



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

JONATHAN MONTEIRO DA SILVA

**INSTABILIDADE BAROCLÍNICA COMO GATILHO PARA O DESPRENDIMENTO
DE VÓRTICES DA CNB: UM ESTUDO DE CASO**

FORTALEZA

2018

JONATHAN MONTEIRO DA SILVA

INSTABILIDADE BAROCLÍNICA COMO GATILHO PARA O DESPRENDIMENTO DE
VÓRTICES DA CNB: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Paula Morais Krelling.

CIDADE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58i Silva, Jonathan Monteiro da.
INSTABILIDADE BAROCLÍNICA COMO GATILHO PARA O DESPRENDIMENTO DE
VÓRTICES DA CNB: UM ESTUDO DE CASO / Jonathan Monteiro da Silva. – 2018.
34 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
Coorientação: Profa. Dra. Ana Paula Morais Krelling.

1. Oceanografia Física. 2. Instabilidade Baroclínica. 3. Desprendimento de Vórtice. 4. Análise Energética. 5. Energia Potencial Disponível. I. Título.

CDD551.46

JONATHAN MONTEIRO DA SILVA

INSTABILIDADE BAROCLÍNICA COMO GATILHO PARA O DESPRENDIMENTO DE
VÓRTICES DA CNB: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho De Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Ana Paula Morais Krelling
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Joseci (vulgo Psit da Boléia) e
Luzirene.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai, que mesmo em outro plano existencial me concedeu inspiração para continuar.

À minha Mãe, que batalhou mais que qualquer um para que o filho terminasse a graduação.

À todos meus familiares, em especial à meu avô paterno, seu Messias, que assumiu o papel de Pai na ausência de seu filho.

À Prof^a. Dr^a. Ana Paula Morais Krelling por ser uma pessoa incrível e uma orientadora excepcional, mesmo em outro continente.

Aos professores participantes da banca examinadora Carlos Eduardo Peres Teixeira, Ana Paula Morais Krelling e Antônio Geraldo Ferreira por terem aceito o convite, disponibilizado seu tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Prof^o Dr^o Edmo José Dias Campos por ter disponibilizado os dados sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Oceanografia Física, Marina Sousa, Mateus Lobo Guerra, Tayanne Pires e Erik Solha, por compartilharem os momentos de aflições, desesperos e frustrações, mas também os de alegria, êxito e regozijo.

Aos amigos Nathaniel Gomes, Francisco Gustavo, Washington Francisco e Paulo Sávio, pelos momentos vividos e experiências compartilhadas ao longo desses quatro anos.

Ao companheiro e a companheira de viagem Antônio Derley e Mariany Sousa pela paciência para com a minha pessoa durante nosso embarque para a Ilha da Trindade.

E por último mas não menos importante, aos camaradas de copo por todas as cervejas compartilhadas na famigerada Barraca Satéhut, Andrezza Carvalho, Camila Dourado, Mariana Batista, Lorena Sampaio e outros que já foram citados anteriormente.

“The discovery of truth is prevented more effectively, not by the false appearance things present and which mislead into error, not directly by weakness of the reasoning powers, but by preconceived opinion, by prejudice.”

- Arthur Schopenhauer.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo verificar se a instabilidade baroclínica pode atuar como mecanismo para o desprendimento de vórtice da retroflexão superficial da Corrente Norte do Brasil (CNB). Para tal, foi realizada uma análise energética no campo horizontal de velocidades em um caso específico onde um vórtice de subsuperfície foi sobreposto por um vórtice de superfície ao longo de sua trajetória. Assim, foi calculado o perfil médio do gradiente de vorticidade potencial e o sentido do fluxo de energia potencial disponível (Evar). Com isso, foi possível observar que os valores positivos de Evar foram ficando progressivamente mais próximo da superfície conforme se avançava nos passos de tempo analisados. Isto sugere que há uma maior tendência na geração de vórtice em superfície ao longo do tempo. Deste modo, no último passo de tempo analisado constatou-se a presença de um vórtice em superfície, o que indica que, ao menos no caso estudado, a instabilidade baroclínica pode atuar como mecanismo para o desprendimento de vórtice na retroflexão superficial da CNB. Porém, enfatiza-se que o processo estudado possui certo grau de não-linearidade para ser explicado completamente apenas por esta dinâmica, de modo que outros processos, como ondas de Rossby na CCNE, variações na forçante do vento, instabilidade barotrópica, entre outros, também podem atuar no desprendimento de vórtices.

Palavras-chave: Oceanografia Física. Instabilidade Baroclínica. Desprendimento de Vórtice. Análise Energética. Energia Potencial Disponível.

ABSTRACT

This work aims to verify whether baroclinic instability might act as a mechanism for the eddies shedding off from the superficial North Brazil Current retroflexion (NBC). For this, we analyzed energy of the horizontal velocities field for a specific case where a subsurface eddy was overlaid by a surface eddy alongside its trajectory. Thus, the mean potential vorticity gradient profile and the available potential energy flux (Evar) direction were calculated. Hence, it was possible to observe that positive Evar values were progressively getting closer to the surface at each time step. This suggest that there is a bigger tendency on eddy formation at surface over time. In this way, at the last analyzed time step, it was noted the presence of a surface eddy, which indicates that, at least on this case, the baroclinic instability might act as a mechanism for pinching off eddies from the superficial NBC retroflexion. Although, we emphasize that the studied process has a certain non-linearity to be fully explained only by this dynamics, in order that other process such as Rossby waves at the NECC, barotropic instability, among other, may as well act shedding eddies.

Keywords: Physical Oceanography. Baroclinic Instability. Eddy Shedding. Energy Analysis.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Figura 1 – Modelo esquemático para a formação da CNB. Também é possível observar a retroflexão da CNB em aproximadamente 6-8°N..... 13
- Figura 2 – Domínio espacial da simulação. O retângulo de linha sólida representa a área total da simulação de alta resolução (1/12°). O retângulo pontilhado maior é referente a região do Atlântico Sul na qual foi realizada a validação da presente simulação por Castellanos et al. (2016) 16
- Figura 3 – Validação da Temperatura Média da Superfície do Mar, onde a) é a média anual de TSM do sensor MODIS-Aqua e b) é a média anual de TSM da simulação. A comparação foi feita para o ano de 2003 21
- Figura 4 – Validação da Salinidade Média da Superfície do Mar, onde a) é a média anual de SSM do sensor Aquarius e b) é a média anual de SSM da simulação. A média da figura a) refere-se ao ano de 2013, enquanto que b) é referente a 2004 21
- Figura 5 – Mapa do campo de velocidades horizontal mostrando a sazonalidade da retroflexão da CNB. As figuras a) e b) são referentes ao primeiro e segundo semestre do ano, respectivamente 22
- Figura 6 – Mapa com a trajetória do vórtice do estudo de caso escolhido. Os asteriscos vermelhos continuam sua trajetória para Noroeste, mas não aparecem no mapa pois estão sobrepostos pelos azuis 23
- Figura 7 – Perfil Médio do Gradiente de Vorticidade Potencial. Onde a) refere-se ao perfil de dq/ds ao longo de toda a coluna d'água e b) é um recorte de a) para uma análise pormenorizada dos primeiros 400 metros de profundidade 24
- Figura 8 – Diagnóstico para o primeiro passo de tempo analisado – 01/01/2002: mapa de a) campo horizontal de velocidades em subsuperfície, b) campo horizontal de velocidades em superfície, c) perfil de Evar em $^{\circ}\text{C}^2\text{s}^{-1} \times 10^{-7}$ e d) similar a c), mas mostrando uma área reduzida para análise detalhada 25
- Figura 9 – Semelhante à Figura 8, mas para o segundo passo de tempo analisado 26

Figura 10 – Semelhante à Figura 8, mas para o terceiro passo de tempo analisado	27
Figura 11 – Semelhante à Figura 8, mas para o quarto passo de tempo analisado	28
Figura 12 – Semelhante à Figura 8, mas para o quinto passo de tempo analisado	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCNE	Contra corrente Norte Equatorial
CNB	Corrente Norte do Brasil
CSE	Corrente Sul Equatorial
EPD	Energia Potencial Disponível
HYCOM	<i>Hybrid Coordinate Ocean Model</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
SSM _m	Salinidade Média da Superfície do Mar
TSM _m	Temperatura Média da Superfície do Mar

