2021.

A análise dos principais modos empíricos das velocidades simuladas no canal permitiu avaliar de forma mais quantitativa a estrutura vertical da coluna d'água no CIG e como esta é influenciada pelos processos sobre a plataforma. O primeiro modo do experimento MyControle apresentou uma corrente média para W, ao passo que o experimento HyControle apresentou uma corrente para E. Caso a corrente costeira subsuperficial, no experimento MyControle, fosse observada na região adjacente a BIG, seria esperado que o primeiro modo empírico, referente a esse experimento, também apresentasse sentido para E. O primeiro modo foi responsável por mais de 96% da variância em todos os experimentos e se caracterizou por um perfil exponencial de camada única (sem inversão de sentido), com velocidades máximas em superfície e decaimento das velocidades em direção ao fundo. Sobre a região interna da plataforma, entre a IB e a Ilha Grande, Dottori & Castro (2009) estimaram, a partir de dados de corrente adquiridos entre 11/07/1993 e 21/09/1993, a 10, 20 e 30 m de profundidade, que o primeiro modo empírico

respondeu por mais de 90% da variância total. Dessa variância, 80% se deu na direção paralela à costa, para a qual os autores atribuíram uma componente barotrópica resultante do ajustamento geostrófico, que, por sua vez, foi correlacionada à componente paralela do vento. Ou seja, ventos de E/NE geraram uma corrente geostrófica para W/SW na região e ventos de W/SW geraram uma corrente no sentido oposto.

A estrutura vertical das velocidades referentes ao primeiro modo empírico no CIG está em concordância com os resultados apresentados por Dottori & Castro (2009). No entanto, o primeiro modo dos experimentos de caso, que não foram forçados por vento, apresentaram o mesmo padrão do primeiro modo do experimento HyControle, evidenciando que a circulação gerada pelo ajustamento dos campos de densidade (ajustamento baroclínico) apresentou maior relação com a variabilidade do primeiro modo. O vento foi relacionado ao segundo modo empírico nos experimentos de controle, uma vez que, nos experimentos de caso, as velocidades médias desse modo foram duas ordens de grandeza inferiores às do primeiro modo. Com a imposição do vento nos experimentos de controle, as velocidades médias do segundo modo aumentaram uma ordem de grandeza em relação aos experimentos de caso. Além disso, o sentido dessas velocidades em superfície se deu para W em ambos os experimentos de controle, até a uma profundidade de 12 m, quando se inverteu para E em maiores profundidades. Assim, sugere-se que, em superfície, a corrente para W está relacionada ao ajustamento geostrófico barotrópico associado aos ventos predominantemente de NE sobre a plataforma. As velocidades em superfície foram maiores durante a primavera e o verão, quando os ventos de NE foram mais intensos. No outono e no inverno, as velocidades superficiais do segundo modo foram menos intensas, coincidindo com as estações nas quais a intensidade do vento de NE foi menor.

### **3.3 A circulação média sobre a PCSE e talude relacionada à corrente média no CIG**

Conforme discutido previamente, a corrente média no CIG está relacionada a uma corrente costeira em subsuperfície localizada sobre a PCI adjacente à BIG. Também foi sugerido que essa corrente costeira, observada em todos os experimentos, embora não adjacente à BIG no experimento MyControle, resulta do ajuste baroclínico sobre a plataforma. Tal fato é sustentado pelos resultados obtidos com os experimentos de caso.

Avaliando-se a perspectiva acima numa escala espacial maior, os mapas da circulação média anual e sazonal para a grade A, particularmente, para os experimentos MyCaso e

HyCaso, exibiram a existência de uma grande célula de circulação ciclônica sobre a PCSE, que se estendeu de Arraial do Cabo até as proximidades do Cabo de Santa Marta. Nessa célula, o ramo interno correspondeu a corrente média para E junto à costa da BIG, enquanto o ramo externo (oceânico) foi delimitado pela corrente fluindo entre as isóbatas de 200 m e 2000 m, com sentido para SW, que configura o padrão típico da CB (Silveira *et al.* 2000). Com base nesses experimentos, é possível observar que a célula de circulação ciclônica, gerada pelos campos de temperatura e salinidade na coluna d'água, estabelece, em superfície, uma longa faixa, centrada, aproximadamente, entre as isóbatas de 50 m e 200m, com nível do mar relativamente mais baixo (Figuras 28 e 29). Entre essa faixa central e a costa, o gradiente de pressão barotrópico estabelecido garante, portanto, uma corrente geostrófica para E na PCI, conforme observado nos experimentos de caso.

O mesmo cenário descrito acima ocorre no experimento HyControle (Figuras 16-II e 17-V a VIII), com pequenas diferenças na superfície, possivelmente, devidas à forçante de vento. No experimento MyControle, a CB se localizou mais próxima à costa, a partir de Cabo Frio, chegando até a isóbata de 50 m, em comparação com os demais experimentos, e a célula ciclônica não foi observada (Figuras 16-I e 17-I a IV). Com isso, o gradiente de pressão barotrópico estabelecido perpendicularmente a costa apresentou sentido inverso àquele observado nos demais experimentos, o que gerou uma corrente geostrófica para W na PCI. O padrão geral anual e sazonal da circulação da célula ciclônica em superfície e na profundidade de 20 m, para a grade A referente aos experimentos de controle, é apresentado no APÊNDICE B.

Portanto, considerando-se todos os experimentos realizados neste trabalho, o ajustamento geostrófico dos campos de temperatura e salinidade foi identificado como o principal mecanismo responsável por criar uma célula de circulação ciclônica permanente sobre a PCSE. Essa célula, por sua vez, gera uma corrente costeira para E, em subsuperfície, sobre a PCI adjacente à BIG e conseqüentemente, uma corrente de mesmo sentido no CIG.

