



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



AVALIAÇÃO DE MODELOS DO CMIP5 QUE MELHOR EXPRESSAM A ATUAÇÃO DOS VÓRTICES CICLÔNICOS EM ALTOS NÍVEIS (VCANS) NO NORDESTE BRASILEIRO (NEB)

José Ueliton Pinheiro¹, Josemir Araújo Neves², Rosane Rodrigues Chaves³, David Mendes⁴, Naurinete De Jesus Da Costa Barreto⁵.

¹Meteorologista, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, Parnamirim, RN, Brasil, ueliton-emparn@rn.gov.br.

²Doutor, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, Parnamirim, RN, Brasil, josemiremparn@rn.gov.br.

³Prof(a). Doutor(a) da Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, rosanechaves@gmail.com.

⁴Prof. Doutor da Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, davidmendes@ect.ufrn.br.

⁵Doutorando em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, netebarreto@gmail.com.

Artigo recebido em 30/06/2014 e aceito em 15/09/2014

RESUMO

A pesquisa estudou a saída de modelos de mudanças climáticas que melhor expressam a atuação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) no Nordeste Brasileiro (NEB). Os VCANs foram quantificados pela sua ocorrência diária durante 5 anos (1995-1999), no período de outubro a março. O objeto de estudo foram 13 modelos do CMIP5/IPCC/AR5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5/Intergovernmental Panel on Climate Change/Fifth Assessment Report), comparados com os resultados do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), por meio de métodos estatísticos para escolha do modelo que melhor indica a presença dos VCANs no NEB. A primeira análise comparativa foi feita através das correlações de Pearson, Kendall e Spearman, Raiz quadrada do erro quadrático médio, Raiz quadrada do erro quadrático médio normalizada e os índices de Eficiência e desempenho, Nash-Sutcliffe (NSE), Kling-Gupta (KGE) e o Índice de Concordância de Willmott (d). Em seguida foram selecionados os modelos de melhor desempenho e com significância estatística para uma análise posterior de acertos e erros através dos índices: Índice de Proporção Correta (PC), Índice de Sucesso Crítico (ISC), Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de alarme Falso (TAF) e Taxa de Tendência (VIÉS). Para os testes estatísticos aplicados na primeira avaliação realizada o modelo MIROC4h foi o que apresentou os melhores índices seguido pelo MIROC-ESM e InmCM4, respectivamente. Além destes, ainda apresentaram correlação estatística significativa o MPI-ESM-LR, o MRI-CGCM3 e o CSIRO-MK3-6-0. A segunda análise também apresentou o MIROC4h com os melhores valores de PC, ISC e POD, excetuando-se o VIÉS que apresentou o segundo melhor resultado e o TAF com o pior resultado em relação aos outros 5 modelos. Dessa forma o MIROC4h apresentou-se como o mais indicado entre os modelos do CMIP5 para estudos de cenários presentes e futuros de VCANs no NEB.

Palavras-chave: Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis, Nordeste Brasileiro, Modelos de Mudanças Climáticas, CMIP5, Testes Estatísticos para Análise de Desempenho.

* E-mail para correspondência: ueliton-emparn@rn.gov.br (Pinheiro, J. U.).

EVALUATION OF THE CMIP5 MODELS THAT EXPRESS THE BEST PERFORMANCE OF VORTICE IN HIGH LEVELS (VCANS) IN NORTHEAST BRAZIL (NEB)..

ABSTRACT

The research studied the output of climate change models that best express the actions of Upper Tropospheric Cyclonic Vortices (UTCV) in high levels in the Northeast Brazil (NEB). The UTCV were quantified by a daily occurrence for 5 years (1995-1999) in the period from October to March. The object of the study were 13 models from CMIP5/IPCC/AR5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 / [Intergovernmental Panel on Climate Change / Fifth Assessment Report](#)), compared with results from the NCEP / NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) by means of statistical methods for choosing the model which best indicates the presence of UTCV in the NEB. The first comparative analysis was performed using the Pearson, Spearman and Kendall correlations, mean square error, normalized mean square error and efficiency and performance indices, Nash-Sutcliff (NSE), Kling-Gupta (KGE) and Index of Agreement of the Willmott (d). Then models with better performance and statistical significance for further analysis of successes and mistakes through the indices were selected: Index Proportion Correct (PC), Critical Success Index (CSI), Probability of Detection (POD), False Alarm Rate (FAR) and Trend Rate (BIAS). For the statistical analyzes used in the first test performed MIROC4h model showed the best rates followed by MIROC-ESM and InmCM4 respectively. In addition, further significant statistical correlation MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3 and CSIRO-MK3-6-0. The second analysis also showed the MIROC4h with the best values of PC, CSI and POD, except the BIAS that had the second best result and the FAR with the worst result in relation to the other five models considered in this phase. Thus the MIROC4h introduced himself as the most suitable model of the CMIP5 for studies of the present and future scenarios of UTCV in the NEB

Introdução

Existem estudos desenvolvidos no Brasil sobre os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs), sugerindo estes sistemas meteorológicos como um dos principais indutores ou inibidores de precipitações no Semiárido do Nordeste Brasileiro (NEB), tanto na pré, como na estação chuvosa (ARAGÃO, 1975; KOUSKY; GAN, 1981; VIRJI, 1981; GAN, 1983; BARBOSA, 2006; COUTINHO, 2010). No entanto se observa também a influencia dos VCANs na precipitação do NEB durante a estação seca, principalmente nos meses de outubro e novembro (RAMÍREZ; KAYANO; FERREIRA, 1999).

Os VCANs consistem de uma circulação ciclônica fechada com núcleo frio e seco, cujo eixo estende-se desde 200hPa até 500hPa (ARAGÃO, 1975; KOUSKY; GAN, 1981; GAN, 1982; RAMÍREZ et al., 1999), podendo também alcançar a superfície em aproximadamente 10% dos casos (FRANK, 1970; KOUSKY; GAN, 1981). A maioria dos trabalhos sobre a atuação dos VCANs no NEB são de cunho diagnóstico e trabalhos a nível de prognóstico são raros ou inexistentes.

