

Projeções de precipitação para o século XXI utilizando sistema de classificação hierárquica de modelos: aplicação para o nordeste setentrional brasileiro

Precipitation forecasts for the XXI century using a hierarchical classification system into climate models: northeast brazil application

RESUMO

Os modelos globais do quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC-AR4) são avaliados para o Nordeste Setentrional do Brasil (NEB) quanto à representação da variabilidade interanual e interdecadal da precipitação para o período de 1901 a 1999 e são analisadas as projeções do cenário A1B. 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). É aplicada a transformada em ondas à série de dados para detectar e analisar os padrões de variabilidades existentes no século XX. Os resultados sugerem que os modelos CSIRO_MK3_0_RUN2, GISS_MODEL_E_R_RUN8 e UKMO_HADCM3_RUN1 reproduziram de maneira satisfatória a variabilidade plurianual. Os modelos divergem quanto o futuro da precipitação no NEB, alguns indicam impactos positivos na média anual de até 12% e outros impactos negativos de até 42%.

PALAVRAS-CHAVE: modelos do IPCC, mudança climática e variabilidade de precipitação

ABSTRACT

The global models of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4) are evaluated for the Northern Northeast Brazil (NEB) as the representation of interannual variability and interdecadal precipitation for the period 1901-1999 for the A1B scenario projections. 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). It was applied the wavelet transform to the data set to detect and analyze existing patterns of variability in the twentieth century. The results suggest that CSIRO_MK3_0_RUN2 and GISS_MODEL_E_R_RUN8 UKMO_HADCM3_RUN1 models reproduced satisfactorily the variability. The models differ on the future NEB rainfall, indicating some positive impacts on annual average of 12% and negative impacts up to 42%.

KEYWORDS: IPCC models, climate change and precipitation variability

Yvonne Magdalena Campos Lázaro

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Fortaleza, Ceará, Brasil
yvonnecamp@gmail.com

Cleiton da Silva Silveira

Professor Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), Redenção, Ceará, Brasil
cleitonsilveira16@yahoo.com.br

Francisco de Assis de Souza Filho

Professor Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Fortaleza, Ceará, Brasil
assis@ufc.br

Wictor Edney Dajtenko Lemos

Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Fortaleza, Ceará, Brasil
dajtenko@gmail.com

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas devido à ação antropogênica tem sido alvo de discussões e pesquisas científicas em todo mundo (DUURSMA, 2002; KOUSKY 1979; TASCHETTO e WAINER, 2005; IPCC, 2007; MARENGO, 2008). Diversos autores identificaram aumento da temperatura nas últimas décadas, modificando diversas variáveis climatológicas, dentre elas a precipitação (MARENGO e VALVERDE, 2007; MARENGO e SOARES, 2005). Estudos buscam avaliar os possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos (HAYLOCK *et al.*, 2006) destas alterações para que possam ser tomadas medidas que minimizem as consequências dessas alterações.

Na região Nordeste do Brasil (NEB), predomina um clima semiárido com intensa variabilidade temporal e espacial de chuvas (SOUZA FILHO, 2006; MARENGO, 2002 e 2004; MOLION, 2002), devido fundamentalmente à atuação simultânea de diversos sistemas atmosféricos de várias escalas e à dinâmica de suas interações. Estes podem variar com as características fisiográficas da região, assim como, pelos padrões anômalos de grande escala de circulação atmosférica global associada ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO) e ao dipolo do Atlântico, o que modifica frequência, distribuição espacial e intensidade desses sistemas.

Chaves *et al.* (2004), considerando resultados da reanálise do “National Centers for Environmental Prediction” / “National Center for Atmospheric Research” (NCEP/NCAR) dos EUA, identificaram sobre o NEB o aumento da temperatura cerca de 0,6°C, para o período de 1976-2007 em relação a 1948-1975. Sendo que no período de 1992-2007 em relação a 1948-1975, o aumento foi de aproximadamente 1,2°C. Esse trabalho mostrou ainda, fortes indícios de que a variabilidade

natural do clima associada às oscilações do El Niño não é a única responsável pelo aumento de temperatura na região do NEB. Marengo (2007), baseado nas evidências observacionais e tendências observadas no Brasil para o século XX e os modelos do IPCC; apresenta cenários climáticos para o século XXI, para o NEB, a tendência dos modelos é de redução de chuvas acompanhada de um aumento de temperatura para finais do século XXI.

Andreoli *et al.* (2004), utilizaram a transformada em ondeletas para analisar as variações da precipitação em Fortaleza e da temperatura da superfície do mar (TSM) nos oceanos Pacífico e Atlântico para o período de 1856 a 1991, foi identificado um pico dominante de 12,7 anos na série. Confirmou-se, ainda, alta coerência entre a variabilidade de precipitação no norte do NEB e o gradiente inter-hemisfério de TSM no Atlântico na escala interdecadal.

Estas variações, associadas às mudanças climáticas vem sendo discutidos através da publicação de relatórios por o IPCC, com vistas à compreensão de sua ocorrência buscando avaliar e identificar os possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos (IPCC, 2007(b)). O quarto relatório (IPCC-AR4, 2007) confirma a projeção da temperatura média da atmosfera global. 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.

