

**Impactos da utilização de uma grade de alta resolução horizontal na
componente oceânica do modelo brasileiro do sistema terrestre
(BESM)**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Andyara Oliveira Callegare (UFSCar, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: andy.callegare@gmail.com

Dr. Emanuel Giarolla (DMD/CPTEC/INPE, Orientador)
E-mails: emanuel.giarolla@cptec.inpe.br,
egiarolla@yahoo.com.br (de preferência)

Junho de 2016

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

PROJETO

**Impactos da utilização de uma grade de alta resolução horizontal na
componente oceânica do modelo brasileiro do sistema terrestre
(BESM)**

PROCESSO: 125129/2015-7

Relatório elaborado por ANDYARA OLIVEIRA CALLEGARE relativo
ao período de agosto de 2015 a junho de 2016

Andyara Oliveira Callegare - Bolsista PIBIC/CNPq
E-mail: andy.callegare@gmail.com

Dr. Emanuel Giarolla - Orientador
E-mails: emanuel.giarolla@cptec.inpe.br,
egiarolla@yahoo.com.br (de preferência)

Julho de 2015

RESUMO

Este projeto iniciado em 2014 visa avaliar a então recém construída grade horizontal de $\frac{1}{4}^\circ \times \frac{1}{4}^\circ$ do MOM4p1 (“Modular Ocean Model” versão 4p1, do “Geophysical Fluid Dynamics Laboratory” – GFDL), que é também a componente oceânica da atual versão do modelo brasileiro do sistema terrestre (BESM). Desde então foram feitas várias simulações, análises, e melhorias na grade. Dentre estas se destaca a correção topográfica da grade, que removeu as porções de água não oceânicas do modelo (por exemplo lagos, grandes rios, etc). As simulações com as forçantes climatológicas, que normalmente são feitas até que se atinja o equilíbrio dinâmico do modelo, também chamadas “spin-up”, foram bem-sucedidas, portanto foram integralizados 30 anos, porém as simulações com forçantes com dados observacionais (“reanálises”) apresentou problemas, não conseguindo ultrapassar 6 anos, sendo esta a motivação para a correção topográfica da grade, que apesar de não ter solucionado o problema apresentou maior estabilidade que a anterior. Foram realizados alguns experimentos com metodologias diferentes para resolver o problema, que ainda persiste; estas tentativas incluem a modificação dos passos de tempo, do período das forçantes, e utilização dos dados climatológicos em vez de reanálises nos meses em que o modelo não conseguia prosseguir, método que chegou a funcionar por alguns meses. O último experimento realizado, com a grade corrigida, apresentou nos últimos 30 dias do experimento que instabilidade numérica que se manifestou na forma de aglomerados de pontos que apresentaram correntes com valores acima da realidade na costa norte brasileira, pacífico equatorial, mar de Bering, e costa leste dos estados unidos; fazendo que o modelo entrasse em colapso. A comparação entre os ventos filtrados e não filtrados das forçantes climatológicas e das correntes oceânicas não apresentou correlação aparente para o período analisado

ABSTRACT

This project initiated in 2014 aims to evaluate the newly built, at the time, horizontal grid $\frac{1}{4}^\circ \times \frac{1}{4}^\circ$ of MOM4p1 ("Modular Ocean Model" version 4p1, of the "Geophysical Fluid Dynamics Laboratory" - GFDL), which is also the oceanic component of the current version the Brazilian Earth System Model(BESM). Since then several simulations, analysis, and improvements were made on the grid. The grid topographic correction stands out from those, which removed the non-oceanic water portions (i.e. lakes, great rivers, etc.). The simulations with climatological forcings, are usually made until the model reaches its dynamic equilibrium, also called "spin-up", were successful with 30 years output, but the simulations with observational data forcings ("reanalysis") had problems, simulating no more than 6 years, which was the motivation for the grid topographic correction, that despite not solving the problem showed greater stability than before. A few experiments were conducted with different methodologies to solve the problem, which still persists; these attempts include the modification of time steps, the period of the used forcings, and use of climatological forcings instead of reanalysis in the months in which the model could not continue, this method worked for a few months. The last experiment with the corrected grid, showed that in the last 30 days the numerical instability manifested in the form of clusters on the Brazilian north-western coast, equatorial pacific, Bering Sea, and the east coast of U.S; making the model collapse. The comparison between the filtered and non-filtered winds of the forcings and the oceanic currents did not show correlation on the period analysed.

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1 – Exemplo de porções de água continental que foram aterradas (eliminadas da grade)	3
Figura 2 – Mapa do aglomerado dos pontos com instabilidade entre 0 e 250 m de profundidade	6
Figura 3 – Velocidade das Correntes Oceânicas (m/s)	7
Figura 4 – Velocidade dos ventos à superfície (m/s)	9
Figura 5 – Modos de variabilidade da altura do mar no Atlântico Sul	10
Figura 6 – EOF1 satélite	11
Figura 7 – EOF1 modelo acoplado.....	12

LISTA DE TABELAS

	Pag
Tabela 1 – Experimentos realizados.....	2
Tabela 2 - Lista dos pontos com instabilidade entre 0 e 25m de profundidade.....	5

SUMÁRIO

	Pag
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 METODOLOGIA.....	1
3 ANÁLISES E RESULTADOS.....	5
3.1 ANÁLISE DA INSTABILIDADE.....	5
3.2 EOF ATLANTICO SUL.....	10
4 CONCLUSÕES FINAIS.....	12
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13