Os primeiros indícios dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis foram detectados nas proximidades do NEB, sobre o Atlântico Sul (DEAN, 1971; ARAGÃO, 1975; VIRJI, 1981). Os VCANs também podem ser definidos como sistemas atmosféricos de grande escala, de circulação fechada. No seu centro o movimento vertical é descendente causando a ausência de nebulosidade, enquanto que nos setores oeste e norte

existe movimento vertical ascendente produzindo nebulosidade. Este sistema é um dos principais sistemas meteorológicos que provoca ou inibe chuva no Norte do Nordeste Brasileiro. E ocorre principalmente durante o verão austral (dezembro-março), sendo janeiro o mês de frequência máxima (KOUSKY; GAN, 1981; RAMÍREZ, 1996), devido ao escoamento da alta troposfera sobre a América do Sul ser anticiclônico (GAN; KOUSKY, 1986).

Este fenômeno meteorológico apresenta quatro tipos de formação: a clássica, Alta, Africana I e Africana II (Paixão, 1999). A Formação Clássica resulta do modelo proposto por Kousky e Gan (1981) e que está associado à intensificação da crista em altos níveis e ao deslocamento de frentes frias para latitudes baixas. A Alta resulta da intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) o que força o surgimento de um anticiclone em altos níveis, induzindo o aparecimento de um VCAN à norte/noroeste de sua posição. A Africana I que surge do fortalecimento da convecção sobre a África, cuja convecção faz aparecer um par de anticiclones em altos níveis sobre a parte centro-sul desse continente. Esses anticiclones forçam o aparecimento de um VCAN na costa oeste africana. E a formação Africana II que deve-se ao desacoplamento de um cavado vindo da região sudoeste do Saara, que ao se desprender do seu escoamento de origem, ganha força e movimenta-se para oeste, influenciando o extremo leste do NEB.

Os VCANs apresentam influência na precipitação no NEB através da nebulosidade gerada pelo movimento ascendente do ar quente e úmido no VCAN formando nuvens, quando esta nebulosidade interage com outros fenômenos meteorológicos como

as frentes frias, provenientes de latitudes médias, a Zona de convergência Intertropical e/ou Zona de convergência do atlântico sul provocam precipitações significativas no NEB (KOUSKY; GAN, 1981; VAREJÃO-SILVA, 2005; COUTINHO, 2008).

Nesse trabalho os VCANs foram estudados em função da quantidade de dias por mês de sua ocorrência, nos meses de outubro a março, para um período de cinco anos de dados, com a finalidade de estabelecer uma comparação entre os dados de reanálise e os dados dos modelos do CMIP5.

O estudo e proposição dos modelos de mudanças climáticas são realizados por instituições integrantes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) da ONU. Na reunião do IPCC realizada em setembro de 2008, houve a concordância dos 20 grupos de trabalho de modelagem climática presentes. Nesta reunião eles propuseram o desenvolvimento de um novo conjunto de experimentos de modelos em coordenadas climáticas, que constituem a quinta fase do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). O CMIP5, nomeadamente, prestará um contexto de multi-modelo para: i) avaliar os mecanismos responsáveis por diferentes modelos a entender os feedbacks associados com o ciclo do carbono e com as nuvens; ii) examinar “previsibilidade do clima” e explorar as capacidades de previsão de sistemas em escalas de tempo decadal e geral; e, iii) determinar por que similarmente modelos forçantes produzem uma gama de respostas. O conjunto maior de simulações históricas e paleoclimáticas e o conjunto expandido de saídas de modelos utilizados pelo CMIP5 promete oferecer novas oportunidades para uma avaliação mais detalhada sobre as projeções climáticas. Os resultados gerados pelo CMIP5 serão utilizados nas próximas reuniões do IPCC para elaboração do 5º Relatório de Avaliação (Fifth Assessment Report - AR5) de Mudanças Climáticas (TAYLOR et al., 2012).

O CMIP5 é à base do sucesso das fases anteriores do CMIP (TAYLOR et al., 2012). Na fase 3, com o CMIP3, foram realizados experimentos com um conjunto de multi-modelos fornecendo conteúdo para centenas de artigos revisados por especialistas, e dando os subsídios necessários para a elaboração do IPCC

AR4, Relatório AR4 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Durante a fase 4 do CMIP, simulações adicionais foram realizadas para separar as influências antrópicas e naturais do clima do século XX (TAYLOR et al., 2012).

Um salto importante e mais significativo na modelagem climática nos últimos 20 anos foi à substituição dos modelos com a componente oceânica simplificada pelo acoplamento dos modelos oceano-atmosfera (com mais níveis verticais nos oceanos). Embora ambas as componentes tenham sido objeto de melhorias altamente significativas, esse avanço tem levado a modificações profundas nos padrões das mudanças climáticas simuladas, e presente nos relatórios atuais do IPCC, principalmente em regiões oceânicas. Devido a esse avanço, criou-se a possibilidade de explorar transientes climáticos o que constituiu um passo importante na direção do desenvolvimento de modelos que incluíssem representações explícitas de ciclos químicos e biogeoquímicos, como também outros sistemas do clima, os chamados de “modelos do sistema terrestre” (ESM- Earth System Models) (LE TREUT et al., 2007).

Os ESMs evoluíram e, provavelmente, são dominantes entre os modelos contribuintes para o CMIP5 e o AR5. Pode-se ter como exemplo, a evolução da modelagem climática acoplada, onde se verifica que o número de ESMs dentre os modelos do CMIP3/AR4 ainda era muito restrito, ao passo que, até o presente momento, esse tipo de modelo já constitui uma fração significativa dentre aqueles cujos dados já foram submetidos para o CMIP5 (SALES, 2011; TAYLOR et al., 2012).

Os cenários criados para nortear a elaboração do AR5 são chamados de RCPs (Representative Concentration Pathways) e estão sendo usados como entrada para modelagem climática e química atmosférica. Os RCPs recebem seus nomes de acordo com os níveis das forçantes radiativas que representam, por exemplo, RCP-X implica em um cenário cuja forçante radiativa de estabilização ou de pico no final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$ (TAYLOR et al., 2012). Para o IPCC-AR5 os cenários são: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 e RCP3-PD (Figura 1).