Assim, tendo como base os modelos do IPCC-AR4 e utilizando a transformada em ondeletas (Torrence e Compo, 1998), o objetivo do presente trabalho é avaliar a capacidade destes modelos em representar o padrão de chuvas no século XX, e identificar os modelos que melhor representam a variabilidade interanual e decadal do Nordeste Setentrional do Brasil. Além disso, serão analisadas as projeções das precipitações dos modelos globais IPCC-AR4 para o cenário A1B para o século XXI, buscando identificar tendências nas variações interanuais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Região de Estudo

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

Aquisição dos dados Observados

A base de dados observacionais utilizada para verificar a destreza dos modelos do IPCC sobre o continente é proveniente da “University of East

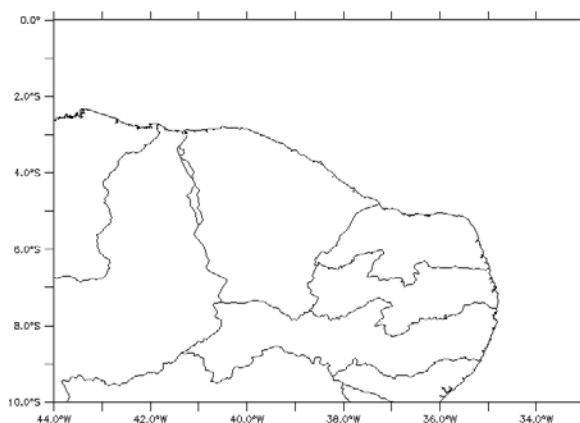


Figura 1- Região de estudo, Nordeste Setentrional brasileiro e parte do Oceano Atlântico

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 Century Reanalysis 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 série anual média de precipitação de 1901 a 1999, com resolução de 0,5 graus 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 simulações de modelos globais de centros de meteorologia que participaram desse relatório, conforme tabela 1, a partir das próprias observações do século XX. Neste estudo, será realizada uma análise dos dados de previsão climática do 4º relatório do IPCC para o NEB no século XX; foram avaliados os 24 modelos com suas respectivas rodadas, num total de 72.

Para avaliação das projeções para o século XXI para o Nordeste Setentrional do Brasil serão considerados os modelos do cenário A1B. O cenário A1B sugere um pico das emissões de gases estufa na metade do século XXI,

seguido por uma tendência de redução na segunda metade do século XXI (IPCC, 2007).

Métodos de Análise de Séries Temporais – Wavelets

O método utilizado neste estudo para caracterizar as variabilidades tanto de espaço como de tempo no padrão de precipitação, é a Transformada de Wavelets. Este método é recomendado para o estudo de fenômenos transientes, espacialmente heterogêneos e que atuam simultaneamente em várias escalas do escoamento (WENG e LAU, 1994; TORRENCE e COMPO, 1998).

Tabela 1- Modelos que compõem as previsões 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 (1,125° x1,125°)
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL); França	4 hPa/ 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

Transformada em ondeletas (TO)

A TO é definida em termos de uma integral de convolução entre o sinal analisado $f(t)$ e uma função wavelet conhecida, expressa pela equação 1.

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (1)$$

Em que os parâmetros a e b variam continuamente em R , com $a \neq 0$, e

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in R^+, b \in R \quad (2)$$

Sendo as funções $\psi_{a,b}$ chamadas de ondeletas filhas e são geradas a partir de dilatações e translações da ondeleta-mãe $\psi(t)$. A função ondeleta considerada para a análise foi a de Morlet, dada pela equação 3:

$$\psi(t) = e^{iw_0t} e^{-\eta^2/2} \quad (3)$$

com $w_0 = 6$ e $\eta = t/s$ onde t é o tempo e s é a escala da wavelet.

O algoritmo usado foi o desenvolvido por Torrence e Compo (1998).

Critérios de Avaliação

Utilizou-se como critério de avaliação a representação da variabilidade interanual e interdecadal da precipitação do NEB, pois ela exerce profunda influencia na variabilidade climática sobre o NEB e mostra-se como um importante modulador da variabilidade de mais alta frequência (HASTENRATH, 1981; NOBRE e SHUKLA, 1996; KAYANO e ANDREOLI, 2004).

Para avaliar os modelos do IPCC são calculados os espectros globais anuais sobre a região do

NEB. Em seguida, é feita uma comparação entre os espectros dos dados observados e das rodadas dos modelos do IPCC para que possam ser definidos quais os modelos que possuem melhor desempenho para a região de estudo. As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas nesta secção, são: correlação entre espectros (CORREL) (conforme equação 5) e a distância euclidiana das variâncias das bandas (DIST).

$DIST^2$ indica o valor da variabilidade das variâncias das rodadas dos modelos quanto às variâncias dos dados observados por bandas e é definida pela equação:

$$DIST^2 = \sum_{i=1}^3 (Var_{BANDAobs} - Var_{BANDAmod})^2 \quad (4)$$

onde i é o número de bandas avaliadas, $Var_{BANDAobs}$ é a variância por banda da série observada e $Var_{BANDAmod}$ é a variância da banda das rodadas dos modelos do IPCC-AR4. Valores altos de DIST indicam uma distância maior entre as variâncias dos modelos quanto à variância da série observada.

A correlação assume valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, anticorrelação e perfeita correlação, havendo ainda a total ausência de correlação verificada com um resultado igual a zero, conforme equação 5. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (5)$$

$$AVAL = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{DIST_{MAX} - DIST}{DIST_{MAX} - DIST_{MIN}} \right) \quad (6)$$

onde n são os anos, P é a previsão de cada ano e A é a análise considerada como observação.

Ao final do cálculo desse índice é feita uma avaliação ponderada (AVAL) para que os modelos possam ser classificados, dada pela equação 6. tal que:

$$\alpha_c + \alpha_r = 1 \quad (7)$$

Sendo, $CORREL_{MIN}$ a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e $CORREL_{MAX}$ a máxima correlação. Assim como, $DIST_{MAX}$ é a máxima distância das variabilidades por bandas das rodadas dos modelos e $DIST_{MIN}$ o mínimo.

As variáveis α_c e α_r assumem valores entre 0 e 1 (conforme equação 7). Para valores $\alpha_c > \alpha_r$, a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo, enquanto que para $\alpha_c < \alpha_r$ a distância entre as variabilidades 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.