1 INTRODUÇÃO

O estudo do clima sofreu um grande avanço com o desenvolvimento dos modelos numéricos de circulação atmosférica. Depois dos modelos atmosféricos, vieram os modelos oceânicos de circulação e hoje temos os modelos climáticos, que consistem no acoplamento dos modelos atmosférico e oceânico, juntamente com outros modelos do sistema terrestre (modelos de gelo marinho, vegetação, hidrológicos, de química da atmosfera, de ondas oceânicas geradas pelo vento, de gelo continental, etc). Pela complexidade destes modelos climáticos e pelo esforço computacional envolvido, são poucos os centros de estudos climáticos no mundo que podem desenvolver projetos deste porte. O Brasil, graças ao esforço de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entrou para esta comunidade internacional de modeladores do clima em 2012 (Nobre et al., 2012), com o modelo acoplado oceano-atmosfera desenvolvido no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), que agora também é a base do “modelo brasileiro do sistema terrestre” (“BESM”, de “Brazilian Earth System Model”), desenvolvido em parceria com outras instituições.

Os artigos (Nobre et al., 2012, 2013) apresentaram à comunidade a versão acoplada oceano-atmosfera (OA2.3) do modelo BESM. Bottino (2013) alterou o esquema de cobertura de nuvens e coeficientes de propriedades óticas da componente atmosférica, gerando uma versão mais recente e estável, BESM-OA2.3.1.

O modelo oceânico é o MOM4p1 e MOM5 (“Modular Ocean Model” versões 4p1 e 5, do “Geophysical Fluid Dynamics Laboratory” – GFDL), instalado no CPTEC. A grade horizontal atual não é constante em todas as partes do globo, o espaçamento é de 1° longitude x ¼° latitude nos trópicos, decrescendo uniformemente para 1° longitude x 2° latitude à medida que se aproxima dos polos. A escolha da resolução horizontal de constantes ¼° latitude x ¼° longitude é crítica para a reprodução dos fenômenos turbulentos do oceano. Tal resolução foi comprometida a ser utilizada quando o BESM participar do projeto CMIP6, dependendo de apenas mais recursos computacionais para sua utilização.

2 METODOLOGIA

Desde o início deste projeto foram realizados 12 experimentos com a grade de resolução horizontal de constantes $\frac{1}{4}^\circ$ latitude x $\frac{1}{4}^\circ$ longitude, conforme na tabela 1.

ano	experimento	inicio	final	forçantes
2014	t126_spinup	jan/31	dez/61	climatológicas
2014	t126_reanalysis	jan/50	dez/51	reanálise
2014	t126_testecoeff1	jan/31	dez/35	climatológicas
2014	t126_testecoeff2	jan/31	jun/35	climatológicas
2015	t126_higher_dz	jan/31	dez/35	climatológicas
2014	t126_reanalysis2	jan/50	set/53	reanálise
2014	t126_reanalysis3	jan/54	set/53	reanálise
2015	g0.25n_spinup	jan/31	dez/60	climatológicas
2015	g0.25n_reanalysis	jan/50	jun/51	reanálise
2015	g0.25n_reanalysis2	jan/61	dez/66	reanálise
2016	g0.25n_reanalysis3	jan/67	mar/67	reanálise
2016	g0.25n_reanalysis4	jan/67	abr/68	reanálise e climatológicas

Tabela 1 – Experimentos realizados

Simulação “spin-up” são aquelas na qual no estado inicial do oceano as correntes estão em repouso e a estrutura de temperatura e salinidade são climatológicas de Levitus (1994), e as forçantes atmosféricas são de dados climatológicos mensais. Depois do "spin-up", passamos a forçar o modelo com dados observados, também chamada de simulação “reanálise”.

No caso dos experimentos com a grade t126, os 6 primeiros, não havia sido feita nenhum tipo de correção prévia da topografia da grade global, algumas regiões continentais com porções de água, como por exemplo grandes lagos e rios, também estavam sendo interpretadas pelo modelo como regiões oceânicas. Um destes lagos estava gerando marés altíssimas e isso impedia o modelo de continuar. Para resolver este problema foi

necessário editar os pontos da grade, retirando tais lagos e, com essa nova grade, chamada de g0.25n, foi preciso reiniciar o processo novamente.

A correção topográfica da grade inclui aterrar lagos, abrir canais, etc. Esta tarefa foi realizada manualmente utilizando-se 2 ferramentas: uma feita em linguagem python (programa 'Gridgen', desenvolvido por um antigo membro do grupo de modelagem acoplada do CPTEC/INPE) e a outra em linguagem GrADS. A do GrADS corrigia até 60N, enquanto que o Gridgen algumas regiões acima de 60N. A figura 2 mostra alguns dos lagos aterrados no norte da África e próximo ao mar Cáspio.