## CONCLUSÕES

A partir das informações apresentadas e discutidas neste trabalho foi possível concluir que:

- a) No período de 15 meses de dados registrados, a corrente média no CIG apresentou uma velocidade de  $6,90 \text{ cm.s}^{-1}$ , com sentido para E. Os processos com períodos acima de 90 dias, relacionados aos ajustamentos dos campos de densidade externos às baías, foram os responsáveis pela manutenção dessa corrente, que dentro da janela temporal analisada, apresentou um caráter estacionário;
- b) A abrangência temporal da série de dados analisada permitiu a determinação de uma oscilação das correntes no CIG com período de 52 dias. Esta oscilação não apresentou caráter estacionário, tendo sido observada entre os dias 08/01/1999 e 28/04/1999 (total 110 dias). Essa oscilação não gerou influência relevante sobre a corrente média investigada, que apresentou velocidades médias similares ao longo de todas as estações do ano simulado;
- c) A hipótese de que a assimetria entre as velocidades positivas e negativas da corrente paralela à costa, associadas às OPCs, geraria uma componente residual de velocidade para E no CIG não se confirmou. A corrente média para E no CIG também não apresentou relação com nenhum mecanismo no interior do sistema de baías BIG-BS, mas sim com uma corrente costeira subsuperficial, de mesmo sentido, que flui em equilíbrio geostrófico na PCI adjacente;
- d) O ajuste baroclínico dos campos de temperatura e salinidade produziu uma célula de circulação ciclônica da costa ao talude, observada de Arraial do Cabo até as proximidades do Cabo de Santa Marta. O ramo externo dessa célula é dado pela Corrente do Brasil e, o ramo interno, é dado pela corrente costeira mencionada no item acima, que é diretamente correlacionada com a corrente média no CIG. O gradiente de elevação do nível do mar, que se estabeleceu entre a faixa central da célula ciclônica e a costa foi determinante para o balanço geostrófico que controla a corrente costeira no ramo interno.
- e) A estrutura vertical do primeiro modo empírico da coluna d'água no canal apresentou um perfil em camada única, com velocidades máximas em

superfície, que se reduziram em direção ao fundo. Esse modo está associado a circulação provocada pelos gradientes de densidade sobre a PCSE;

- f) A estrutura vertical do segundo modo empírico da coluna d'água no canal apresentou um perfil em camada dupla, com velocidades para W em superfície, e para E no fundo. Esse modo está associado à circulação provocada pela componente do vento paralela à costa.

Os resultados aqui apresentados abriram precedentes para uma série de trabalhos futuros, dentre os quais sugere-se:

- a) A utilização de séries temporais, seja de dados medidos no CIG ou de resultados de experimentos numéricos, maiores que 15 meses, para se determinar se a corrente média para E apresenta uma natureza oscilatória, e qual o período dessa possível oscilação;
- b) Um estudo direcionado aos potenciais impactos dos processos ligados à oscilação observada com período de 52 dias, possivelmente associada a pulsos da Corrente do Brasil, sobre a circulação no CIG;
- c) A realização de estudos mais detalhados sobre a sensibilidade das simulações aqui conduzidas, em relação às condições de contornos provenientes de diferentes modelos globais.

## REFERÊNCIAS

- ARAKAWA, A.; LAMB, V., 1977. "Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model". *Methods in Computational Physics 1*.
- CAMPOS, E.J.D.; GONÇALVES, J.E.; IKEDA, Y., 1995. "Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight' Summer of 1991". *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 100, NO. C9, PAGES 18,537-18,550, SEPTEMBER 15.
- CAMPOS, E.J.D., 1995. "Estudos da circulação oceânica no Atlântico tropical e região oeste do Atlântico Subtropical Sul". Tese de livre docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 114p.
- CASTELAO, R.M.; Barth, J.A., 2006. "Upwelling around Cabo Frio, Brazil: the importance of wind stress curl". *Geophysical Research Letters*. 33, L03602. doi:10.1029/2005GL025182.
- CASTRO, B.M., 1990. "Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: winter, 1979". *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 38(2):111-132.
- CASTRO, B.M., 1996. "Correntes e Massas de água da Plataforma Continental Norte de São Paulo (Tese de Livre Docência). Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- CASTRO, B.M., LEE, T.N., 1995. "Wind-forced sea-level variability on the southeast Brazilian shelf". *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, v. 100, n. C8, 16045-16056.
- CAVALCANTE, S.L.S., 2010. "Estudo da Influência da Dinâmica da Plataforma Continental nas Baías de Ilha Grande e Sepetiba Via Aninhamento de Modelo Numérico Costeiro a Modelo Numérico Oceânico". Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. XVII, 129 p.: il.; 29,7 cm.
- CERDA, C.; CASTRO, B.M., 2014. "Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between São Sebastião (24°S) and Cabo São Tome (22°S)". *Continental Shelf Research*. 89: 5-14. DOI: 10.1016/j.csr.2013.11.003.
- COELHO, A.L., 2008. "Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos". Tese de Doutorado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 188p.
- CORRÊA, M.A., 1994. "Análise das correntes observadas na Baía de Ilha Grande". Dissertação de Mestrado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 118p.