Análise das Projeções

Para o cálculo das anomalias sazonais são consideradas as projeções fornecidas pelos modelos globais do IPCC-AR4 para o cenário A1B no período de 2010 a 2099. Em seguida é feita uma comparação relativa à representação dos modelos para o cenário 20C3M (este cenário indica como os modelos do IPCC representam os padrões de variação do século XX) no período de 1901 a 1999.

As medidas estatísticas utilizadas, cuja definição encontra-se a seguir, é a anomalia na média anual de precipitação.

Para o cálculo da anomalia na média anual considerou-se a equação 8, dada pela diferença entre a média anual do cenário do século XXI e média anual do cenário 20C3M sobre a média anual do século XX:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(P_{\text{XXI}}^a - P_{\text{20C3M}}^a)}{P_{\text{20C3M}}^a} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde P_{XXI}^a é média da precipitação anual para o cenário do século XXI e P_{20C3M}^a é a média da precipitação anual para o cenário 20C3M.

Para analisar a tendência do século XXI as séries de precipitações anuais dos cenários do século XXI foram normalizadas com base nas características da série do cenário 20C3M de 1901 a 1999. Essa normalização segue a equação 9:

$$Z = \frac{X_{\text{XXI}}^j - \bar{X}_{\text{20C3M}}}{\sigma_{\text{20C3M}}} \quad (9)$$

Onde Z é a precipitação do cenário do século XXI normalizada, X_{XXI}^j a precipitação anual do cenário

A1B para um ano j, \bar{X}_{20C3M} a precipitação anual média do cenário 20C3M na série de 1901 a 1999 e σ_{20C3M} o desvio padrão da série de precipitações anuais do cenário 20C3M.

RESULTADOS

Análises de ondeletas

A análise da série observada foi realizada visando conhecer as relações existentes entre as componentes de diferentes

Espectro Global Wavelet

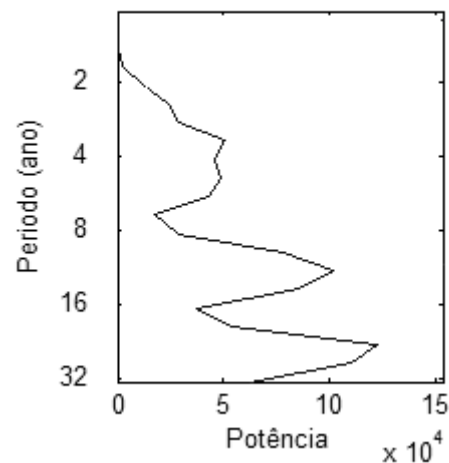


Figura 2 – Espectro global wavelet para o século XX.

períodos, em função da escala temporal do sinal.

Na figura 2 o espectro global da série de dados observados de precipitação CRU/NOAA mostra picos na escala interanual (3,5 e 4,9 anos) e picos para as escalas decadal (11,7 e 23,4 anos), e mostra que ao longo do Século XX esta apresenta três bandas características de (3-6 anos), (9-14 anos) e (19-33 anos), ou seja, ela apresenta oscilações em várias escalas de tempo.

Espectros Globais

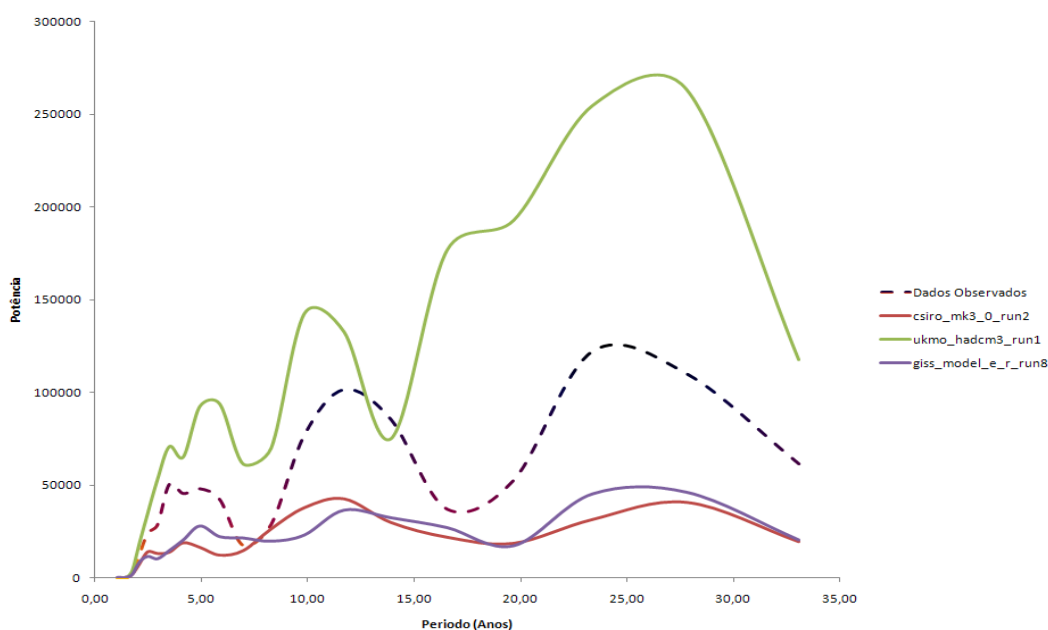


Figura 3 – Espectro da precipitação observada e dos três modelos que tem maior correlação

