

Sazonalidade da Precipitação Sobre o Nordeste Setentrional Brasileiro nas Simulações do IPCC-AR4

Cleiton da Silva Silveira, Francisco de Assis de Souza Filho, Yvonne Magdalena Campos Lázaro

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)/UFC
cleitonsilveira16@yahoo.com.br, assis@ufc.br, yvonnecamp@gmail.com

Alexandre Araújo Costa, Domingo Cassain Sales

Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas (MCFE)/UECE
alexandrearaujoc@gmail.com, domingosales@gmail.com

Mariane Mendes Coutinho

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CST/INPE
mariane.coutinho@inpe.br

Recebido: 23/02/11 - revisado: 16/05/11 - aceito: 09/04/12

RESUMO

Os modelos globais do quarto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4) são avaliados para o Nordeste Setentrional do Brasil quanto à representação da sazonalidade da precipitação para o período de 1901 a 1999. Essa avaliação é realizada utilizando-se os dados do Climatic Research Unit (CRU) e a reanálise 20th Century Reanalysis V2 do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Propõe-se a criação de um índice de desempenho, baseado em medidas de correlação e erro quadrático médio, para a avaliação e classificação dos modelos. A maioria dos modelos fornece correlações superiores a 0,85 e erro quadrático inferior a 5% em relação ao percentual de chuva mensal da climatologia média sobre a região. Segundo a avaliação pelo índice de desempenho proposto, os modelos MRI-CGCM2.3.2 (Japonês) e BCCR-BCM2.0 (Norueguês) fornecem as melhores representações da sazonalidade da precipitação na região.

Palavras-Chave: IPCC-AR4; sazonalidade; índice de desempenho.

INTRODUÇÃO

Significativo desenvolvimento tem ocorrido nas últimas décadas acerca do conhecimento do clima em suas diversas escalas de ocorrência, com ênfase nas mudanças climáticas antropogênicas. Diversos autores identificam aumento da temperatura planetária (incluindo o Brasil) nas últimas décadas, combinado com modificações nos campos de precipitação, associando essas ocorrências às Mudanças Climáticas (Marengo e Valverde, 2007; Marengo e Soares, 2005). Estas têm sido alvo de discussões e pesquisas científicas em todo mundo com vistas ao entendimento de sua ocorrência (IPCC, 2007(a); Nobre, 2005), assim como a identificação e a avaliação dos possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos (IPCC, 2007(b)) e a elaboração de medidas que minimizem as consequências adversas das mesmas.

As mudanças climáticas estão associadas a um modelo de desenvolvimento baseado no uso intensivo de combustíveis fósseis. O aumento exponencial na demanda por energia e recursos naturais trouxe consigo grandes quantidades de emissões de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxido de nitrogênio) na atmosfera.

Desde 1988, quando foi criado IPCC, cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima reúnem-se para publicar relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas. Até o momento, foram publicados quatro relatórios: em 1990 em Sundsvall (Suécia), 1995 em Roma (Itália), 2001 em Acra (Gana) e 2007 em Paris (França).

O quarto relatório fornecido pelo IPCC, divulgado em fevereiro de 2007, confirma a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera. Embora exista uma discrepância em torno dos valores absolutos dos modelos do IPCC para esse

aumento na temperatura, todos concordam que haverá aumento na temperatura média global (IPCC, 2007(a)).

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima semiárido com intensa variabilidade temporal e espacial de chuvas (Molion e Bernardo, 2002; Albuquerque et. al, 2009) associada historicamente a significativos impactos sociais e econômicos sobre a região descritos em, por exemplo, Souza Filho e Moura (2006). Desta forma, torna-se relevante para o desenvolvimento de políticas públicas a identificação das alterações na ocorrência do clima nesta região.

Os diferentes modelos do IPCC-AR4 têm cenários divergentes para o campo de precipitação para a região do NEB, alguns projetando aumento de precipitação e outros, redução.

O objetivo do presente estudo é avaliar a habilidade dos modelos do IPCC-AR4 em simular o regime sazonal de chuvas sobre o NEB durante o século XX, buscando indicações sobre a confiabilidade das projeções desses modelos para o século XXI.

METODOLOGIA

Região de Estudo

Utilizou-se uma região de 0° a 10°S de latitude e 33°W a 44°W de longitude sobre o NEB, assim como uma porção do Oceano Atlântico, conforme mostra a Figura 1.

Essa região possui um ciclo anual bem definido, onde predominam duas estações distintas: o período chuvoso e o período seco (Albuquerque et.al, 2009). A estação chuvosa distribui-se entre dezembro e julho e subdivide-se em: a) pré-estação chuvosa (dezembro e janeiro), durante a qual os principais sistemas causadores de chuva são a proximidade das frentes frias e os vórtices ciclônicos de ar superior; b) “quadra chuvosa” ou estação chuvosa propriamente dita (de fevereiro a maio), que tem a zona de convergência intertropical-ZCIT como principal sistema causador de chuva, impactando o setor norte do NEB, seguido de sistemas secundários tais como linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala e efeitos de brisa (Uvo e Nobre, 1987) e c) pós-estação chuvosa (junho e julho), em que os sistemas causadores de chuva mais importantes são as ondas de leste, que atuam principalmente sobre o leste do NEB, e os complexos convectivos de mesoescala. No segundo semestre, há um predomínio de altas pressões atmosféricas e uma quase total ausência de fenômenos atmosféricos causadores de

chuva, caracterizando a estação seca. O NEB apresenta grande variabilidade de chuvas com regiões com precipitação de 500 mm/ano e outras com mais de 1400 mm/ano (Souza Filho, 2003).