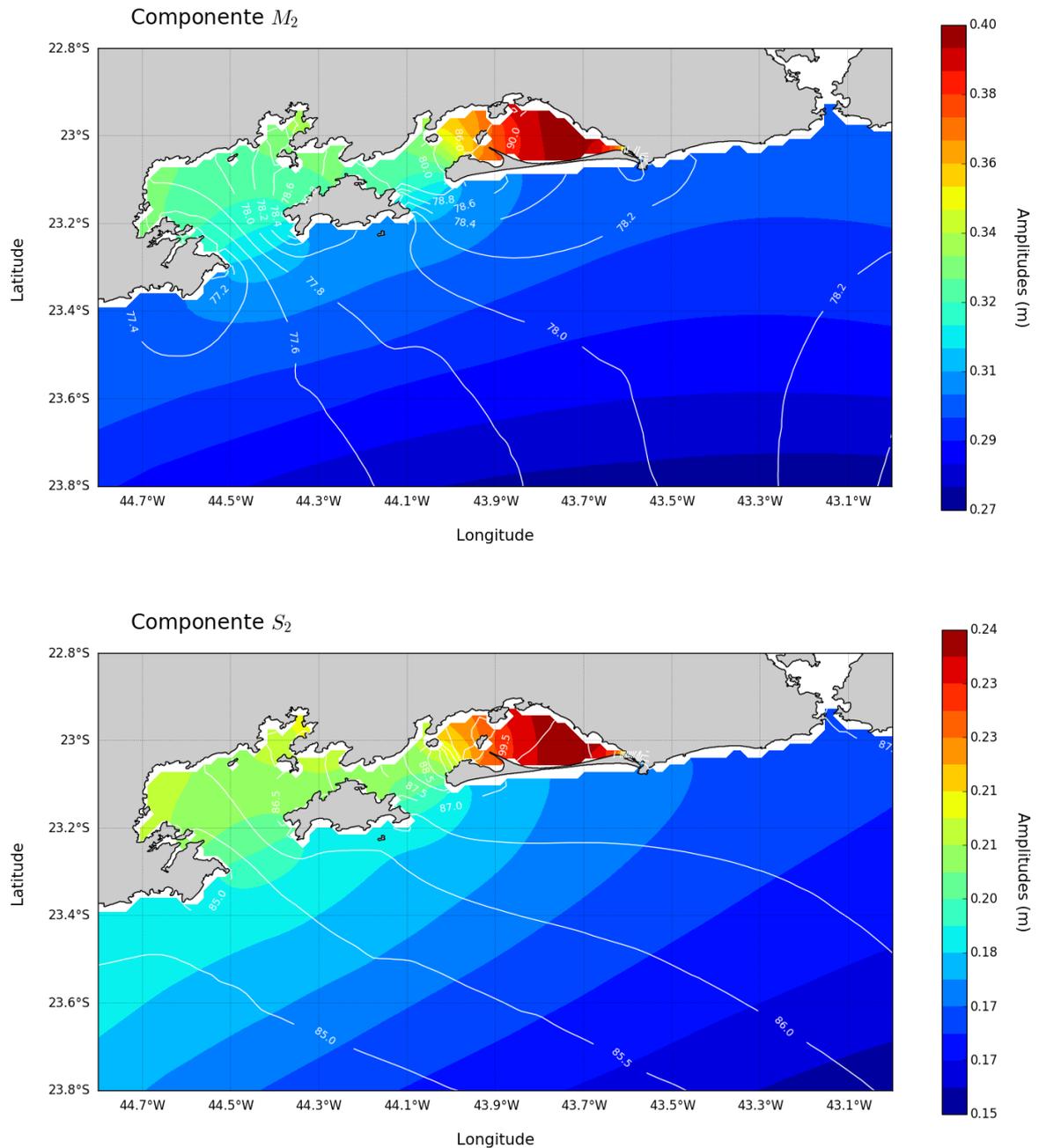
- DA SILVA, A.; YOUNG, C.; LEVITUS, S., 1994. “Atlas of surface marine data 1994 Vol.3: Anomalies of Fluxes of Heat and Momentum”. *NOAA Atlas NESDIS*. vol. 8. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- DOTTORI, M.; CASTRO, B.M., 2009. “The response of the São Paulo continental shelf, Brazil, to synoptic winds”. *Ocean Dyn.* 59, 603–614.
- DOTTORI, M.; CASTRO, B.M., 2018. “The role of remote wind forcing in the subinertial current variability in the central and northern parts of the South Brazil Bight”. *Ocean Dynamics*. 68, 677–688. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1153-9>.
- EMERY, W.J.; THOMSON, R.E., 2001. “Data Analysis Methods in Physical Oceanography”. *Elsevier Science*. Second Edition. ISBN: 9780080477008. 654p.
- EVANS, D.L.; SIGNORINI, S.R., 1985. “Vertical Structure of the Brazil Current”. *Nature*. 315(1): 48-50.
- FILIPPO, A., KJERFVE, B., TORRES JR., A.R., FERNANDES, A.M., 2012. “LOW-FREQUENCY VARIABILITY OF SEA-LEVEL ALONG THE MID-ATLANTIC COAST OF SOUTH AMERICA, IN 1983”. *Revista Brasileira de Geofísica*. 30(1): 5-14.
- FOFONOFF, P.; MILLARD, R.C. Jr., 1983. “Algorithms for computation of fundamental properties of seawater”. *UNESCO Tech. Pap. In Mar. Sci.*, No. 44, 53 pp. Eqn.(31) p.39.
- FRAGOSO, M.R., 1999. “Estudo Numérico da Circulação Marinha da Região das Baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ)”. Dissertação de Mestrado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 115p.
- FRANZ, G.A.S.; PINTO, L.; ASCIONE, I.; MATEUS, M.; FERNANDES, R.; LEITÃO, P.; NEVES, R., 2014. “Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 151, 34 e 44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.09.017>.
- FRANZ, G.A.S.; LEITÃO, P.; SANTOS, A.; JULIANO, M.; NEVES, R., 2016. “From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: case study of Paranaguá estuarine system”. *BRAZILIAN JOURNAL OF OCEANOGRAPHY*, 64(3):277-294. DOI: 10.1590/S1679-875920161195806403.
- GILL, A.E.; SCHUMANN, E.H., 1974. “The Generation of Long Shelf Waves by the Wind”. *J. Phys. Oceanogr.* 4 (1): 83–90. doi: 10.1175/1520-0485(1974)004<0083:TGOLSW>2.0.CO;2.
- GOES, M.; CIRANO, M.; MATA, M.M.; MAJUMDER, S., 2019. “Long-term monitoring of the Brazil Current transport at 22°S from XBT and altimetry data: Seasonal, interannual, and extreme variability”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JC014809>.