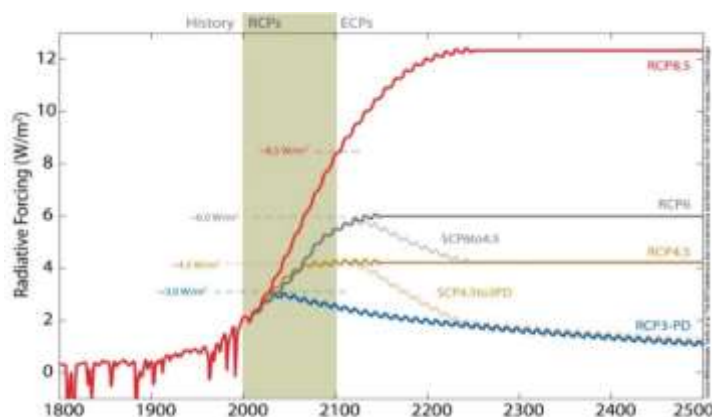


Figura 1 – Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global para cada uma delas - Fonte: <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>

A literatura apresenta uma variedade de trabalhos com resultados do CMIP5 em várias partes do mundo, porém não há trabalhos com os dados do CMIP5 para os VCANS no NEB.

Este artigo tenta suprir a essa demanda e faz parte do Projeto de tese de doutorado “Vórtices ciclônicos de ar superior sobre o Nordeste do Brasil e mudanças climáticas: Análise para o clima atual e cenários futuros”, desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) com apoio da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

Neste primeiro estudo foca-se a resposta para a seguinte questão: Será que os modelos do CMIP5 são capazes de detectar os VCANS no NEB? E se são capazes de detectar qual o melhor modelo que os representam?

Dessa forma construiu-se quatro metas para dar solução a este primeiro problema proposto: 1. Estudo da presença/ausência de VCANS, através de uma análise subjetiva visual, que consistiu na determinação da vortacidade dentro da área de estudo e a partir de um determinado limiar, e a identificação visualmente da ocorrência da circulação fechada que caracteriza o vórtice, em 13 modelos de mudanças climáticas do CMIP5, para um período de 5 anos (1995-1999) no NEB e áreas oceânicas adjacentes; 2. Avaliação estatística comparativa dos 13 modelos estudados com os dados de reanálise do NCEP/NCAR, através das correlações, índices de eficiência ou desempenho e teste de significância estatística das correlações; 3. Seleção dos modelos com significância estatística positiva para uma análise comparativa de acertos e erros através de índices de desempenho propostos por Stephenson (2000); 4. Determinação do Modelo que expressa com melhor precisão ou desempenho a presença dos VCANS no NEB.

Em resumo esta pesquisa visa determinar através de métodos estatísticos o modelo de mudança climática que melhor identifique a atuação dos VCANS

no NEB e áreas oceânicas adjacentes, validados com os dados de reanálise do NCEP/NCAR.

Material e Métodos

Área de Estudo

Considerou-se como área de estudo, para a detecção da presença e ausência dos VCANS, todo o NEB, áreas adjacentes nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, Goiás e Pará, e, áreas oceânicas do Atlântico Norte e Sul. Esta área situa-se entre as coordenadas: 20°S – 5°N de latitude e 50°W - 25°W de longitude. Embora a área de estudo tenha sido a indicada acima, que está destacada em na Figura 2, plotou-se a uma grade bem maior, com coordenadas 20°N – 60°S de latitude e 100°W - 40°E de longitude, em virtude da extensão de alguns vórtices serem maiores que a área de interesse (área de estudo). Como a identificação dos VCANS foi visual foi necessário que se observasse a formação completa destes para que se identificasse a abrangência da sua influência.

Objeto de Estudo: Modelos de Mudanças Climáticas do CMIP5

Os experimentos realizados no CMIP5 são disponibilizados na internet utilizando a seguinte nomenclatura “rxiypz” quanto a codificação das configurações das simulações realizadas. O “r” representa o número de realizações ou rodadas, “i” representa as diferentes inicializações com implicações físicas e o “p” são as perturbações na física para cada um dos modelos simulados (SILVEIRA, 2013). Nesse trabalho para todos os modelos rodados foi considerada a configuração r1i1p1.

A Tabela 1, abaixo, apresenta o detalhamento de 13 modelos estudados por Sales (2011), que foram utilizados nesse estudo. Além do País, nome da Instituição responsável pelo modelo e resolução, esta apresenta um resumo das características dos principais experimentos realizados no CMIP5 e a frequência dos dados disponibilizados.