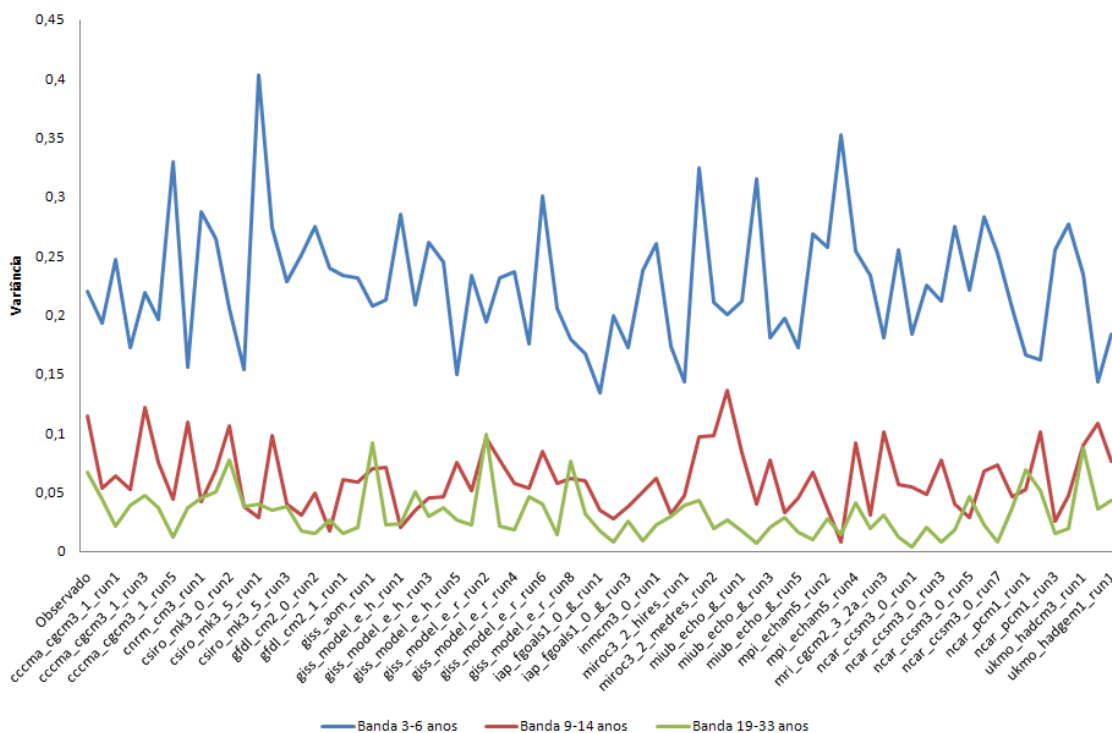


Figura 4 – Variância das rodadas dos modelos do IPCC-AR4 e da série observada por bandas

Na figura 3 são mostrados os espectros globais tanto da série observada quanto pelos modelos do IPCC que apresentam maior CORREL: GISS_MODEL_E_R_RUN8, CSIRO_MK3_0_RUN2 e UKMO_HADCM3_RUN1. No caso do modelo UKMO_HADCM3_RUN1 ele tem uma maior amplitude que as observações, mesmo assim ele capta o comportamento das observações.

Variâncias Espectrais da Série Observada e dos Modelos do IPCC

Para a análise da variância espectral das rodadas dos modelos foram avaliadas as três bandas mais representativas da série observada de precipitação no século XX. As bandas consideradas foram de (3-6 anos), (9-14 anos) e (19-33 anos).

Na figura 4 mostra as variações dos modelos com respeito às bandas consideradas neste estudo. Na banda de 3-6 anos a variância dos dados observados é 0,21, sendo que tal padrão de

variação é bem representado pelos modelos CSIRO_MK3_5_RUN2, GISS_MODEL_R_RUN8 e NCAR_PCM1_RUN2 que possuem variâncias de aproximadamente 0,20. Os modelos CSIRO_MK3_5_RUN1, MPI_ECHAM5_RUN3 e CCCMA_CGCM3_1_RUN5 superestimam a variância observada, enquanto os modelos UKMO_HADCM3_RUN2, MIROC3_2_HIRES_RUN1 e IAP_FGOALS1_0_G_RUN1 subestimam.

Na banda de 9 – 14 anos a variância dos dados observados é 0,11. Os padrões de variação dos modelos CCCMA_CGCM3_1_T63_RUN1, CSIRO_MK3_5_RUN2, MRI_CGCM2_3_2A_RUN3 possuem variâncias aproximadas às observações. O padrão de variação do modelo MIROC3_2_MEDRES_RUN3 superestima a variância observada, enquanto as variâncias dos modelos MPI_ECHAM5_RUN3, GFDL_CM2_0_RUN3,

GISS_MODEL_E_H_RUN1 subestimam.

Na banda de 19 – 33 anos a variância dos dados observados é 0,07. Este padrão de variação é bem representado pelos modelos CSIRO_MK3_5_RUN2, GISS_MODEL_R_RUN8, NCAR_PCM1_RUN1 que possuem variâncias aproximadas às observações. As variâncias dos modelos GISS_AOM_RUN1, GISS_MODEL_E_R_RUN2, UKMO_HADCM3_RUN1 superestimam a variância observada, enquanto as variâncias dos modelos NCAR_CCSM3_0_RUN1, IAP_FGOALS1_0_G_RUN2, MIUB_ECHO_G_2 subestimam.