- HARAI, J.; CAMARGO, R., 1994. “Simulação da propagação das nove principais componentes de mare na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico”. *Bolm Inst. oceanogr.*, 42(1): 35-54.
- IKEDA, Y; STEVERSON, M.R., 1982. “Seasonal Characteristics of Hydrography Turbulence and Dispersion Near Ilha Grande”. *Bolm Inst. oceanogr.*, 31(1): 11-32.
- KJERFVE, B.; DIAS, G.T.M.; FILIPPO, A.; GERALDES, M.C., 2021. “Oceanographic and environmental characteristics of a coupled coastal bay system: Baía de Ilha Grande-Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brazil”, *Regional Studies in Marine Science*. Volume 41, 101594, ISSN 2352-4855, doi: 10.1016/j.rsma.2020.101594.
- KRELLING, A.P.M., 2015. “The Potiguar Eddy: a subsurface anticyclone associated with the North Brazil Undercurrent at 4° S”. Tese de Doutorado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 132p.
- LEITÃO, P.M.C.F.L., 2003. “Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho”. Tese de Doutorado - *Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa*. 296 p.
- LIU, Y.; SAN LIANG, X.; WEISBERG, R.H., 2007. “Rectification of the Bias in the Wavelet Power Spectrum”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 24, n. 12, pp. 2093–2102.
- MASCARENHAS JR., A.S.; MIRANDA, L.B.; & ROCK, N.J., 1971. “A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio”. In *Costlow, J. D.*, ed. Fertility of the sea, New York, Gordon and Breach, 1:285-308.
- MELO, E. “Investigações sobre a Análise da Agitação Marítima”. Dissertação (Mestrado), *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 138 p., 1982.
- MELO, E. “Meteorological Tide at the Brazilian Coast”. *Full Professor Thesis, School of Engineering, Federal University of Rio Grande, Brazil*, 328 p, April 2017 (in Portuguese).
- MIRANDA, L. B. de; IKEDA., Y.; CASTRO FILHO, B. M.; PEREIRA FILHO, N. 1977. “Note on the occurrence of saline fronts in the Ilha Grande region (RJ)”. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 26(2) :249-256.
- NEVES R.; LEITÃO, P.; BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; COELHO, H.; SANTOS, A.; MIRANDA R., 2000. “The advantage of a generic coordinate approach for ocean modelling”. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. v.40, pp.10, DOI: 10.2495/HY000021.
- NEVES, R.; SILVA, A.; BRAUNSCHWEIG, F.; LEITÃO, P.C.; WANDEL, R.; PINA, P.; PITA, G. 2001. “Hidroinformática e otimização da gestão de ecossistemas aquáticos”. *A Hidroinformática em Portugal*, Lisboa, Portugal, 2001.

- PARKER, B.B., 2007. "Tidal Analysis and Prediction". *NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3*. Library of Congress Control Number: 2007925298. Silver Spring, Maryland.
- PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE., *Journal of Computers and Geosciences*. V. 28, p. 929-937, 2002.
- PITA, I.I.C., 2019. "MODELAGEM DA CIRCULAÇÃO EM EVENTOS SUBINERCIAIS NA BAÍA DE GUANABARA – RJ". Dissertação (Mestrado), *Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ)*, RJ, Brasil, 89 p.
- REZENDE, J.H.M., 2003. "Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste durante o verão". Tese de Doutorado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 120p.
- SEBRAE, 2016. Painel regional: Costa Verde / Observatório Sebrae/RJ. Rio de Janeiro: SEBRAE/RJ. 16 p.: il; 30 cm. ISBN. CDU 311.21:338.12 (815.3), 2016.
- SIGNORINI, S.R., 1980. "A Study of The Circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba Part I, A Survey of the Circulation Based on Experimental Field Data". *Bolm Inst. oceanogr.*, 29(1): 41-55.
- SILVA, L.S.; MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M., 2005. "Numerical Study of Circulation and Thermohaline Structure in the São Sebastião Channel". *Revista Brasileira de Geofísica*. 23(4): 407-425.
- SILVEIRA, I.C.A.; SCHMIDT, A.C.K.; CAMPOS, E.J.D.; GODOI, S.S.; IKEDA, Y., 2000. "A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira". *Rev. bras. oceanogr.* 48(2):171-183. 2000.
- STECH, J.L.; LORENZZETTI, J.A., 1992. "The Response of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 97, NO. C6, PAGES 9507-9520. 0148-0227/92/92JC-00486505.00.
- STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; Peterson, R.G., 1990. "Geostrophic transport in the Brazil Current region". *Deep-Sea. Res.*, 37(1A): 1875-1886.
- TALLEY, L.D.; PICKARD, G.L.; EMERY, W.J.; SWIFT, J.H., 2011. "Descriptive Physical Oceanography: An Introduction". *Academic Press is an imprint of Elsevier*. Sixth edition. ISBN: 978-0-7506-4552-2.
- TORRENCE, C.; COMPO, G.P.A., 1998. "Practical Guide to Wavelet Analysis". *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 1, pp. 61–78.
- VIANA, C.C.G., 2017. "A assimetria da onda de maré na Baía de Guanabara - RJ". Dissertação (Mestrado), *Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, RJ, Brasil, 142 p.

## APÊNDICE A – Mapas cotidais

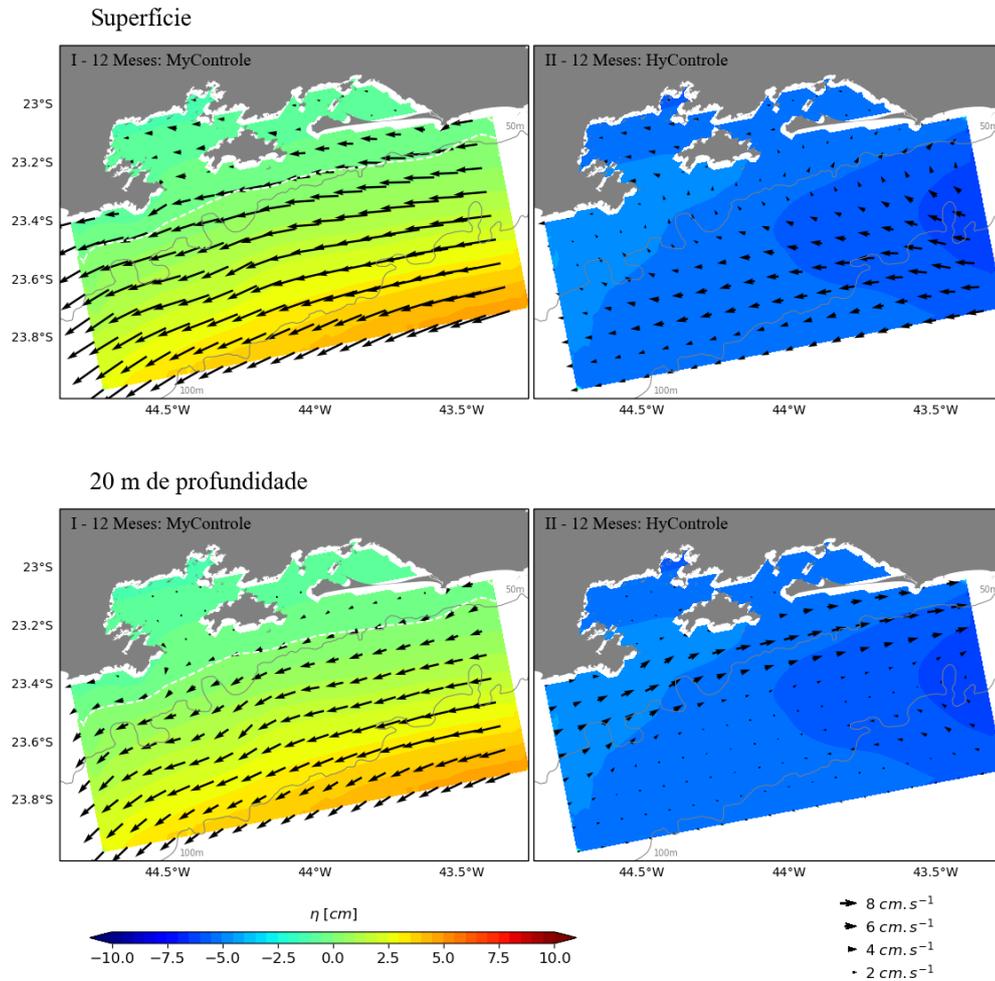
Figura 37 – Mapas cotidais das componentes  $M_2$  e  $S_2$  calculados a partir dos resultados horários de elevação do nível do mar obtidos com experimento barotrópico, rodado durante o ano de 2018 com o MOHID.