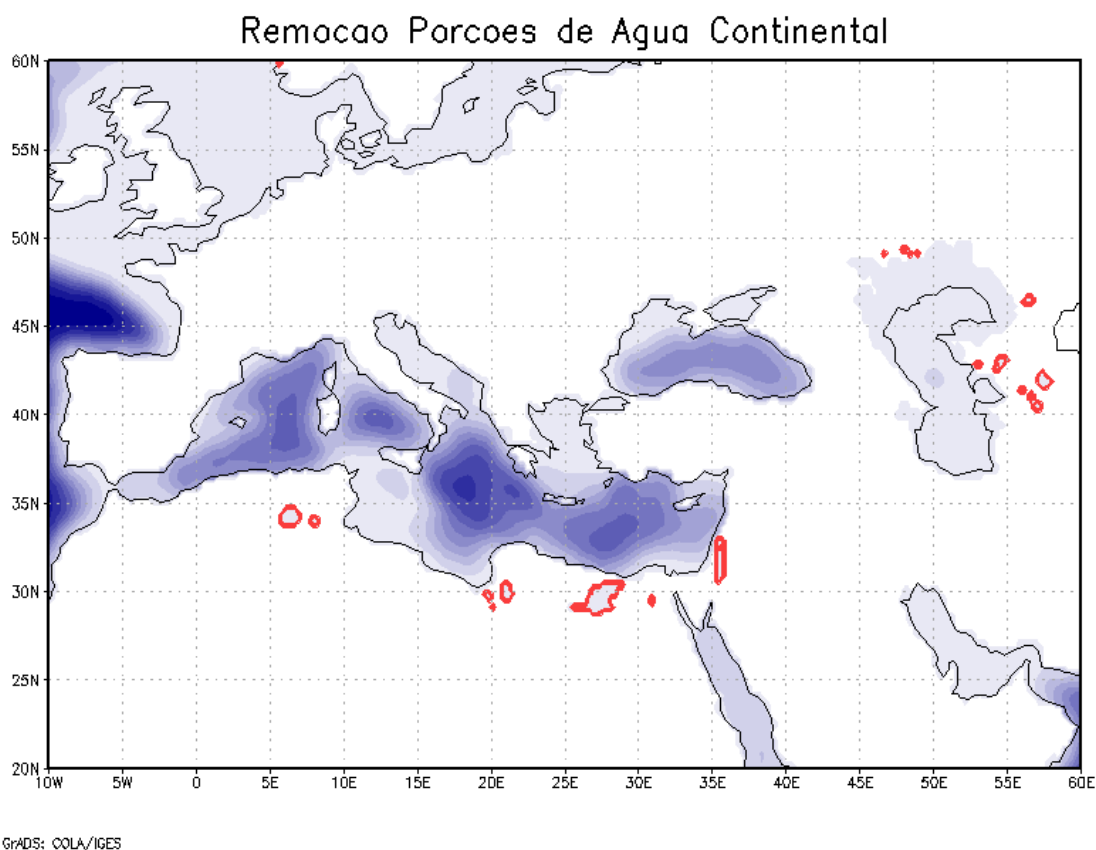


Figura 1 – Exemplo de porções de água continental que foram aterradas (eliminadas da grade)

Estes programas geraram arquivos com os pontos topograficamente ajustados, ou seja, com latitude e longitude e quantidade de níveis (0 para terra, e até 50 para o oceano). Para inserir estes ajustes na grade foram utilizados um conjunto de scripts do MOM4 que permitiam a criação de novas grades.

Com os experimentos da família t126 foi estudada a subcorrente do equatorial atlântico, e como a mesma apresentou um esparsamento em relação aos dados observados foram realizados experimentos spin-up de curta duração com diferentes coeficientes de mistura e difusão vertical, experimentos t126_testecoeff1 e t126_testecoeff2, que não resultaram na diminuição desta característica, este trabalho foi apresentado no Congresso Brasileiro de Oceanografia em Itajaí-SC em outubro de 2014. No entanto foi sugerido que uma grade com mais níveis verticais pudesse resolver este problema, para tal fim, então foi criada uma grade com 102 níveis verticais, variando 10m nos 500m superiores, aumentando gradualmente com a profundidade até 182m, tal experimento também de curta duração foi chamado de t126_higher_dz e novamente não melhorou o esparsamento.

Para a criação das grades é necessário utilizar vários scripts em C-shell que fazem parte do MOM4. Nestes scripts é possível determinar o espaçamento as grades verticais e horizontais, inserir correções topográficas, e gerar os arquivos auxiliares para inicialização da simulação. Um relatório técnico foi elaborado sobre o assunto e o mesmo foi disponibilizado para o grupo BESM, bem como a monitoria do treinamento BESM 2.6 em Cachoeira Paulista - SP em junho de 2015 sobre o assunto.

A atividades desempenhadas durante este período de vigência incluíram estudar e resolver as causas da instabilidade da simulação com dados de reanálise da grade g0.25n através da realização de experimentos com:

- a) Início em outra data (g0.25n_reanalysis2);
- b) Saídas diárias em vez de mensais do modelo para identificar a causa da instabilidade (g0.25n_reanalysis3);
- c) Alterar as forçantes de reanálise por climatológicas nos meses nos quais o modelo parou (g0.25n_reanalysis4);
- d) O estudo das forçantes atmosféricas em pontos problemáticos (g0.25n_reanalysis3).

Paralelamente propôs-se, como treinamento, utilizar outros experimentos do BESM para análise da variabilidade da altura do mar através da EOF (Empirical Orthogonal Functions

- Funções Empíricas Ortogonais), que analisa as componentes principais dos dados procurando encontrar padrões temporais e espaciais de variabilidade em um dado campo.