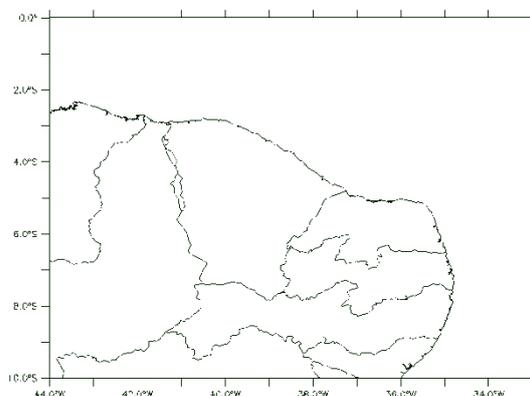


Figura 1- Região de estudo, Nordeste Setentrional brasileiro e parte do Oceano Atlântico

Dados observacionais

A base de dados observacionais utilizada para verificar a destreza dos modelos do IPCC sobre o continente é proveniente da University of East Anglia/Climate Research Unit (CRU) (New et. al, 1999 e New et. al, 2001) (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>), enquanto sobre o oceano são usadas as reanálises 20th CenturyReanalysis V2 (Compo, 2004; Whitaker, 2006), fornecidas pelo National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) a partir do site <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

O conjunto de dados utilizado corresponde à climatologia de precipitação de 1901 a 1999, com resolução de 0,5 grau para o continente (CRU TS 3.0) e 2,0 graus para o oceano (20th Century Reanalysis V2).

Modelos do IPCC

Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuíram para esse relatório (conforme Tabela 1), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX (simulações 20C3M).

Tabela 1 - Modelos de circulação geral do IPCC

Designação do Modelo	Instituição ou Agência; País	Topo do modelo /Resolução
BCC-CM1	Beijing Climate Center; China	25 hPa/ T63 (1.9° x 1.9°) L16
BCCR-BCM2	Bjerknes Centre for Climate Research, Universidade de Bergen; Noruega	10 hPa/ T63 (1.9° x 1.9°) L31
CCCMA-CGCM3.1-T47	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis; Canadá	1 hPa/ T47 (~2.8° x 2.8°) L31
CCCMA-CGCM3.1-T63	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis; Canadá	1 hPa/ T63 (~1.9° x 1.9°) L31
CNRM-CM3	Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo France; França	0.05 hPa/ T63 (~1.9° x 1.9°) L45
CONS-ECHO-G	Meteorological Institute of the University of Bonn (Alemanha), Institute of KMA (Correia do Sul), and Model, and Data Group	10hPa/ T30 (~3.9° x 3.9°) L19
CSIRO-MK3	CSIRO; Austrália	4.5 hPa/ T63 (~1.9° x 1.9°) L18
CSIRO-MK3.5	CSIRO; Austrália	4.5 hPa/ T63 (~1.9° x 1.9°) L18
GFDL-CM2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA; Estados Unidos	3 hPa/ 2.0° x 2.5° L24
GFDL-CM2.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA; Estados Unidos	3 hPa/ 2.0° x 2.5° L24
INM-CM3.0	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science; Rússia	10 hPa/ 4° x 5° L21
INGV-SXG2005	National Institute of Geophysics and Volcanology; Itália	10hPa/ T106 (1,125o x1,125o)
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL); França	4hPa/ 2.5° x 3.75° L19
LASG-FGOALS-G1.0	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 9804, Beijing 100029; China	2.2 hPa/ T42 (~2.8 x 2.8°) L26
MPIM-ECHAM5	Max Planck Institute for Meteorology; Alemanha	10 hPa/ T63 (~1.9° x 1.9°) L31
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency; Japão	0.4 hPa/ T42 (~2.8° x 2.8°) L30
NASA-GISS-AOM	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/ GISS); Estados Unidos	10hPa/ 3° x 4° L12
NASA-GISS-EH	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/ GISS); Estados Unidos	0.1 hPa/ 4° x 5° L20
NASA-GISS-ER	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/ GISS); Estados Unidos	0.1 hPa/ 4° x 5° L20
NCAR-CCSM3	National Center for Atmospheric Research (NCAR); Estados Unidos	2.2 hPa/ T85 (1.4° x 1.4°) L26
NCAR-PCM	National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF, DOE, NASA, e NOAA; Estados Unidos	2.2 hPa/ T42 (~2.8° x 2.8°) L26
NIES-MIROC3.2-HI	CCSR/ NIES/ FRCGC; Japão	40 km T 106 (~1.1° x 1.1°) L56
NIES-MIROC3.2-MED	CCSR/ NIES/ FRCGC; Japão	30 km T42 (~2.8° x 2.8°) L20
UKMO-HADCM3	Hadley Centre for Climatic Prediction and Research, Met Office; Reino Unido	5 hPa/ 2.5° x 3.75° L19
UKMO-HADGEM1	Hadley Centre for Climatic Prediction and Research, Met Office; Reino Unido	39.2 km/ ~1.3° x 1.9° L38

Crítérios de Avaliação

Utilizou-se como critério de avaliação a representação da sazonalidade da precipitação, que é de grande relevância para a avaliação dos impactos do clima em recursos hídricos e agricultura. O início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas. Uma má representação desta sazonalidade compromete a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre estas duas importantes áreas. Adicionalmente pode-se avaliar que os totais de precipitação mensais e sua sazonalidade são considerados como indicativo da habilidade do modelo em representar os sistemas geradores de chuvas e sua ocorrência.