Nota: A simulação foi forçada pelas constituintes harmônicas fornecidas pelo modelo global FES2012.  
 Fonte: O autor, 2021.

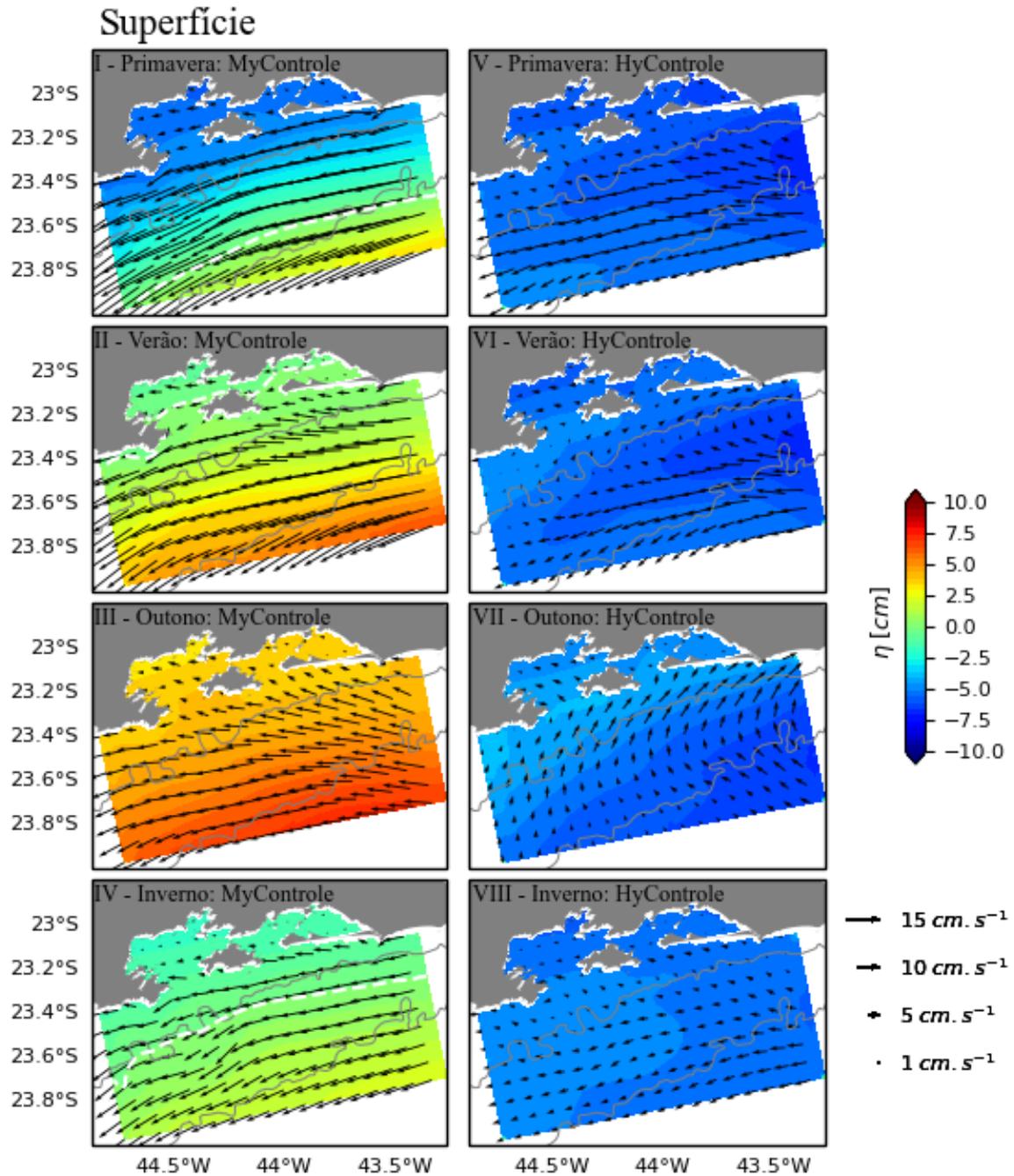
## APÊNDICE B – Campos de velocidade média em superfície e a 20 m de profundidade

Figura 38 – Campos médios anuais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície e à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.



