



Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Ciências Atmosféricas
Programa de Pós-graduação em Meteorologia



Hugo Cainã Ferreira Monteiro

**PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DOS CENÁRIOS RCP 8.5 E 4.5 NAS CAPITAIS DOS
ESTADOS DO NORDESTE DO BRASIL, UTILIZANDO MODELOS CLIMÁTICOS
REGIONAIS**

Maceió – AL

Junho de 2019

Hugo Cainã Ferreira Monteiro

**PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DOS CENÁRIOS RCP 8.5 E 4.5 NAS CAPITAIS DOS
ESTADOS DO NORDESTE DO BRASIL, UTILIZANDO MODELOS CLIMÁTICOS
REGIONAIS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito necessário para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior

Maceió- AL
Junho de 2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

M775p Monteiro, Hugo Cainã Ferreira.
Projeções climáticas dos cenários RPC 8.5 e 4.5 nas capitais dos estados do
Nordeste do Brasil, utilizando modelos climáticos regionais / Hugo Cainã Ferreira
Monteiro. – 2019.
71 f. : il.

Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.
Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 63-66.
Anexos: f. 66-71

1. Modelos climáticos. 2. Cenários climáticos. 3. Clima - Brasil - Nordeste. I.
Título.

CDU: 551.509(812/813).

Ativar o Windows
Acesse as configurações
para ativar o Windows.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-163.

***"PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DOS CENÁRIOS RCP8.5 E RCP4.5 NAS
CAPITAIS DOS ESTADOS DO NORDESTE DO BRASIL, UTILIZANDO
MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS."***

Hugo Cainã Ferreira Monteiro

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior
(Orientador)

Prof. Dr. Marcos Antonio Lima Moura
(Membro Interno)

Prof. Dr. Marcos Paulo Santos Pereira
(Membro Interno)

Prof. Dr. Sandro Correia de Holanda
(Membro Externo)

junho/2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS por me guiar e auxiliar durante toda essa jornada.

A minha esposa, meu filho, meus familiares e amigos por todo suporte emocional e apoio nas horas difíceis e momentos em que eu quis desistir.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rosiberto Salustiano que me guiou, me ensinou e me aturou durante todo esse processo de pesquisa e criação desta dissertação.

E agradeço a FAPEAL pelo apoio financeiro sem o qual não teria sido possível concluir essa dissertação.

RESUMO

Os eventos atmosféricos influenciam de forma direta e indireta a vida terrestre. Ao longo dos séculos foram desenvolvidas diversas técnicas e conceitos para entender e tentar prever os fenômenos meteorológicos de forma a minimizar os efeitos colaterais que possam ser causados por eventos extremos. Um dos métodos empregados atualmente para prever os fenômenos meteorológicos é o uso de modelos climáticos. O intuito desse estudo é primeiramente testar os modelos RegCM e WRF na simulação e uso de cenários climáticos podendo assim auxiliar nas tomadas de decisões socioeconômicas. A região Nordeste do Brasil está situada entre os paralelos de 07° 12' 35" de latitude sul e 48° 20' 07" de latitude sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24", a oeste do meridiano de Greenwich. Engloba os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Nos resultados é possível ver na variável de precipitação que o modelo WRF apresentou uma resposta aos dias com e sem a ocorrência de chuva, embora não na mesma intensidade que o observado, é visto também que em ambos os modelos a um aumento na temperatura média anual, esse aumento varia de 0,3 a 0,8 a depender da localização, ainda foi constatado que para a variável de vento os dados simulados ficaram melhor relacionado com os dados observados de rajado de vento do que com os dados de velocidade do vento. Com base no que foi apresentado é possível dizer que os modelos obtiveram uma boa resposta para as simulações em relação ao observado, seja nas rodadas sem ou com o uso dos cenários climáticos, onde em algumas variáveis é possível ver um melhor desempenho na representação da intensidade da variável, outras na variação sazonal da variável e algumas em ambas as características.

Palavras – Chave: Modelos Climáticos, Cenários Climáticos, Clima do Nordeste Brasileiro.

ABSTRACT

Atmospheric events directly and indirectly influence terrestrial life. Over the centuries, various techniques and concepts have been developed to understand and attempt to predict weather phenomena in order to minimize side effects that may be caused by extreme events. One of the methods currently employed to predict weather phenomena is the use of climate models. The purpose of this study is primarily to test the RegCM and WRF models in the simulation and use of climate scenarios, thus helping to make socioeconomic decisions. The Northeast region of Brazil is situated between the parallels of 07 ° 12 '35 "south latitude and 48 ° 20' 07" south latitude and between the meridians of 34 ° 47 '30 "and 48 ° 45' 24", west of the Greenwich meridian. It encompasses the states of Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte and Sergipe. In the results it is possible to see in the precipitation variable that the WRF model presented a response to the days with and without the occurrence of rain, although not at the same intensity as observed, it is also seen that in both models an increase in the average annual temperature, this increase varies from 0.3 to 0.8 depending on location, it was also found that for the wind variable the simulated data were better related to the observed gust data than to the wind speed data. Based on what was presented it is possible to say that the models obtained a good response to the simulations in relation to the observed, either in the rounds without or with the use of climatic scenarios, where in some variables it is possible to see a better performance in the representation of the intensity. of the variable, others in the seasonal variation of the variable and some in both characteristics.

Keywords: Climate Models, Climate Scenarios, Northeastern Brazilian Climate.