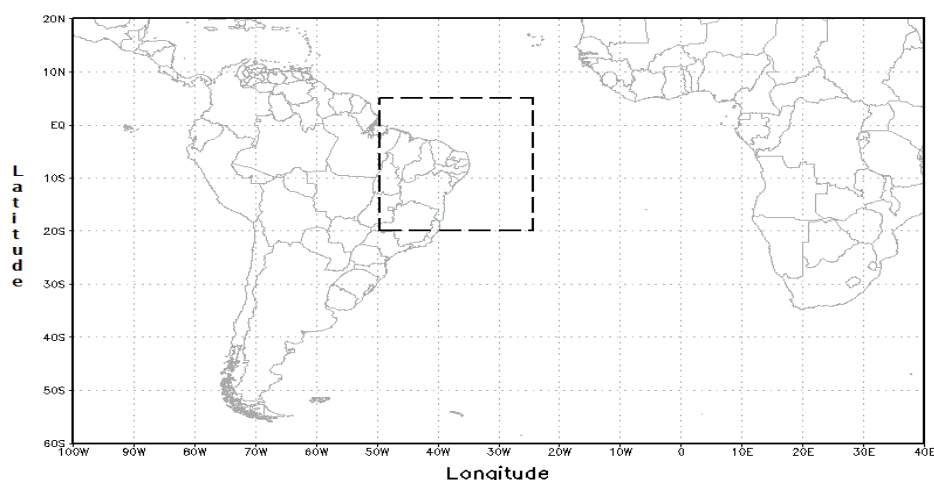


Figura 2 – Área de Estudo – grade em vermelho

Tabela 1 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo

Nº	MODELO	PAÍS	NOME/INSTITUIÇÃO	RESOLUÇÃO	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS		
					PRINCIPAIS EXPERIMENTOS	RODADAS	FREQUENCIA
01	CanESM2	China	Canadian Earth System Model Second Generation	2,8° x 2,8°	historical; historicalExt; historicalGHG; historicalMisc; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp8.5	10 Rodadas; 2 Inicializações ; 7 Pertubações	6hr ; day ; fx; mon ; yr
02	CNRM-CM5	França	Centre National de Recherches Meteorologiques – Coupled Model 5	- 1,5° x - 1,5°	historical; historicalExt; historicalGHG; historicalMisc; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp8.5	10 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day ; fx; mon; subhr; yr
03	CSIRO-MK3-6-0	Austrália	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – Mark 3.6.0	1,8° x 1,8°	historical; historicalGHG; historicalMisc; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5	10 Rodadas; 2 Inicializações ; 7 Pertubações	6hr; day; fx; mon.
04	HadCM3	Reino Unido	Hadley Center Coupled Model Versão 3	3,75° x -2,5°	historical; decadal 1960-2009; rcp4.5	10 Rodadas; 4 Inicializações ; 2 Pertubações	day; fx; mon.
05	HadGEM2-CC	Reino Unido	Hadley Center Global Environmental Model Versão 2 _ Carbon Cycle (include)	1,8° x 1,2°	historical; rcp4.5;rcp8.5	4 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; yr.
06	inmCM4	Russia	Institute for Numerical Mathematics – Coupled Model Versão 4	2,0° x 1,5°	historical; rcp4.5;rcp8.5	2 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; monClim; yr.
07	IPSL – CM5A-LR	FRANÇA	Institute Pierre Simon Laplace – Coupled Model Versão 5 Atmospheric grid configuration - Lower Resolution	3,7° x 1,8°	historical; historicalGHG; historicalMisc; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5	9 Rodadas; 2 Inicializações ; 5 Pertubações	6hr; day;mon; subhr.

Tabela 1 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo (Continuação).

N°	MODELO	PAÍS	NOME/INSTITUIÇÃO	RESOLUÇÃO	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS		
					PRINCIPAIS EXPERIMENTOS	RODADAS	FREQUENCIA
N°	MODELO	PAÍS	NOME/INSTITUIÇÃO	RESOLUÇÃO	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS	N°	MODELO
08	MIROC4h	JAPÃO	Model for interdisciplinary Researsh on Climate Versão 4 - High resolução	0,5° x 0,5°	Decadal 1960,1965,1970, 1975, 1980,1985,1990, 1995, 2000,2005; historical; rcp4.5	7 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; monClim.
09	MIROC5	JAPÃO	Model for interdisciplinary Researsh on Climate Versão 5	~1,5° x ~1,5°	Decadal 1959-2010; historical; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5.	13 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; monClim.
10	MIROC-ESM-CHEM	JAPÃO	Model for interdisciplinary Researsh on Climate – Earth System Model – Chemistry	2,8° x 2,8°	historical; historicalGHG; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5.	2 Rodadas; 2 Inicializações ; 2 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; monClim; yr.
11	MIROC-ESM	JAPÃO	Model for interdisciplinary Researsh on Climate – Earth System Model	2,8° x 2,8°	historical; historicalGHG; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5.	3 Rodadas; 1 Inicialização; 1 Pertubação	6hr; day; mon.
12	MPI-ESM-LR	Alemanha	Max Planck Institute-Earth System Model –Lower Resolution	1,8° x 1,8°	Decadal 1959-2010; historical; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5.	10 Rodadas; 2 Inicializações ; 3 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; monClim; subhr; yr.
13	MRI-CGCM3	Japão	Meteorological Research Institute - Coupled Clobal Climate Moder Versão 3	1,8° x 2,8°	Decadal 1960,1965,1970, 1975, 1980,1985,1990, 1995, 2000,2005,2010, 2011; historical; historicalGHG; historicalNat; rcp2.6; rcp4.5; rcp6.0, rcp8.5.	24 Rodadas; 2 Inicializações ; 3 Pertubações	3hr; 6hr; day; fx; mon; subhr.

Dados

No presente estudo foram usados os seguintes conjuntos de dados:

- (a) Dados diários oriundos dos modelos do CMIP5: HadCM3, HadGem2-CC, CNRM_CM5, MIROC5, CSIRO-MK3-6-0, CanESM2, inmCM4, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, MIROC4h, MIROC-ESM e IPSL-CM5A-LR; com frequência temporal de 6 horas, nível padrão de 250 hPa, onde as variáveis meteorológicas utilizadas foram componentes zonal (U) e meridional (V) do vento, correspondentes ao período de 1995 a 1999, e com a área de estudo limitada entre 20°S – 5°N de latitude e 50°W - 25°W de longitude.
- (b) Dados de Reanálises do National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmosphere Research (NCEP–NCAR) (KANAMITSU et al., 2002) com resolução espacial de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude, mesmas variáveis, frequência temporal, nível e área de estudo que os modelos do CMIP5.

Os dados dos 13 modelos do CMIP5, utilizados nesse estudo, foram obtidos no site <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe>, totalizando **993,31 horas** de download, ou seja **41,38 dias** (Tabela 2).

Após os dados serem baixados eles foram processados através de scripts rodados no software Grid Analysis and Display System (GrADS), para a geração dos campos de vorticidade com limiar de $\zeta < -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ em 250 hPa. Esse limiar foi obtido por SILVA (2005) a partir de uma filtragem de vários limiares onde este valor foi o que apresentou a melhor distribuição de frequência na representação de sistemas ciclônicos no NEB (Figura 3).

Os dados dos 13 modelos do CMIP5, utilizados nesse estudo, foram obtidos no site <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe>, totalizando **993,31 horas** de download, ou seja **41,38 dias** (Tabela 2).

Após os dados serem baixados eles foram processados através de scripts rodados no software Grid Analysis and Display System (GrADS), para a geração dos campos de vorticidade com limiar de $\zeta < -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ em 250 hPa. Esse limiar foi obtido por SILVA (2005) a partir de uma filtragem de vários limiares onde este valor foi o que apresentou a melhor distribuição de frequência na representação de sistemas ciclônicos no NEB (Figura 3).

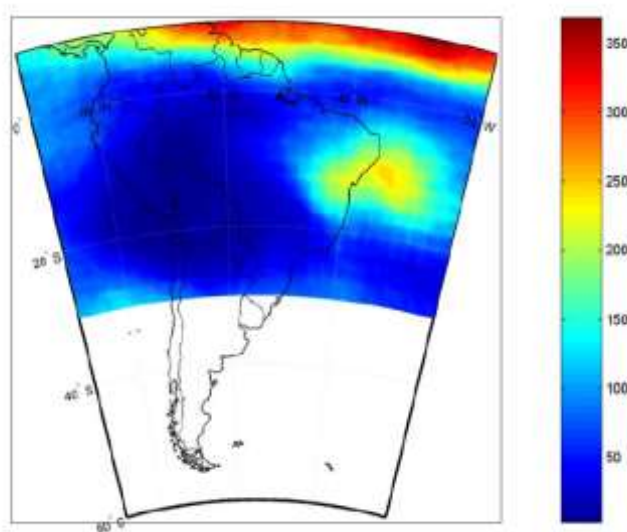


Figura 3 – Distribuição espacial do número de dias com $\zeta < -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ para o período (dez a dez) de 1994 a 2001. Fonte: SILVA, 2005.