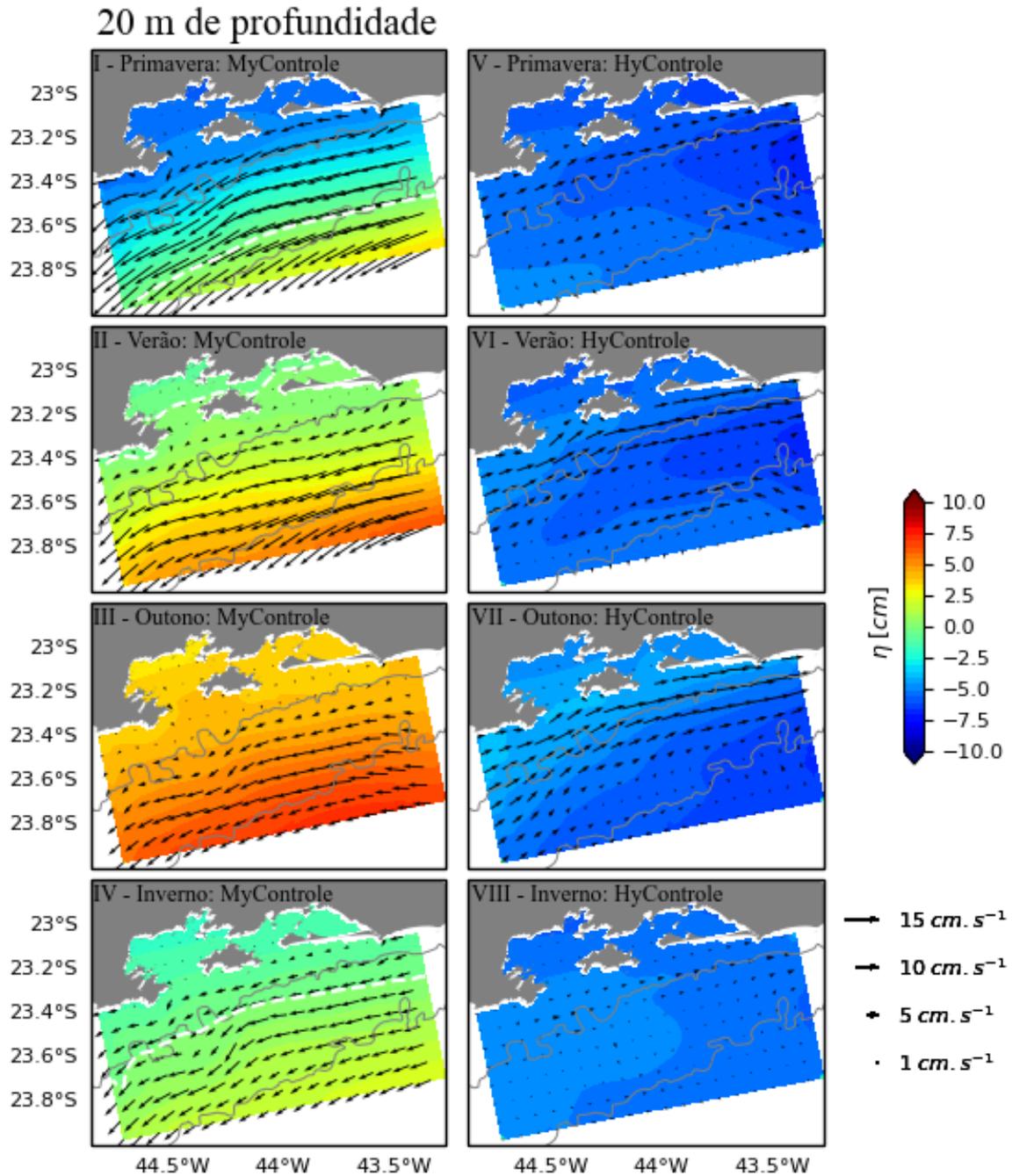
Fonte: O autor, 2021.

Figura 39 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.



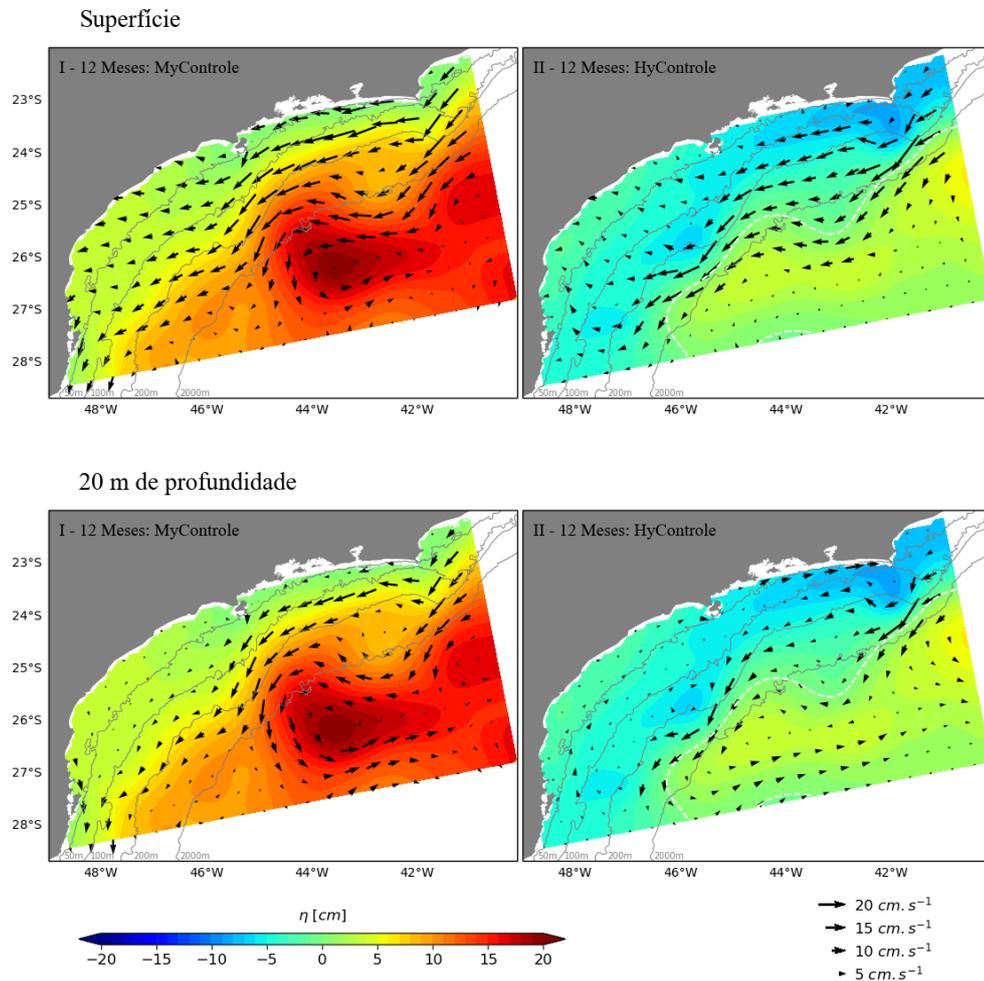
Fonte: O autor, 2021.

