

A avaliação do desempenho de um OGCM forçado por um AGCM.

Luciano P Pezzi, Emanuel Giarolla, Paulo Nobre e Marta Malagutti

¹Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Rod. Presidente Dutra Km 40 – 12630-00 - Cachoeira Paulista, SP

luciano@cptec.inpe.br

Abstract. *In this paper we show preliminary results of the oceanic component of the coupled ocean-atmosphere system used at CPTEC for numerical seasonal climate forecast. The ocean general circulation model (OGCM) skill is analyzed when the model is forced with wind stresses generated by an atmospheric general circulation model (AGCM). The results are compared against a control simulation forced by observed wind stress, which theoretically would indicate the OGCM maximum skill. The better results are found in the experiment forced by the observed wind stresses, what is not a surprise. However, the results strongly suggest that the atmospheric resolution employed in the wind stress generation might play a fundamental role on the OGCM skills. The experiment forced by higher resolution wind stress produces better results compared to the one forced by lower wind stress resolution.*

Resumo. *Neste artigo são apresentados resultados preliminares da componente oceânica do sistema acoplado oceano-atmosfera de previsão sazonal numérica usado no CPTEC. A destreza do modelo de circulação geral oceânico (OGCM) é analisada quando o mesmo é forçado por ventos gerados previamente por um modelo de circulação geral atmosférico (AGCM). Esses resultados são comparados com uma simulação oceânica forçada por ventos observados, o que representaria teoricamente o melhor desempenho que se pode obter de um OGCM. Os melhores resultados são obtidos quando se força o OGCM com tensões de vento observada, o que não é surpreendente. Porém os resultados mostram que a resolução atmosférica usada na geração das tensões do vento tem papel fundamental no skill do modelo oceânico. O experimento forçado com tensões de vento de maior resolução (T62) apresenta melhores resultados do que o experimento forçado com mais baixa resolução (T42).*

1. Motivação

A evolução das ciências atmosféricas, associadas a evolução computacional, colocou um grande desafio no século XXI para a comunidade científica. Este desafio tem sido de transformar a previsão de tempo e clima de simplesmente uma questão atmosférica para uma questão de condições ambientais; onde, os modelos numéricos empregados nesta tarefa tornam-se cada vez mais complexos, considerando alguns dos vários aspectos acoplados do sistema terra-atmosfera-oceano.

No caso oceano-atmosfera, os oceanos Pacífico e Atlântico tropical desempenham um papel fundamental no clima global e da América do Sul. Por exemplo veja Ropelewski and Halpert (1987, 1989) para uma boa indicação dos impactos desses oceanos na temperatura e precipitação em algumas regiões do globo e Pezzi and Cavalcanti (2001) para o Brasil. Uma pequena variação na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) pode acarretar em grandes anomalias climáticas sobre várias regiões do globo. Hoje em dia, é possível prever com uma certa antecedência, por exemplo, o El Niño Oscilação Sul (ENOS) bem como os impactos produzidos por esse fenômeno em algumas regiões, e.g. sobre a América do Norte (Ropelewski and Halpert, 1986, Barnston and Preisendorfer, 1987), Hawaii e Alaska (Barnston and He, 1996), América do Sul (Rao and Hada, 1990, Pezzi and Cavalcanti, 2001), região Amazônica (Souza et al., 2000) e sul do Brasil (Pezzi et al., 2001). Alguns impactos do ENOS nas regiões tropical e sul da África, Austrália e partes da Índia são reportados também em Ropelewski and Halpert (1987) e Ropelewski and Halpert (1989).

Porém com o oceano Atlântico o problema é um pouco mais complexo devido à sua baixa previsibilidade, comparada ao caso do oceano Pacífico. A sua importância para o clima da América do Sul já há algum tempo vem sendo estudada (Moura and Shukla, 1981, Nobre and Shukla, 1996, Pezzi and Cavalcanti, 2001). Entretanto sua previsibilidade ainda permanece como um desafio. Repelli and Nobre (2004) mostraram a potencialidade de previsibilidade deste oceano usando um modelo estatístico. Esse modelo tem o melhor *skill* principalmente no período de março a maio, com previsões sendo feitas a partir dos meses de setembro a fevereiro. Esforços precisam ser feitos no sentido de se melhorar esses índices de previsibilidade do Atlântico fazendo-se uso de outras ferramentas, tais como modelos dinâmicos.