Tabela 2 – Detalhamento do download dos dados dos Modelos do CMIP5 analisados neste estudo

Modelo	Quantidade de Arquivo de Dados	Tamanho (GB)	Tempo de Download (Horas)
CanESM2	2	1,78	7,4
CNRM-CM5	2	3,56	11,32
CSIRO-MK3-6-0	2	2,00	24,88

HadCM3	2	3,12	4,63
HadGEM2-CC	2	2,96	31,79
inmCM4	2	2,34	29,31
IPSL-CM5A-LR	2	9,40	57,44
MIROC4h	10	11,2	330,06
MIROC5	2	7,12	113,76
MIROC-ESM-CHEM	2	2,86	21,30
MIROC-ESM	2	2,86	67,60
MPI-ESM-LR	10	3,80	178,69
MRI-CGCM3	10	5,60	115,13
TOTAIS	50	58,60	993,31
Total (Dias)			41,38

Procedimento para quantificar VCANs nos Modelos do CMIP5 e do NCEP/NCAR.

O procedimento utilizado para a quantificar a presença e ausência dos VCANs foi a ANÁLISE VISUAL SUBJETIVA dos campos de vento e vorticidade relativa no nível de 250 hPa. Este procedimento consiste na identificação da ocorrência de sinais de VCANs nos campos de ventos gerados no GrADs, dia a dia, para cada mês nos 13 modelos de mudanças climáticas e nos dados de reanálise. Adotou-se como convenção de sinal de VCAN na área de estudo a presença de vorticidade de circulação fechada sobre e próxima ao NEB.

Métodos e Índices Estatísticos utilizados para avaliar o desempenho dos modelos do CMIP5 em comparação com os dados de Reanálise do NCEP/NCAR.

A comparação dos modelos do CMIP5 e do NCEP/NCAR se deu a partir da aplicação de duas abordagens estatísticas:

A primeira com o cálculo das correlações de Pearson, Spearman e Kendall (WILKS, 2011), a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE), a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio Normalizada (NRMSE), o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o Índice de Concordância de Willmott (d) e o Índice de Eficiência de Kling-Gupta (KGE), no qual utilizou-se o quantitativo mensal dos VCANs, no período de 1995-1999, para o cálculo desses índices. Neste trabalho optou-se para o cálculo da correlação por utilizar além do método de Pearson os métodos de Spearman e Kendall que são estatisticamente mais robustos (WILKS, 2011), duas medidas para quantificar o erro e três métodos de eficiência e

desempenho que são muito utilizados na avaliação da habilidade (skill) de modelos de previsão (Stephenson, 2000). Estes três últimos métodos se diferenciam na forma de cálculo e na escala utilizada para comparação, enquanto que o método de willmott (d) varia em uma escala de 0 a 1 os métodos de Nash-Sutcliffe e Kling-Gupta variam de $-\infty$ a 1 indicando uma melhor acurácia quando se aproximam de 1.

Na segunda abordagem analisou-se o nível de acertos e erros dentro do mês, nos modelos com teste de significância estatística positiva, em função dos índices Proporção Correta (PC), Índice de Sucesso Crítico (ISC), Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (TAF) e Taxa de Tendência (Viés) (Stephenson, 2000). Os modelos para a segunda análise foram escolhidos a partir da aplicação do teste de significância t de Student para as correlações, utilizando-se como teste de hipótese nula a correlação igual a zero. Os cálculos dos testes e índices estatísticos foram realizados utilizando-se o software estatístico R disponível em <http://cran.r-project.org/>.

As equações dos índices estatísticos calculados e usados na primeira análise deste trabalho são descritas abaixo:

- Correlação de Person (r_p):

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) - (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

Onde:

S_i → são os dados simulados (Modelos do CMIP5);

O_i → são os dados observados (NCEP/NCAR);

$i = 1, 2, 3, \dots, 30$;

\bar{S} → é a média dos valores simulados;

\bar{O} → é a média dos valores observados.

- Correlação de Spearman (r_s):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Onde:

D_i → é a diferença das ordens entre os valores simulados e observados;

- Correlação de Kendall (r_K):

$$r_K = \frac{N_c - N_D}{n(n - 1)}$$

Onde:

N_c → é o número de pares (Observado-Simulado) concordantes em ordem

N_D → é o número de pares discordantes em ordem.

- Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE):

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$$

- Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio Normalizado (NRMSE):

$$nrmse = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}}{O_{max} - O_{min}}$$

- Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

- Índice de Concordância de Willmott (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

- Índice de Eficiência de Kling-Gupta (KGE):

$$KGE = 1 - ED$$

Onde:

$ED =$

$$\sqrt{(s[1] * (r_p - 1))^2 + (s[2] * (vr - 1))^2 + (s[3] * (\beta - 1))^2}$$

$$\beta = \frac{\bar{O}}{\bar{S}}$$

$$vr = \begin{cases} \alpha \\ \gamma \end{cases}$$

Com:

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$$

σ_s → Desvio padrão Simulado

σ_o → Desvio padrão Observado

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o}$$

CV_s → Coef. de Variação do Simulado

CV_o → Coef. de Variação do Observado

$$CV_s = \frac{\sigma_s}{\bar{S}} \text{ e } CV_o = \frac{\sigma_o}{\bar{O}}$$

Na segunda análise utilizou-se uma abordagem que leva em consideração inicialmente a tabela de contingência da comparação dos erros e acertos entre os dados simulados ou estimados (Modelos do CMIP5) e os dados observados (NCEP/NCAR) dia a dia, conforme a Figura 4, abaixo:

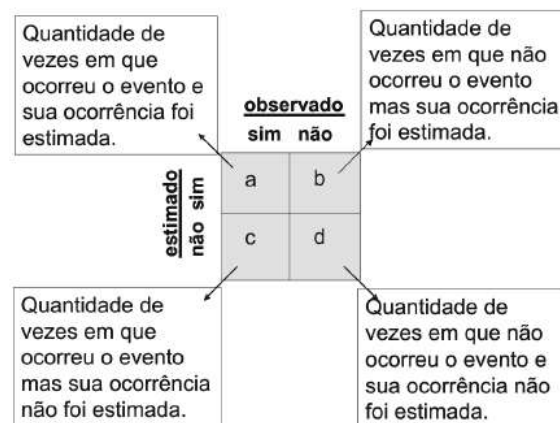


Figura 4 – Tabela de contingência dos erros e acertos para modelos simulados e observados. Fonte: Adaptado de Stephenson, 2000.