Figura 40 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.



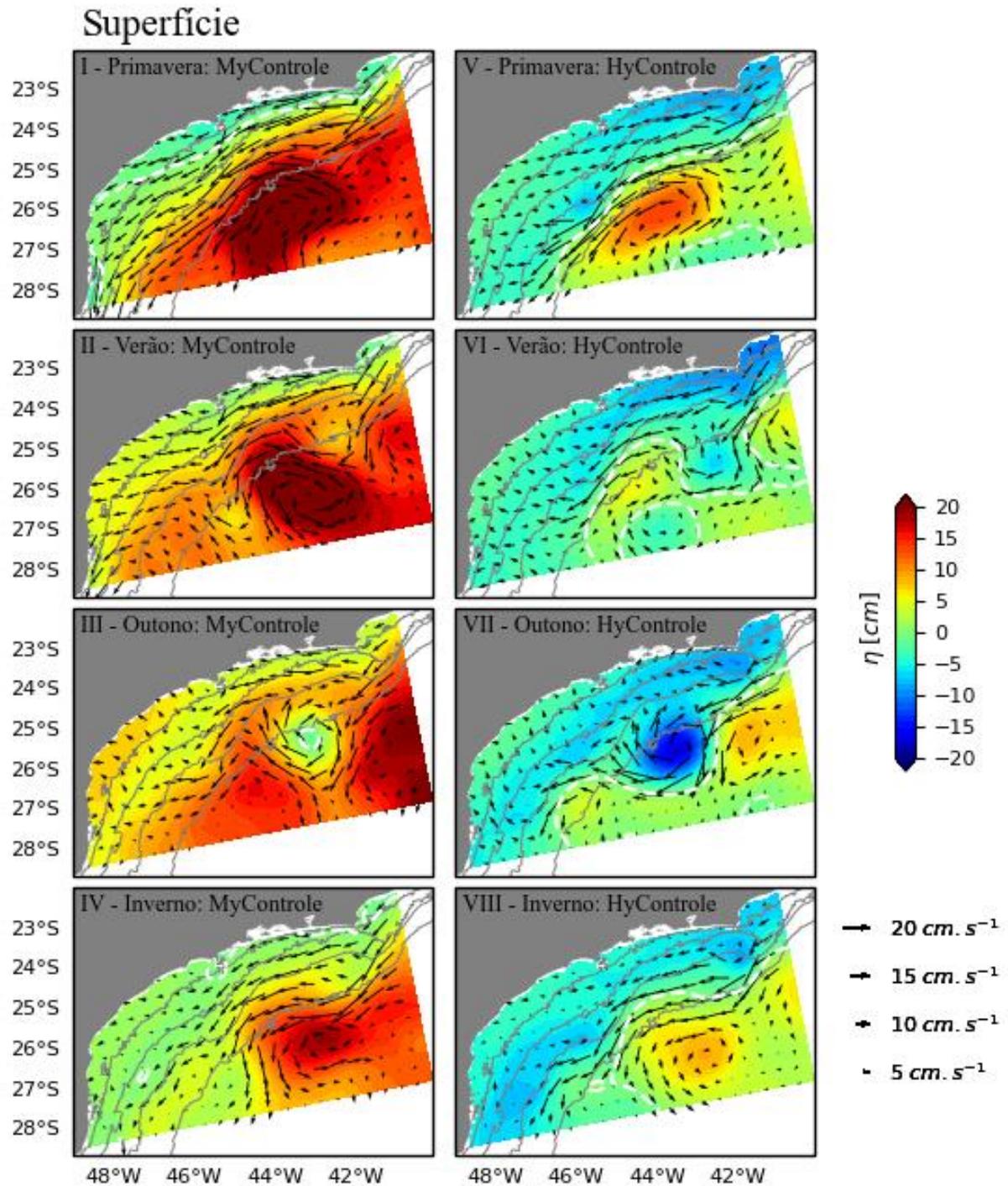
Fonte: O autor, 2021.

Figura 41 – Campos médios anuais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície e à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade A dos experimentos de controle.