Na figura 5 mostra-se a variação percentual dos modelos nas três bandas representativas no século XX para o NEB. O modelo CSIRO_MK3_5_RUN1 representa 80% a mais em relação a variabilidade interanual da precipitação observada, na banda de 3 – 6 anos, já o mesmo modelo para a banda de 9 – 14 anos representa 75% a menos da variabilidade nessa

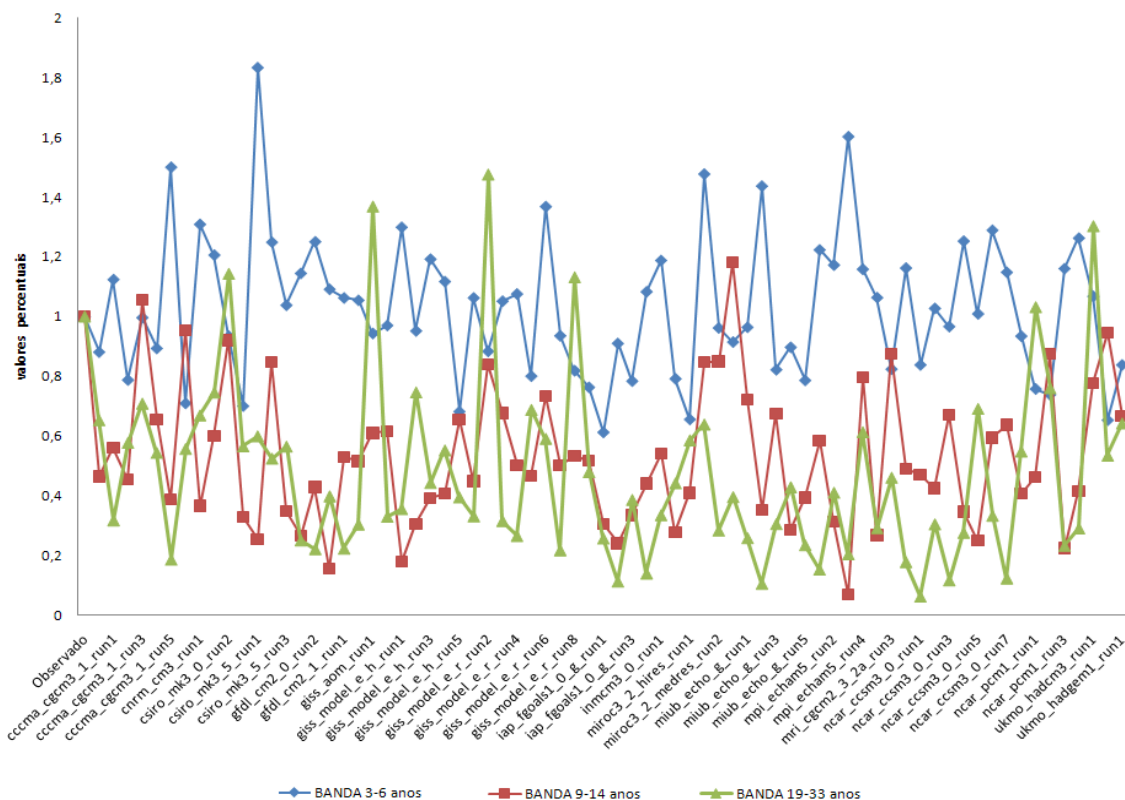


Figura 5 – Variação percentual das rodadas dos modelos do IPCC por bandas com respeito aos dados observados no NEB

faixa, e para a banda de 19 - 33 anos representa 50% a menos da variabilidade interdecadal de precipitação observada no século XX.

O modelo UKMO_HADCM3_RUN1 tem uma boa representação da variabilidade interanual com 6% a mais da série observada na banda de 3 – 6 anos, na banda de 9 -14 anos ele representa 12% a menos da variabilidade nessa faixa e para a banda de 19 – 33 anos ele representa 30% a mais da variabilidade interdecadal observada.

O modelo NCAR_PCM1_RUN2 representa 27% a menos da variabilidade interanual observada, na banda de 9 -14 anos ele representa 13% a menos da variabilidade nessa faixa, já para a banda de 19 – 33 anos o modelo representa 25% a menos da variabilidade interdecadal da série observada.

Classificação dos Modelos do IPCC

A tabela 2 mostra os índices estatísticos CORREL, DIST e AVAL de todas as rodadas dos modelos do IPCC em ordem de classificação, para α_c e α_r igual a 0,5. O modelo CSIRO_MK3_0_RUN2 apresentou correlação superior a 0,89 e distancia inferior a 0,18 em relação à variação por bandas da série observada, seguido pelos modelos UKMO_HADCM3_RUN1 e GISS_MODEL_E_R_RUN8. O modelo MPI_ECHAM5_RUN3 apresentou correlação negativa e a maior distancia, o que levou esse modelo a apresentar AVAL igual a 0, indicando que o mesmo não representa adequadamente os padrões de variação de baixa frequência da série observada no século XX. Os modelos MIUB_ECHO_G_RUN2, IAP_FGOALS1_0_G_RUN2 e MPI_ECHAM5_RUN3 apresentam correlações inferiores aos demais,

associados a distancias superiores a 1,17, por isso obtiveram um AVAL baixo.

Análise das projeções anuais de precipitação do cenário A1B

Na figura 6 é mostrada a anomalia percentual da precipitação anual média sobre o Nordeste Setentrional do Brasil para os dez melhores modelos do IPCC-AR4, segundo a avaliação proposta neste trabalho, que possuem projeções disponíveis para o cenário A1B no período de 2010 e 2099.