O CPTEC dentro de sua missão, que é a de prever o tempo e o clima para o Brasil e América do Sul tem colocado um grande esforço na implantação de um sistema acoplado oceano-atmosfera de previsão numérica. Neste trabalho são apresentados resultados preliminares, que é parte deste esforço, mostrando-se a componente oceânica do sistema acoplado oceano-atmosfera de previsão numérica. A destreza do modelo de circulação geral oceânico (OGCM) é analisada quando o mesmo é forçado por ventos gerados, previamente, por um modelo de circulação geral atmosférico (AGCM). Esses resultados são comparados com uma simulação oceânica forçada por ventos *observados*, o que representaria *teóricamente* o melhor desempenho que se pode obter de um OGCM. No item 2 é apresentado o OGCM bem como suas principais características, no item 3 são descritos os experimentos realizados, no item 4 são discutidos os resultados dos experimentos e no último item são apresentadas as conclusões e alguns passos futuros.

2. O modelo oceânico

O OGCM usado nesse trabalho é o *Modular Ocean Model* versão 3.0 (MOM3) (Pakanowski and Griffies, 2000). Este é o modelo que está acoplado ao AGCM do CPTEC e que será usado nas rotinas operacionais de previsão sazonal climática. O MOM é um modelo baseado na formulação de equações dinâmicas, denominadas primitivas, que é essencialmente baseada no trabalho pioneiro de Bryan (1969) e posteriormente em Cox (1984). A coordenada vertical é Z , a qual representa a distância de uma superfície em repouso, $Z = 0$, com valores positivos para cima e $Z = -H(x, y)$ a topografia. De

acordo com Griffies et al. (2000), algumas vantagens dessa coordenada é a simplicidade da discretização numérica das equações. Por outro lado, este tipo de coordenada vertical é deficiente na representação da topografia do fundo do oceano. As equações primitivas diferem da forma completa da equações do momento porque a equação vertical do momento é substituída pela aproximação hidrostática.

A grade é definida como quasi-global, cobrindo todas as longitudes do globo com espaçamento constante de 1.5° . Porém, latitudinalmente estende-se somente de 40°S a 40°N , com espaçamento irregular. Próximo ao equador a resolução é de 0.5° entre 5°N e 5°S . A resolução decresce em função da latitude para espaçamentos de até 2° , nas bordas norte e sul. O modelo tem 20 níveis na vertical com a maior resolução (aproximadamente 15 metros) nos primeiros 100 metros. Abaixo desta profundidade a resolução decresce, aumentando o espaçamento para 25 metros até a profundidade de 250 metros, aproximadamente, e depois para 120 metros até 2800 metros de profundidade máxima.

3. Estratégia dos Experimentos

Foram realizados 3 experimentos oceânicos, usando-se a mesma configuração do MOM3 em todos eles, porém forçados com 3 campos distintos de tensão do vento. Dois experimentos usaram tensões de vento geradas pelo AGCM do CPTEC. Em um deles a resolução do AGCM foi T42L28 e no outro T62L28, por conseguinte os experimentos oceânicos são nomeados T42 e T62 respectivamente, como mostrado na Tabela 1. Detalhes destes experimentos atmosféricos podem ser encontrados em Nobre and Malagutti (2004). O terceiro experimento oceânico foi forçado com tensões de vento derivadas das reanálises do NCEP (Kalnay et al., 1996). Para cada experimento o modelo parte do repouso e o *spin-up* feito por 30 anos usando-se ventos climatológicos médios mensais do período de 1971 a 2001. Na sequência cada experimento é inicializado de sua própria condição inicial oceânica e forçado por 30 anos com ventos médios mensais variando no período de 1971 a 2001. A radiação solar utilizada foi a climatologia de Oberhuber (1988). Salinidade e temperatura são inicializadas de Levitus and Boyer (1994).