Para avaliação dos modelos é calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para todos os modelos do IPCC e as observações (CRU sobre o continente e NOAA sobre o oceano). Em seguida, é feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos para que possam ser defi-

nidos que modelos possuem melhor desempenho para a região de estudo.

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são: raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais (RMSE_PC) e correlação (CORREL) (Wilks, 1995).

A raiz do erro quadrático médio percentual (RMSE_PC) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre a contribuição percentual mensal das chuvas modeladas nos totais anuais e a contribuição percentual mensal das chuvas observadas nos totais anuais e é definida pela equação:

$$RMSE_{PC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{100 \cdot P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} - \frac{100 \cdot A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2}, \quad (1)$$

onde n são os meses, P é previsão de cada mês e A a Análise considerada como observação.

Valores grandes do $RMSE_{PC}$ representam grandes erros nos campos previstos, e valores próximos de zero indicam uma previsão quase perfeita. Elevando ao quadrado o termo da diferença, o $RMSE_{PC}$ tende a dar maior peso às grandes discrepâncias entre os campos observados e previstos.

A correlação (equação 2) pode assumir valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, havendo ainda a total ausência de correlação verificada com um resultado igual a zero. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (2)$$

Ao final do cálculo desses dois índices é feita uma avaliação ponderada para que os modelos possam ser classificados, dada por:

$$AVAL = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{RMSE_{PC_{MAX}} - RMSE_{PC}}{RMSE_{PC_{MAX}} - RMSE_{PC_{MIN}}} \right) \quad (3)$$

tal que

$$\alpha_c + \alpha_r = 1. \quad (4)$$

Sendo, $CORREL_{MIN}$ a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e $CORREL_{MAX}$ a máxima correlação. Assim como, $RMSE_{PC_{MAX}}$ é o máximo erro quadrático médio percentual dos modelos do IPCC e $RMSE_{PC_{MIN}}$ o mínimo.

As variáveis α_c e α_r assumem valores entre 0 e 1 (conforme equação 4). Para $\alpha_c > \alpha_r$, a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo, enquanto que para $\alpha_r > \alpha_c$ o $RMSE_{PC}$ dos modelos possui maior peso na avaliação. Já para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$, as duas métricas utilizadas neste trabalho exercem o mesmo efeito sobre o valor de AVAL.

A variável AVAL assume valores entre 0 e 1 que indicam, respectivamente, o pior entre os modelos avaliados e o melhor deles, segundo este critério.

Interpolação

As análises do CRU ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) são interpoladas para grade do 20th Century Reanalysis V2 ($2^\circ \times 2^\circ$), sendo chamadas neste trabalho de análise CRU/NOAA. Em seguida, as previsões dos modelos do IPCC são interpoladas para esta grade, conforme a equação 5. A precipitação interpolada para os pontos da grade da análise CRU/NOAA constitui-se de uma média ponderada das precipitações dos pontos fornecidas pelo modelo do IPCC em questão (equação 5), tal que as funções-peso são dadas conforme a equação (6).

$$P_A = \frac{\sum_{N=1}^N W_N P_N}{\sum_{N=1}^N W_N} \quad (5)$$

$$W_N = \exp\left(-\sqrt{\left(\frac{X_{IPCC} - X_A}{K_X}\right)^2 + \left(\frac{Y_{IPCC} - Y_A}{K_Y}\right)^2}\right), \quad (6)$$

Se $W_N > \exp(-R^2)$, então $W_N = 0$;

onde X_A e Y_A são as coordenadas dos pontos de grade da análise CRU/NOAA; X_{IPCC} e Y_{IPCC} são as coordenadas dos modelos do IPCC; N é o número de ponto de grade do modelo do IPCC avaliado; P_N são as precipitações em cada ponto de grade do modelo do IPCC avaliado; W_N são os pesos de cada ponto de grade do modelo do IPCC avaliado em relação ao ponto de grade da análise CRU/NOAA; P_A são as precipitações de cada ponto de grade depois da interpolação; K_X , K_Y e R são constantes, para as quais é atribuído o valor 1.

Após a interpolação dos valores climatológicos mensais dos modelos para a grade da análise CRU/NOAA, é analisada a habilidade dos modelos em representar o ciclo sazonal da precipitação sobre as caixas de $2^\circ \times 2^\circ$ dessa grade, sendo utilizado o mesmo método descrito anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 2 mostra as climatologias dos modelos do IPCC e a média destas em comparação ao observado sobre a região indicada pela figura 1. A maioria dos modelos representa razoavelmente a climatologia observada, porém, principalmente no período da estação chuvosa, os modelos divergem quanto à quantidade de chuva nessa região (figura 2a).