SUMÁRIO

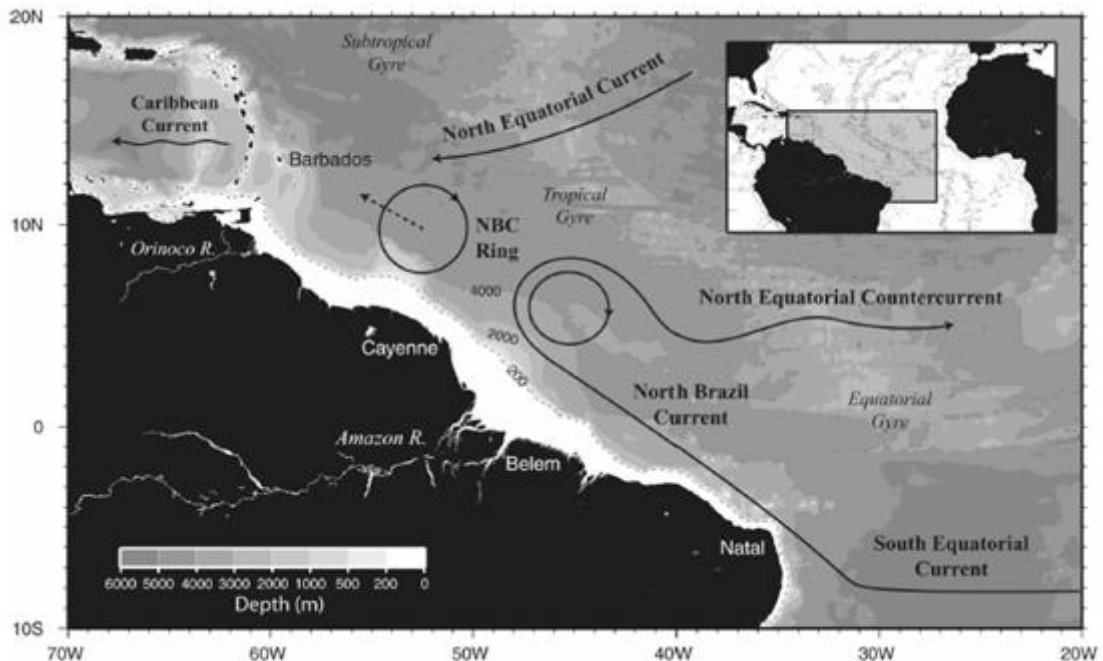
1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO GERAL	15
2.1	Objetivos específicos	15
3	METODOLOGIA	16
3.1	Descrição do modelo	16
3.2	Validação da simulação	17
3.2.1	<i>Base de dados</i>	17
3.2.1.1	<i>GIOVANNI</i>	17
3.2.1.2	<i>MODIS-Aqua</i>	17
3.2.1.3	<i>Aquarius</i>	18
3.3	Identificação e trajetória de vórtices	18
3.4	Instabilidade baroclínica e fluxos de energia	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1	Validação da simulação	20
4.2	Trajetória do vórtice do estudo de caso	22
4.3	Condições necessárias para instabilidade baroclínica	23
4.4	Fluxo de Energia Potencial Disponível	23
5	CONCLUSÃO	29
6	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

A Corrente Norte do Brasil (CNB) é uma corrente de contorno oeste, sendo considerada a principal componente da circulação superficial na parte oeste do Atlântico Tropical (FRATATONI e GLICKSON, 2001). De acordo com Johns et al. (1998), a importância da CNB para a circulação oceânica superficial no Atlântico dá-se por duas razões: primeiro, a CNB fecha o giro equatorial e alimenta um sistema de contracorrentes zonais; e segundo, a CNB faz parte da Célula de Revolvimento Meridional, transportando águas superficiais do Atlântico Sul para norte através do equador.

Quando a Corrente Sul Equatorial (CSE), que se move para oeste, encontra uma barreira continental em aproximadamente 10 °S, parte do seu fluxo segue para norte e, eventualmente, dá origem à CNB (Figura 1) (JOHNS ET AL., 1998).

Figura 1 – Modelo esquemático para a formação da CNB. Também é possível observar a retroflexão da CNB em aproximadamente 6-8°N.



Fonte: Fratantoni e Glickson (2001).

Conforme descrito por Moraes (2011), ao deslocar-se para norte a partir do equador, a vorticidade planetária da CNB aumenta, de modo que a conservação de vorticidade potencial é assegurada pela mudança na vorticidade relativa. Este processo obedece a seguinte equação:

$$Q = \frac{(f + \zeta)}{H} \quad (1)$$

onde Q é a vorticidade potencial, f é a vorticidade planetária, ζ é a vorticidade relativa e H é a espessura da coluna d'água. Assim, ao longo da trajetória da corrente em sentido norte, f aumenta, de modo que Q mantém-se constante por meio da mudança súbita no sentido da corrente para leste. Este processo é conhecido como retroflexão da Corrente Norte do Brasil, onde esta afasta-se do continente sul-americano em aproximadamente 6° - 8° N e curva-se sobre si própria, formando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) em superfície (FRATANTONI e GLICKSON, 2001) (Figura 1). Na profundidade da termoclina, a retroflexão da CNB ocorre próximo ao equador, alimentando a Subcorrente Equatorial (SCE) (JOHNS ET AL., 1998). Isso ocorre devido a menor inércia da CNB nessa região do que na superfície (MORAES, 2011).

Associado à retroflexão da CNB, tanto em superfície quanto em subsuperfície, há o desprendimento de vórtices que se deslocam para noroeste ao longo da costa brasileira. Alguns estudos fazem uso de análise energética para investigar a atividade de mesoescala e o desprendimento de vórtice. Por exemplo, Mata et al. (2006), analisando as transferências de energia entre o fluxo médio e a perturbação na Corrente Leste Australiana, sugerem que instabilidades barotrópicas (e baroclínicas, em menor medida) são responsáveis pelo desenvolvimento de perturbações que levam a um evento de desprendimento.

Outros trabalhos, como o de Krelling (2010), sugerem que vórtices subsuperficiais, da retroflexão CNB-SCE, podem interferir no desprendimento de vórtices em superfície, na retroflexão CNB-CCNE. Além disso, da Silveira et al. (2000) indicam que a ocorrência de interações baroclínicas entre a superfície e as camadas intermediárias podem fazer com que as anomalias de vorticidade potencial em subsuperfície induzam o crescimento de vórtices em superfície, e vice-versa.

Assim, o presente trabalho propõe-se a investigar a interação, no que diz respeito à transferência de energia, entre vórtices em diferentes níveis da retroflexão da CNB. Com isto, espera-se verificar se um vórtice de subsuperfície pode influenciar no desprendimento de um vórtice de superfície, como sugerido por Krelling (2010). Para tal, será utilizada a metodologia descrita por Mano et al. (2009).

2 OBJETIVO GERAL

- Verificar se a instabilidade baroclínica pode atuar como mecanismo que contribui para o desprendimento de vórtices na retroflexão superficial da Corrente Norte do Brasil.