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa do Nordeste brasileiro	22
Figura 2 - Precipitação das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.....	30
Figura 3 - Pressão atmosférica das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.	34
Figura 4 – Temperatura do ar das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.	37
Figura 5 - Velocidade do vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.	41
Figura 6 - Rajada de vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.....	44
Figura 7 - Precipitação diária das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.	47
Figura 8 - Pressão atmosférica das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.	50
Figura 9 - Temperatura do ar das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.	53
Figura 10 - Velocidade do vento próximo a superfície das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.	56
Figura 11 - Rajada de vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 - datas de início e termino das rodadas	26
Tabela 2 - categorização dos dados estatísticos.....	27
Tabela 3 - Estatística da simulação do modelo WRF para a variável de precipitação. Verde - melhor valor, vermelho – pior valor estatístico.....	33
Tabela 4 - Analise estatística da simulação do modelo WRF para a pressão atmosférica próximo a superfície.....	36
Tabela 5 - Analise estatística da simulação do modelo WRF para a temperatura atmosférica próximo a superfície	40
Tabela 6 - Analise estatística da simulação do modelo WRF para a velocidade do vento próximo a superfície.....	43
Tabela 7 - Analise estatística da simulação do modelo WRF para a rajada de vento.	46
Tabela 8 - Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a variável de precipitação	49
Tabela 9 - Analise estatística da simulação do modelo RegCM para a pressão atmosférica próximo a superfície	52
Tabela 10 - Analise estatística da simulação do modelo RegCM para a temperatura atmosférica	55
Tabela 11 – Analise estatística da simulação do modelo RegCM para a velocidade do vento.	58
Tabela 12 - Analise estatística da simulação do modelo RegCM para a Rajada de vento	61
Tabela 13 - Analise estatística da previsão do modelo WRF para a precipitação.....	67
Tabela 14 - Analise estatística da previsão do modelo WRF para a Pressão atmosférica próximo a superfície.....	68
Tabela 15 - Analise estatística da previsão do modelo WRF para a temperatura atmosférica.....	68
Tabela 16 - Analise estatística da previsão do modelo WRF para a velocidade do vento.	68
Tabela 17 - Analise estatística da previsão do modelo WRF para a rajada de vento.....	69
Tabela 18 - Analise estatística da previsão do modelo RegCM para a precipitação.....	69
Tabela 19 - Analise estatística da previsão do modelo RegCM para a pressão atmosférica....	70
Tabela 20 - Analise estatística da previsão do modelo RegCM para a temperatura da atmosfera.....	70
Tabela 21 - Analise estatística da previsão do modelo RegCM para a velocidade do vento. ...	71
Tabela 22 - Analise estatística da previsão do modelo RegCM para a rajada de vento.....	71

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. Objetivo.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1.1. Cenários Climáticos no Brasil	11
3.2.1. Precipitação...	13
3.2.2. Temperatura do ar	14
3.2.3. Sistemas Climáticos e Atmosféricos atuantes na Região Nordeste	14
3.2.4. Clima das capitais nordestinas	14
4. Material e Métodos	21
4.3.1. Modelo RegCM 4.7	22
4.3.2. Modelo WRF	24
4.4.1. Análise estatística	26
5. Resultados e Discussões	27
5.1.1. Modelo WRF	29
5.1.2. Modelo RegCM	47
6. Conclusões.....	63
Referências... ..	64
Anexos.....	67
1. Modelo WRF.....	67
2. Modelo RegCM	69

INTRODUÇÃO

Os eventos atmosféricos influenciam de forma direta e indireta a vida terrestre. Ao longo dos séculos foram desenvolvidas diversas técnicas e conceitos para entender e tentar prever os fenômenos meteorológicos de forma a minimizar os efeitos causados por eventos extremos, tais como tempestades, seca e ondas de calor. Um dos métodos empregados atualmente para prever os fenômenos meteorológicos é o uso de modelos climáticos.

Nos modelos climáticos são gerados cenários futuros mediante os dados utilizados de inicialização do modelo, tornando possível a previsão a curto e, até certo ponto, longo prazo. Além de auxiliar na previsão de fenômenos meteorológicos, é possível também visualizar nesses cenários as possíveis circunstâncias que a atmosfera apresentará e com isso auxiliar nas tomadas de decisões socioeconômicas, políticas e industriais, tornando possíveis realizar ações que minimizem os danos que podem ocorrer.

Os modelos podem ser utilizados incrementando o sistema de equações matemáticas e físicas, apesar de ser uma forma mais precisa de simular a realidade isso pode se tornar algo complexo, pois a depender do fenômeno a ser simulado se faz necessário bom conhecimento sobre toda física envolvida naquele evento. Outra técnica utilizada para realizar previsões climáticas, é o uso de inteligência artificial, que ao invés de definir bem os eventos climáticos, visa fazer o modelo “aprender” as variabilidades existentes em uma série de dados e em seguida descrever o que está acontecendo na atmosfera.

Portanto, o intuito desse estudo é testar e viabilizar para as capitais da região Nordeste do Brasil, os modelos climáticos regionais Regional Climate Model (RegCM) e Weather Research Forecasting (WRF) e com eles realizar projeções climáticas de acordo com os cenários RCP4.5 e 8.5. Possibilitando assim auxiliar nas tomadas de decisões socioeconômicas, tais como o uso da terra, construções de novas indústrias e moradias, e como essas mudanças afetariam a atmosfera. “Em quanto tempo isso se tornará prejudicial à saúde e a economia? ”, “Quais medidas podem ser adotadas para mudar o quadro climatológico? ” Essas são perguntas que a partir de estudos de cenários climáticos projetados por modelos podem ser respondidas.

OBJETIVO

1.1. Objetivo geral

ANALISAR os Cenários climáticos RCP 8.5 e RCP 4.5 para as capitais do Nordeste do Brasil utilizando os modelos RegCM e WRF.

1.2. Objetivos específicos

VALIDAR os modelos RegCM e WRF para as capitais do Nordeste do Brasil

SIMULAR os padrões sazonais e diários das principais variáveis atmosféricas.

PREVER o comportamento futuro das variáveis atmosféricas utilizando os RCP's 8.5 e 4.5 nos modelos RegCM e WRF.

COMPARAR a performance dos modelos WRF e RegCM.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3. Modelagem Atmosférica no Brasil

A diversidade climática presente no Brasil é que incentiva um aprimoramento das ferramentas de previsão e análise meteorológicas. Esses avanços foram notados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), onde através da Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima (CGMC) firmou ligações com a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA) e reafirmou parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). A rede CLIMA, implantada pelo MCTIC, é formada por diversos centros nacionais de pesquisa com o objetivo de gerar e espalhar conhecimentos para que o Brasil seja capaz de fazer frente aos desafios propostos pelos efeitos e causas das mudanças climáticas globais.

O INPE, associado ao MCTIC e o Cemaden, afim de elaborar estudos setoriais de vulnerabilidade a mudanças climáticas, passou a coordenar trabalhos de modelagem climática regional e de produção de cenários futuro acerca de mudanças climáticas e também a relação entre adequação de setores vulneráveis aos impactos associados a mudança climática e os estudos de vulnerabilidade no país. Os dados gerados a partir das simulações possibilitaram a formação de relatórios de cenários climáticos inéditos que deram respaldo aos estudos apresentados na Terceira Comunicação Nacional (TCN) para a convenção do clima.