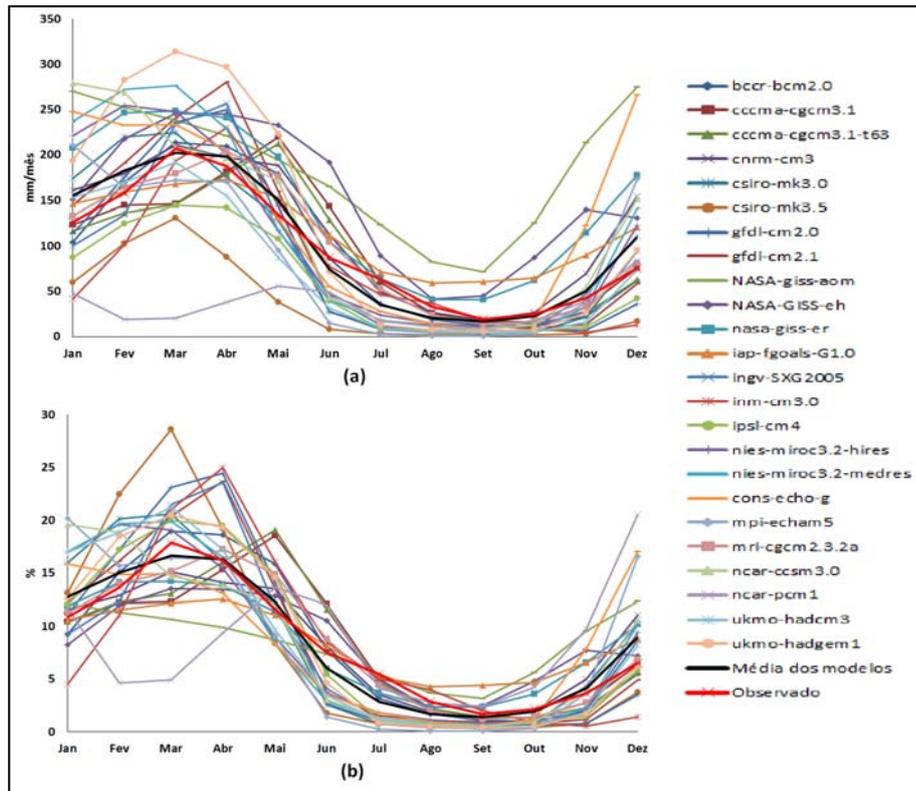


Figura 2 – Climatologia dos Modelos do IPCC-AR4 para século XX (1901-1999) para o Nordeste Setentrional do Brasil: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.

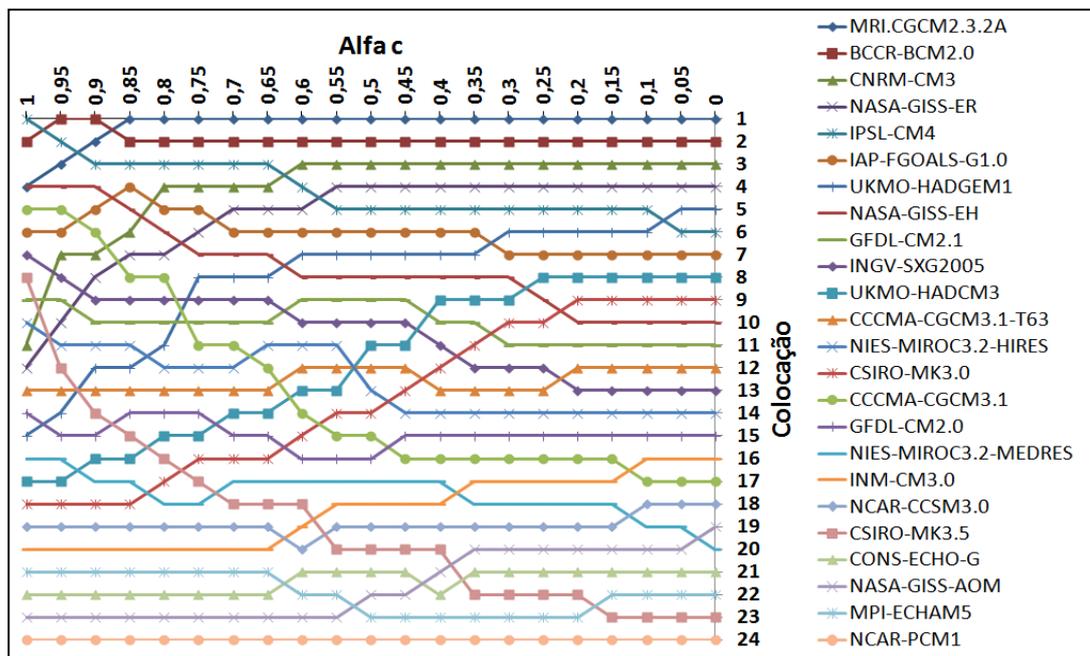


Figura 3 – Classificação dos modelos em função dos valores de α_c . Para $\alpha_c=0$ ($\alpha_c=1$), apenas a correlação é usada na avaliação dos modelos.