2.1 Objetivos específicos

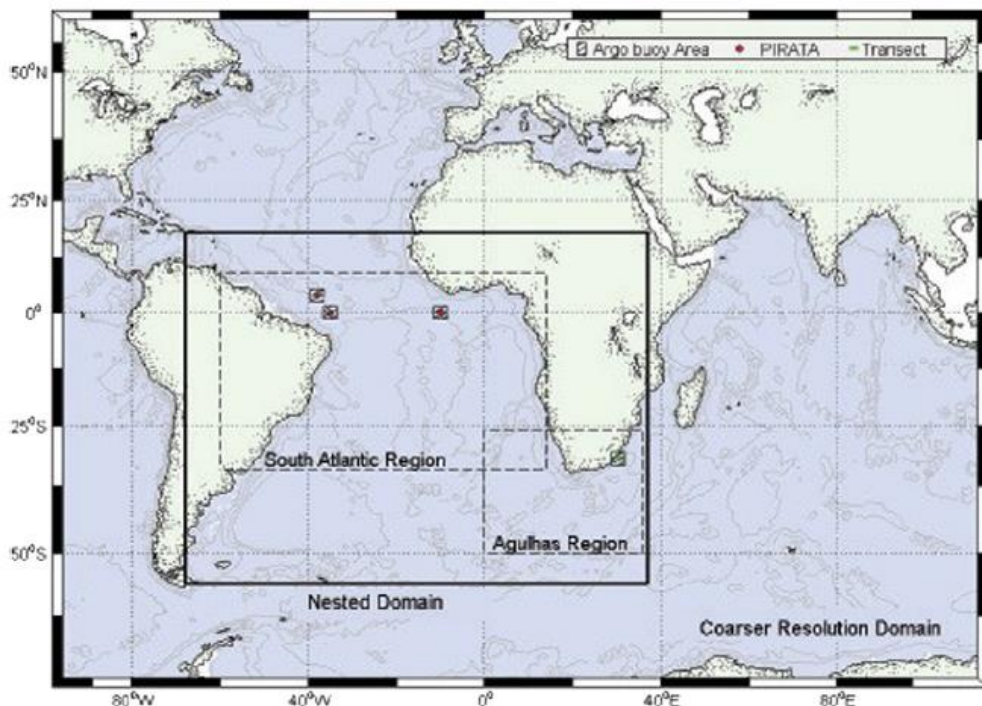
- Validar os resultados de uma simulação numérica para a região oeste do Atlântico Tropical;
- Quantificar o número de vórtices em campos de velocidade (u e v) da retroflexão da CNB nos níveis da CCNE e da SCE;
- Realizar uma análise energética no campo de correntes da região de desprendimento de vórtices da CNB.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do modelo

Neste trabalho foram utilizados dados de temperatura, salinidade e velocidades zonal e meridional provenientes de uma simulação do modelo de alta resolução *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), descrita anteriormente por Castellanos et al. (2016, 2017). O modelo foi rodado para o período de 1960 a 2010, com resolução horizontal de $1/4^\circ$, sendo forçado por produtos do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e compreendendo ao domínio de 70°S – 60°N e 98°O – 114°L . A presente implementação do modelo trata-se de uma simulação de alta resolução com uma abordagem de “aninhamento” (ver Castellanos et al., 2016) dentro da simulação semiglobal de menor resolução ($1/4^\circ$), com os resultados disponibilizados a cada 6 dias. A simulação abrange ao domínio de 55°S – 18°N e 68°O – 37°L (Figura 2), com resolução horizontal de $1/12^\circ$ e 22 camadas verticais híbridas, utilizando a parametrização *k-profile* para representar a evolução da camada de mistura.

Figura 2 – Domínio espacial da simulação. O retângulo de linha sólida representa a área total da simulação de alta resolução ($1/12^\circ$). O retângulo pontilhado maior é referente a região do Atlântico Sul na qual foi realizada a validação da presente simulação por Castellanos et al. (2016).



Fonte: Castellanos et al. (2016).

3.2 Validação da simulação

Primeiro, foi realizada a validação dessa simulação para o domínio 5°S-15°N e 60°-35°O e entre os anos 2000 e 2005, avaliando-se os resultados de temperatura média da superfície do mar (TSM_m), salinidade média da superfície do mar (SSM_m), número de vórtices desprendidos anualmente e sazonalidade da retroflexão. A TSM_m e a SSM_m foram comparadas com dados do GIOVANNI por meio de médias anuais. Para a validação de TSM_m comparou-se os resultados da simulação com dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Já para a validação de SSM_m , os resultados foram comparados com dados do sensor Aquarius. Em relação ao número de vórtices desprendidos e a sazonalidade da retroflexão, estes foram validados por meio de comparação com a literatura.

3.2.1 Base de dados

3.2.1.1 GIOVANNI

A plataforma GIOVANNI é um ambiente online para visualização e análise de diversos tipos de dados, como temperatura e salinidade da superfície do mar, por exemplo. Trata-se de uma ferramenta mantida e desenvolvida pelo *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* da NASA. Por meio desta ferramenta, dados de vários instrumentos em satélites da NASA podem ser facilmente visualizados em diferentes formatos, incluindo plots de áreas, séries temporais, médias zonais e meridionais e perfis verticais, entre outros, sem as dificuldades dos métodos tradicionais de aquisição e análise de dados.

3.2.1.2 MODIS-Aqua

O MODIS-Aqua é um instrumento chave a bordo do satélite Aqua (EOS PM), visualizando toda a superfície terrestre duas vezes ao dia. O sensor adquire dados em 36 bandas espectrais, entre 0,405 e 14,385 μm , e em três resoluções espaciais, 250m, 500m e 1000m. Os diversos produtos derivados do MODIS-Aqua melhoram o entendimento de processos e da dinâmica global dos oceanos em diferentes escalas.

3.2.1.3 *Aquarius*

O sensor *Aquarius* trata-se de uma colaboração entre a NASA e a Agência Espacial da Argentina para medir a salinidade da superfície do mar global. Este instrumento contém três radiômetros e um dispersômetro, onde os dados coletados pelos radiômetros são utilizados para obter dados de salinidade e são corrigidos para a rugosidade superficial usando dados do dispersômetro.

3.3 Identificação e trajetória de vórtices

Após a validação da simulação, foram identificados visualmente vórtices nos níveis da CCNE e da SCE por meio de mapas dos campos de velocidade horizontal. A localização destes vórtices foi acompanhada a cada passo de tempo. Em seguida, as trajetórias dos vórtices identificados foram determinadas para verificar a existência de casos em que os vórtices de subsuperfície eram aparentemente sobrepostos pelos de superfície. Para tal, foram feitos gráficos de tempo vs. latitude, tempo vs. longitude e longitude vs. latitude para verificar por quanto tempo e por qual distância os vórtices de subsuperfície deslocam-se antes de serem sobrepostos pelos vórtices de superfície.

A partir das trajetórias, foi possível observar um caso específico de desprendimento de um vórtice da retroflexão CNB-SCE no qual, à medida que este deslocava-se para Noroeste, a retroflexão superficial da CNB foi ficando mais definida. Em seguida, um vórtice de superfície desprendeu-se em um local que coincidia com a localização do vórtice de subsuperfície. Assim, foram gerados cubos de dados para cada passo de tempo deste caso específico baseado na localização do vórtice. Estes cubos possuíam os resultados da simulação somente na região próxima ao vórtice que foi identificado neste estudo de caso, a cada passo de tempo, para evitar a influência de outros processos que pudessem estar acontecendo na região. Destaca-se que ocorreram outros casos em que um vórtice de subsuperfície foi sobreposto por um vórtice de superfície, porém, foi escolhido apenas este estudo de caso para uma análise pormenorizada.

3.4 Instabilidade baroclínica e fluxos de energia

Após a definição do estudo de caso, foi aplicada a metodologia descrita por Mano et al. (2009) com o intuito de verificar se a instabilidade baroclínica pode atuar como um

mecanismo para o desprendimento de vórtice da retroflexão superficial da CNB. Deste modo, foi analisado o perfil médio do gradiente de vorticidade potencial $\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}\right)$, com foco no cisalhamento vertical (Equação 2).

$$\left.\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}\right|_{BCL} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \bar{v}_L}{\partial z} \right), \quad (2)$$

onde q é a vorticidade potencial, s é a normal à corrente, f é o parâmetro de Coriolis, N^2 é o quadrado da frequência de Brunt-Väisälä e v_L é a corrente longitudinal. O perfil de $\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}$ foi calculado ao longo da CNB, em aproximadamente 45°O-2°N, por meio do campo médio entre os anos 2000-2005. O objetivo desta etapa foi examinar se a CNB possui as condições necessárias para instabilidade, por meio da análise da estrutura vertical de seu perfil médio.

Uma vez verificadas as condições necessárias para o desenvolvimento de instabilidade baroclínica na CNB, foi calculado o fluxo de Energia Potencial Disponível (EPD) na área na qual o vórtice estava localizado, para cada passo de tempo, de acordo com a Equação 3.

$$\left[-u'T' \frac{\partial \bar{T}_y}{\partial x} - v'T' \frac{\partial \bar{T}_x}{\partial y} \right] = E \text{ var}, \quad (3)$$

onde E é a EPD da perturbação, T é a temperatura potencial e u e v são a velocidade zonal e meridional, respectivamente; a aspa simples representa anomalia e a barra indica a média em relação ao eixos (x ou y).