Os modelos UKMO_HADCM3_run1 e MIROC3_2_MEDRES_run1 apresentam projeções que indicam que a média das precipitações no século XXI sofreriam decréscimos superiores a 12% para o cenário A1B. Enquanto os modelos CSIRO_MK3_0_run1 e giss_model_e_r_run1 indicam acréscimos de aproximadamente

Tabela 2 – AVAL dos modelos do IPCC-AR4, em ordem de classificação, para o século XX para região Nordeste do Brasil

Modelos do IPCC	Correl	Dist	Aval	Modelos do IPCC	Correl	Dist	Aval
csiro_mk3_0_run2	0,90	0,18	0,99	giss_model_e_r_run9	0,35	0,75	0,49
ukmo_hadcm3_run1	0,84	0,38	0,88	miub_echo_g_run1	0,38	0,79	0,49
giss_model_e_r_run8	0,92	0,52	0,86	giss_model_e_r_run3	0,32	0,76	0,47
ncar_pcm1_run2	0,78	0,38	0,85	giss_model_e_r_run1	0,41	0,87	0,47
giss_model_e_r_run2	0,79	0,52	0,80	giss_model_e_r_run4	0,41	0,89	0,46
csiro_mk3_0_run1	0,78	0,52	0,79	ipsl_cm4_run1	0,42	0,94	0,44
giss_aom_run1	0,78	0,54	0,78	gfdl_cm2_1_run2	0,33	0,85	0,44
mpi_echam5_run4	0,68	0,47	0,77	giss_model_e_r_run7	0,39	0,93	0,43
cccma_cgcm3_1_t63_run1	0,74	0,53	0,77	ncar_ccsm3_0_run6	0,26	0,83	0,41
mri_cgcm2_3_2a_run3	0,76	0,58	0,75	ncar_pcm1_run4	0,35	0,96	0,41
miroc3_2_medres_run1	0,77	0,62	0,74	ncar_ccsm3_0_run2	0,30	0,90	0,40
giss_model_e_r_run6	0,74	0,61	0,73	mri_cgcm2_3_2a_run1	0,30	0,91	0,40
cccma_cgcm3_1_run3	0,41	0,30	0,71	inmcm3_0_run1	0,22	0,83	0,39
miroc3_2_medres_run3	0,67	0,64	0,69	ncar_ccsm3_0_run4	0,34	1,01	0,38
csiro_mk3_5_run2	0,57	0,56	0,67	ingv_echam4_run1	0,35	1,03	0,37
ncar_pcm1_run1	0,55	0,59	0,65	gfdl_cm2_0_run2	0,32	1,00	0,37
bccr_bcm2_0_run1	0,53	0,65	0,62	mpi_echam5_run1	0,29	0,97	0,37
miroc3_2_medres_run2	0,59	0,73	0,61	mri_cgcm2_3_2a_run2	0,33	1,02	0,37
cccma_cgcm3_1_run1	0,66	0,82	0,61	mpi_echam5_run2	0,23	0,92	0,36
giss_aom_run2	0,60	0,77	0,60	iap_fgoals1_0_g_run3	0,23	0,93	0,36
ukmo_hadgem1_run1	0,36	0,52	0,60	miub_echo_g_run5	0,28	1,00	0,35
cccma_cgcm3_1_run4	0,42	0,58	0,59	csiro_mk3_5_run1	0,43	1,19	0,34
ncar_ccsm3_0_run5	0,62	0,81	0,59	ncar_ccsm3_0_run7	0,21	0,96	0,34
cccma_cgcm3_1_run2	0,52	0,72	0,58	ncar_ccsm3_0_run3	0,18	0,94	0,33
giss_model_e_h_run5	0,54	0,77	0,57	mri_cgcm2_3_2a_run4	0,21	0,98	0,33
giss_model_e_h_run3	0,60	0,85	0,57	gfdl_cm2_0_run3	0,22	1,04	0,31
giss_model_e_r_run5	0,41	0,65	0,56	gfdl_cm2_1_run1	0,10	0,91	0,30
cnrm_cm3_run1	0,51	0,78	0,56	giss_model_e_h_run1	0,24	1,09	0,30
csiro_mk3_0_run3	0,56	0,85	0,55	cccma_cgcm3_1_run5	0,29	1,13	0,30
miub_echo_g_run4	0,53	0,92	0,51	gfdl_cm2_0_run1	0,21	1,06	0,29
ncar_ccsm3_0_run9	0,38	0,75	0,50	ncar_ccsm3_0_run1	0,16	1,09	0,26
ukmo_hadcm3_run2	0,23	0,58	0,50	iap_fgoals1_0_g_run1	0,06	1,09	0,21
giss_model_e_h_run2	0,37	0,74	0,50	ncar_pcm1_run3	0,05	1,10	0,20
miub_echo_g_run3	0,41	0,79	0,50	miub_echo_g_run2	0,09	1,19	0,19
csiro_mk3_5_run3	0,40	0,79	0,50	iap_fgoals1_0_g_run2	0,06	1,17	0,18
miroc3_2_hires_run1	0,41	0,80	0,50	mpi_echam5_run3	-0,14	1,37	0,00
giss_model_e_h_run4	0,36	0,75	0,49				

10% para o cenário A1B, anomalia essa também mostrado pelo modelo GISS_MODEL_E_R_run2 para o cenário A1B e pelo modelo CCMA_CGCM3_1_run3 para o

cenário B1. As demais projeções dos outros modelos não indicam impactos significativos na média anual de precipitações no século XXI.

Na figura 7 são mostradas as precipitações normalizadas de quatro dos modelos do IPCC-AR4 (os de maiores tendências positiva e negativa, segundo a Figura 5, que