Tabela 1: Tabela mostrando os nomes dos experimentos executados e as respectivas forçantes usadas.

<i>Experimento</i>	<i>Forçante</i>
T42	AGCM T42L28
T62	AGCM T62L28
FOR	Re-analize NCEP

4. Resultados

4.1. Análise global da TSM

Neste ítem são analisados os campos globais de TSM, erros quadrático médio (RMSE) e correlações de anomalias em relação a TSM observada do conjunto de dados da NOAA Smith and Reynolds (2004). Os maiores erros verificados na simulação encontram-se na região do Pacífico equatorial leste, como mostrado na Figura 1. Esta é uma região

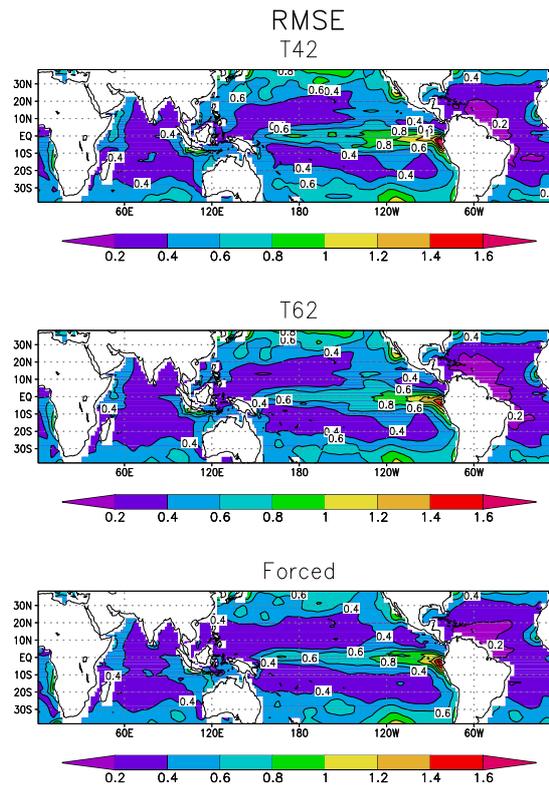


Figura 1: Erro quadrático médio (RMSE) das anomalias de TSM dos experimentos numéricos com as anomalias de TSM observadas. Período analisado 1971–2001.

caracteristicamente marcada pela presença de águas frias devido a ressurgência. É sabido que os OGCMs tem grande dificuldade em simular corretamente os processos turbulentos verticais de mistura nessa região e que em sua grande maioria, os modelos, apresentam um *bias* frio. Veja Pezzi and Richards (2003) para uma maior discussão sobre mistura lateral (*lateral mixing*) na região equatorial. De uma maneira geral, vê-se também em todos os experimentos erros maiores ao norte de 30°N e ao sul 30°, que devem estar associados ao problema das bordas norte e sul serem fechadas (*solid walls*). Os resultados de RMSE mostram que os maiores erros são do experimento T42. As análises globais de correlação são apresentadas na Figura 2. As maiores correlações de TSM são verificadas nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais. No Pacífico equatorial entre 180°E e 140°W ocorrem valores de até 0.8 e de 0.6 no Atlântico tropical sul. As áreas com esses valores mais altos de correlação tendem a aumentar, comparativamente, do experimento T42 para o experimento T62 como visto nas Figuras 2a e 2b. As maiores áreas espaciais com os maiores valores de correlação de todos os experimentos ocorrem no experimento FOR, que é forçado por tensões do vento das reanálises. É interessante observar que neste último experimento o Atlântico tropical norte exibe uma grande área de correlações entre maiores que 0.4 e 0.6 entre as latitudes de 10°N a 25°N.

