



ESTUDO DOS EFEITOS DA CORRENTE DO BRASIL NAS ONDAS DA REGIÃO SUL-SUDESTE

Adriano Wiermann Barroso

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Nelson Violante Carvalho

Rio de Janeiro
Março de 2019

ESTUDO DOS EFEITOS DA CORRENTE DO BRASIL NAS ONDAS DA
REGIÃO SUL-SUDESTE

Adriano Wiermann Barroso

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Claudio Neves, D.Sc.

Phd. Pedro Veras Guimaraes, D.Sc.

Phd. Pedro Veras Guimaraes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2019

Wiermann Barroso, Adriano

Estudo dos efeitos da corrente do Brasil nas ondas da região sul-sudeste/Adriano Wiermann Barroso. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XI, 16 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Nelson Violante Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 14 – 15.

1. Previsão de ondas. 2. Interação onda-corrente.
3. Corrente do Brasil. I. Violante Carvalho, Nelson.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*A alguém cujo valor é digno
desta dedicatória.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DOS EFEITOS DA CORRENTE DO BRASIL NAS ONDAS DA REGIÃO SUL-SUDESTE

Adriano Wiermann Barroso

Março/2019

Orientador: Nelson Violante Carvalho

Programa: Engenharia Oceânica

Os efeitos de correntes superficiais em ondas são amplamente conhecidos, quando estas estão sujeitas a um campo de correntes existe uma troca de energia entre a onda e a corrente. Em casos de alto cisalhamento horizontal do campo de corrente é mais notável estes efeitos. O presente trabalho tem como principal objetivo analisar o efeito da Corrente do Brasil no campo de ondas na região sul-sudeste do Brasil. Para isso foram escolhidos alguns eventos para estudo de caso em que a Corrente do Brasil apresentava estruturas de mesoescala (meandros e vórtices). Estes eventos foram simulados através de modelagem numérica com o modelo de ondas Wave Watch III com o campo de correntes provenientes do modelo Hycom. Foram empregadas simulações com e sem o campo de correntes afim de verificar os impactos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF BRAZIL CURRENT EFFECTS ON OCEAN WAVES WITHIN
SOUTHEASTERN REGION

Adriano Wiermann Barroso

March/2019

Advisor: Nelson Violante Carvalho

Department: Ocean Engineering

Abstract here...

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas	xi
1 Introdução	1
2 Interação Onda-Corrente	4
2.1 Descrição das Ondas	4
3 Revisão Bibliográfica	10
4 Método Proposto	11
5 Resultados e Discussões	12
6 Conclusões	13
Referências Bibliográficas	14
A Algumas Demonstrações	16

Lista de Figuras

1.1	Temperatura superficial do oceano imagem de satélite (AVHRR-NOAA) demonstrando ressurgência em Cabo Frio/RJ (cores azuis) e também um vórtice quente da CB. Imagem retirada do artigo de RODRIGUES e LORENZZETTI [1]	2
1.2	Ilustração da bimodalidade que ocorre na região.	3
1.3	Campo de corrente superficial do modelo Hycom para a data de 01/01/2013. Pontos em preto representam a bóias do programa PN-BOIA	3
2.1	Representação teórica de uma onda.	4
2.2	Imagem retirada do livro de HOLTHUIJSEN [2]. Duas ondas harmônicas com frequências diferentes (ou número de onda) se somam criando grupos de ondas.	6
2.3	Reconstrução de um dado estado de mar a partir da superposição de várias ondas cada uma com seu comprimento e direção próprias. Imagem retirada do livro ARDHUIN e FILIPOT [3].	7
2.4	Imagem retirada do artigo citado. Impacto da corrente do Golfo nas ondas do tipo swell em 18 de Setembro de 2014, 6:00 UTC. Mapas de (a) altura de onda modelada com corrente, (b) altura de onda do modelo sem corrente, (c) corrente de alta resolução do ROMS (d) mesma corrente filtrada. (e,f) diferença na altura de onda para (e) caso com corrente de alta resolução menos caso sem corrente e (f) caso com corrente de alta resolução menos caso com corrente filtrada. A área pontilhada refere-se a região usada para análise espectral. . . .	9

Lista de Tabelas

3.1	Exemplos de citações utilizando o comando padrão <code>\cite</code> do <code>L^AT_EX</code> e o comando <code>\citet</code> , fornecido pelo pacote <code>natbib</code>	10
-----	---	----