3 ANALISES E RESULTADOS

3.1 ANALISE DA INSTABILIDADE

Analisando os últimos 30 dias antes do modelo parar foi possível destacar os seguintes pontos até profundidade de 250 metros listados na tabela abaixo (Tabela 2) como os mais instáveis, em ordem alfabética de mais instável para menos instável, ou seja, estavam gerando correntes nos 3 eixos (x, y, e z) acima dos valores aceitos para a realidade. Quando plotados (Figura 2) pode-se identificar que os pontos B e D se aglomeram próximos a costa nordeste do Brasil, os pontos A, G, F, H no mar de Bering, o ponto E na costa leste dos Estados Unidos, e o ponto E no Pacífico equatorial.

ponto	longitude	latitude	profundidade
A	177	62	232
B	318	-1	222
C	177	62	231
D	317	-1	222
E	284	35	191
F	203	71	74
G	230	5	5
H	203	71	75

Tabela 2 - Lista dos pontos com instabilidade entre 0 e 25m de profundidade

Pontos que estouraram 0–250m

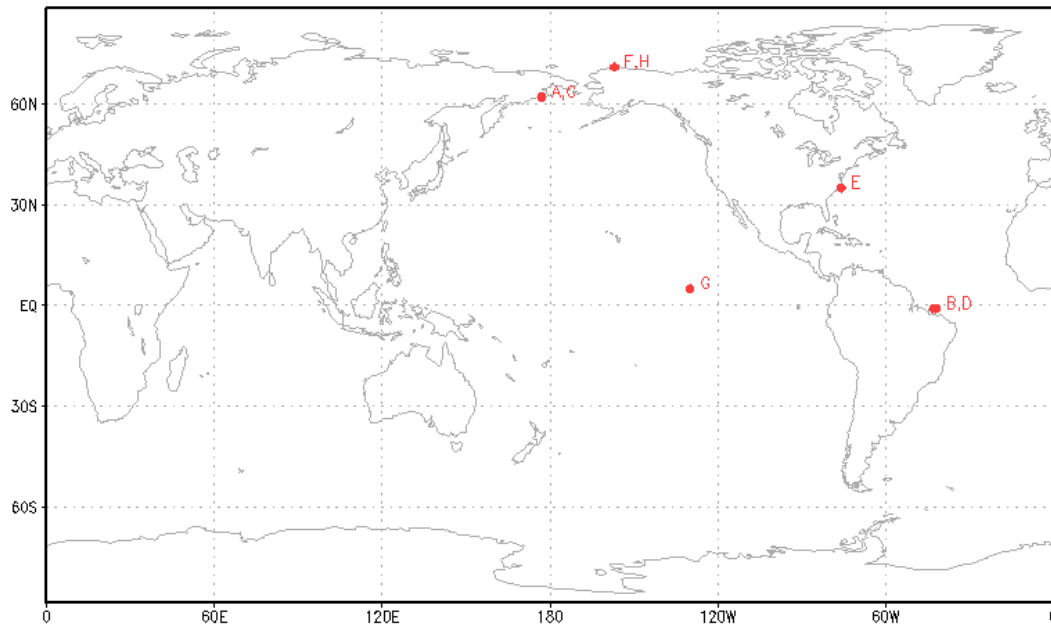


Figura 2 - Mapa do aglomerado dos pontos com instabilidade entre 0 e 250 m de profundidade

Os programas utilizados para a correção topográfica da grade não conseguiram corrigir pontos mais ao norte do que 60°, então os aglomerados no mar de Bering (A, G, F, H) podem representar porções de água continentais.

Foi então analisada a velocidades das correntes oceânicas para os pontos escolhidos, conforme na figura 3, sendo a corrente u em azul, e a v em vermelho.