4.2. Séries temporais da TSM

A análise das séries temporais mostram, de uma maneira geral, que o modelo reproduz a sazonalidade dos campos observados de TSM. A Figura 3 mostra as séries temporais

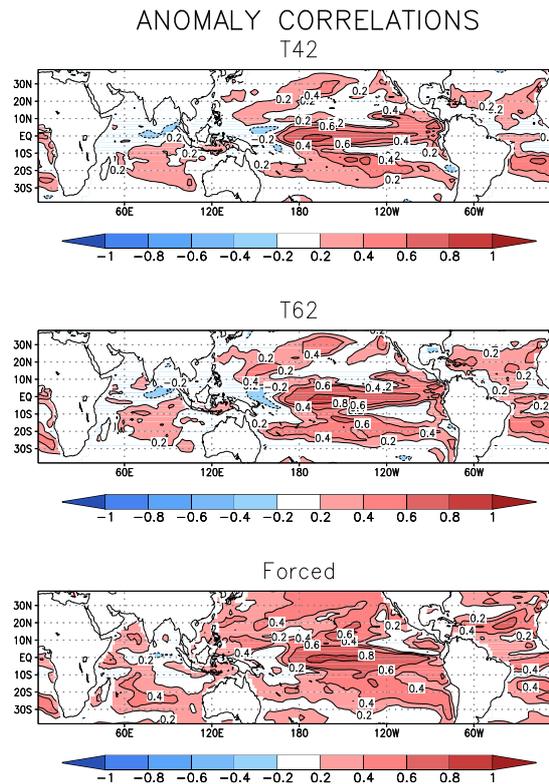


Figura 2: Correlações das anomalias de TSM dos experimentos numéricos com as anomalias de TSM observadas. Período analisado 1971–2001.

de TSM média sobre as regiões Niños 1+2, 3 e 4, no oceano Pacífico. Fica claro dessas séries temporais que o modelo oceânico subestima os valores máximos de TSM em eventos extremos. Este é o caso nos anos de 1982-83 e 1997-98 onde ocorreram dois eventos extremos do ENSO. Por exemplo, no El Niño de 1997-98, vê-se da Figura 3b (area Niño 3) que a TSM observada nesta área foi de aproximadamente 3.4°C acima da média. A simulação que mais se aproxima desse valor é a FOR (2.8°C), seguido em ordem decrescente por T62 (2.3°C) e finalmente por T42 (2.1°C).

Na área Niño 1+2, vê-se novamente o modelo subestimando os valores observados. Como mencionado anteriormente no item 4.1, essa deficiência pode estar associada ao problema do modelo não resolver corretamente (via parameterizações físicas) os processos de mistura turbulenta (Pezzi and Richards, 2003) e também a ressurgência que é um fenômeno característico desta região. Comparativamente as áreas Niño 3 e 4 apresentam uma melhor consistência com as observações. A área 4 é onde o modelo apresenta sua maior destreza em simular corretamente as anomalias de TSM. Os índices de RMSE e correlação das anomalias de TSM apresentados na Tabela 2 ratificam essa informação, mostrando valores de 0.37 e 0.84 para essa área respectivamente.

O oceano Atlântico apresenta anomalias menores comparadas aquelas verificadas no Pacífico (veja Figura 4a e b). A análise é separada em quatro áreas distintas consideradas importantes para esse oceano. As áreas Atlântico norte e sul são utilizadas no monitoramento e previsão sazonal do clima das regiões norte e nordeste do Brasil (Moura and Shukla, 1981, Nobre and Shukla, 1996, Pezzi and Cavalcanti, 2001), principalmente,