A média dos modelos superestima a quantidade de precipitação na pré-estação e a subestima na pós-estação, o que se reflete também em termos percentuais (figura 2b).

O modelo NCAR-PCM1 possui dificuldade em representar o ciclo anual de chuvas no NEB, claramente subestimando a precipitação em todo o primeiro semestre e produzindo valores máximos de precipitação mensal em dezembro-janeiro e maio-junho, em defasagem com as observações. Por sua vez, o modelo UKMO-HADGEM1 superestima em cerca de 50% a precipitação nos meses da estação chuvosa. Já o modelo CSIRO-MK3.5 aponta chuvas bem inferiores ao observado, subestimando o total anual em mais de 50% com uma maior concentração das chuvas nos meses de fevereiro e março.

Os modelos NASA-GISS-AOM e NASA-GISS-EH superestimam a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em totais anuais respectivamente 93% e 57% acima do observado. Além disso, o NASA-GISS-AOM apresenta erros de fase na distribuição anual da precipitação, subestimando a contribuição percentual das chuvas no primeiro semestre para o total anual e superestimando-a no segundo.

O modelo CONSECHO-G, fornecido através de uma parceria de um centro alemão e um centro sul-coreano, apresenta dificuldade de representar a climatologia anual, mais do que duplicando o total de chuvas na pré-estação.

O modelo francês IPSL-CM4 subestima a climatologia da precipitação durante todo o ano (total anual 37% abaixo das observações), mas superestimando a contribuição percentual das chuvas entre janeiro e maio.

Na figura 3 é mostrada a classificação dos modelos do IPCC-AR4 em função de α_c . Para valores entre 0 e 0,85 o modelo com maior valor de AVAL é o MRI-CGCM2.3.2A, enquanto que o modelo BCCR-BCM2.0 mantém-se sempre entre os dois melhores para todos os valores dos pesos. Para $\alpha_c = 1$, o modelo IPSL-CM4 emerge como o modelo com maior valor de AVAL, indicando que este possui correlação superior aos demais.

O modelo NCAR-PCM1 é o pior dentre os modelos para todos os valores de α_c . Os modelos MPI-ECHAM5, CONSECHO-G, NASA-GISS-AOM, NCAR-CCSM3.0 e INMCM3.0 ocupam sistematicamente colocações inferiores a décimo sexto para todos os valores de α_c .

Os modelos CNRM-CM3, CCCMA-CGCM3.1, NASA-GISS-EH, CCCMA-CGCM3_1_T63 caem de colocação à medida que se aumenta o valor de α_c , o

que mostra que a correlação desses modelos é ligeiramente inferior aos demais, enquanto que os modelos CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, UKMO-HADGEM1 e GFDL-CM2.1 melhoram de colocação à medida que o valor de α_c aumenta, o que significa que o RMSE_PC desses modelos é ligeiramente inferior.

Na tabela 2 são mostrados os índices estatísticos RMSE_PC, CORREL e AVAL de todos os modelos do IPCC em ordem de classificação, para α_c igual a 0,5. A maioria dos modelos indicou correlações superiores a 0,85 e erro quadrático inferior a 3,5% em relação ao percentual de chuva mensal. O modelo japonês MRI-CGCM2.3.2 apresentou correlações superiores a 0,95 e RMSE_PC inferior a 2% , o que o classifica como o melhor modelo segundo a avaliação proposta neste trabalho para α_c igual a 0,5, seguido pelos modelos BCCR-BCM2.0 (Norueguês) e CNRM-CM3 (Francês).

O modelo NCAR-PCM1 apresentou correlação inferior a 0,2, bem abaixo dos demais modelos, e o maior RMSE_PC. Isto levou esse modelo a apresentar AVAL igual a 0, indicando que o mesmo não representa adequadamente a sazonalidade da precipitação no Nordeste Setentrional brasileiro.

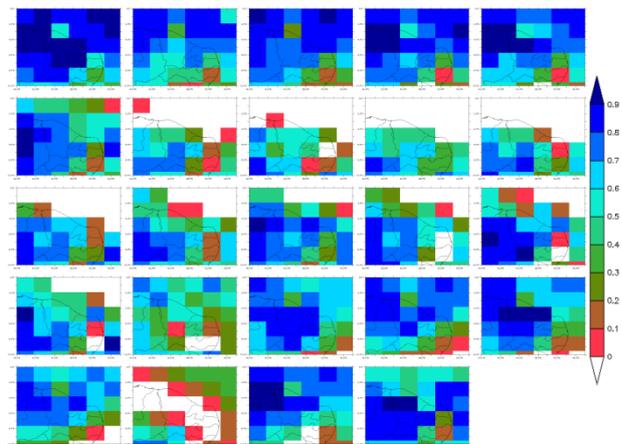


Figura 4 – CORREL dos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA. Modelos do IPCC na seguinte seqüência da esquerda para a direita e de cima para baixo: BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, NASA-GISS-AOM, NASA-GISS-EH, NASA-GISS-ER, IAP-FGOALS-G1.0, INGV-SXG2005, INM-CM3.0, IPSL-CM4, NIES-MIROC3.2-HIRES, NIES-MIROC3.2-MEDRES, CONSECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1.