Em função dessa quantificação diária, descrita acima, é então calculado os índices:

Índice	Formulação	Significado	Valor
PC (proporção correta)	$PC = \frac{a+d}{n}$, onde $n = a+b+c+d$	Percentual de acertos geral, sem distinção entre acertos da ocorrência ou não ocorrência do evento.	Varia de 0 a 1; Quanto maior o valor, melhor o desempenho.
ISC (índice de sucesso crítico)	$ISC = \frac{a}{a+b+c}$	Percentual de acertos nas estimativas, descontando as vezes em que a não ocorrência do evento foi corretamente prevista.	Varia de 0 a 1; quanto maior o valor, melhor o desempenho.
POD (probabilidade de detecção)	$POD = \frac{a}{a+c}$	Dado que o evento ocorreu, percentual de acertos em estimar sua ocorrência.	Varia de 0 a 1; quanto maior o valor, melhor o desempenho.
TAF (taxa de alarme falso)	$TAF = \frac{b}{b+d}$	Dentre as vezes em que foi estimada a ocorrência do evento, percentual em que o evento não ocorreu.	Varia de 0 a 1; quanto menor o valor, melhor o desempenho.
VIÉS (taxa de tendência)	$VIÉS = \frac{a+b}{a+c}$	Relação entre o número de estimativas de ocorrência do evento e o número de eventos ocorridos.	Assume qualquer valor > 0; Quanto mais próximo de 1 melhor o desempenho; se > 1 indica superestimativa da ocorrência do evento; se < 1 indica subestimativa.

Fonte: Adaptado de Stephenson, 2000.

Resultados e Discussão

As Figuras 5 a 11 apresentam o detalhamento da distribuição dos VCANs tanto da reanálise como dos modelos do CMIP5 para os meses de outubro a março de todo o período considerado no estudo (1995-1999) e para cada um dos meses em separado.

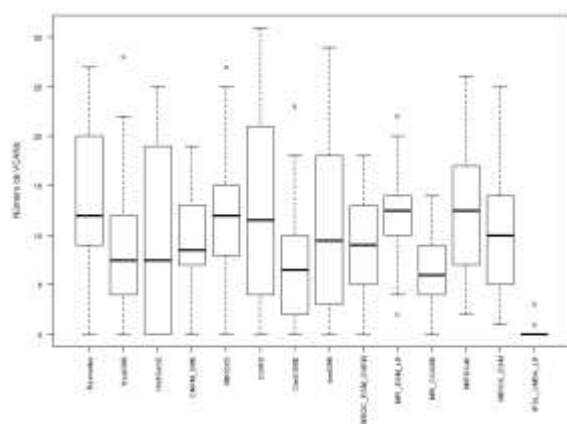


Figura 5 – Boxplot da distribuição de VCANs para o período 1995-1999.

Na Figura 5 vê-se com relação a reanálise que os números de VCANs estão principalmente distribuídos entre 9 a 20 com média **13,63**, com mínimo **0** e máximo **27**, para o período de 1995 a 1999. Nota-se que os modelos do CMIP5 com distribuição mais próxima da reanálise são o MIROC4h e MIROC-

ESM, apesar de que com uma menor amplitude (máximo-mínimo). Com relação a média os modelos CSIRO-MK3-6-0, MIROC4h, MIROC5, MPI-ESM-LR e InmCM4 com valores **13,6**, **12,90**, **12,27**, **11,67** e **11,53**, respectivamente, são os que mais se aproximam da reanálise.

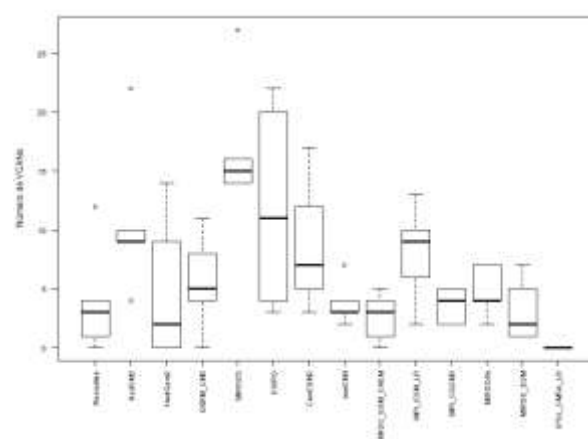


Figura 6 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de outubro, período 1995-1999.

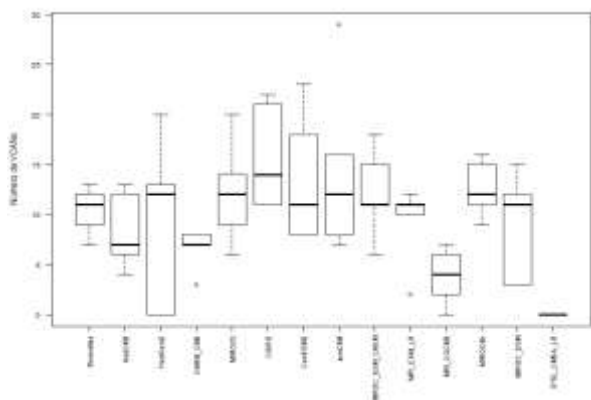


Figura 7 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de novembro, período 1995-1999.

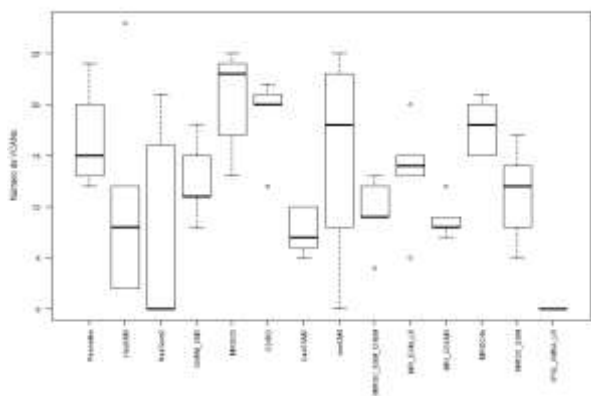


Figura 8 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de dezembro, período 1995-1999.