Lista de Abreviaturas

AAS	Anticiclone do Atlântico Sul, p. 2
CB	Corrente do Brasil, p. 1

Capítulo 1

Introdução

A análise e modelagem numérica de correntes oceânicas e ondas foram historicamente desenvolvidas separadamente. No entanto, é bem conhecido os efeitos de correntes superficiais nas ondas, muitos trabalhos já investigaram os efeitos que ocorrem nas ondas quando estas estão sujeitas a um campo de correntes em larga escala. Trabalhos que fizeram essa análise em sub e mesoescala são mais escassos, no entanto, regiões como a corrente das Agulhas e corrente do Golfo já foram estudados estes efeitos. Embora sejam os mesmos princípios físicos empregados, o impacto de correntes de menor escala ainda foi pouco explorado no oceano aberto ARDHUIN *et al.* [4].

Segundo conclusões de HOLTHUIJSEN e TOLMAN [5] em oceano aberto os efeitos locais das correntes podem ser consideráveis, por conta dos processos de geração e dissipação de onda serem mais afetados nessa região.

A forma de interação de correntes com as ondas é através de alguns mecanismos como a interação dos fluxos de momento da corrente e da onda devida a gradientes da tensão de radiação) e em casos que o cisalhamento horizontal do campo de corrente é diferente de 0, ou seja não uniforme, ocorre maior troca de energia entre as ondas e a corrente através destes termos de fluxo de momento CRAPPER [6]. Os principais locais em que este gradiente é diferente de zero são em correntes de contorno oeste pois devido a sua maior intensidade ocorre um maior cisalhamento horizontal do campo de corrente que faz com que instabilidades como meandros e vórtices ocorram com maior frequência.

A Corrente do Brasil (CB), corrente de contorno oeste se origina em latitudes próximas a 15°S flui em direção ao sul até a região da confluência brasil-malvinas próximo de 28°S onde retroflete em direção a África, ela se intensifica a medida que flui para baixas latitudes, com velocidades de corrente que alcançam a ordem de 1 ms^{-1} DA SILVEIRA *et al.* [7] e com intensa atividade de mesoescala reportada na literatura MILL *et al.* [8], SOUTELINO *et al.* [9], MANO *et al.* [10], CASTELAO *et al.* [11], RODRIGUES e LORENZZETTI [1], CAMPOS [12], SCHMID *et al.* [13],

SIGNORINI [14] e MASCARENHAS [15]. Como pode ser visto na (Figura 1.1).

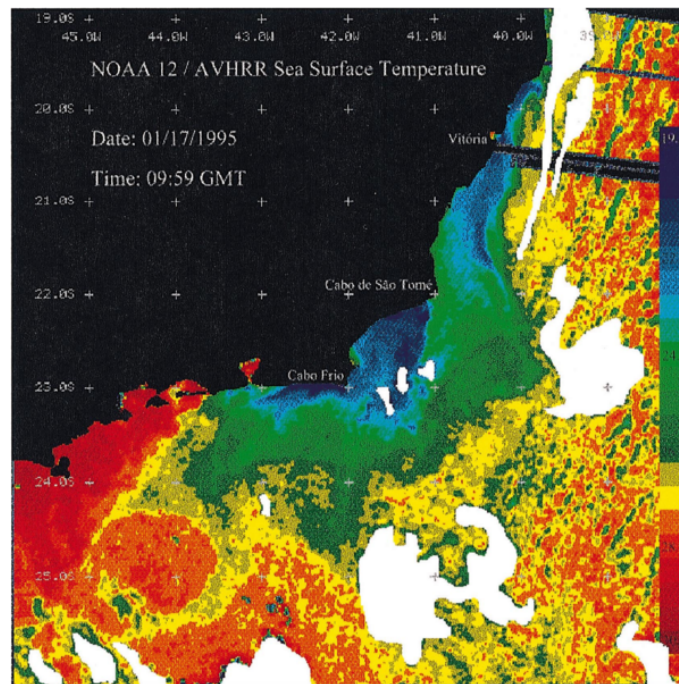


Figura 1.1: Temperatura superficial do oceano imagem de satélite (AVHRR-NOAA) demonstrando ressurgência em Cabo Frio/RJ (cores azuis) e também um vórtice quente da CB. Imagem retirada do artigo de RODRIGUES e LORENZZETTI [1]

Apesar da existência de uma corrente de contorno oeste intensa e com atividade de mesoescala conhecida, ainda não há na literatura estudos que investiguem a influência da CB no campo de ondas na região sul-sudeste.