1.3.1. Cenários Climáticos no Brasil

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) é o responsável pelas projeções dos cenários de mudanças climáticas para o século XXI produzidas pelos modelos climáticos globais, ele analisa os impactos que serão gerados tendo como base os diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa até o ano de 2100. Em 2000 o IPCC publicou o *Special Report Emission Scenarios (SRES)*, onde

nele são apresentados quatro cenários de emissão com projeções futuras, dois com grandes taxas (cenário pessimista) de emissão de gases de efeito estufa (GEE), A1 e A2, e dois com baixas taxas (cenário otimista) de emissões, B1 e B2. Em 2014 foi apresentado um quinto relatório de avaliação (*Fifth Assessment Report – AR5*), nele estavam presentes cenários climáticos e socioeconômicos representativos de tendências, os Representative Concentration Pathways (RCPs). Os RCPs também foram divididos em quatro, o RCP 8.5, contendo altas emissões, o RCP 6.0, com emissões intermediárias, o RCP4.5, possuindo emissões intermediárias-baixas, e RCP 2.6 tendo baixas emissões. Os cenários do RCPs equivalem aos do SRES, o RCP 8.5 se assemelhava ao SRES A2, o RCP 6.0 se encontrava entre os cenários B1 e B2, enquanto que o RCP 4.5 equivalia ao B1, porém nenhum dos SRES tinha resultados tão baixos para se igualar ao RCP 2.6. (IPCC)

Um ponto a ser notado é que projeções climáticas futuras, de curto ou longo prazo, apresentam algumas incertezas que são intrínsecas ao uso de modelos, por isso é aconselhável um olhar crítico na análise dos dados, e também é o que motiva pesquisadores na constante busca pelo aperfeiçoamento dessa ferramenta. Um exemplo disso são os modelos climáticos globais que utilizam variadas representações físicas dos processos atmosféricos em uma grade de resolução baixa, isso induz um grau de incerteza nos cenários de mudanças climáticas futuras e, por consequência, na avaliação dos impactos e vulnerabilidades em função dessas mudanças. Uma técnica utilizada para superar a baixa resolução dos modelos globais são métodos de *downscaling*, que são aplicadas nos cenários climáticos desses modelos com o intuito de tornar possível uma visão de regiões menores, como estados ou vales, com uma resolução espacial maior do que as obtidas no modelo global.

Para o Brasil o INPE utilizou a técnica de *downscaling* dinâmico, onde ele fez uso dos cenários de mudança climática propostos no AR5 do IPCC. Essa técnica consiste em reduzir a escala das projeções oriundas dos modelos globais, obtendo assim uma projeção com uma melhor resolução espacial, ideal para região de litorâneas, de vale e bacias. A melhora na resolução se dá através de modelos regionais atmosféricos mantidos por projeções de modelos climáticos globais. O melhor detalhamento nas projeções auxilia nos estudos dos impactos das mudanças climáticas em vários setores socioeconômicos e a vulnerabilidade proveniente de problemas em escala menores. Para realizar o método de *downscaling* dinâmico o INPE utilizou o modelo regional ETA, desenvolvido pelo mesmo, que gerou cenários de mudanças climáticas para a América do Sul. Desde de 1996 o instituto utiliza este modelo para realizar previsões do tempo, em 2002 ele foi aprimorado para ser usado como modelo climático e fazer previsões

sazonais e logo após para estudos de mudanças climáticas. O INPE busca continuamente o aperfeiçoamento do modelo ETA, os planos futuros para atualização da versão de mudanças climáticas contam com o acoplamento com modelo oceânico, reações químicas da atmosfera, substituição do esquema de radiação considerando aerossóis e vegetação dinâmica e mudanças do uso da terra. Isso mostra o desenvolvimento da modelagem climática no Brasil, através das análises dos cenários atuais e futuros produzidos pelos modelos globais e regionais. Outro modelo que evidencia o desenvolvimento do Brasil na área da modelagem climática é o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (Brazilian Earth System Model – BESM), esse modelo foi desenvolvido pelo INPE em parceria com instituições de ensino e pesquisa nacionais e internacionais. O modelo, mesmo estando ainda em desenvolvimento, já se mostrou capaz de conseguir gerar cenários climáticos globais para décadas futuras, isso viabilizou a participação do Brasil em produzir cenários de mudanças climáticas globais para o AR5 do IPCC.

1.4. Clima no Nordeste

A proximidade com o oceano é importante para o clima da região, pois, ela recebe influência de brisas marítimas e terrestres. Segundo Ferreira e Mello, 2005 as brisas afetam até 100 km para dentro do continente ou do mar. Durante o dia, a superfície terrestre se aquece mais rápido que o oceano, fazendo com que a pressão sobre o continente seja mais baixa que sobre o oceano. Desta forma, o vento próximo a superfície sopra do oceano para o continente, caracterizando a brisa marítima. Durante a noite o oceano passa a exibir temperaturas mais elevadas que o continente, sendo assim a pressão fica maior sobre o continente, fazendo com que o vento sopra do litoral para o oceano, caracterizando a brisa terrestre (Ferreira; Mello, 2005; Reboita et al., 2012). Os autores, também notam que a proximidade com o oceano é importante para o suprimento de vapor d'água para a atmosfera, o que contribui para o efeito estufa local, favorecendo temperaturas com menor variação diária do que das regiões no interior do continente.

1.4.1. Precipitação

Embora esteja localizando numa região equatorial sua distribuição de chuva é atípico do padrão, com uma variação de 300 a 2.000 mm em sua precipitação anual, possuindo três de subclimas em sua região: clima litoral úmido, tropical e tropical semiárido. Essa variação se dá em razão dos mecanismos climáticos atuantes na região, tais como a posição geográfica em que se encontra, o relevo, a vegetação e os sistemas de pressão existentes na região. (Kayano, 2009)

A precipitação na região nordeste do Brasil possui uma grande variabilidade interanual e intrassazonal, chegando a ter anos de extrema seca ou extremamente chuvosos. Essa variabilidade está ligada aos sistemas e padrões atmosféricos que atuam sobre essa região, citando alguns deles temos a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). (Kayano, 2009)

1.4.2. Temperatura do ar

De acordo com algumas literaturas a temperatura do NEB varia com medias em torno de 20° a 28°C, onde nas áreas mais elevadas, como o planalto da Borborema, a média anual pode ficar abaixo dos 20°C, enquanto que no litoral e em áreas acima de 200m a temperatura pode variar em 24° a 26°C. (Kayano, 2009)

1.4.3. Sistemas Climáticos e Atmosféricos atuantes na Região Nordeste

Como citado anteriormente as variáveis climáticas existentes no Nordeste brasileiro são regidas por fatores físicos (relevo, vegetação) e climáticos (sistemas atmosféricos). Segundo Kayano (2009) a região está sob influência do cavado equatorial e dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Norte (ASAN), de acordo com a pesquisadora as mudanças na intensidade e nas posições desses sistemas são responsáveis pela configuração do clima, ela cita também que as movimentações desses sistemas têm influência direta na ZCIT, que por sua vez é um dos mecanismos responsável pela precipitação na região norte e no centro do Nordeste do Brasil durante os meses de fevereiro a abril.