Tabela 2: Avaliação dos Modelos do IPCC-AR4 para o século XX para região Nordeste do Brasil, considerando α_c igual a 0,5.

Modelos do IPCC	Classificação	AVAL	CORREL	RMSE_PC
<i>MRI-CGCM2.3.2A</i>	1	0,994	0,970	1,414
<i>BCCR-BCM2.0</i>	2	0,956	0,979	1,883
<i>CNRM-CM3</i>	3	0,927	0,934	1,911
<i>NASA-GISS-ER</i>	4	0,911	0,927	2,042
<i>IPSL-CM4</i>	5	0,903	0,981	2,486
<i>IAP-FGOALS-G1.0</i>	6	0,879	0,955	2,579
<i>UKMO-HADGEM1</i>	7	0,863	0,905	2,435
<i>NASA-GISS-EH</i>	8	0,837	0,970	3,152
<i>GFDL-CM2.1</i>	9	0,809	0,937	3,234
<i>INGV-ECHAM4</i>	10	0,807	0,943	3,298
<i>UKMO-HADCM3</i>	11	0,798	0,871	2,916
<i>CCCMA-CGCM3.1-T63</i>	12	0,794	0,912	3,242
<i>NIES-MIROC3.2-HIRES</i>	13	0,792	0,935	3,416
<i>CSIRO-MK3.0</i>	14	0,785	0,856	2,960
<i>CCCMA-CGCM3.1</i>	15	0,767	0,968	3,907
<i>GFDL-CM2.0</i>	16	0,766	0,911	3,547
<i>NIES-MIROC3.2-MEDRES</i>	17	0,707	0,886	4,032
<i>INM-CM3.0</i>	18	0,684	0,802	3,721
<i>NCAR-CCSM3.0</i>	19	0,676	0,827	3,972
<i>CSIRO-MK3.5</i>	20	0,651	0,938	4,998
<i>CONS-ECHO-G</i>	21	0,599	0,742	4,271
<i>GISS-AOM</i>	22	0,586	0,677	3,976
<i>MPI-ECHAM5</i>	23	0,582	0,794	4,805
<i>NCAR-PCM1</i>	24	0,000	0,152	6,960

As rodadas dos modelos NASA-GISS-AOM, CONS-ECHO-G, INM-CM3.0, MPI-ECHAM5, NCAR-CCSM3.0 e NCAR-PCM1 apresentaram correlações inferiores aos demais, associados a um RMSE_PC superior a 3,5%, por isso obtiveram um AVAL bastante baixo.

O modelo australiano CSIRO-MK3.5 apesar de apresentar correlação superior a 0,90, apresentou RMSE_PC superior a 4,9%, penalizando-o na avaliação de modo a classificá-lo na vigésima colocação.

Na figura 4 são mostradas as distribuições espaciais das correlações pelos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA no período de 1901 a 1999. A maioria dos modelos apresenta correlações superiores a 0,5 em praticamente todo o domínio avaliado. No leste do NEB, os modelos em geral mostram correlações inferiores ao

restante do domínio avaliado, indicando que os mesmos possuem menos habilidade de representar a sazonalidade sobre essa região.

O modelo NCAR-PCM1 apresenta correlações negativas em várias regiões do domínio avaliado, mostrando que o mesmo não representa adequadamente a sazonalidade sobre a maior parte do NEB.

Os modelos BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, IAP-FGOALS-G1.0, INM-CM3.0, CONS-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI CGCM 2.3.2^a, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1 apresentaram correlações superiores a 0,8 em várias regiões do domínio avaliado. Isso indica que estes modelos capturam bem a sazonalidade da precipitação sobre a região.

Na figura 5 é mostrado o erro quadrático percentual obtido pelos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA no período de 1901 a 1999.

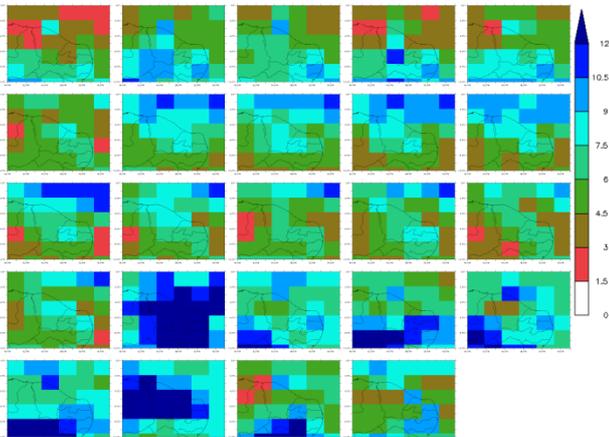


Figura 5 – RMSE_PC dos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA. Modelos do IPCC na seguinte sequência da esquerda para a direita e de cima para baixo: BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, NASA-GISS-AOM, NASA-GISS-EH, NASA-GISS-ER, IAP-FGOALS-G1.0, INGV-SXG2005, INM-CM3.0, IPSL-CM4, NIES-MIROC3.2-HIRES, NIES-MIROC3.2-MEDRES, CONS-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1.