O clima de ondas nesta região é muito característico com persistência de vagas do quadrante leste geradas pelo AAS (Anticiclone do Atlântico Sul) e a chegada de ondulações do quadrante sul com longos períodos oriundas de ciclones extratropicais, apresentando a bimodalidade do mar (Figura 1.2) muito constante na região CAMPOS [16], ARAUJO *et al.* [17].

A ocorrência desses dois principais fatores: corrente intensa com atividade de mesoescala e área de geração e propagação de ondas evidenciam a região da costa sul-sudeste do Brasil como potencial local em que a interação onda-corrente se faz importante.

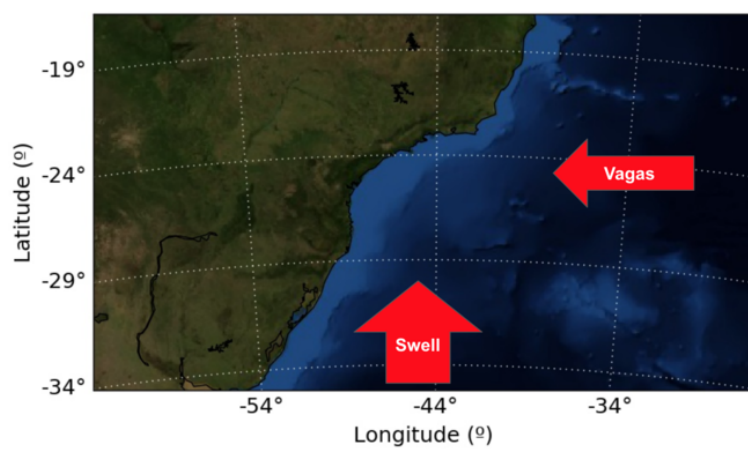


Figura 1.2: Ilustração da bimodalidade que ocorre na região.

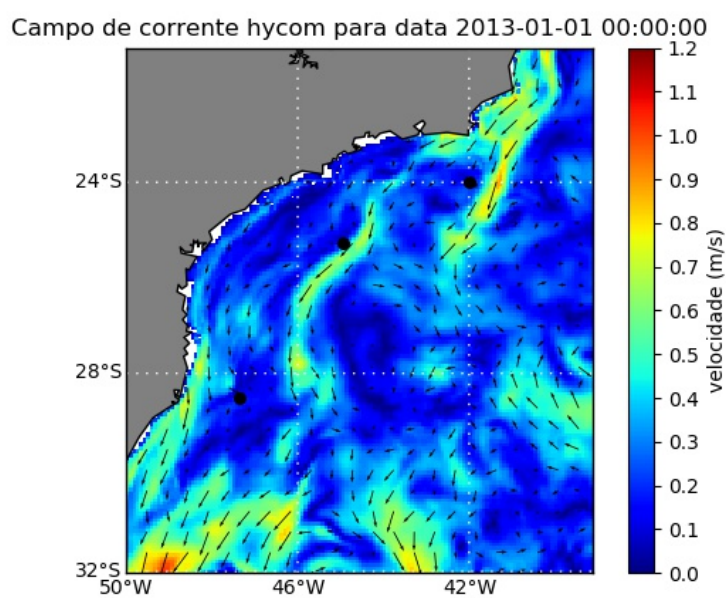


Figura 1.3: Campo de corrente superficial do modelo Hycom para a data de 01/01/2013. Pontos em preto representam a bóias do programa PNBOIA

Capítulo 2

Interação Onda-Corrente

Neste capítulo serão apresentados conceitos básicos da interação de um campo de ondas e corrente, bem como estudos encontrados na literatura atual.

2.1 Descrição das Ondas

O comprimento de onda L , é a distância horizontal entre duas cristas de ondas sucessivas Figura 2.1, e o período T é o tempo decorrente da passagem destas cristas ou mesmo das cavas. A frequência f é o inverso do período ($f = \frac{1}{T}$), e a altura de onda H é a distância vertical entre uma crista e uma cava, sendo a amplitude, metade da altura ($a = \frac{H}{2}$). A profundidade local é representada por h , e n representa a elevação do nível do mar.