1.4.4. Clima das capitais nordestinas

1.4.4.1. Aracaju

As características climáticas do município de Aracaju estão sobre efeito de quatro sistemas meteorológicos os Alísios de sudeste, a ZCIT, o Sistema Equatorial Amazônico (SEA) e a Frente Polar Atlântico (FPA), onde mediante a ação e inteiração com outros fatores locais, como a posição geográfica e proximidade em relação ao mar, fazem predominar um tipo climático quente que varia do úmido ao subsumido. Apresenta regime pluviométrico definido por um período seco de primavera-verão e chuvoso de outono-inverno, cujas características apresentadas permitem enquadrá-los no clima mediterrâneo. (UFS/SEPLAN, 1979)

A temperatura média anual é de 26 °C e precipitação média anual de 1.300 milímetros (mm). Os meses mais quentes de Aracaju são: janeiro, fevereiro e março, com temperatura média de 27 °C, sendo que a média das máximas são 29 °C e a das mínimas 24 °C. Já os mais amenos são julho e agosto, com temperatura média de 24 °C, a média das máximas não supera os 28 °C, e à noite a temperatura pode cair para 19 °C. (INMET)

Em Aracaju os meses mais chuvosos são entre março e julho, pois os ventos fortes nesses meses trazem várias nuvens carregadas. Nesse período, a quantidade média de chuva supera os 150 mm por mês. Entre esses meses, o mais chuvoso é o maio, cuja média é de aproximadamente 242 mm. Nos meses mais secos, entre setembro e fevereiro, o vento fica mais fraco, só conseguindo trazer nuvens leves. A média de chuvas entre esses meses é de aproximadamente entre 20 mm e 60 mm. (INMET)

1.4.4.2. Fortaleza

Fortaleza possui clima tropical semiúmido, com temperatura média anual em torno dos 27 °C. Sem ter exatamente definidas as estações do ano, há a estação chuvosa, de janeiro a junho e a estação seca, de agosto a dezembro (inverno e primavera). O índice pluviométrico anual é superior a 1 600 milímetros (mm), concentrados entre fevereiro e maio. Sua localização, entre serras próximas, faz com que as chuvas de outono ocorram com mais frequência na cidade e entorno do que no resto do estado. (INMET)

Segundo dados do (INMET) a menor temperatura registrada em Fortaleza foi de 19,4 °C nos dias 15 de agosto de 1969 e 5 de julho de 1974, enquanto a maior atingiu 34,6 °C em fevereiro de 2013. O maior acumulado de precipitação em 24 horas chegou a 198 mm em maio de 1974.

A velocidade horária média do vento em Fortaleza passa por variações sazonais significativas ao longo do ano. A época de mais ventos no ano dura 6,5 meses, de junho a janeiro, com velocidades médias do vento acima de 20,4 km/h. A época mais calma do ano dura 5,5 meses com 14,7 km/h de velocidade horária média do vento. (INMET)

1.4.4.3. João Pessoa

O clima de João Pessoa é tropical úmido, com índices relativamente elevados de umidade do ar, e temperaturas médias anuais em torno dos 27 °C. O índice pluviométrico anual é superior a 1 900 mm, concentrados entre os meses de abril e julho. (INMET)

A probabilidade de dias com precipitação em João Pessoa varia acentuadamente ao longo do ano. A estação de maior precipitação dura 5,7 meses, de fevereiro a de agosto. A estação seca dura 6,3 meses. (INMET)

As temperaturas mais altas tende a durar por 4,0 meses, de dezembro a abril, com temperatura máxima média diária acima de 31 °C. Já as temperaturas mais amenas permanecem por 2,8 meses, entre junho e setembro, com temperatura máxima diária em média abaixo de 29 °C. (INMET)

A velocidade horária média do vento em João Pessoa passa por variações sazonais significativas ao longo do ano. A época com ventos mais forte no ano dura 7,4 meses, de maio a janeiro, com velocidades médias do vento acima de 19,2 km/h. (INMET)

1.4.4.4. Maceió

Maceió apresenta clima quente e úmido, caracteriza por não apresentar grandes diferenciações térmicas e precipitação concentrada no outono e inverno, especialmente entre abril e agosto, sendo maio e junho os meses de maior precipitação. As temperaturas médias mensais oscilam em torno de 25 °C. A máxima mensal atinge 29 °C e a mínima 22 °C, podendo no verão, a máxima variar e atingir entre 30 °C até 35 °C nos dias mais quentes, durante o inverno a máxima é de 27 °C, onde em alguns dias a temperatura não ultrapassa os 23 °C, e a mínima é de 21 °C podendo chegar a 17 °C durante a madrugada. (INMET)

As chances de dias com precipitação em Maceió variam ao longo do ano. A estação de maior precipitação dura aproximadamente 5 meses, de março a agosto, e a estação seca dura cerca de 7 meses. O máximo de chuva ocorre durante o mês de junho, com acumulação total média de 157 milímetros. O mínimo de chuva ocorre por volta de novembro, com acumulação total média de 14 milímetros. (INMET)

A velocidade horária média do vento em Maceió passa por poucas mudanças sazonais durante o ano. O período com ventos mais fortes é entre os meses de junho e fevereiro, com velocidades horarias medias acima de 19,3 km/h, e durante o período mais fraco os ventos chegam até 17,2 km/h de velocidade horária média. (INMET)

1.4.4.5. Natal

Natal possui clima tropical chuvoso com verão seco e com amplitudes térmicas relativamente baixas, devido à sua localização no litoral. A cidade possui uma elevada luminosidade solar, a maior dentre as capitais brasileiras, que ultrapassa 2 900 horas anuais. A

estação com maior índice de precipitação dura de fevereiro a de julho e a estação seca vai de julho a fevereiro. O índice pluviométrico anual é superior a 1 700 milímetros, concentrados entre os meses de março e julho. (INMET)

As maiores temperaturas acontecem entre janeiro e abril, com temperatura máxima média diária acima de 30 °C e as mais frias vão de junho a setembro, com temperatura máxima diária em média abaixo de 29 °C. Em algumas ocasiões pode ser registrada a formação de nevoeiro e, ainda mais raras, chegada de frentes fria. Os ventos mais fortes tendem a ocorrer entre os meses de agosto e outubro, onde uma das rajadas mais fortes aconteceu em 18 de setembro de 2010, a velocidade do vento atingiu 70 km/h. (INMET)

1.4.4.6. Recife

A cidade de Recife tem um clima classificado como tropical úmido, típico do litoral leste nordestino, com baixas amplitudes térmicas e precipitações abundantes ao longo do ano. A temperatura média compensada anual é de aproximadamente 26 °C, podendo chegar a 30 °C no verão. De acordo com pesquisas da Universidade Federal de Pernambuco devido ao grande número de arranha-céus no Recife, a formação de ilhas de calor é algo comum e contribui para uma diferença de temperatura entre diferentes regiões da cidade.