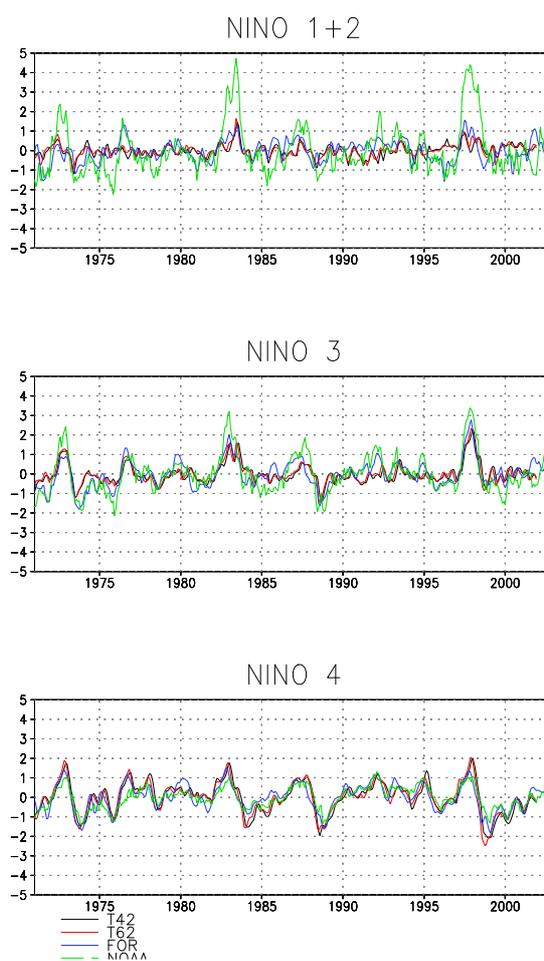


Figura 3: Séries temporais de anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$) para 4 áreas distintas sobre o oceano Atlântico. A posição é indicada no título das figuras.

onde as influências da TSM na circulação atmosférica de grande escala e precipitação nestas regiões são conhecidas.

Tabela 2: Tabela mostrando os erros quadráticos médios (RMSE) e as correlações das anomalias das séries temporais separadas para cada área como indicados na primeira coluna. Veja a localização das área nas Figuras 3 e 4.

Area	RMSE			CORR		
	T42	T62	FOR	T42	T62	FOR
Niño 1+2	1.13	1.08	1.00	0.43	0.57	0.59
Niño 3	0.70	0.64	0.55	0.74	0.80	0.83
Niño 4	0.46	0.45	0.37	0.82	0.83	0.84
Dip N	0.16	0.15	0.13	0.29	0.37	0.58
Dip S	0.17	0.18	0.20	0.48	0.43	0.33
ATL E	0.23	0.21	0.20	0.21	0.36	0.47
ATL W	0.38	0.37	0.32	0.20	0.26	0.55

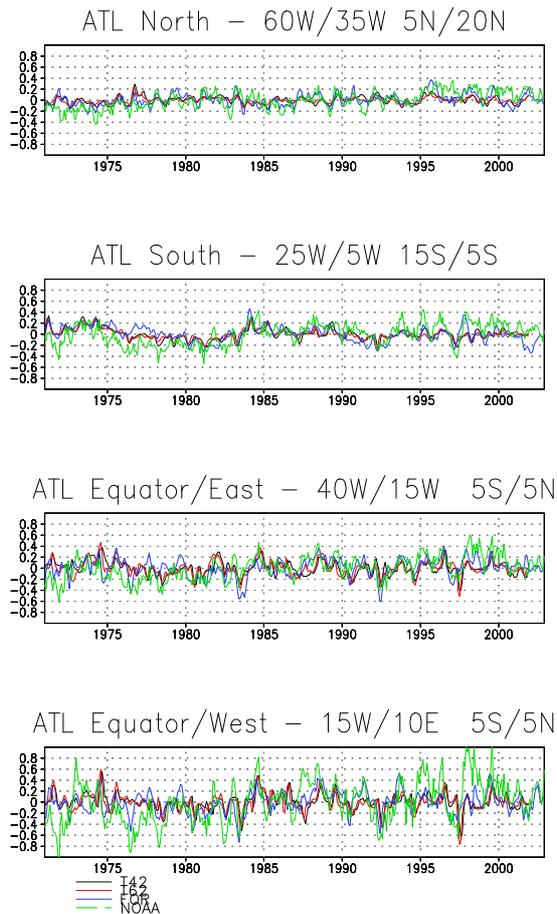


Figura 4: Séries temporais de anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$) para 4 áreas distintas sobre o oceano Atlântico. A posição é indicada no título das figuras.