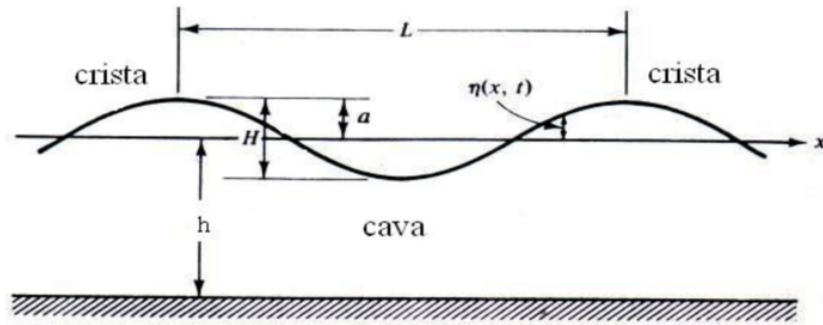


Figura 2.1: Representação teórica de uma onda.

A velocidade de propagação ou velocidade de fase (c), é obtida através da relação de dispersão das ondas representada por DEAN e DALRYMPLE [18]:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.1)$$

onde k é o número de onda ($k = \frac{2\pi}{L}$) e ω é a frequência angular ($\omega = \frac{2\pi}{T}$). A partir deles podemos representar a velocidade de fase (c) desta forma:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.2)$$

e substituindo 2.1 em 2.2, obtem-se:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.3)$$

Essa definição da velocidade de fase (c) é importante pois nos demonstra, em águas profundas ($\tanh(kh) \rightarrow 1$), que a velocidade de uma onda esta diretamente ligada ao seu comprimento L que esta também diretamente ligado ao seu período T , pois substituindo os valores de k e ω em 2.1, obtm-se:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad ou \quad L \approx 1.56T^2 \quad (2.4)$$

Sendo assim, ondas com períodos diferentes se propagam em velocidades de fase diferentes. E portanto, pela 2.3 ondas longas de maior período se propagam mais rápido que ondas curtas. Isso faz com que um campo de ondas sendo gerado se organize em grupos de onda Figura 2.2.

Esse grupo de ondas possui também uma velocidade chamada de velocidade de grupo 2.1($c_{grupo} = c_g$).

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = nc \quad (2.5)$$

Em que c é a velocidade de fase da onda e n é:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.6)$$

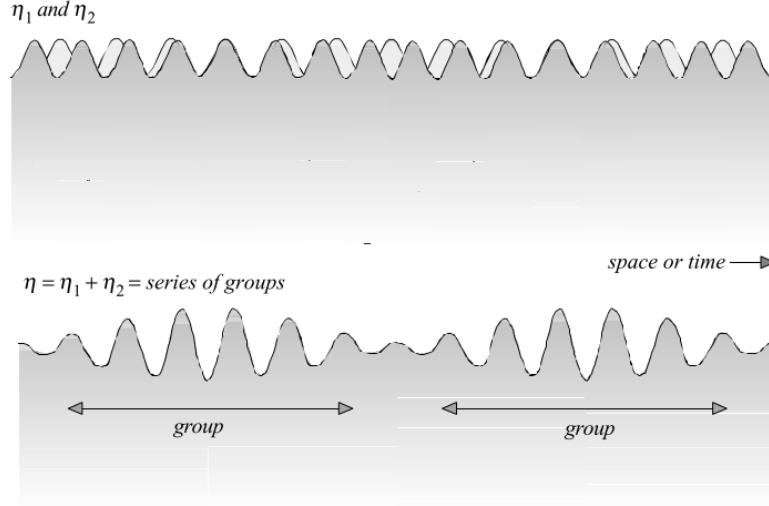


Figura 2.2: Imagem retirada do livro de HOLTHUIJSEN [2]. Duas ondas harmônicas com frequências diferentes (ou número de onda) se somam criando grupos de ondas.

Que em águas profundas se transforma em $c_g = \frac{1}{2}c$ pois $n = \frac{1}{2}$, ou seja a velocidade de grupo é metade da velocidade de uma onda individual.