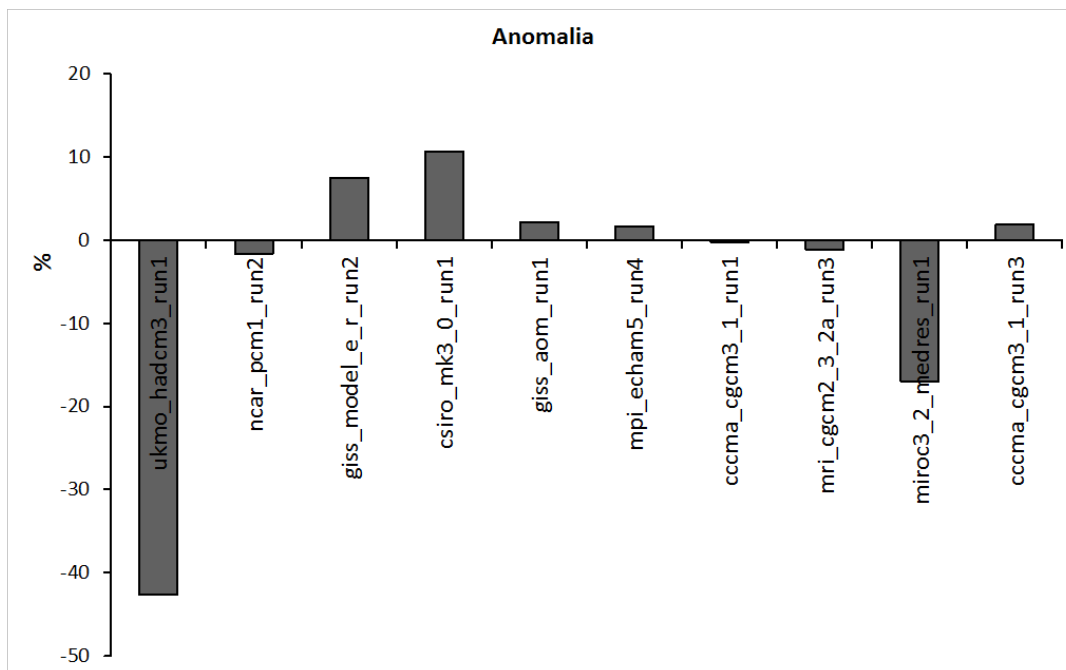


Figura 6 - Anomalia das precipitações anuais no período de 2010 a 2099 em comparação a 1901 a 1999 para Nordeste Setentrional do Brasil para os dez primeiros modelos segundo a avaliação proposta neste trabalho

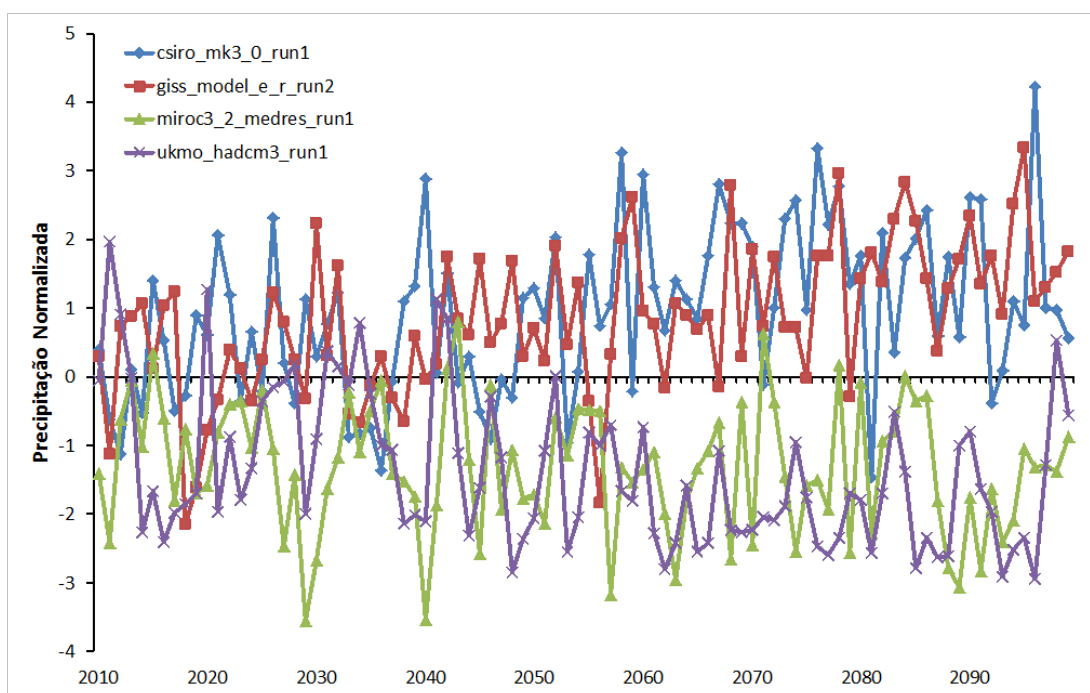


Figura 7 - Séries de Precipitações Normalizadas de 2010 a 2099 dos principais modelos que indicam impactos na média anual de precipitação

estão entre os dez primeiros modelos) para o período de 2010 a 2099 para o cenário A1B. Nesta figura é mostrada uma ideia de magnitude da incerteza associada às projeções dos modelos do IPCC-AR4.

Os modelos com tendência positiva indicam uma clara alternância entre anos secos e chuvosos associados a padrões de variação normais na primeira metade do século XXI, porém a partir da segunda metade do século

esses modelos mostram anos chuvosos mais intensos e anos secos com maior precipitação.

Enquanto os modelos MIROC3_2_MEDRES_RUN1 e ukmo_hadcm3_run1, indicam uma clara tendência negativa em todo

século XXI, associados a valores de precipitação bem inferior ao século XX na segunda metade do século XXI, o que sugere que há mudanças no comportamento dessa variável ou/e existem padrões de variação de baixa frequência que influenciam a mesma.

CONCLUSÕES

A transformada em ondeletas mostra a existência de variações na série de precipitação observada em várias escalas de tempo, no espectro global percebem-se três bandas representativas no século XX para região Nordeste Setentrional do Brasil. Esta variabilidade restringe o uso de alguns modelos do IPCC, pois estes não são capazes de representar o comportamento da série no século XX.

Na análise espectral das rodadas dos modelos do IPCC, quanto à precipitação observada durante o século XX, apresentam grandes divergências em representar a variabilidade interanual e interdecadal de precipitação no NEB.