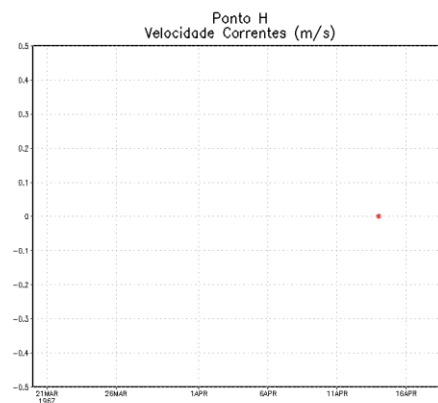
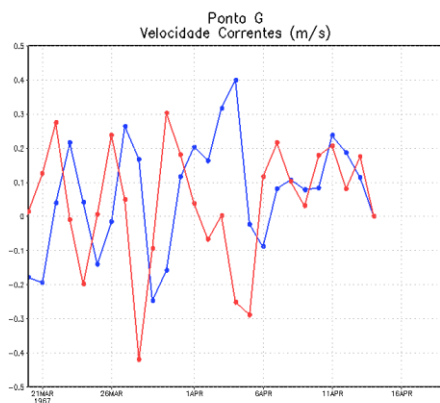
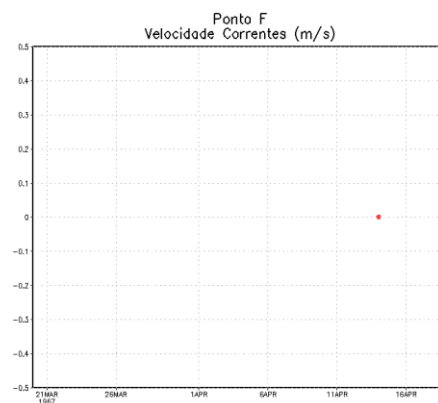
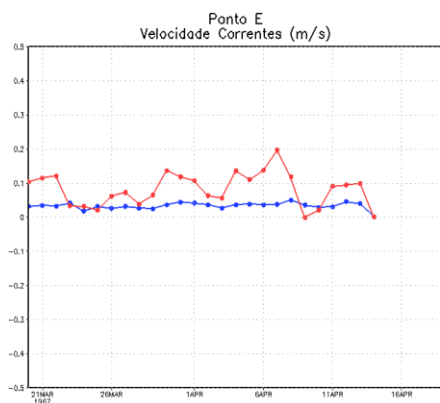
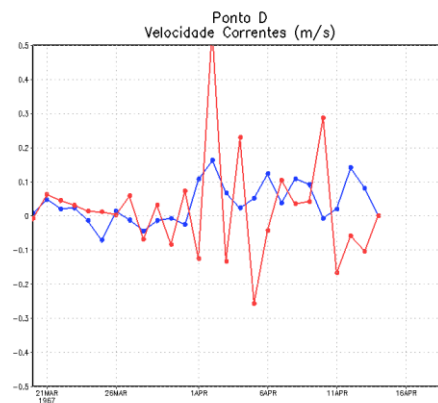
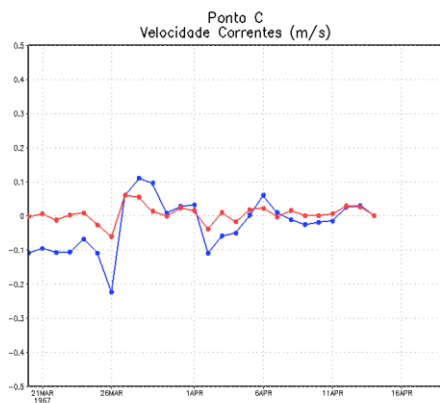
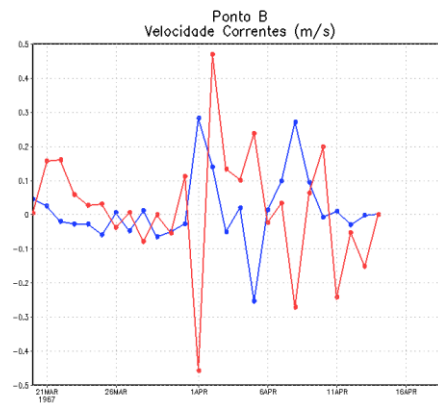
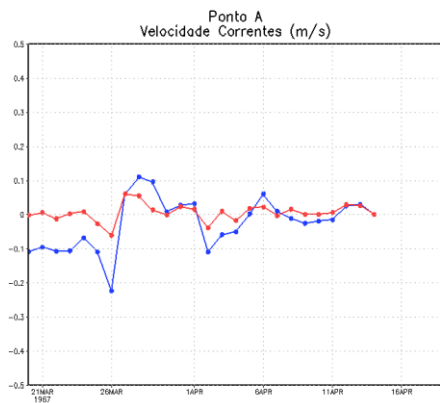


Figura 3 – Velocidade das Correntes Oceânicas (m/s)

Os pontos F e H estão localizados no leste do mar de Bering, e como não apresentaram correntes podem indicar que representam porções de água continental ou gelo. Os pontos B, D, e G apresentaram os maiores valores e com variações bruscas de sentido, indicando instabilidade.

As forçantes atmosféricas (ventos superficiais) influenciam fortemente as correntes superficiais, portanto foram analisadas os ventos de reanálise antes e depois de sua filtragem para remover os picos de amplitude, conforme na Figura 4, em azul e roxo os ventos sem filtragem e com filtragem, respectivamente, na direção u, e vermelho e laranja os ventos sem filtragem e com filtragem, respectivamente, na direção v.

Os maiores picos foram filtrados, variando de maneira mais suave, porém nos pontos A e C apresentam uma alta amplitude com mudanças bruscas, porém não se manifestaram nas correntes oceânicas nos x e y, indicando que a instabilidade está relacionada com correntes verticais (eixo z), ou se propagou.