O índice pluviométrico é superior a 2 000 milímetros (mm) anuais, concentrados entre abril e julho. A formação de nevoeiros é mais comum nos meses mais úmidos e embora sejam raras, chegadas de frentes frias e ventanias também podem acontecer na região. (INMET)

1.4.4.7. Salvador

Salvador é uma cidade com o clima de floresta tropical, uma temperatura média anual por volta dos 25 °C e precipitações abundantes durante o ano todo, sem possuir uma estação seca bem caracterizada. As temperaturas são relativamente constantes ao longo do ano, com condições de clima quentes e úmidas, podendo ficar abaixo dos 20 °C durante o inverno e a 30 °C no verão. O índice pluviométrico anual é superior a 1 800 milímetros, concentrados entre os meses de abril e julho. (INMET)

A velocidade horária média do vento em Salvador passa por variações sazonais pequenas ao longo do ano. O período com ventos mais fortes no ano dura de maio a dezembro, com velocidades médias do vento acima de 13,8 km/h. nos demais meses a velocidade do vento permanece em torno de 12,8 km/h. (INMET)

1.4.4.8. São Luís

O clima de São Luís é considerado tropical, quente e úmido. A temperatura mínima permanece na maior parte do ano entre 22 e 24 °C e a máxima entre 30 e 34 °C. Apresenta um período chuvoso que vai de dezembro a julho e um seco de agosto a novembro. A média pluviométrica é de 2200 mm por ano, com maior concentração nos meses entre fevereiro e maio. Nos meses de fevereiro a maio, a zona de convergência intertropical fica mais ativa no município e por isso os dias desses meses são marcados por poucos ou nenhum período de sol, fortes temporais, temperaturas amenas e algumas vezes ocorrência de neblina pela manhã, caracterizando o período chuvoso. (INMET)

O período de estiagem corresponde aos meses de agosto a novembro. Neste período os dias são ensolarados e com temperaturas elevadas, as chuvas diminuem drasticamente e os ventos vão se tornando mais fortes chegando a 50 km/h, principalmente entre os meses de setembro e outubro. (INMET)

1.4.4.9. Teresina

Teresina possui clima tropical semiúmido com duas estações características: o período chuvoso que ocorrem no verão e outono e o período seco que ocorre no inverno e primavera. Nos meses entre janeiro e maio, devido às chuvas, o clima é quente e úmido, de junho a agosto o clima começa a ficar mais seco com noites relativamente frias e nos meses de setembro a dezembro o clima se torna mais quente e abafado, podendo ocorrer algumas pancadas de chuva a partir de novembro. (INMET)

As chuvas da cidade no geral são rápidas e muito intensas, podendo ocorrer vendavais e descargas elétricas. A precipitação pluviométrica anual situa-se em torno de 1.300 mm. A cidade possui uma temperatura média em torno dos 27 °C, com mínimas de 22 °C e máximas de 40 °C. Estas oscilações são amenizadas pela ocorrência dos ventos que tornam o clima mais agradável. (INMET)

1.5. Modelo Climático RegCM

Pesquisadores têm avaliado a performance do *Regional Climate Model* (RegCM) do *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). Van et al. (2014) pesquisaram a eficácia do RegCM4.2 aninhado com o CFSv2 em prever sazonalmente a temperatura do ar no Vietnã. As variáveis analisadas foram temperatura máxima, mínima e média do ar a 2 metros, para o período de janeiro de 2012 a novembro 2013. As previsões foram feitas quatro vezes por mês

a partir do mês atual até os próximos seis meses e com estes dados foram realizados os ensembles. Os resultados mostraram que o RegCM tinha pouca habilidade em todo o Vietnã, isto sem correção do BIAS. Após a correção do BIAS, as previsões mostraram uma melhora, ainda que limitadas, no modo operacional. Portanto, estudos mais detalhados são necessários para melhorar as habilidades de previsão sazonal dinâmica para o Vietnã.

Machado e da Rocha (2011) avaliaram o desempenho do RegCM3 aninhado ao modelo global CPTEC/COLA, entre maio de 2005 e julho de 2007, sobre o Brasil. Quando comparadas ao observado, as previsões do CPTEC/COLA superestimaram a chuva trimestral e defasaram o pico da estação chuvosa no nordeste do Brasil, enquanto que o modelo RegCM3 obteve melhor a precipitação e uma melhor destreza em prever a evolução temporal da temperatura da região. No sudeste do Brasil, o CPTEC/COLA mostra previsões melhores para a temperatura do ar, enquanto que o RegCM3 faz uma boa simulação para a precipitação. Na região Sul, o RegCM3 demonstra que as suas previsões de precipitação e temperatura do ar são melhores que as do CPTEC/COLA. De acordo com os autores, em geral, as previsões de precipitação e temperatura do RegCM3 são mais próximas dos observados. O RegCM3 também foi capaz de corrigir alguns erros sistemáticos do CPTEC/COLA, fazendo que seja possível o seu uso na previsão sazonal.

Reboita et al. (2014) utilizaram o RegCM4.3 para simular o clima da América do Sul, através de sete simulações para o período de 1990 a 2000. Considerando toda a América do Sul, os resultados obtidos mostram que a precipitação é melhor simulada com o esquema de superfície BATS (esquema de transferência biosfera-atmosfera), com as parametrizações de cúmulos Grell sobre o continente e Emanuel sobre o oceano, enquanto que na temperatura do ar, os melhores resultados foram obtidos utilizando o esquema de cúmulos de Emanuel em conjunto com o esquema de superfície e *Community Land Model* (CLM).

Da Rocha, Reboita e Cuadra (2012) simularam a precipitação sobre a América do Sul utilizando o RegCM4 aninhado a reanálise ERA-Interim no período de 1989-1997 para saber a precisão do modelo em simular os períodos secos e úmidos. Foi testada a parametrização convectiva que combina os esquemas convectivos de Grell sobre o continente e Emanuel sobre o Oceano. A simulação foi avaliada com a análise diária da precipitação do *Climate Prediction Center* (CPC) em três subdomínios da América do Sul: Amazônia, Bacia do Prata e Nordeste do Brasil. A fase e a intensidade do ciclo anual de precipitação sobre a Amazônia e na Bacia do Prata condizem com a análise CPC, enquanto que no Nordeste o modelo reproduz a fase do ciclo anual de precipitação, mas superestima durante a estação chuvosa. Sobre a Amazônia e

na Bacia do Prata há semelhança entre o CPC e a simulação na caracterização de eventos úmidos, porém sobre o Nordeste brasileiro o modelo superestima os eventos úmidos.