A expressão entre colchetes, denominada Evar, indica o sentido do fluxo de EPD. Regiões onde Evar é positivo indicam fluxo de EPD da corrente para a perturbação, o que se traduz como uma maior tendência para a formação de vórtices; enquanto que em regiões onde Evar é negativo há fluxo da perturbação para a corrente, com conseqüente estabilização desta. Desse modo, os sentidos dos fluxos de EPD foram analisados e associados com a ocorrência de vórtices no campo horizontal de velocidades, uma vez que o crescimento e a formação de vórtices dependem do fluxo de EPD da corrente para a perturbação (Mano et al., 2009). Assim, procurou-se por casos nos quais a ocorrência de vórtice nos diferentes níveis da CNB coincidiam com regiões onde Evar é positivo.

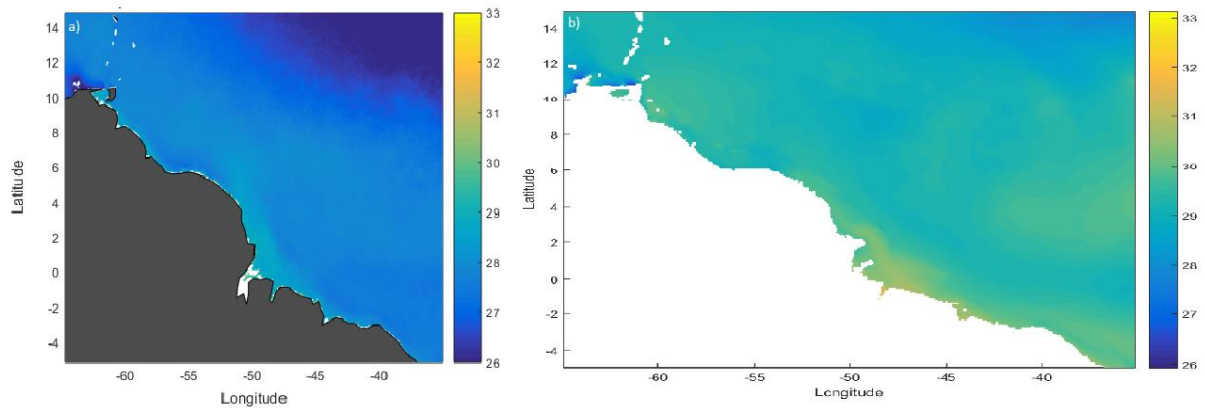
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação da simulação

Os resultados da simulação foram validados para a região da CNB, compreendendo ao domínio de 5°S-15°N e 60°-35°W. Foram analisados os dados de TSM_m, SSM_m, número de vórtices desprendidos anualmente e sazonalidade da retroflexão da CNB para os anos de 2000 a 2005. Os dados de TSM_m e SSM_m foram comparados com a base de dados do GIOVANNI por meio de médias anuais. As comparações entre os resultados de TSM_m mostraram valores de temperatura levemente maiores nos resultados da simulação, porém, o padrão de distribuição de temperatura é similar entre as duas figuras, com maiores valores de temperatura próximo à costa e diminuindo em direção ao oceano aberto (Figura 3). A figura 3 mostra apenas a comparação para o ano de 2003, mas a comparação entre as médias anuais foi razoável para todos os anos analisados. Já em relação à SSM_m, é possível notar um padrão de distribuição de salinidade similar entre os dois resultados, sendo possível visualizar a grande pluma de água doce proveniente do rio Amazonas (Figura 4). No entanto, a pluma do rio Amazonas não é tão bem representada na simulação (Figura 4b), ficando mais contida próximo à costa. A comparação de SSM_m foi realizada entre diferentes anos. Isto ocorre, pois, o sensor Aquarius não possui dados de salinidade para o período de estudo do presente trabalho. Entretanto, destaca-se que, assim como para a temperatura, a comparação entre as médias anuais de salinidade foi razoável para todos os anos analisados. Além disso, é importante ressaltar que os resultados desta simulação foram validados satisfatoriamente por Castellanos et al. (2016) para a região do Atlântico Sul, representada na figura 2 pela área delimitada pelo maior retângulo de linha pontilhada. Assim, optou-se por uma validação de TSM_m e SSM_m mais breve, com um foco maior na parte da validação do campo de correntes, principalmente no que se refere à contabilização de vórtices e sazonalidade da retroflexão.

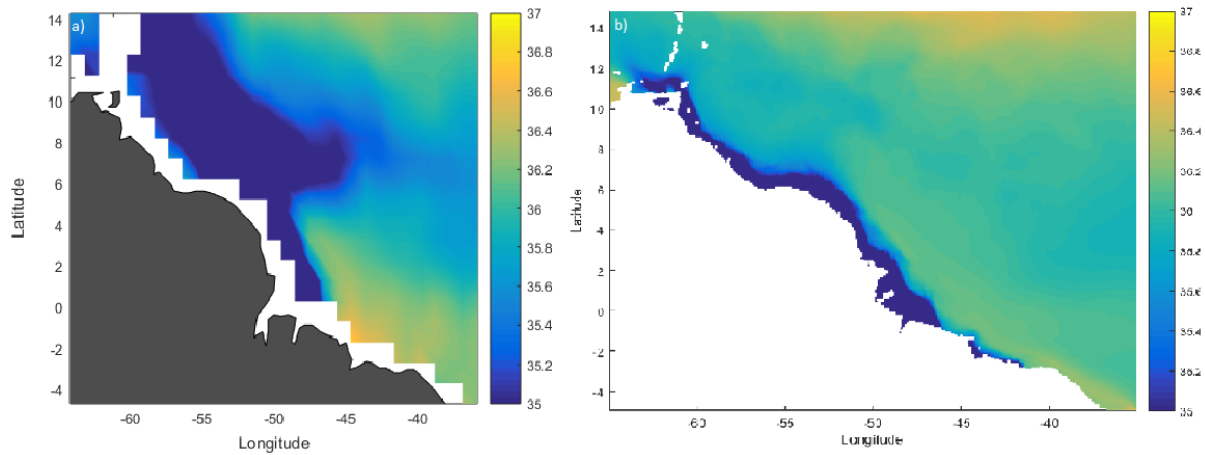
Com relação ao número de vórtices desprendidos, durante a série temporal foram contabilizados um total de 36 vórtices superficiais, uma média de 6 vórtices por ano. Tal valor está de acordo com o encontrado por Goni e Johns (2001), que identificaram 34 vórtices entre 1992 e 1998 por meio de altimetria TOPEX/POSEIDON, uma média de mais de 5 vórtices por ano. Como mostra a Figura 5, a sazonalidade da retroflexão também está de acordo com a literatura, sendo mais intensa durante o segundo semestre do ano (Figura 5b) e mais fraca durante o primeiro semestre (Figura 5a) (Johns et al, 1990; 1998).

Figura 3 – Validação da Temperatura Média da Superfície do Mar, onde a) é a média anual de TSM do sensor MODIS-Aqua e b) é a média anual de TSM da simulação. A comparação foi feita para o ano de 2003.