Enquanto as ondas viajam através do oceano elas carregam energia com elas. São dois reservatórios de energia que compõe a energia total, são eles a energia cinética e potencial, essas duas componentes estão representadas na Equação 2.7 derivadas a partir de aproximações da teoria linear de onda, em que ρ é densidade por unidade de massa e g é a força da gravidade ($\sim 9.89ms^{-2}$).

$$E_{cinetica} = \frac{1}{4}\rho ga^2 \quad ; \quad E_{potencial} = \frac{1}{4}\rho ga^2 \quad (2.7)$$

Seguindo o desenvolvimento de HOLTHUIJSEN [2] temos que a energia total é $E = E_{cinetica} + E_{potencial}$ o que resulta na Equação 2.8.

$$E = \frac{1}{2}\rho ga^2 \quad (2.8)$$

E que o transporte dessa energia por unidade tempo e de crista integrado na vertical é,

$$P_{energia} \approx \overline{\int_{-h}^0 (p_{onda} u_x) dz} = \left(\frac{1}{2} \rho g a^2\right) \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2hh)}\right) \quad (2.9)$$

sendo que a partir da Equação 2.8 e $c = \frac{\omega}{k}$ temos:

$$P_{energia} = Enc \quad \text{com} \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2hh)}\right) \quad (2.10)$$

Essa definição é importante pois demonstra que a energia se propaga junto com a velocidade de grupo c_g 2.5.

$$P_{energia} = Ec_g \quad (2.11)$$

A Equação 2.11 descreve o transporte de energia de uma onda. No entanto, o que acontece efetivamente no oceano é que temos n ondas que se sobrepõem umas as outras com alturas, frequências e direções diferentes ao mesmo tempo Figura 2.3.

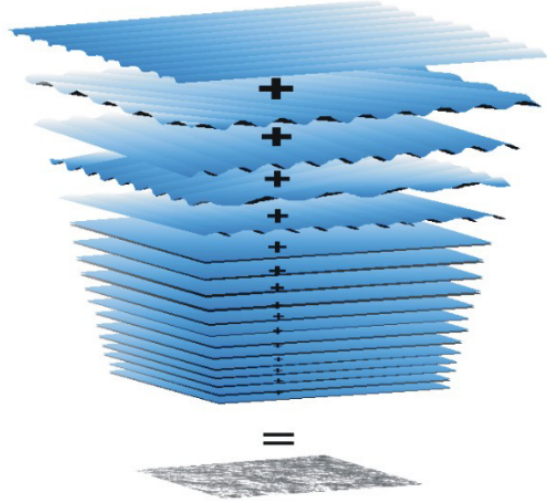


Figura 2.3: Reconstrução de um dado estado de mar a partir da superposição de várias ondas cada uma com seu comprimento e direção próprias. Imagem retirada do livro ARDHUIN e FILIPOT [3].

Por isso para representar este estado do mar utilizamos o conceito de espectro

de onda que é basicamente uma decomposição da elevação do nível do mar a partir da análise de Séries de Fourier em componentes sinusoidais sobrepostas, ou seja, um somatório das componentes harmônicas das ondas registradas. Este somatório de onda e seu formato pode ser descrito como:

$$E(f) \approx g^2 f \quad (2.12)$$

Essa descrição se faz necessária pois o modelo numérico utilizado no presente estudo utiliza o parâmetro de energia para suas integrações numéricas e propagação das ondas.

... Falar da dispersao e da velocidade de grupo para depois falar da propagacao de energia que a forma de calcular a propacao de onda em modelos de onda. ...

No estudo recente de ARDHUIN *et al.* [4] eles analisaram a influência da corrente do Golfo no campo de ondas. Pode-se verificar uma grande diferença no campo de ondas nas simulações com (Figura 2.4a) e sem corrente Golfo (Figura 2.4b).