Gonçalves (2015) utilizou o modelo global CFSv2 como condição de contorno no RegCM4 para avaliar a previsão climática sazonal de precipitação no estado do Rio Grande do Sul, no período de agosto de 2013 a agosto de 2014 e adotou nove diferentes combinações de parametrizações de cúmulos. Foram realizadas 34 simulações de 5 meses de duração para cada uma das combinações de parametrizações e realizado um ensemble temporal para cada parametrização. Os dois primeiros meses de cada previsão foram considerados como período de spin-up sendo descartados do estudo. As análises mostraram que o RegCM4 apresentou correlações maiores e erros menores da precipitação em comparação com o modelo global CFSv2. O RegCM4 teve um bom desempenho em reduzir as superestimativas de precipitação produzidas na previsão do CFSv2 e melhorar a distribuição temporal da variável. O erro sistemático do modelo ficou acima de 60% em todas as parametrizações, e se apresentou mais seco, sugerindo, a necessidade de uma melhor calibração nas parametrizações. Reboita et al. (2014) confirmam que o RegCM4 obteve viés seco sobre o Rio Grande do Sul.

1.6. Modelo climático WRF

O modelo WRF foi desenvolvido em 1990 através da união de diversos centros de pesquisa, laboratório. Entre eles estão os conhecidos *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA) e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), que é operado pela *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR). Foi desenvolvido para aplicação em pesquisas e realizar previsões numéricas do tempo (PNT).

O sistema WRF permite dois núcleos dinâmicos, o *Advanced Research WRF* (ARW) e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), que se diferenciam na formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico usadas, ao modo como são dispostas as variáveis na malha e ao método de integração temporal. O modelo também tem diferentes módulos: real, idealizado (WRF-LES), químico (WRF-Chem), para pesquisa de furacões, clima e para acoplamento de outros modelos (CARVALHO, 2009).

Vários esquemas de parametrização foram desenvolvidos para diferentes microfísicas, alguns continuam em processo de aprimoramento e adaptação aos modelos. Cada esquema tem sua adequação de acordo com as particularidades da região e do caso a serem estudados, por isto muitos trabalhos têm sido realizados para testar a melhor escolha para o tipo de estudo que

se pretende realizar. Alguns destes estudos mais recentes, realizados para o WRF, são os trabalhos de Jankov et al. (2005), Ferreira (2009), Carvalho et al. (2012), entre outros.

Em relação ao tempo de spin-up do modelo, Henderson et al. (2007), Pai Mazumder e Mölders (2009), Aligo et al. (2009) e Mendes (2011), utilizaram as primeiras seis horas simuladas como sendo o tempo de ajuste do modelo. Nos dois primeiros trabalhos, foram usadas 30 horas para cada dia a ser simulado, começando seis horas antes para descartá-las. Mendes (2011) integrou 54 horas, descartando as 6 primeiras horas para analisar os 2 dias completos restantes. Já Pellegrini et al. (2008), Jury et al. (2009) e Carvalho et al. (2012) utilizaram, respectivamente, 24, 18 e 12 horas como tempo de spin-up.

Para avaliar a efetividade dos modelos numéricos existem inúmeros trabalhos. Para avaliar o modelo WRF, Prabha e Hoogenboom (2008) usaram erro médio (BIAS), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância de Willmott, coeficiente de correlação e índice de acurácia do modelo. Carvalho et al. (2012) usaram desvio padrão, viés e RMSE. Segundo Henderson et al. (2007), o viés quantifica os erros sistemáticos da distorção devido a parâmetros do modelo, deficiências, parametrizações e aproximações numéricas. O REQM avalia a performance global e invalida erros negativos e positivos, cancelando um com o outro, sendo muito sensível aos extremos incorretos. Por outro lado, Emery et al. (2001) dizem que o índice de Willmott condensa em uma única quantidade estatística todas as diferenças entre estimativas do modelo e observações dentro de uma dada região de análise e para um dado período de tempo.

MATERIAL E MÉTODOS

1.7. Área de estudo

A região Nordeste do Brasil está situada entre os paralelos de 07° 12' 35" de latitude sul e 48° 20' 07" de latitude sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24", a oeste do meridiano de Greenwich. Engloba os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, possuindo uma área de 1.554.291,744 km², equivalente a 18% do território nacional, é a região que possui a maior costa litorânea do Brasil com 3338 km de praias. (IBGE, 2015)

Figura 1 – Mapa do Nordeste brasileiro



Fonte: FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. "A Região Nordeste"; Brasil Escola.

1.8. Aquisição dos dados observados

Os dados utilizados para comparação e validação do modelo, foram adquiridos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) vinculado ao site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizados os dados das estações automáticas situadas nas capitais de todos os estados da região nordeste do Brasil no período de março de 2017 a março de 2018, somando o período de um ano de dados horários. Porém esses dados apresentam algumas inconsistências em algumas datas ou campos.

1.9. Modelos Utilizados e suas Configuração

Para efeito de comparação estatística, as rodadas de ambos os modelos foram configuradas de 3 diferentes formas, duas utilizando os cenários climáticos e uma sem a utilização de cenários, as com cenários climáticos utilizados para as simulações foram o RCP 8.5, que possui uma maior concentração e liberação dos gases de efeito estufa e aumento da radiação em $8,5 \text{ W/m}^2$ durante todo século XXI, e o RCP 4.5, onde também há ocorrências desses gases em menor escala que o RCP 8.5 e aumento da radiação em $4,5 \text{ W/m}^2$ decrescendo próximo ao ano de 2100.

1.9.1. Modelo RegCM 4.7

Para a realização das simulações e previsões climáticas, foi utilizado o modelo RegCM, originalmente desenvolvido no NCAR, é mantido na seção Física do Sistema Terra (ESP) do

ICTP. A primeira versão do modelo, RegCM1, foi desenvolvida em 1989, sofreu grandes atualizações em 1993 (RegCM2), 1999 (RegCM2.5), 2006 (RegCM3) e 2010 (RegCM4). A versão mais recente do modelo, RegCM4, agora é totalmente suportada pelo ESP, enquanto as versões anteriores não estão mais disponíveis. Esta versão inclui atualizações importantes na estrutura do código e seus pré e pós-processadores, juntamente com a inclusão de algumas novas parametrizações físicas. Pode ser aplicado a qualquer região do mundo, com espaçamento de grade de até 10 km (limite hidrostático) e para uma ampla gama de estudos, desde estudos de processo até paleoclimático e simulação climática futura. As melhorias de modelos atualmente em andamento incluem o desenvolvimento de um novo esquema de nuvem microfísica, o acoplamento com um modelo oceânico regional, a inclusão de química completa em fase gasosa, as atualizações de alguns esquemas de física (convecção, PBL, microfísica em nuvem) e desenvolvimento de um núcleo dinâmico não hidrostático. ESP também apoia a Rede Regional de Pesquisa Climática, ou RegCNET. O objetivo do RegCNET é expandir e fortalecer a rede de usuários modelo e desenvolver projetos de pesquisa colaborativa em toda a rede para melhorar a compreensão das mudanças climáticas na escala regional. O RegCNET também fornece um fórum para usuários de modelos atuais e futuros para discutir questões relevantes, trocar experiências de pesquisa e formular necessidades e prioridades para o desenvolvimento e disseminação de modelos adicionais.