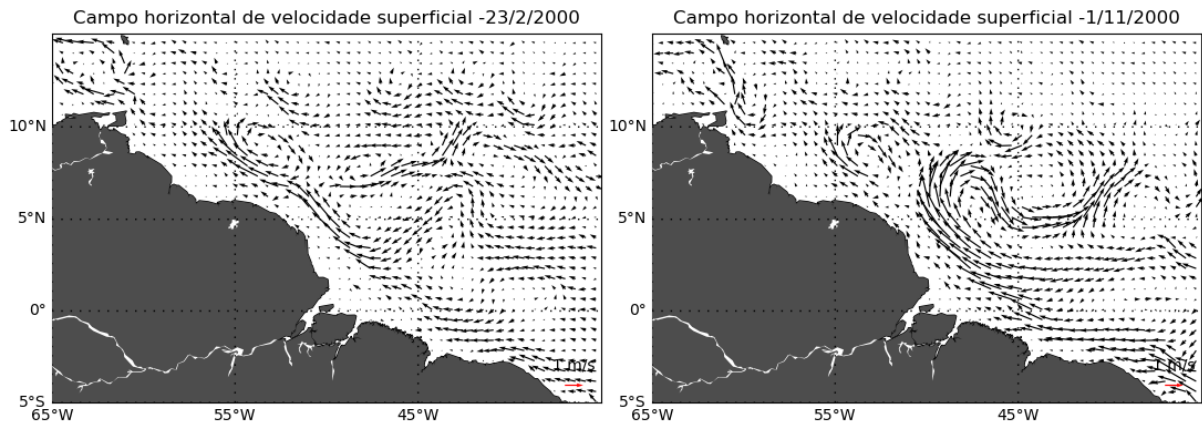
Fonte: O autor.

Figura 4 – Validação da Salinidade Média da Superfície do Mar, onde a) é a média anual de SSM do sensor Aquarius e b) é a média anual de SSM da simulação. A média da figura a) refere-se ao ano de 2013, enquanto que b) é referente a 2004.



Fonte: O autor.

Figura 5 – Mapa do campo de velocidades horizontal mostrando a sazonalidade da retroflexão da CNB. As figuras a) e b) são referentes ao primeiro e segundo semestre do ano, respectivamente.

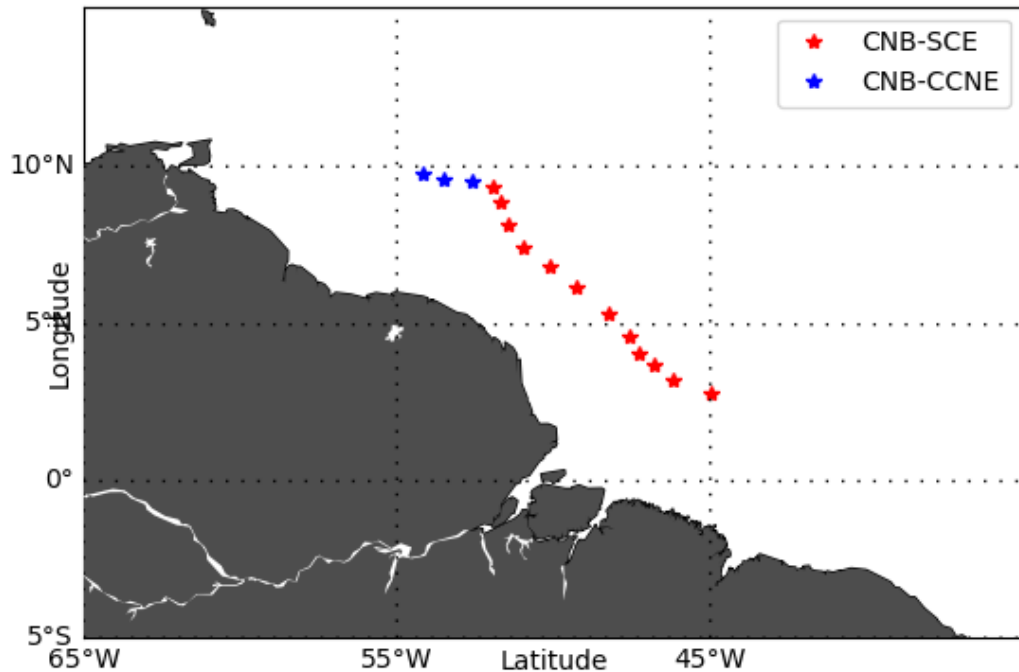


Fonte: O autor.

4.2 Trajetória do vórtice do estudo de caso

Quanto aos vórtices de subsuperfície e superfície do estudo de caso, o primeiro é mais claro no campo de velocidades a 160 metros de profundidade, enquanto que o último fica mais visível por volta de 30 metros. O vórtice subsuperficial formou-se em cerca de 2.8°N-44°O, no dia 08/12/2001, e deslocou-se por 60 dias até 8.9°N-51.8°W, antes de ser sobreposto pelo vórtice da retroflexão CNB-CCNE. Após este período, o vórtice originado na retroflexão CNB-SCE continuou deslocando-se para Noroeste até desaparecer. Já em superfície, o vórtice foi formado em cerca de 9.4°N-52°O, no dia 12/02/2002, e deslocou-se por 18 dias até 9.9°N-54.2°W, onde foi se dissipando até desaparecer. Assim, o vórtice da retroflexão CNB-SCE levou cerca de 66 dias até ser aproximadamente sobreposto pelo vórtice da retroflexão CNB-CCNE (Figura 6). Deste modo, os resultados sugerem que o desprendimento do vórtice da retroflexão CNB-CCNE possa ter sido influenciado pelo vórtice de subsuperfície.

Figura 6 – Mapa com a trajetória do vórtice do estudo de caso escolhido. Os asteriscos vermelhos continuam sua trajetória para Noroeste, mas não aparecem no mapa pois estão sobrepostos pelos azuis.

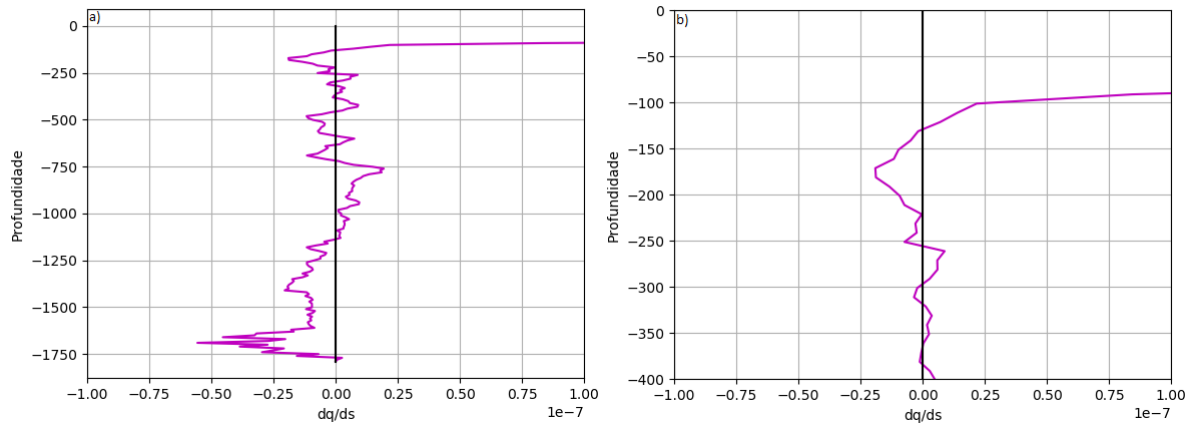


Fonte: O autor.

4.3 Condições necessárias para instabilidade baroclínica

De acordo com Johns (1988), as condições gerais para instabilidade baroclínica estão satisfeitas se o perfil de $\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}$ possui tanto valores positivos quanto negativos. Portanto, a análise do perfil médio do gradiente de vorticidade potencial mostra que a CNB possui as condições necessárias para o desenvolvimento de instabilidade baroclínica, com valores mínimos locais em torno de 170-180m e máximos locais por volta de 270-280m (Figura 7). Além disso, a profundidade de ocorrência do vórtice subsuperficial (~160 m) está dentro do nível no qual $\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}$ atinge o menor valor (negativo) do perfil (Figura 7). O mesmo padrão foi encontrado para a Corrente do Brasil, em 23°S, por Mano et al. (2009).

Figura 7 – Perfil Médio do Gradiente de Vorticidade Potencial. Onde a) refere-se ao perfil de dq/ds ao longo de toda a coluna d'água e b) é um recorte de a) para uma análise pormenorizada dos primeiros 400 metros de profundidade.