Aproximadamente 15 rodadas dos modelos globais do IPCC para o NEB apresentam correlações superiores a 0,69 (Tab. 2) em relação à precipitação observada durante o século XX, mostrando que estes modelos são capazes de capturar os padrões de variação interanual e em alguns casos a variação interdecadal.

A avaliação feita com os dados médios sobre a área do NEB (figura 1) apontou o modelo CSIRO_MK3_0_RUN2 como aquele com mais altos valores de AVAL, seguidos pelos modelos e UKMO_HADCM3_RUN1, GISS_MODEL_E_R_RUN8; a partir da figura 4 observa-se que estes modelos conseguem produzir as variabilidades interanual e interdecadal de precipitação durante o Século XX.

Os modelos NCAR_PCM1_RUN3, MIUB_ECHO_G_RUN2, IAP_FGOALS1_0_G_RUN2, IAP_FGOALS1_0_G_RUN1 e MPI_ECHAM5_RUN3 mostram dificuldade de representação do ciclo decadal da precipitação sobre o NEB, com correlações inferiores às demais regiões do domínio, conforme a figura 5.

A avaliação apresentada, sugere que os modelos CSIRO_MK3_0_RUN2, GISS_MODEL_E_R_RUN8 e UKMO_HADCM3_RUN1, reproduziram de maneira satisfatória as variabilidades interanual e interdecadal do padrão de chuvas sobre o NEB, pode-se considerar estes modelos como uma boa opção para avançar na investigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da região.

Os modelos do IPCC divergem quanto o futuro da precipitação no Nordeste Setentrional do brasileiro, as divergências dos modelos globais do IPCC-AR4 quanto às projeções interanuais demonstram um alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de precipitação do Nordeste Setentrional do Brasil. Podendo ser usada para adoção de políticas e gestão em nível de agricultura, recursos hídricos, impactos sobre o meio ambiente e outras áreas correlacionadas.

Para o cenário A1B, dos dez primeiros modelos, dois indicam impactos positivos na precipitação média anual de até 12% e dois indicam impactos negativos de até 42%, os demais não indicam impactos significativos.

Obviamente, projeções com menos incertezas seriam mais interessantes para os tomadores de decisão, no entanto isto não ocorre nas projeções dos modelos do IPCC para esta região. Artificializar a redução destas incertezas pode

induzir estratégias que levem a grandes arrependimentos. Estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES, CNPq e FUNCAP pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; GUEDES, R. L.; OYAMA, M. D.; ALVES, M. A. S. A influência da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.3, 337-344, 2004.

ANDREOLI, R.; KAYANO, M.; GUEDES, R.; OYAMA, M.; ALVES, M.; A importância relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na Variabilidade de Precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, 63-74, 2007.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 2004.

DUURSMA, E. **River flow and temperature profile trends; consequences for water resources**. A. de Man, P.E. van Oeveren, S. Montjijn, Heineken, N. V. Company. Amsterdam 2002.

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

GU, D.; PHILANDER, G. H. Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the

- past century. **Journal of Climate**, v.8, n. 4, p.864-876, 1995.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.
- FILHO, F. A. S.; 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, 332p.,2006
- HASTENRATH, S.; KACZMARCZYK, E. B. On spectra and coherence of tropical climate anomalies. **Tellus**, v.33, n.5, p.453-462,1981.
- HAYLOCK, M.; PETERSON, T.; ALVES, L.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, M.; BAEZ, J.; BARROS, V.; BERLATO, M.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V.; GRIMM, A.; KAROLY, D.; MARENGO J. A.; MARINO, M.; MONCUNILL, D.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, V.19, n 8, 1490-1512,2006.
- IPCC – **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.
- IPCC – **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge, 18 p. 2007a.
- KANE, R. P. El Niño and La Niña events and rainfall in NE and South Brazil. **Rev. Bras. Geofísica**, v.10,p. 49-59, 1992.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI R. V. Decadal variability of northern northeast Brazil rainfall and its relation to tropical sea surface temperature and global sea level pressure anomalies. **J. Geophys. Res.**, v. 109, 2004.
- KOUSKY, V. E; Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**. n107, 1140-1153,1979.
- LORENTZ, E. N. Nondeterministic theories of climate change. **Quart. Res.**, v.6. pp. 495-506, 1975.
- MARENGO, J. A.; PAIXÃO, J. A.; BRAHMANANDA, V. A influência das Anomalias de TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico sobre as chuvas de Monção da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 16,1020-1028, 2002.
- MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**. 78, p. 79-96, 2004.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. **Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001**. CPTEC-INPE, p. 29 2005.
- MARENGO J.A.; VALVERDE, MARIA 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**, n8,2007.
- MARENGO J. A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO DE OLIVEIRA G.; CAMARGO H.; OYAMA, M.; ALVES, L., The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v.21,495-516,2008.
- MOLION, L. C. B; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal Atmos. Sci.**, 38, 2653-2675. 1981.
- NOBRE C. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima**. In: **Brasil, Presidência da Republica. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do clima: Negociações Internacionais sobre a Mudança do Clima**. Brasília. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da Republica. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica. V. 1 parte 2, p. 147-216, 2005.
- NOBRE, P.; SHUKLA J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v.9 n. 19, p. 2664-2479, 1996.
- PHILANDER, S.G. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. Academic Press, INC. San Diego, Califórnia,1990.
- TASCHETTO, A.; WAINER I., A Influência dos Gases Estufa no Oceano Atlântico Sul: Variabilidade Interanual. **Revista Brasileira de Meteorologia** ,v.20, n.1, 105-120, 2005.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis, **Bull. Am. Meteor. Soc.**, v.79, n.1, p.61-78, 1998.
- WENG, H.; LAU, K. M.: Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over Tropical Western Pacific. **J. Atmos. Sci.**,v51,n17,1994.

Recebido em: jan/2013
Aprovado em: jun/2014