É interessante observar que o modelo oceânico não reproduz a alta variabilidade temporal que as anomalias observadas apresentam. Em vários casos, a TSM simulada está fora de fase, aparentemente, em relação ao que é observado. De um modo geral os RMSE para o Atlântico são pequenos comparados aqueles encontrados para o Pacífico, chegando a exibir os valores mínimos de toda a análise. Para a área do Dipolo norte são 0.16°C (T42), 0.15°C (T62) e 0.16°C como mostrado na Tabela 2, no entanto as correlações são bastante baixas. Porém, essa área apresenta as melhores correlações comparado ao Atlântico sul. Este resultado em parte concorda com aqueles apresentados em Repelli and Nobre (2004), onde eles encontraram uma maior previsibilidade no Atlântico norte usando um modelo estatístico.

4.3. A corrente sub-superficial equatorial

Na Figura 5, são apresentados cortes meridionais x verticais da corrente zonal simulada pelo modelo oceânico. Todas elas são médias zonais sobre as longitudes indicadas no título de cada painel. Na coluna da esquerda são mostradas as seções verticais para o Pacífico e na direita para o Atlântico. De uma maneira geral, as principais características das correntes no Pacífico e Atlântico são reproduzidas. A corrente sub-superficial equatorial (CSE) com o máximo em torno de 60 cm/s para o experimento FOR no Pacífico.

Esta corrente é envolta pelas correntes equatorial do sul (CES) (componentes norte e sul) e mais ao norte pela contra corrente equatorial de norte (CCEN). No Atlântico a CSE é mais fraca do que no Pacífico, e um fato curioso é que a medida em que se aumenta a resolução das forçantes os valores da CSE diminuem. Situação inversa é verificada no oceano Pacífico.

5. Conclusões e direções futuras

Neste estudo foram avaliados três experimentos numéricos de simulação oceânica usando-se o *Modular Ocean Model* versão 3.0 (MOM3) (Pakanowski and Griffies, 2000). Os resultados apresentados aqui são de um trabalho que precede a fase de acoplamento do AGCM do CPTEC com o MOM3. O maior objetivo foi conhecer as potencialidades de *skill* do modelo oceânico quando submetido a forçantes atmosféricas com diferentes características. Neste caso as diferenças são as resoluções horizontal e vertical usadas no AGCM para gerá-las. Também testou-se a condição *teóricamente* ideal, onde o modelo oceânico é forçado por ventos *observados* (reanálises) e onde se espera conhecer o *skill* máximo do OGCM, dada suas particularidades de configuração de grade e parameterizações físicas.

Os melhores resultados numéricos de simulação oceânica são obtidos quando se força o experimento com tensões de vento observada (FOR), o que não é surpreendente. Porém os resultados mostraram forte indícios que a resolução atmosférica usada na geração das tensões do vento tem papel fundamental no *skill* do modelo oceânico. O experimento forçado com tensões do vento de maior resolução (T62) apresenta melhores resultados do que o experimento forçado com baixa resolução (T42).

Os próximos testes a serem realizados deverão contemplar a parte de configuração das parameterizações físicas e de resolução horizontal e vertical do modelo oceânico.

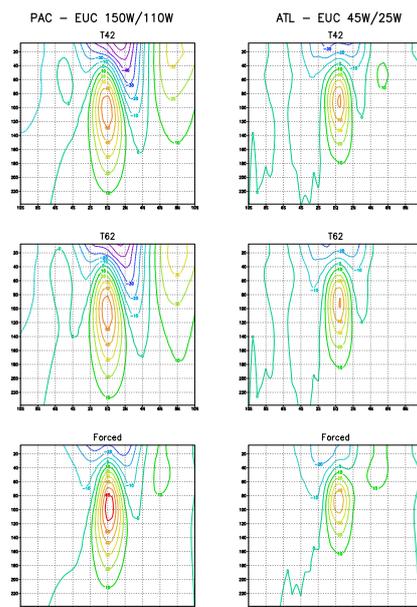


Figura 5: Corte vertical latitude X profundidade da corrente zonal (u) médio sobre as longitudes indicadas no título das figuras. As unidades são (cm s^{-1})