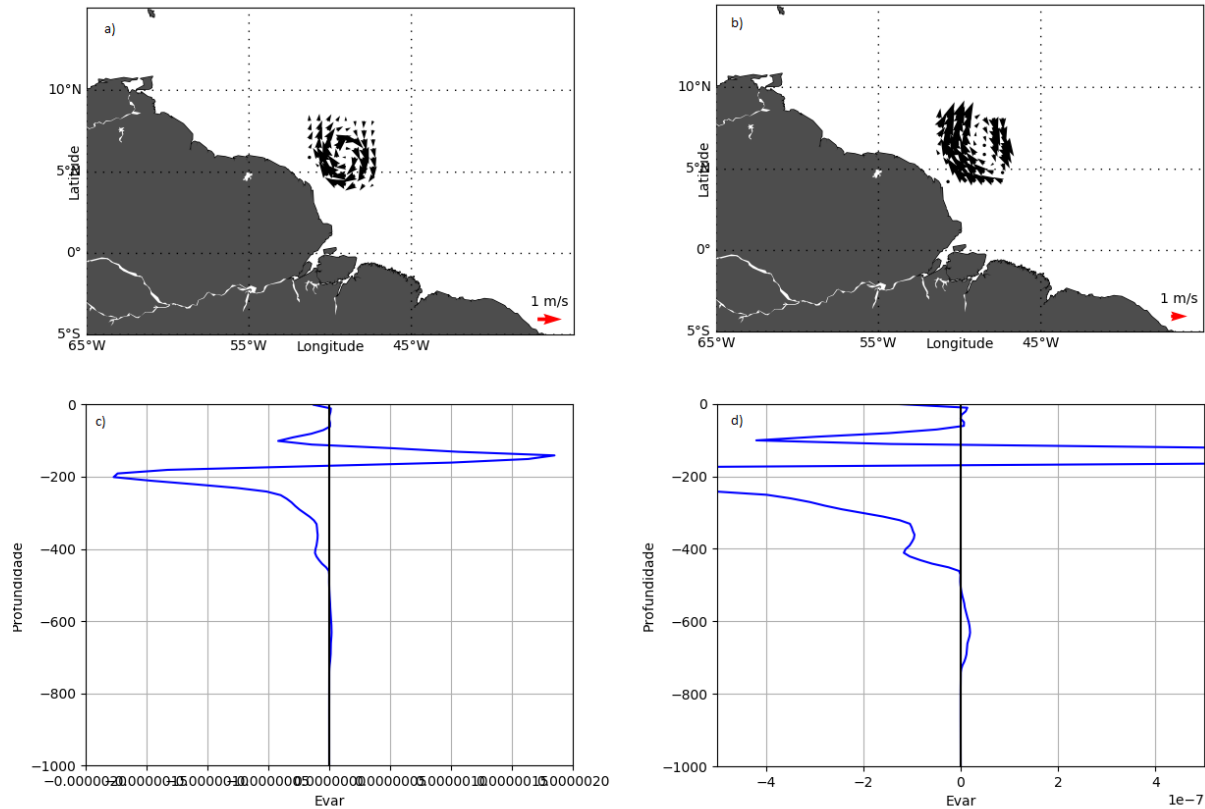


Fonte: O autor.

4.4 Fluxo de Energia Potencial Disponível

Em relação ao fluxo de EPD, foram selecionados 5 passos de tempo para uma análise mais detalhada. Assim, para o primeiro passo de tempo analisado (Figura 8), referente ao dia 01/01/2002, Evar possui valores positivos entre 100-180m (Figura 8c), o que indica energia partindo do fluxo médio para a perturbação, estando associado com instabilização da corrente. Essa atividade pode ser confirmada analisando-se o campo horizontal de velocidades, que mostra a presença de um vórtice em subsuperfície (Figura 8a), ao passo que em superfície não há vórtice (Figura b), embora possa ser visualizada uma porção da retroflexão CNB-CCNE.

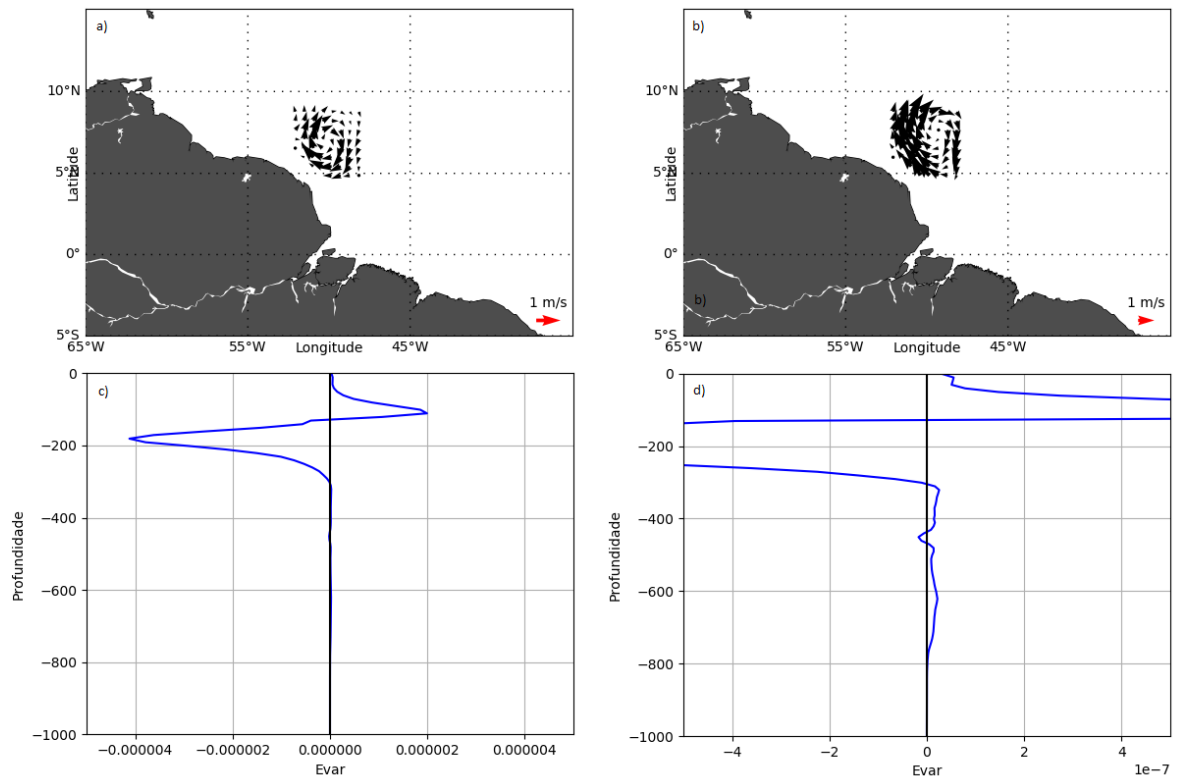
Figura 8 – Diagnóstico para o primeiro passo de tempo analisado – 01/01/2002: mapa de a) campo horizontal de velocidades em subsuperfície (aproximadamente 160 m), b) campo horizontal de velocidades em superfície, c) perfil de Evar em $^{\circ}\text{C}^2\text{s}^{-1} \times 10^{-7}$ e d) similar a c), mas mostrando uma área reduzida para análise detalhada.



Fonte: O autor.

No segundo passo de tempo estudado, relativo ao dia 07/01/2002, Evar é positivo entre a superfície e cerca de 150 m. Aqui, continua havendo presença de vórtice em subsuperfície (Figura 9a), mas ainda sem sinal de atividade de vórtice em superfície (Figura 9b). Porém, a profundidade na qual há cruzamento de zeros fica mais próxima da superfície do que no tempo anterior. Isto indica que o fluxo de energia do fluxo médio para a perturbação está chegando mais próximo à superfície, causando uma desestabilização da corrente na região mais superficial do que no tempo anterior.