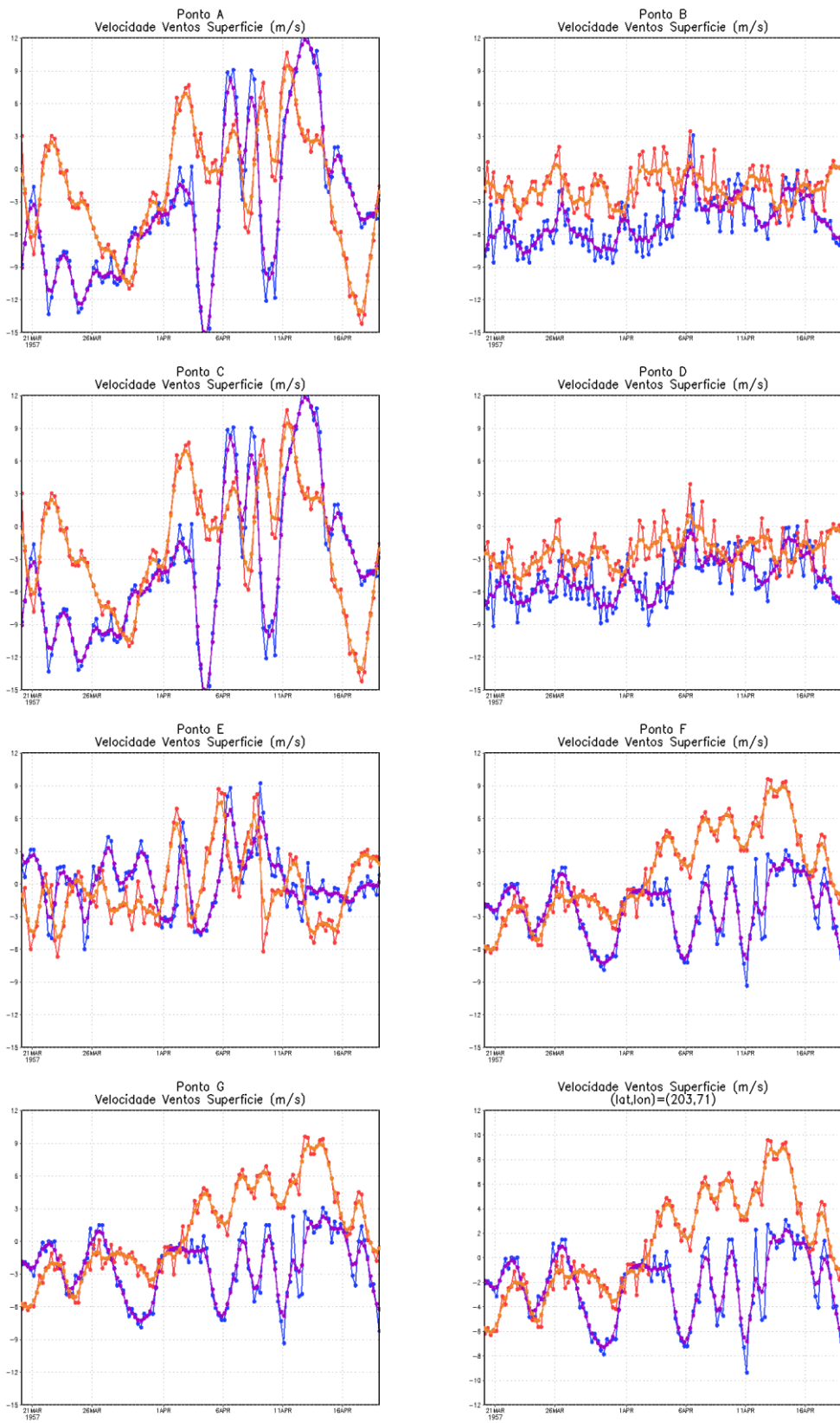
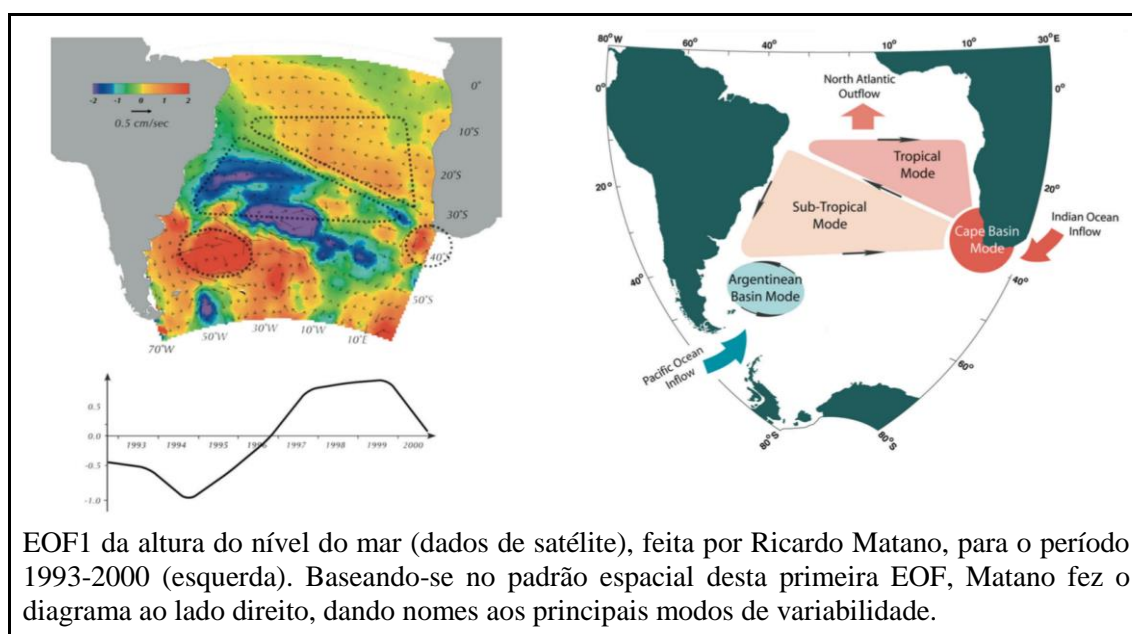


Figura 4 -Velocidade dos ventos à superfície (m/s)

3.2 EOF ATLANTICO SUL

As análises utilizando outros modelos foram iniciadas no período previsto, e incluem saídas do modelo acoplado (BESM), ainda utilizando a grade oceânica antiga, para o estudo da variabilidade da altura do mar. Neste tipo de análise, a variabilidade da altura do mar simulada pelo modelo BESM, revelada pelo cálculo de EOF, foi comparada com os padrões de variabilidade sugeridos por Ricardo Matano (Universidade Estadual do Oregon, EUA, comunicação pessoal). Matano postulou que a variabilidade da altura do nível do mar do Atlântico Sul poderia ser dividida em 4 modos espaciais, baseando-se em uma análise de EOF utilizando dados de satélite de 1999 a 2003 (Figura 5).