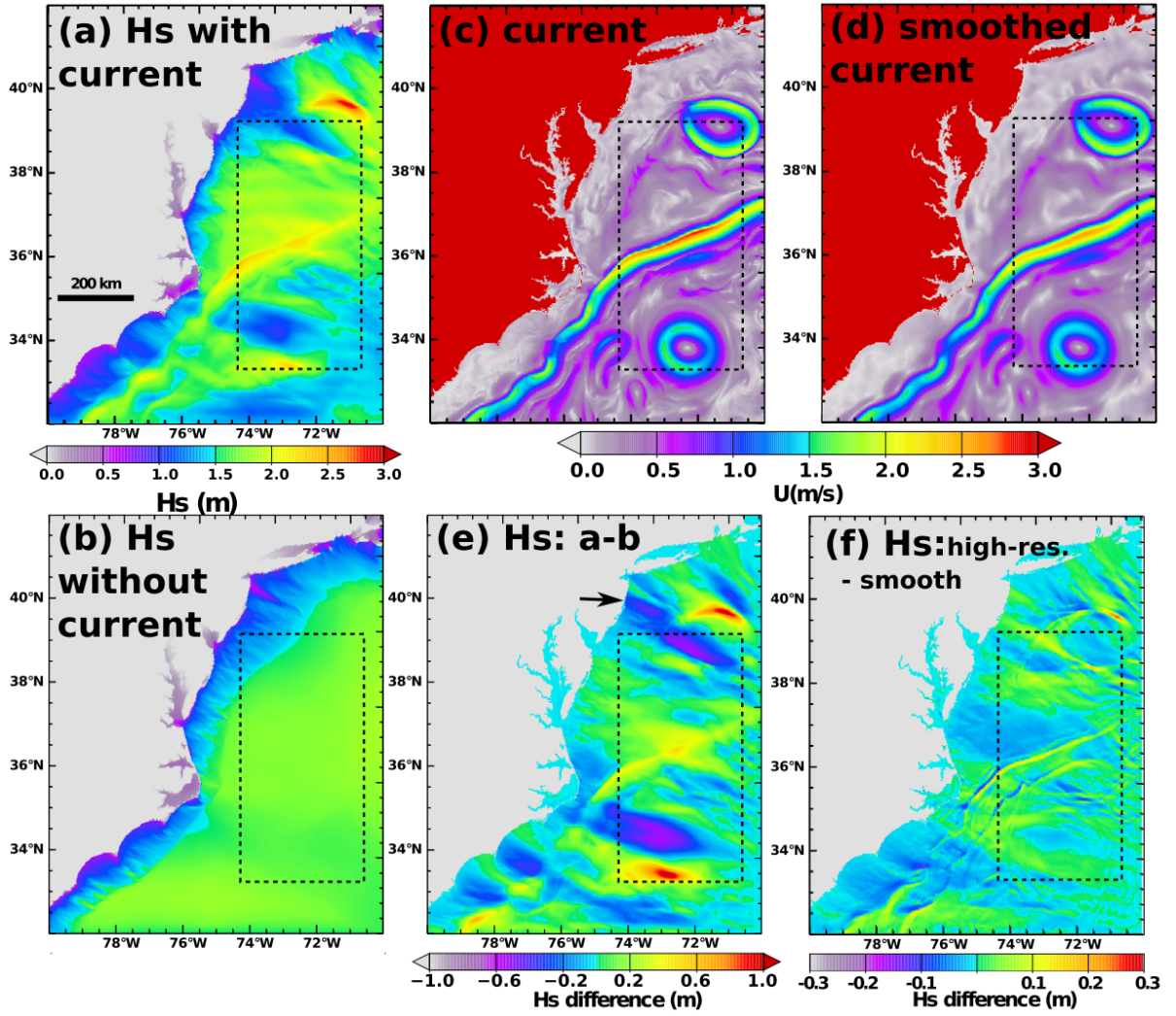


Figura 2.4: Imagem retirada do artigo citado. Impacto da corrente do Golfo nas ondas do tipo swell em 18 de Setembro de 2014, 6:00 UTC. Mapas de (a) altura de onda modelada com corrente, (b) altura de onda do modelo sem corrente, (c) corrente de alta resolução do ROMS (d) mesma corrente filtrada. (e,f) diferença na altura de onda para (e) caso com corrente de alta resolução menos caso sem corrente e (f) caso com corrente de alta resolução menos caso com corrente filtrada. A área pontilhada refere-se a região usada para análise espectral.

Capítulo 3

Método Proposto

Foram feitas simulações numéricas com o modelo de ondas Wave Watch III com dados de campo de corrente superficiais provenientes do modelo Hycom. Foram escolhidos eventos de alta instabilidade da CB para serem analisados.

Tabela 3.1: Exemplos de citações utilizando o comando padrão `\cite` do \LaTeX e o comando `\citet`, fornecido pelo pacote `natbib`.