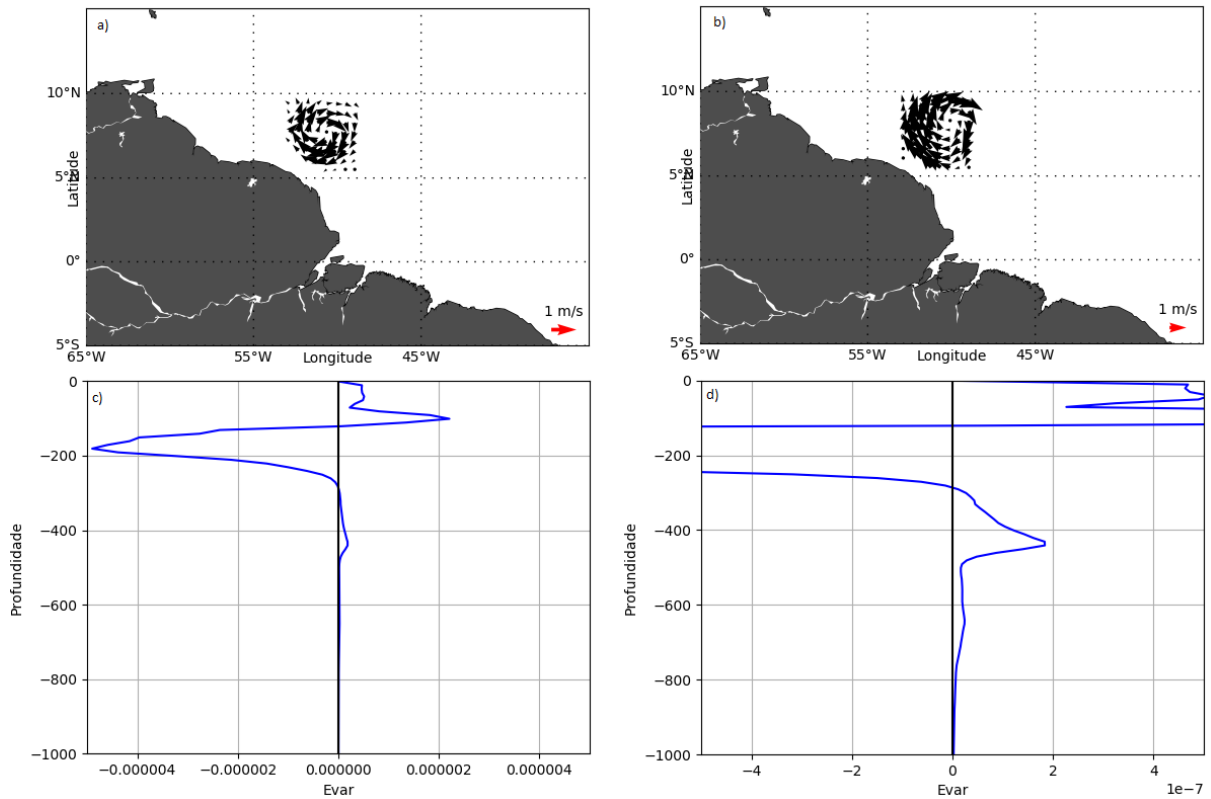
Figura 9 – Semelhante à Figura 8, mas para o segundo passo de tempo analisado – 07/01/2002.



Fonte: O autor.

No passo de tempo três, 13/01/2002, Evar é positivo entre 10-100m. A retroflexão superficial da CNB começa a ficar mais visível, porém, ainda não há ocorrência de vórtice em superfície (Figura 10).

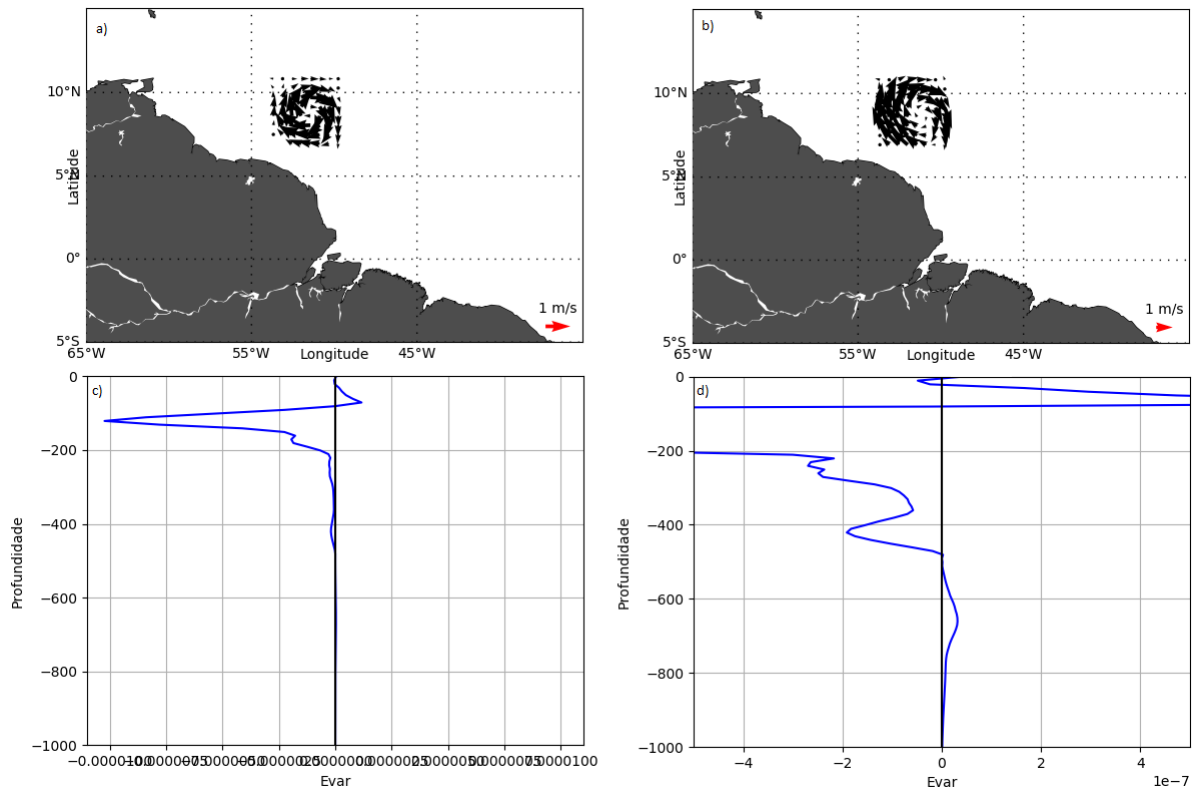
Figura 10 – Semelhante à Figura 8, mas para o terceiro passo de tempo analisado – 13/01/2002.



Fonte: O autor.

No penúltimo passo de tempo analisado, 25/01/2002, Evar é positivo entre 15-70m. Em superfície, começa a surgir algum sinal de atividade de vórtice (Figura 11b) e em subsuperfície continua ocorrendo sinal de vórtice.

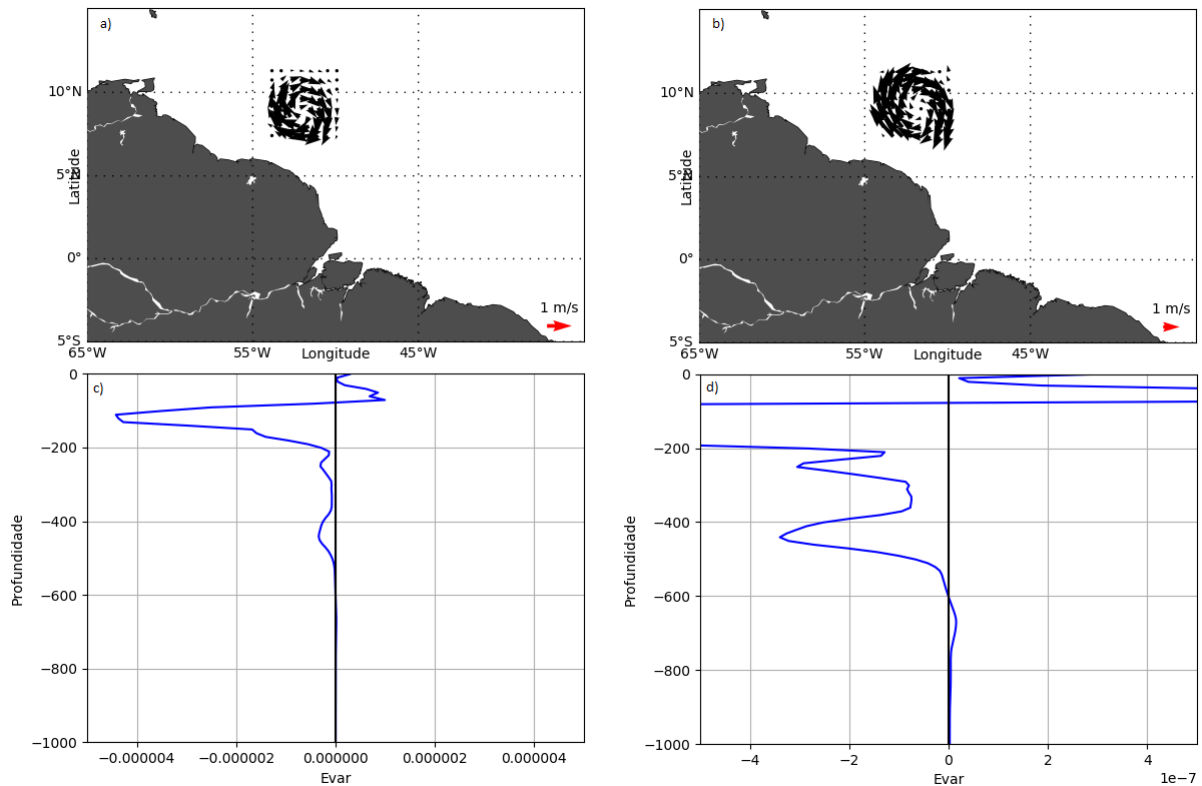
Figura 11 – Semelhante à Figura 8, mas para o quarto passo de tempo analisado – 25/01/2002.