Os modelos BCCR-BCM2.0, CNRM-CM3 e IPSL-CM4 apresentaram campos com menores RMSE_PC em praticamente todo domínio, enquanto os modelos NIES-MIROC3.2-MEDRES, NCAR-CCSM3.0 e NCAR-PCM1 apresentaram RMSE_PC superior a 10% em várias regiões, o que indica que estes modelos possuem dificuldade de representar a contribuição percentual dos meses nas precipitações anuais.

Na figura 6 é mostrado o índice de AVAL obtido pelos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA no período de 1901 a 1999 para as caixas de grade de dimensão 2°x2°. Destacam-se os modelos BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, NASA-GISS-AOM, NASA-GISS-EH, NASA-GISS-ER, IAP-FGOALS-G1.0, INGV-SXG2005, INM-CM3.0, IPSL-CM4, NIES-MIROC3.2-HIRES, NIES-MIROC3.2-MEDRES, CONS-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1 que obtiveram valores superiores a 0,8 em vários pontos do domínio. Os modelos CSIRO-MK3.5 e NCAR-PCM1 obtiveram valores inferiores a 0,5 na maioria dos pontos da região avaliada.

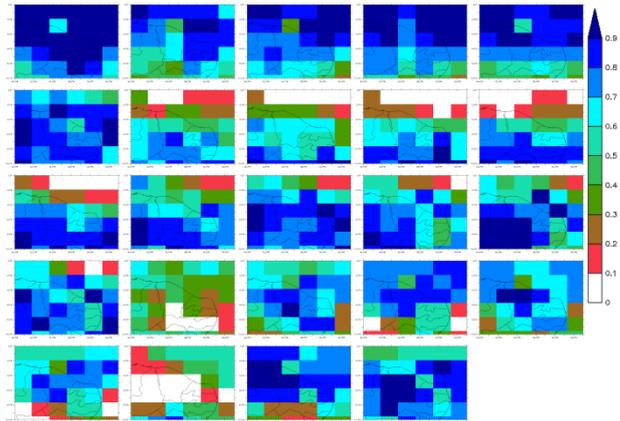


Figura 6 – AVAL dos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA, considerando $\alpha_r = \alpha_c = 0,5$. Modelos do IPCC na seguinte sequência da esquerda para a direita e de cima para baixo: BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, NASA-GISS-AOM, NASA-GISS-EH, NASA-GISS-ER, IAP-FGOALS-G1.0, INGV-SXG2005, INM-CM3.0, IPSL-CM4, NIES-MIROC3.2-HIRES, NIES-MIROC3.2-MEDRES, CONS-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1.

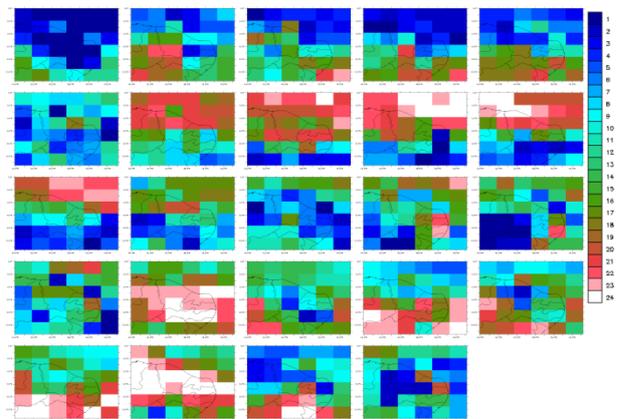


Figura 7 – Classificação espacial dos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA, considerando $\alpha_r = \alpha_c = 0,5$. Modelos do IPCC na seguinte sequência da esquerda para a direita e de cima para baixo: BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-CGCM3.1.T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, NASA-GISS-AOM, NASA-GISS-EH, NASA-GISS-ER, IAP-FGOALS-G1.0, INGV-SXG2005, INM-CM3.0, IPSL-CM4, NIES-MIROC3.2-HIRES, NIES-MIROC3.2-MEDRES, CONS-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3 e UKMO-HADGEM1.

O modelo UKMO-HADCM3, apesar de apresentar valores de AVAL superiores 0,8 no norte do NEB mostra valores inferiores a 0,2 no sul da região analisada.

Na figura 7 é mostrada a classificação dos modelos do IPCC em relação à climatologia da análise CRU/NOAA no período de 1901 a 1999 nas caixas de grade de 2°x2°. Os modelos BCCR-BCM2, CNRM-CM3, IPSL-CM4 e UKMO-HADGEM1, obtiveram em geral as melhores colocações. Em contraste, os modelos CSIRO-MK3.5 e NCAR-PCM1 obtiveram colocações inferiores a vigésimo na maior parte do domínio.

CONCLUSÕES

Os modelos globais do IPCC apresentam correlações elevadas em relação à climatologia observada no período de 1901 a 1999 para região Nordeste Setentrional do Brasil, mostrando que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais.

Quanto ao erro quadrático médio percentual, a maioria dos modelos aponta valores elevados espacialmente, o que indica que os modelos possuem dificuldade de quantificar os padrões de chuva sobre o Nordeste Setentrional brasileiro.