EOF1 da altura do nível do mar (dados de satélite), feita por Ricardo Matano, para o período 1993-2000 (esquerda). Baseando-se no padrão espacial desta primeira EOF, Matano fez o diagrama ao lado direito, dando nomes aos principais modos de variabilidade.

Figura 5 - Modos de variabilidade da altura do mar no Atlântico Sul

Estes modos foram denominados: “Tropical”, “Sub-Tropical”, “Cape Basin” (Bacia do Cabo), e “Argentinean Basin” (Bacia da Argentina). Antes de utilizar os resultados do BESM, uma análise preliminar foi feita também com dados de satélite reduzidos para uma grade 1x1 (com remoção de vórtices), inicialmente para o mesmo período de análise de Matano. A primeira EOF, mostrada na figura 6, ficou semelhante à de Matano, e sua série temporal se comportou de maneira similar. Quando realizada a mesma análise para o período de 1993-2010 os modos espaciais divergiram um pouco; os modos Tropical e Sub-tropical estão mais paralelos com as linhas de latitude, Argentinean Basin permanece no mesmo local, porém Cape Basin não está representado na primeira EOF; quanto a sua série temporal é evidente o aumento da amplitude após 2003.

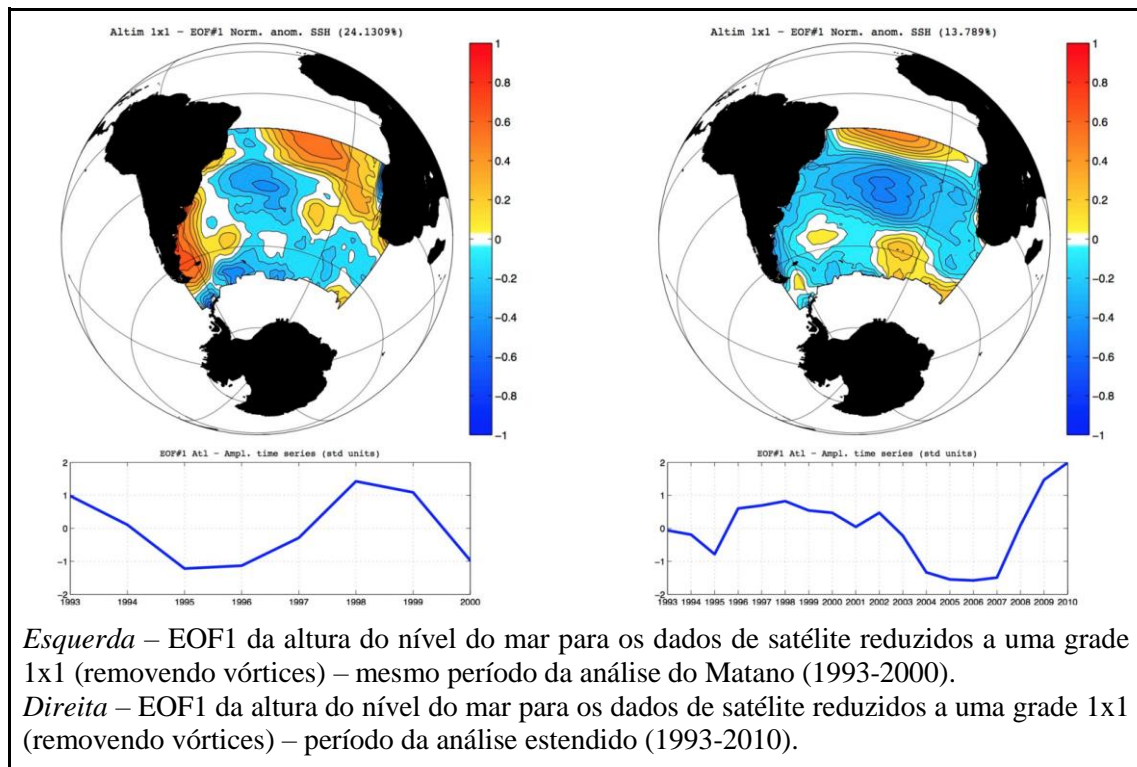


Figura 6 - EOF1 satélite

Em seguida, os resultados do modelo acoplado foram analisados (Figura 7). Estes, por se tratarem de uma rodada acoplada, não podem ser comparados diretamente com dados observados como nos casos anteriores, porém podemos inferir se os padrões de variabilidade são os mesmos ou não em rodadas acopladas. A primeira EOF de um experimento de 150 anos do modelo acoplado representa os modos Tropical, Sub-Tropical, e Argentinean Basin, porém novamente o Cape Basin desaparece, sua análise temporal demonstrou que o maior pico de variação é de 70 anos, outras oscilações notáveis são as de 4, 7 e 9 anos; estas estão condizentes com as inversões de fase notadas nas análises com dados de satélites.