Para que o modelo possa produzir simulações são necessários alguns detalhes antes das rodadas, isto é, o modelo precisa ser configurado. Primeiramente é necessário definir a base de dados do modelo, que por meio de um script foi adquirida no domínio “<http://climadods.ictp.it/regcm4>” neste caminho são encontradas as informações básicas de DOMAIN, que possui as informações de superfície, como topografia, tipo e textura do solo, além de conter os dados globais da atmosfera e oceanográficos para construir as condições iniciais e de contorno (Initial Conditions Boundary Conditions – ICBC), os dados de Modelo de Terras Comunitárias (Community Land Model – CLM), informações sobre a temperatura de superfície do mar (sea surface temperature – SST) e os dados de atmosfera e superfície globais de referência, no caso desse estudo o ano de referência utilizado foi o de 2017 por motivo de ter informações mais recentes.

1.9.1.1. Configuração da lista de opções do modelo (Namelist)

Além dos dados iniciais o modelo precisa de uma linha de comando onde são especificadas algumas diretrizes, isto é feito através de um namelist, nele estão contidas as

informações que o modelo precisa fazer em uma simulação, tais como a dimensão e o número de pontos de grade e os parâmetros: geográficos, de terreno, de contorno, globais, de recomeço, de tempo, de saída, os físicos, de umidade, de convecção e os de CLM.

Vale salientar que o arquivo namelist pode ser adquirido, previamente, totalmente pronto para uso e com mais opções de detalhes e parâmetros, cabe ao autor do estudo modificá-lo para melhor se adequar a sua pesquisa. Nesse estudo os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente neste mesmo tópico.

1.9.1.2. Definindo os parâmetros do Namelist

O primeiro parâmetro a ser definido e modificado foi a delimitação da área a ser estudada, foram escolhidos 60 pontos no eixo y, direção Norte – Sul, 50 pontos no eixo x, Leste – Oeste, 18 níveis verticais com resolução de 20 km, tendo o ponto central latitude -9.74° S e longitude -36.56° O, isso delimitou a área de estudo como sendo o Nordeste brasileiro. O esquema de tempo do modelo foi modificado para ter um tempo interno de 60 segundos, a radiação com 30 minutos, tempo de absorção e emissão a cada 18 horas e superfície com 600 segundos. Os dados de saída do modelo foram modificados para que apresentassem um intervalo de seis horas, exceto os dados de superfície e umidade que ficaram ambos a cada três horas. Para os parâmetros físicos a única modificação foi nos cenários a serem adotados para as rodadas iniciais o cenário utilizado foi o A1B descrito no relatório do IPCC. No demais os outros parâmetros utilizados estão de acordo com o descrito no manual de instruções do RegCM, escrito por Giorgi (2016).

1.9.2. Modelo WRF

As previsões climáticas realizadas para o presente estudo, foram obtidas com base na saída do modelo climático NCAR versão 1 - CESM1 (Community Earth System Model) que participa da 5o. fase do CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Experiment), com suporte do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR5). Esta base de dados possuem as variáveis necessárias para a inicialização e condição de borda para simulações com o modelo atmosférico e de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting). Os dados são interpolados em 26 níveis de pressão e são disponibilizados com intervalos de frequência de 6 horas. As variáveis têm seus valores corrigidos usando ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanálise do Interim (ERA-Interim) para o período de 1981-2005, seguindo a metodologia proposta por Bruyere et al. (2014). Os três cenários futuros que

representam variações no aumento da poluição atmosférica, RCP (Representative Concentration Pathway) são os RCP2.5, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, sendo cenários com projeções de concentrações de poluentes de menos a mais pessimista respectivamente. Estes dados estão disponíveis entre o período de 2006-2100.

Portanto o objetivo foi utilizar a saída do modelo global do NCAR (CESM1_CMIP5) como inicialização e condição de borda para realizar simulações climáticas com o modelo WRF, vale destacar ainda que foram feitas rodadas mensais com saídas diárias e “*spin up*” de 3 dias. O modelo foi configurado da seguinte forma:

- Coordenadas do centro do domínio:
 - LAT: -9,805°
 - LON: -36,619°
- Período da rodada: 01/01/2017 - 31/12/2020
- Resolução do modelo: 20km
- N° de Pontos em X e em Y: pontos em x (141) e pontos em y (131).
- Níveis Verticais: 29 níveis verticais e topo do modelo em 50mb.

1.10. Validação das simulações do modelo

Os modelos atmosféricos computacionais precisam de alguns ajustes para que possam demonstrar uma melhor visão do que ocorre na atmosfera e para que sejam o mais preciso possíveis são feitas comparações com dados reais adquiridos através de estações convencionais e automáticas. A validação do modelo é feita comparando os dados coletados por estações e os dados obtidos através das rodadas produzidas pelo modelo, mediante a comparação são feitos ajustes no modelo para que ele reproduzir a atmosfera com melhor precisão.

Para a validação do modelo empregado neste trabalho foram utilizados dados horários das estações automáticas do INMET situadas nas nove capitais do Nordeste, foram coletados e utilizados dados de intensidade do vento, precipitação pluviométrica, pressão atmosférica e temperatura. Foram usados dois períodos para a comparação dos dados onde ambos tinham início no dia 21 de março de 2017, porém o primeiro finalizava em 31 de dezembro de 2017 e o segundo terminava em 4 de fevereiro de 2019, isto se deu em razão dos cenários e o tempo utilizado em suas rodadas, nas rodadas que não utilizavam cenários climáticos o tempo delas compreendia somente o ano de 2017, já nas que eram adicionadas os cenários de RCP 4.5 e 8.5 o período das rodadas tinha início no ano de 2017 e faziam projeções futuras para até 2020, como descrito na tabela 1.