A maioria dos modelos possui dificuldade em representar a pré-estação, superestimando o valor observado e a pós-estação, subestimando-o. Isto fica evidente na média dos modelos que, de novembro a fevereiro, apresenta valores acima do observado e que, de junho a agosto, apresenta valores abaixo do observado. Essa dificuldade pode estar associada ao espaçamento de grade dos modelos do IPCC, que possuem uma resolução grosseira e não são capazes de reproduzir os padrões de variação dos fenômenos de mesoescala e os efeitos da circulação atmosférica local nesses períodos.

Quanto à climatologia dos modelos IPCC algumas observações são destacadas:

- A avaliação feita com os dados médios sobre a área delimitada na Figura 1 apontou o modelo Japonês MRI-CGCM2.3.2 como aquele com mais altos valores de AVAL, seguido pelos modelos BCCR-BCM2.0 (Norueguês) e CNRM-CM3 (Francês);
- O modelo NCAR-PCM1 não representa adequadamente a climatologia média da

precipitação sobre o Nordeste Setentrional brasileiro;

- Os modelos MPI-ECHAM5, MIUB-ECHO-G e GISS-AOM apresentaram correlações ligeiramente inferiores aos demais, dessa forma mostram-se inferiores aos outros modelos IPCC na representação da climatologia média sobre a região;
- Os modelos CSIRO-MK3.5 e MIROC3.2-MEDRES apesar de apresentarem correlações superiores a 0,90, apresentaram RMSE_PC superior a 4%, mostrando dificuldade em quantificar as chuvas mensais sobre a região estudada.

Em geral, os modelos mostram dificuldade de representação do ciclo anual da precipitação sobre o leste do NEB, com correlações inferiores às demais regiões do domínio. Especialmente, os modelos BCCR-BCM2, CNRM-CM3, IPSL-CM4 e UKMO-HADGEM1 obtiveram avaliação superior aos demais. O modelo NCAR-PCM1 mostra-se inadequado para representação dos padrões de variação sazonal do século XX sobre o NEB.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por financiamento concedido através dos projetos “Modelagem Climática Regional (Downscaling) e Suas Aplicações Em Energias Renováveis” (MOREA, Processo 555675/2010-6, Edital 05/2010), “Downscaling de Mudanças Climáticas para o Nordeste Brasileiro” (DOMINÓ, Processo 482378/2010-7, Edital 14/2010) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), por financiamento concedido através do projeto “Mudanças Climáticas, Variabilidade Climática e seus Impactos no Semi-Árido: Recursos Hídricos, Energias Renováveis, Ambiente e Agricultura” (MUVUCA, Edital 09/2010 PRO-NEM/CNPq/FUNCAP).

REFERÊNCIAS

ALBURQUERQUE, I. F.; FERREIRA, J. N.; SILVA, M. G.; DIAS, M. F. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 280.

COMPO, G. P.; WHITAKER, J. S.; SARDESHMUKH, P. D. Feasibility of a 100 year reanalysis using only surface pressure data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 87, n. 2, p. 175-190, 2006.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007a. 18 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b. 23 p.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC de 2001. In: CLIMA e recursos hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA, 2003. cap. 6, p. 209-233.

MARENGO, J. A., VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, Campinas, n. 8, p. 5-28, maio 2007.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, Boston, v. 12, p. 829-856, 1999.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, Silver Spring, v. 21, p. 1-25, May 2002.

NOBRE, C. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima. In: BRASIL. Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. *Mudança do clima: negociações internacionais sobre a mudança do clima*. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, 2005. v. 1 pt. 2, p. 147-216.

SOUZA FILHO, F. A. Variabilidade e mudança climática nos Semi-Áridos brasileiros. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 77-111. (Coleção ABRH, v. 9).

SOUZA FILHO, F. A.; MOURA, A. D. *Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos*. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2006. 332 p.

UVO, C. R. B.; NOBRE, C. A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da região norte do Nordeste brasileiro. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 2., 1987, Buenos Aires, AR. *Anais...* Buenos Aires, 1987. p. 6.9.1-6.

WHITAKER, J. S.; COMPO, G. P.; WEI, X.; HAMILL, T. N. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. *Monthly Weather Review*, v. 132, p. 1190-1200, May 2004.

WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction*. San Diego: Academic Press, 1995. 467 p.

Precipitation Seasonality in the Northern Northeast of Brazil in the IPCC-AR4 Simulations

ABSTRACT

The global models of the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (IPCC-AR4) are evaluated for the representation of precipitation seasonality in the Northern Northeast of Brazil for the 1901-1999 period. This evaluation is performed using data from the Climatic Research Unit (CRU) and the 20th Century Reanalysis V2 of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). A performance index based on measures of correlation and mean squared error is proposed for evaluation and ranking of the models. Most models provide correlations exceeding 0.85 and mean squared error less than 5% compared to the percentage of monthly rainfall of the climatology averaged over the region. According to the evaluation using the proposed performance index, models MRI-CGCM2.3.2 (Japanese) and BCCR-BCM2.0 (Norwegian) provide the best representations for the precipitation seasonality in the region.

Key-words: *Precipitation; Northern Northeast*