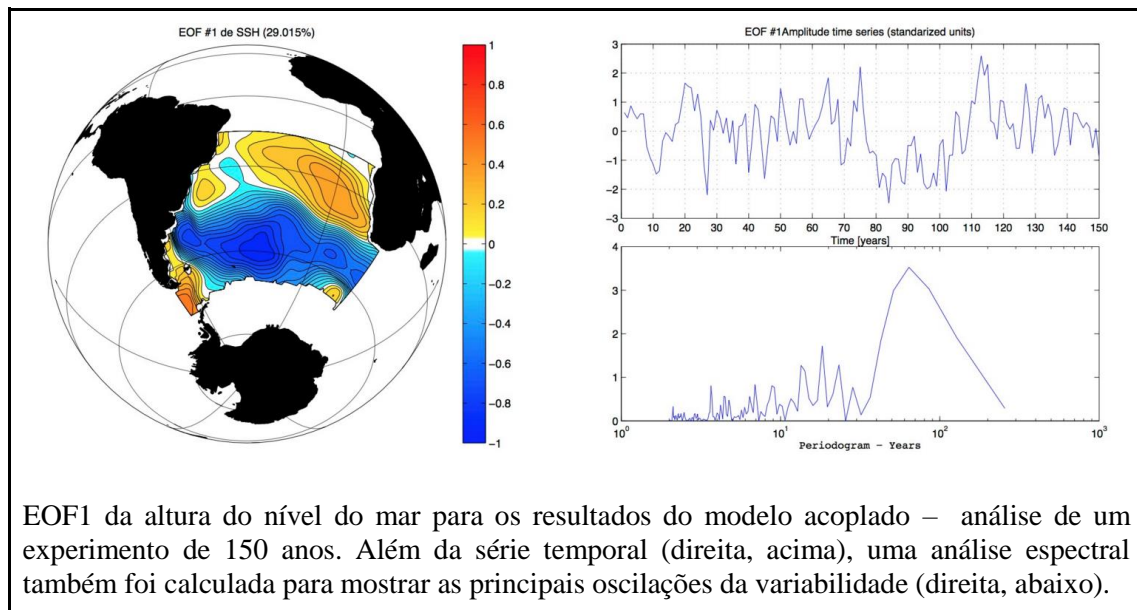


Figura 7 – EOF1 modelo acoplado

3 CONCLUSÕES

A grade que foi desenvolvida no primeiro ano deste projeto (t126), mostrou ser muito útil na representação de processos oceânicos, como vórtices e meandros, que não eram resolvidos pela grade anterior. Já se considera esta grade como a oficial para a versão do BESM 2.6, justificando todo o esforço de desenvolvimento ao longo de todos estes meses durante a execução deste projeto. No entanto, por ser de mais alta resolução, mostrou-se também mais sensível a instabilidades numéricas, possivelmente causadas por ondas que não eram resolvidas na grade anterior com mais baixa resolução. Em um primeiro momento, quando foram feitas simulações forçadas por ventos e fluxos radiativos climatológicos (ou seja, campos mais suavizados), quase não houveram problemas de estabilidade, e assim simulações de mais de 30 anos puderam ser feitas sem problemas. Ao se substituir os ventos e demais forçantes por outras mais realistas, como as das reanálises, é provável que os campos com variações mais bruscas e com maior amplitude, quando aplicados ao oceano, possam ter causado instabilidades numéricas devido à incapacidade do modelo de lidar com a dissipação que ocorreria na natureza na forma de transmissão para escalas menores (conceito de “cascata de energia”). Foram testados então alguns métodos para se contornar o problema, além do ajuste de coeficientes de dissipação. O primeiro foi a correção manual da grade em pontos problemáticos. Por exemplo, grandes lagos foram fechados (pois não são considerados regiões oceânicas).

Algumas passagens oceânicas, bloqueadas devido a problemas na geração da grade, foram abertas, e assim por diante. Após esta correção, que não é difícil, porém muito trabalhosa, o modelo ficou um pouco mais estável, porém não para conseguir fazer as integrações durarem por mais do que 5 ou 6 anos. Foram tentadas outras técnicas, como por exemplo um estudo detalhado dos pontos geográficos mais problemáticos, fazendo-se gráficos dos valores de correntes e ventos sobre estes pontos. Embora isto tenha trazido mais informações sobre como a instabilidade do modelo se manifesta e evolui, isto não auxiliou muito para fornecer uma solução para o problema. Em outras palavras, apesar de todos os esforços o problema da instabilidade persiste, e está presentemente sendo estudado por outros membros do grupo de modelagem do BESM.

Como não se dispunha de uma simulação com esta grade, as análises estatísticas foram feitas com resultados obtidos com a antiga grade (1° longitude x ¼° latitude nos trópicos, decrescendo uniformemente para 1° longitude x 2° latitude à medida que se aproxima dos polos.). O modelo mostrou bom desempenho ao reproduzir os principais padrões de variabilidade da altura do nível do mar, mesmo em uma simulação de cenário futuro.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bottino, M. J., 2013: Impacto da parametrização de propriedades de nuvens na simulação do clima na região do Atlântico com o modelo acoplado oceano-atmosfera de INPE/CPTEC. Tese de doutorado em meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 102 pp. <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E2L5B5>
- Giarolla, E., Nobre, P., Malagutti, M. and Pezzi, L.P. (2005). The Atlantic Equatorial Undercurrent: PIRATA observations and simulations with GFDL Modular Ocean Model at CPTEC. *Geophysical Research Letters* 32: doi: 10.1029/2004GL022206. issn: 0094-8276.
- Johns, W. E., Brandt, P., Bourlès, B., Tantet, A., Papapostolou, A e A. Houk, 2014: Zonal structure and seasonal variability of the Atlantic Equatorial Undercurrent. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-014-2136-2

Levitus, S., T.P. Boyer. World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature, number 4, 1994.

Nobre, P., et al., Coupled ocean-atmosphere variations over the South Atlantic ocean. *J. Climate*, 2012. 25(18): p. 6349-6358.

Nobre, P. e Coauthors, 2013: Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *J. Climate*, 26, 6716–6732. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>