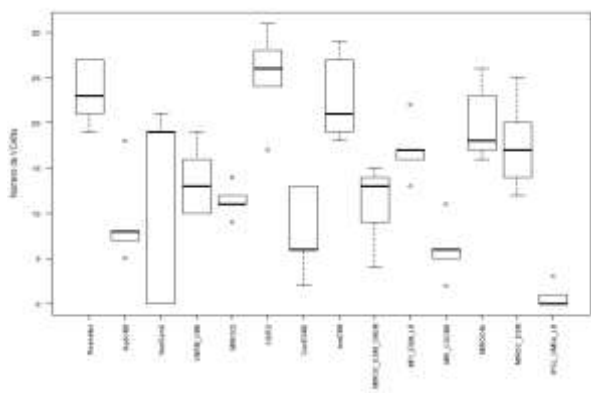


Figura 9 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de janeiro, período 1995-1999

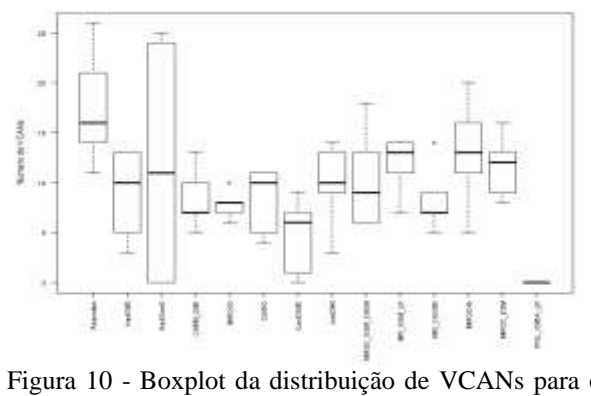


Figura 10 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de fevereiro, período 1995-1999.

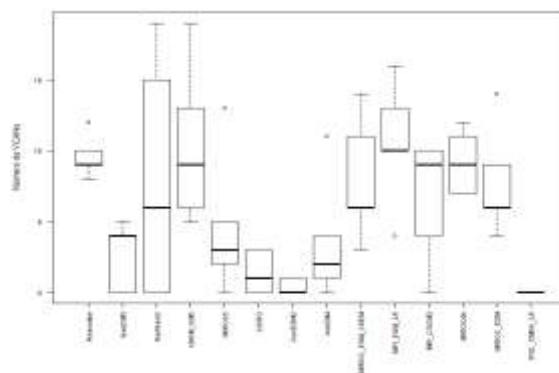


Figura 11 - Boxplot da distribuição de VCANs para o mês de março, período 1995-1999.

Na Figura 6 vê-se que a maioria dos modelos do CMIP5 apresentam distribuição que superestimam a quantidade de VCANs da reanálise para o mês de outubro. Na Figura 7, que detalha o mês de novembro, há uma alternância de estados, alguns modelos subestimam outros superestimam a quantidade de VCANs, sendo que os modelos MIROC4h e MIROC5 apresentam-se com distribuição próxima a reanálise. Nas Figuras 9 e 10 que apresentam os resultados dos meses de janeiro a fevereiro a maioria dos modelos do CMIP5 subestimam a reanálise, a exceção dos modelos CSIRO-MK3-6-0, inmCM4 e MIROC4h no mês de janeiro e HadGEM2-CC e MIROC4h no mês de fevereiro.

Para o mês de dezembro (Figura 8), há uma predominância de modelos subestimando a quantidade de VCANs da reanálise, a exceção dos modelos MIROC4h, inmCM4, MIROC5 e CSIRO-MK3-6-0.

Para o mês de março (Figura 11) observou-se que, apesar de terem uma amplitude de distribuição mais acentuada, os modelos MIROC4h, MRI-CGCM3 e o CNRM_CM5 apresentaram a mediana próxima da mediana da reanálise.

Vale destacar os resultados apresentados pelo modelo IPSL-CM5A_LR cuja variação foi nula exceto no mês de janeiro.

A Tabela 3 apresenta os resultados da aplicação dos testes estáticos correspondentes a primeira análise comparativa realizada.

Em todos os testes estatísticos e índices calculados o MIROC4h foi o modelo que apresentou o melhor desempenho, corroborando os resultados apresentados por este na análise descritiva dos dados realizada anteriormente. A ordem de classificação dos modelos com melhor desempenho em relação aos resultados dos índices foi a seguinte: 1º) MIROC4h, 2º) MIROC-ESM, 3º) inmCM4, 4º) MPI-ESM-LR, 5º) MRI-CGCM3, 6º) CSIRO-MK3-6-0, 7º) MIROC-ESM-CHEM, 8º) CNRM_CM5, 9º) HadGEM2-CC, 10º) HadCM3, 11º) MIROC5, 12º) CanESM2, 13º) IPSL-CM5A-LR.

A aplicação do teste de significância estatística t-student para as correlações calculadas, admitindo como hipótese nula a correlação igual a zero e $\alpha = 5\%$, resultou, como estatisticamente significantes, os seis primeiros modelos da classificação obtida anteriormente (Tabela3). Este resultado foi utilizado como ponto de corte para a segunda análise estatística realizada

Tabela 3 – Resultados da primeira análise comparativa.