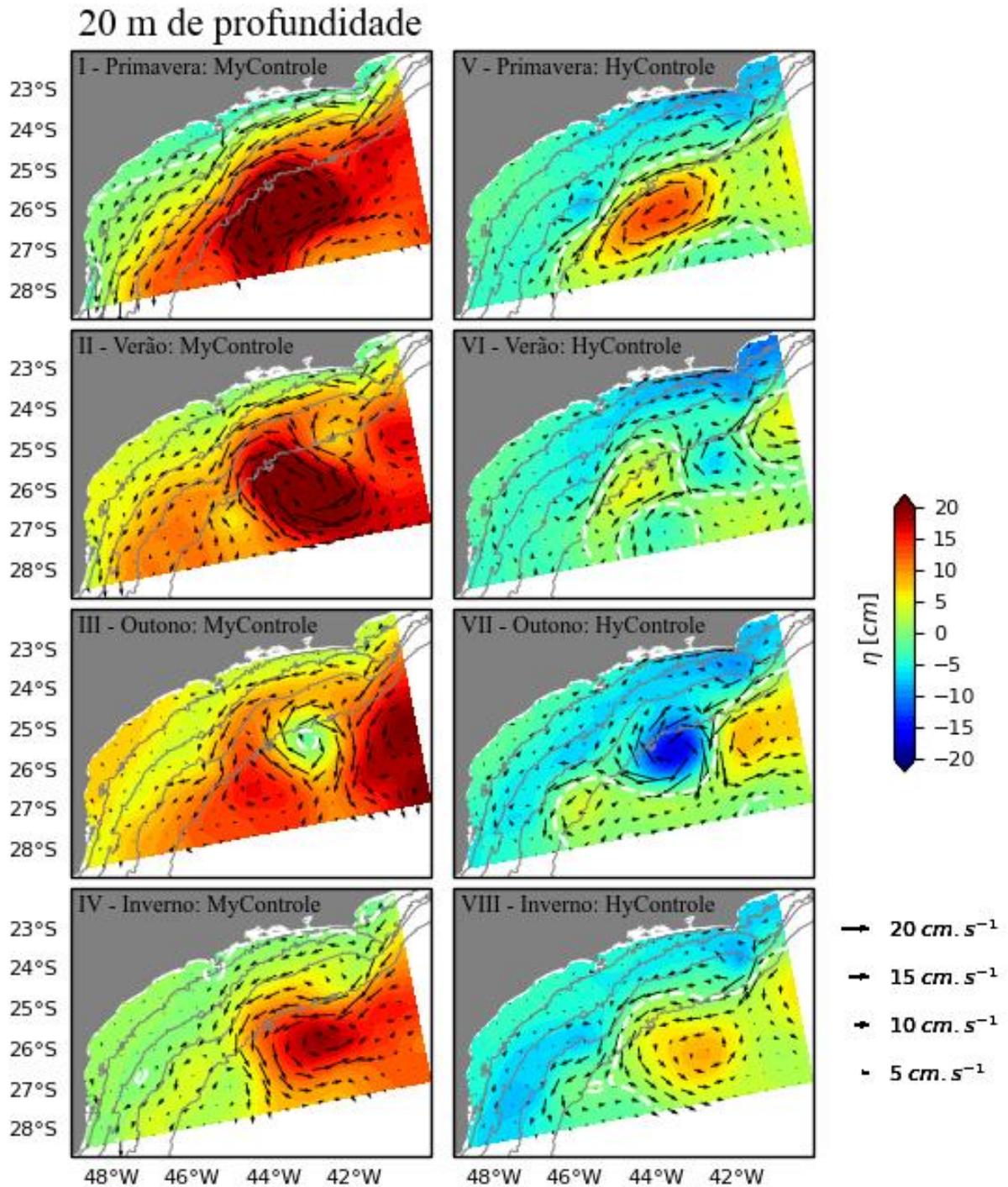
Fonte: O autor, 2021.

Figura 42 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente em superfície, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.



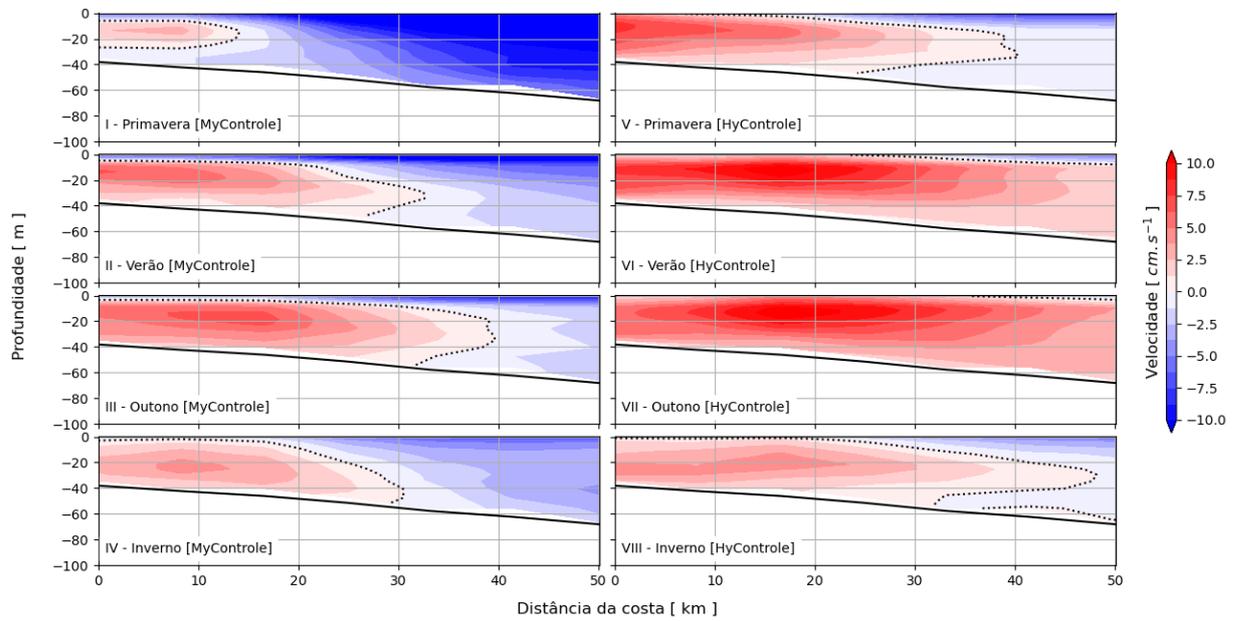
Fonte: O autor, 2021.

Figura 43 – Campos médios sazonais das elevações do nível do mar e das velocidades de corrente à 20 m de profundidade, obtidos a partir da grade B dos experimentos de controle.



Fonte: O autor, 2021.

## APÊNDICE C – Seção vertical da Ilha Bela

Figura 44 – Seção vertical auxiliar da componente  $u$ , localizada a W da Ilha Bela (IB).

Fonte: O autor, 2021.

## ANEXO A – Configuração do módulo *Geometry*

Informações de configuração do arquivo *Geometry.dat*, responsável por definir os valores de espessura de cada camada vertical na direção *z*.

```

<begindomain>
ID                : 1
TYPE              : CARTESIAN
DOMAINDEPTH      : 0
LAYERS           : 50
MININITIALLAYERTHICKNESS : 0.05
<<beginlayers>>
0.494025
1.04735
1.104294
1.173826
1.258729
1.36239
1.488946
1.643437
1.832003
2.06214
2.34293
2.68549
3.10326
3.61259
4.23332
4.98942
5.9099
7.02964
8.3906
10.04298
12.04658
14.47222
17.40323
20.9367
25.1847
30.2749
36.3496
43.5651
52.0871
62.0856
73.7247
87.1512
102.4779
119.7663
139.0062
160.1007
182.851
206.96
232.033
257.609
283.185
308.258
332.367
355.117
376.212
395.452
412.74
428.067
441.493
453.133
<<endlayers>>
<enddomain>

```