Tipo da Publicação	<code>\cite</code>	<code>\citet</code>
Livro		
Artigo		
Relatório		
Relatório		
Anais de Congresso		
Séries		
Em Livro		
Dissertação de mestrado		
Tese de doutorado		

- Coeficiente de Correlação (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2)}} \quad (3.1)$$

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Capítulo 5

Conclusões

Referências Bibliográficas

- [1] RODRIGUES, R. R., LORENZZETTI, J. A. “A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling”, *Continental Shelf Research*, v. 21, n. 4, pp. 371–394, 2001. ISSN: 02784343. doi: 10.1016/S0278-4343(00)00094-7.
- [2] HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007. doi: 10.1017/CBO9780511618536.
- [3] ARDHUIN, F., FILIPOT, J. F. *Ocean waves in geosciences*. Relatório técnico, 2016.
- [4] ARDHUIN, F., GILLE, S., MENEMENLIS, D., et al. “Small scale open ocean currents have large effects on ocean wave heights”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. , Revised, 04 2017. doi: 10.1002/2016JC012413.
- [5] HOLTHUIJSEN, L. H., TOLMAN, H. L. “Effects of the Gulf Stream on Ocean Waves”, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, v. 96, n. C7, pp. 12755–12771, jul. 1991.
- [6] CRAPPER, G. D. *Introduction to Water Waves*. New York, Ellis Horwood, 1984. ISBN: 978-0-521-36829-2.
- [7] DA SILVEIRA, I. C. A., LIMA, J. A. M., SCHMIDT, A. C. K., et al. “Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 45, n. 3-4, pp. 187–207, 2008. ISSN: 03770265. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2008.01.002.
- [8] MILL, G. N., DA COSTA, V. S., LIMA, N. D., et al. “Northward migration of Cape So Tom rings, Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 106, pp. 27 – 37, 2015. ISSN: 0278-4343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.06.010>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434315300017>>.

- [9] SOUTELINO, R., C A DA SILVEIRA, I., GANGOPADHYAY, A., et al. “Is the Brazil Current eddy-dominated to the north of 20S?” *Geophysical Research Letters*, v. 38, pp. L03607, 02 2011. doi: 10.1029/2010GL046276.
- [10] MANO, M. F., PAIVA, A. M., TORRES, A. R., et al. “Energy Flux to a Cyclonic Eddy off Cabo Frio, Brazil”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 39, n. 11, pp. 2999–3010, 2009. ISSN: 0022-3670. doi: 10.1175/2009jpo4026.1.
- [11] CASTELAO, R. M., CAMPOS, E. J. D., MILLER, J. L. “A Modelling Study of Coastal Upwelling Driven by Wind and Meanders of the Brazil Current”, *Journal of Coastal Research*, v. 203, n. 1987, pp. 662–671, 2006. ISSN: 0749-0208. doi: 10.2112/1551-5036(2004)20[662:amsocu]2.0.co;2.
- [12] CAMPOS, E. J. D. “Equatorward translation of the vitoria eddy in a numerical simulation.” *Geophysical Research Letters*, v. 33, pp. 253–259, 2006.
- [13] SCHMID, C., SCHFER, H., PODESTA, G., et al. “The Vit??ria Eddy and Its Relation to the Brazil Current”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 25, pp. 2532–2546, 11 1995. doi: 10.1175/1520-0485(1995)025<2532:TVEAIR>2.0.CO;2.
- [14] SIGNORINI, S. R. “On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of So Tom and Guanabara Bay”, *Deep Sea Research*, v. 25, n. 5, pp. 481 – 490, 1978. ISSN: 0146-6291. doi: [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(78\)90556-8](https://doi.org/10.1016/0146-6291(78)90556-8). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146629178905568>>.
- [15] MASCARENHAS, A.S., M. L. R. N. “A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio.” *Fertility of the Sea*, pp. 285–308, 1971.
- [16] CAMPOS, R. M. *ANÁLISE DOS EXTREMOS DE ONDA NO RIO DE JANEIRO ASSOCIADOS A CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL*. M.Sc. dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ BRASIL, 2009.
- [17] ARAUJO, C., FRANCO, D., MELO, E., et al. “Wave regime characteristics of the Southern Brazilian coast”, *VI International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, v. 4, pp. 1–15, 01 2003.
- [18] DEAN, R., DALRYMPLE, R. *Water Wave Mechanics - Dean*. 1991. ISBN: 9810204205. doi: <https://doi.org/10.1142/1232>.

Apêndice A

Algumas Demonstrações