Modelo (Class)	r_p	Teste Significância	r_K	Teste Signif.	r_S	Teste Signif.	RMSE	NRMSE	NSE	d	KGE
HadCM3 (10°)	0,087	t = 0,4631 p = 0,646	0,031	z = 0,233 p = 0,815	0,055	S = 4244,71 p = 0,770	10,564	37,7	-1,96	0,39	-0,126
HadGEM2-CC (9°)	0,225	t = 1,2222 p = 0,231	0,158	z = 1,141 p = 0,253	0,207	S = 3560,52 p = 0,270	11,324	45,3	-0,57	0,53	0,039
CNRM_CM5 (8°)	0,320	t = 1,7877, p = 0,084	0,211	z = 1,582 p = 0,113	0,292	S = 3178,94 p = 0,116	8,392	44,2	-2,30	0,49	0,001
MIROC5 (11°)	-0,121	t = -0,65 p = 0,521	-0,059	z = -0,448 p = 0,654	-0,140	S = 5125,88 p = 0,459	10,565	39,1	-1,54	0,23	-0,133
CSIRO-MK3-6-0 (6°)	0,359	t = 2,0364 p = 0,051	0,270	z = 2,031 p = 0,042	0,392	S = 2729,58 p = 0,031	9,318	30,1	-0,08	0,62	0,335
CanESM2(12°)	-0,063	t = -0,3347 p = 0,740	0,012	z = 0,089 p = 0,928	0,025	S = 4379,85 p = 0,893	11,552	50,2	-3,12	0,32	-0,425
inmCM4 (3°)	0,568	t = 3,6516 p = 0,00106	0,375	z = 2,848 p = 0,004	0,544	S = 2048,10 p = 0,001	7,968	27,5	0,20	0,72763	0,499
MIROC-ESM-CHEM (7°)	0,346	t = 1,9524 p = 0,060	0,265	z = 1,980 p = 0,047	0,371	S = 2827,11 p = 0,043	8,658	48,1	-2,18	0,51292	0,015
MPI-ESM-LR (4°)	0,477	t = 2,8792 p = 0,007	0,367	z = 2,7522 p = 0,005	0,489	S = 2294,55 p = 0,006	6,858	34,3	-1,10	0,62365	0,220
MRI-CGCM3 (5°)	0,407	t = 2,3582 p = 0,025	0,275	z = 2,0521 p = 0,040	0,416	S = 2624,88 p = 0,022	10,024	71,6	-7,69	0,38990	-0,772
MIROC4h (1°)	0,672	t = 4,8093 p = 0,00004	0,492	z = 3,699 p = 0,0002	0,707	S = 1345,23 p = 0,00001	5,585	23,3	0,12	0,79574	0,596
MIROC-ESM (2°)	0,653	t = 4,563 p = 0,00009	0,487	z = 3,678 p = 0,0002	0,627	S = 1672,25 p = 0,0002	6,708	28	-0,32	0,73389	0,437
IPSL-CM5A-LR (13°)	0,286	t = 1,5812 p = 0,125	0,290	z = 1,872 p = 0,061	0,353	S = 2908,17 p = 0,055	15,304	510,2	-741,2	0,04517	- 100,91

p = probabilidade; t, z, S = estatísticas de teste (t-student) para as correlações de Person, Kendall e Spearman.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de acertos e erros. Vê-se pelos resultados apresentados na tabela que o MIROC4h foi o que teve o melhor desempenho em três desses índices (PC, ISC e POD) com exceção dos índices TAF e VIÉS que apresentaram os modelos MRI-CGCM3 e CSIRO-

MK3-6-0 com valores superiores, sendo que o MIROC4h obteve o segundo melhor resultado no VIÉS e o pior resultado com relação ao TAF junto com o CSIRO-MK3-6-0.

Tabela 4 – Resultados da segunda análise comparativa.

Modelos Analisados	PC	ISC	POD	TAF	VIÉS
MIROC_4h	0,674	0,562	0,708	0,374	0,969
INMCM4	0,602	0,350	0,479	0,297	0,845
MPI-ESM-LR	0,537	0,284	0,410	0,360	0,855
MRI-CGCM3	0,538	0,169	0,210	0,196	0,452
MIROC_ESM	0,568	0,286	0,386	0,283	0,735
CSIRO-MK3-6-0	0,585	0,366	0,535	0,374	0,997

Conclusões

As análises realizadas nesse estudo, tanto para a primeira quanto para a segunda abordagens estatísticas, nos quais estudou-se o quantitativo de VCANs mensais e diários, respectivamente, apontaram o MIROC4h como modelo do CMIP5 com melhor desempenho para descrever o comportamento de VCANs no NEB.

Dessa forma este modelo poderá ser utilizado para estudo de períodos climatológicos (30 anos) e para o estudo de cenários futuros, que constituem as próximas etapas dessa pesquisa. A extensão desse estudo avaliará outras variáveis meteorológicas como a precipitação, além da convergência, divergência e movimentos ascendentes e descendentes dos ventos, e investigará a contribuição dos VCANs em termos de precipitação para o NEB além da projeção climática dessa variável meteorológica para o século XXI.

Agradecimentos

À Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo financiamento da pesquisa e o suporte técnico e material para a sua viabilização.

À pesquisadora da EMPARN Marlúcia Elias de Farias pelo suporte técnico científico durante a pesquisa e ao pós-graduando Alexandre Santos Silva pelo suporte técnico na utilização do software GrADS.

Referências

Aragão, J.O.R., 1975. Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil, Tese de Mestrado em Meteorologia – São José dos Campos - SP. INPE. 47p.

Coutinho, M. D. L.; Gan, M. A.; Rao, V. B. 2010. Método objetivo de identificação dos vórtices

ciclônicos de altos níveis na região tropical sul: Validação. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.3, 311-323.

Dean, G. A. 1971. Three dimensional wind structure over South America and associated rainfall over Brazil. 1971. (LAFE-164). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Gan, M. A.; Kousky, V. E. 1986. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 1, p. 19-28..

Kanamitsu, M. et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2):. 1631-1643, Nov, Bulletin of the American Meteorological Society.

Kousky, V. E., Gan, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south Atlantic, Tellus, 33, 538-551.

Laprise, R. et al. 2008. Challenging some tenets of regional climate modeling. Meteorology and Atmospheric Physics, 100, 3-22,

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M. 2007. Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,

- Ramirez, M. C. V. 1996. Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil. 132p. (INPE-6408-TDI/618). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- Ramirez, M.C.V., Kayano, M.T., Ferreira, N. J. 1999. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of Northeast Brazil during the 1980-1989 period. *Atmosfera*, v.12, p.75-88.
- Sales, D.C. 2011. Simulações de Downscaling Dinâmico do Clima Presente sobre as Américas Tropicais. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza-CE.
- Silva, L. A. 2005. A influência do vórtice ciclônicos de altos níveis (VCAN) sobre a precipitação do nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas. 134 p. (INPE-14488-TDI/1169). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Silveira, C. S.; Filho, F. A. S., Costa, A. A.; Cabral, S. L. 2013. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.3, 317-330.
- Stephenson, D. B. 2000. Use of the “Odds Ratio” for diagnosing forecast: Skill. *American Meteorology Society*, 15, 221-323.
- Taylor, K.E., Ronald, J.S., Meejl, G.A. 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *American Meteorological Society*, DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Varejão-Silva, M. A. 2005. Meteorologia e Climatologia. Versão Digital 1. In: *Perturbações Atmosféricas*. Recife.
- Virji. 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Mon. Wea. Rev.* 109, 599-610.
- Wilks, D. S. 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, v. 100, Third Edition (International Geophysics).