Referências

- Barnston, A. G. and He, Y. (1996). Skill of canonical correlation analysis forecasts of 3-month mean surface climate in hawaii and alaska. *Journal of Climate*, 9:2579–2605.
- Barnston, A. G. and Preisendorfer, R. (1987). Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for united states surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Monthly Weather Review*, 115:1825–1850.
- Bryan, K. (1969). A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *Journal of Computational Physics*, 4:347–376.
- Cox, M. D. (1984). A primitive equation, 3-dimensional model of the ocean. *GFDL, Ocean Group Technical Report 1, Available from Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton New Jersey - USA*.
- Griffies, S. M., Boning, K., Bryan, F. O., Chassignet, E. P., R., G., Hasumi, H., Hirst, A., Treguier, A. M., and Webb, D. (2000). Developments in ocean climate modelling. *Ocean Modelling*, 2:123–192.
- Kalnay, E. M., Kanamitsu, M., Kilster, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D. (1996). The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77:437–471.
- Levitus, S. and Boyer, T. (1994). World ocean atlas 1994. Tech. Report. (Salinity and Temperature) Vol 3-4, US Dep. of Commer., Washington, DC.
- Moura, A. D. and Shukla, J. (1981). On the dynamics of droughts in northeast of brazil: Observations, theory and numerical experiments with general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38:2653–2675.
- Nobre, P. and Malagutti, M. (2004). Uma avaliao do modelo de circulao geral do cptec para estudos climticos. *Anais XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza, Ceará*, 1.
- Nobre, P. and Shukla, J. (1996). Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical atlantic and south america. *Journal of Climate*, 10(4):2464–2479.
- Oberhuber, J. M. (1988). An atlas based on the coads data set: The budgets of heat, buoyancy and turbulent kinetic energy at the surface of teh global ocean. *Max-Planck-Institut fur Meteorology*, 1(15):20pp.
- Pakanowski, R. C. and Griffies, S. M. (2000). Mom 3.0 manual. *GFDL*(<http://www.gdfl.gov>, pages 680–pp.
- Pezzi, L. P. and Cavalcanti, I. (2001). The relative importance of enso and tropical atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over south america: A numerical study. *Climate Dynamics*, 17:205–212.
- Pezzi, L. P. and Richards, K. J. (2003). The effects of lateral mixing on the mean state and eddy activity of an equatorial ocean. *Journal of Geophysical Research*, 108(C12):doi:10.1029/2003JC001834.
- Pezzi, L. P., Ubarana, V., and Repelli, C. A. (2001). Forecast and performance of a statistical regional model for seasonal climate prediction in southern brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*.
- Rao, V. B. and Hada, K. (1990). Characteristics of rainfall over brazil: Annual variations and connections with the southern oscilation. *Theoretical and Applied Climatology*, 42:82–91.

- Repelli, C. and Nobre, P. (2004). Statistical prediction of sea surface temperature over the tropical atlantic. *International Journal of Climatology*, 24:45–55.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. (1986). North american precipitation and temperature patterns associated with the el *niño*/southern oscillation. *Monthly Weather Review*, 114:2352–2362.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the el *niño*/southern oscillation. *Monthly Weather Review*, 115:1606–1626.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. (1989). Precipitation patterns associated with high index phase of the southern oscillation. *Journal of Climate*, 2:260–284.
- Smith, T. M. and Reynolds, R. W. (2004). Extended reconstruction of global seas surface temperatures based on coads data 1854-1997. *Journal of Climate*, Submitted.
- Souza, E., Kayano, M. T., Tota, J., Pezzi, L., Fisch, G., and Nobre, C. (2000). On the influences of the el *niño*, la *niña* and atlantic dipole pattern on the amazonian rainfall during 1960-1998. *ACTA Amazonica*, 30(2):305–318.