Fonte: O autor.

Finalmente, no último passo de tempo, 31/01/2002, Evar é positivo entre a superfície e cerca de 50 m (Figura 12b). Há presença de vórtice tanto em subsuperfície quanto em superfície. É interessante observar que o vórtice de superfície possui maior dimensões que o de subsuperfície.

Figura 12 – Semelhante à Figura 8, mas para o quinto passo de tempo analisado – 31/01/2002.



Fonte: O autor.

É importante notar que os valores positivos de Evar observados vão ficando progressivamente mais próximo da superfície conforme se avança nos passos de tempo analisados. Deste modo, os resultados sugerem uma sequência de eventos similares à encontrada por Mano et al. (2009): fluxo de EPD da CNB para a perturbação na profundidade onde $\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}$ é negativo; formação e crescimento de vórtice associado a valores positivos de Evar; e fluxo de EPD cada vez mais próximo à superfície. Assim, os dados aqui apresentados sugerem que ao menos no caso estudado, a instabilidade baroclínica atua como gatilho para o desprendimento de vórtices da retroflexão superficial da CNB.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo identificar o mecanismo responsável pelo desprendimento de um vórtice da retroflexão superficial da CNB que ocorreu de dezembro de 2001 a fevereiro de 2002. Para tal, foi realizada uma análise energética do caso em questão, conforme metodologia descrita por Mano et al. (2009). Assim, calculou-se o perfil médio do gradiente de vorticidade potencial $\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial s}\right)$ e o sentido do fluxo de energia potencial disponível (Evar).

Os resultados mostraram um progressivo avanço nos valores positivos de Evar na porção da coluna d'água mais próxima da superfície, o que significa que ao longo do tempo há uma maior tendência para a geração de vórtice superficiais. Assim, no último passo de tempo analisado foi possível observar o aparecimento de um vórtice em superfície. A partir deste passo de tempo não foi possível prosseguir com a análise, pois outros processos começaram a tornar-se mais significantes, influenciando na dinâmica local. Desse modo, o presente estudo sugere que a instabilidade baroclínica pode atuar como mecanismo para o desprendimento de vórtices na retroflexão superficial da CNB.

É importante salientar que nesse estudo foi considerada a dinâmica quase-geostrófica como adequada para a região. A referida dinâmica, apesar de não ser ideal em regiões próximas ao equador, foi mostrado por Silveira et al. (2000) que pode ser aplicada neste caso de forma satisfatória. No entanto, enfatiza-se que o processo estudado possui certo grau de não-linearidade para ser explicado em sua totalidade apenas pela dinâmica quase-geostrófica. A geração e crescimento de meandros e o desprendimento e translação de vórtices podem ter participação também de outros processos, como ondas de Rossby na CCNE, variações na forçante do vento na região (Ma, 1996), instabilidade barotrópica, entre outros. Porém, no caso estudado, a transferência de energia identificada indica que o processo preponderante, ao menos ao longo dos passos de tempo analisados, é a instabilidade baroclínica, assim como verificado em outra ocasião e a partir de um diferente conjunto de dados por Silveira et al. (2000).

REFERÊNCIAS

- CASTELLANOS, P.; CAMPOS, E. J. D.; GIDDY, I.; SANTIS, W.. Inter-comparison studies between high-resolution HYCOM simulation and observational data: The South Atlantic and the Agulhas leakage system. *Journal Of Marine Systems*. São Paulo, p. 76-88. mar. 2016.
- CASTELLANOS, P.; CAMPOS, E. J. D.; PIERA, J.; SATO, O. T.; SILVA DIAS, M. A. F.. Impacts of Agulhas Leakage on the Tropical Atlantic Western Boundary Systems. *Journal Of Climate*. São Paulo, p. 6645-6659. set. 2017.
- da SILVEIRA, Ilson C. A.; BROWN, Wendell S.; FLIERL, Gleen R.. Dynamics of the North Brazil Current retroflexion region from the Western Tropical Atlantic Experiment observations. *Journal Of Geophysical Research*. São Paulo, p. 559- 583. dez. 2000.
- FRATANTONI, David M.; GLICKSON, Deborah A.. North Brazil Current Ring Generation and Evolution Observed with SeaWiFS. *Journal Of Physical Oceanography*. Massachusetts, p. 1058-1074. ago. 2001.
- GONI, Gustavo J.; JOHNS, William E.. A Census of North Brazil Current Rings Observed from TOPEX/POSEIDON Altimetry: 1992-1998. *Geophysical Research Letters*. Florida, p. 1-4. jan. 2001
- JOCHUM, Markus; MALANOTTE-RIZZOLI, Paola. On the generation of North Brazil Current rings. *Journal Of Marine Research*. Massachusetts, p. 147-173. mar. 2003.
- JOHNS, William E.; LEE, Thomas N.; SCHOTT, Friedrich A.; ZANTOPP, Rainer J.; EVANS, Robert H.. The North Brazil Current Retroflexion: Seasonal Structure and Eddy Variability. *Journal Of Geophysical Research*,. Florida, p. 22.103-22.120. dez. 1990.
- JOHNS, W. E.; LEE, T. N.; BEARDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; CASTRO, B.. Annual Cycle and Variability of the North Brazil Current. *Journal Of Physical Oceanography*. Florida, p. 103-128. jan. 1998.
- JOHNS, William E.. ONE-DIMENSIONAL BAROCLINICALLY UNSTABLE WAVES ON THE GULF STREAM POTENTIAL VORTICITY GRADIENT NEAR CAPE HATTERAS. *Dynamics Of Atmospheres And Oceans*. Amsterdam, p. 323-350. ago. 1987.
- MA, Hong. The dynamics of North Brazil Current retroflexion eddies. *Journal Of Marine Research*. Nova York, p. 35-53. set. 1995.

MANO, Manlio F.; PAIVA, Afonso M.; JR, Audalio R. Torres; COUTINHO, Alvaro L. G. A.. Energy Flux to a Cyclonic Eddy off Cabo Frio, Brazil. *Journal Of Physical Oceanography*. Rio de Janeiro, p. 2999-3010. nov. 2009.

MATA, Mauricio M.; WIJFFELS, Susan E.; CHURCH, John A.; TOMCZAK, Matthias. Eddy shedding and energy conversions in the East Australian Current. *Journal Of Geophysical Research*. Rio Grande, p. 1-18. set. 2006.

MORAES, Soyla Olenka Correia de. CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE NORTE DO BRASIL NA REGIÃO DA RETROFLEXÃO. 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. 41

RICHARDSON, P. L.; HUFFORD G. E.; LIMBURNER, R.; BROWN, W. S.. North Brazil Current retroflection eddies. *Journal of Geophysical Research*. Massachusetts, p. 5081-5093. mar. 1994.