Tabela 1 - datas de início e termino das rodadas

	Dados Observados	Sem Cenário	Cenário RCP 8.5	Cenário RCP 4.5
Início das rodadas	21/03/2017	01/01/2017	01/01/2017	01/01/2017
Final das Rodadas	04/02/2019	31/12/2017	31/12/2020	31/12/2020

1.10.1. Análise estatística

Para dar maior respaldo aos dados foi feita a análise estatística dos dados usando a Correlação, o VIÉS (BIAS em inglês) e do Erro Médio Quadrado (em inglês MSE). A Bias é a diferença entre o valor predito pelo modelo e o valor real observado, sendo assim o valor da Bias serve para medir a tendência do modelo em subestimar ou superestimar o dado previsto em relação ao dado observado. O cálculo da BIAS pode ser visto na equação (1), onde d (equação (2)) é descrito como a diferença entre o valor previsto ou simulado (P_s) e o observado (P_o), levando em consideração que um $d_i = 0$ indicaria uma simulação perfeita e $d_i \gg 0$ ou $d_i \ll 0$ uma simulação imperfeita, e o valor de N (equação (3)) o número de amostras.

$$BIAS = \bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (1)$$

$$d_i = P_{is} - P_{io} \quad (2)$$

$$N = n_x \times n_y \quad (3)$$

Porém, somente o cálculo da Bias não valida totalmente os dados, pois ele não dá informações acerca dos erros individuais, ou seja, não demonstra a precisão do modelo, apesar de ser possível ter uma ideia da tendência ele falha no fato de que erros individuais negativos e positivos com a mesma magnitude se anulam, isso leva a superestimação ou subestimação do modelo. O MSE serve para contornar esse problema, pois ele não é afetado por esses pontos anômalos extremos, podendo assim verificar a acurácia do modelo (Wilks, 2006). O MSE, descrito na equação (4), é definido como sendo a média da diferença entre o valor estimado

pelo modelo e do observado elevada ao quadrado, onde quando $MSE = 0$ indica uma simulação perfeita.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{is} - P_{io})^2 \quad (4)$$

Em conjunto com o MSE, está a Raiz do Erro Médio Quadrado (RMSE em inglês) que é utilizado para expressar a precisão dos resultados numéricos do modelo, com a vantagem que esse cálculo mostra os valores dos erros na mesma dimensão da variável observada, o cálculo do RMSE é descrito na equação (5) abaixo:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{is} - P_{io})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Para melhor compreensão dos dados estatísticos foi definido uma faixa de valores que indicam o nível de aceitação das estatísticas, segundo a opinião do autor. Também foi aplicado nas tabelas o uso das cores verde e vermelha para indicar, respectivamente, o melhor e o pior valor estatístico da simulação.

Tabela 2 - categorização dos dados estatísticos.

	Correlação	BIAS	MSE	RMSE
Péssimo	0	>2	>2	>2
Ruim	-0,3 < ou > 0,3	1 < BIAS ≤ 2	1 < MSE ≤ 2	1 < RMSE ≤ 2
Aceitável	-0,5 < ou > 0,5	0,5 < BIAS ≤ 1	0,5 < MSE ≤ 1	0,5 < RMSE ≤ 1
Bom	-1 < ou > 1	0 < BIAS ≤ 0,5	0 < MSE ≤ 0,5	0 < RMSE ≤ 0,5
Perfeito	-1 ou 1	0	0	0

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como citado foram utilizados para a análise os dados observados de precipitação, pressão, temperatura e velocidade do vento das 9 (nove) capitais do Nordeste brasileiro sendo essas variáveis coletadas a nível de superfície. Nos gráficos e tabelas a seguir estarão dispostos a comparação entres os modelos WRF e RegCM, sem e com a utilização dos cenários climáticos, com os dados coletados das estações automáticas.

Vale ressaltar que os dados tanto das estações quanto dos modelos têm início no dia 21 de março de 2017, porém os dados observados vão até 04 de fevereiro de 2019 e os dados simulados com os modelos sem considerar os cenários climáticos finalizam em 31 de dezembro de 2017. Em contrapartida as simulações considerando os cenários climáticos fazem projeções até o dia 31 de dezembro de 2020. Para a análise estatística foram somente plotados o período comum entre todos os casos, ou seja, de 21 de março a 31 de dezembro de 2017.

1.11. Simulações Realizadas com os Modelos Climáticos

Durante as análises da variável de precipitação foi visto que os dois modelos nas 3 diferentes simulações não obtiveram resultados satisfatórios quando comparados com os dados das estações meteorológicas do INMET, falhando em representar a variação diária e o padrão sazonal da variável.

Em termos de comparação entre os modelos, notou-se que as simulações sem o uso dos cenários climáticos, utilizando o modelo RegCM apresentou para a maioria das cidades, melhores resultados na correlação, MSE e RMSE. Enquanto isso para as rodadas utilizando os cenários, RCP's 4.5 e 8.5, em linhas gerais os modelos obtiveram valores aproximados e com pouca diferença entre as cidades. Dentre as 3 configurações utilizadas nas simulações, para os dois modelos, a melhor simulação para a precipitação foi realizada com o modelo WRF, em especial destaca-se a cidade de Fortaleza quando utilizado o cenário RCP 8.5. (Ver Tabela 3 e Tabela 8).

Na análise da pressão atmosférica, diferente da precipitação, os modelos demonstraram uma melhor representação desta variável. Sendo notório para a referida variável, poucas variações estatísticas na comparação dos modelos RegCM e WRF, e novamente sendo melhor representado pelo modelo WRF, onde desta vez as simulações sem a utilização de cenários climáticos foram as melhores (ver Tabela 4 e Tabela 9).

Já para a variável temperatura do ar, foi possível notar que os modelos obtiveram resultados aceitáveis, onde para as simulações sem o uso de cenários e para o cenário RCP 8.5 o modelo RegCM apresentou melhores valores de correlação em relação ao modelo WRF, porém para os demais cálculos estatísticos, o WRF mostrou valores mais próximos de uma simulação ideal, ou seja, enquanto o modelo RegCM possui uma melhor representação da sazonalidade da variável (melhor coeficiente de correlação: RegCM 0,836 e WRF 0,827), o modelo WRF obteve valores mais próximos do observado (melhor RMSE: WRF 0,903 e RegCM 1,038). A respeito da simulação com melhor desempenho, a cidade de Aracaju

utilizando o cenário 4.5 do modelo WRF foi a que mais se aproximou do real (ver Tabela 5 e Tabela 10).

Ainda sobre os gráficos da temperatura do ar é possível ver a influência da localização geográfica e dos sistemas atuantes da região, um bom exemplo para tal afirmação é comparar as amplitudes térmicas e temperatura média das cidades de São Luís (região norte do Nordeste), que sofre influência da ZCIT, Recife (região leste do Nordeste), que sofre influência das POAS (Perturbações Ondulatórias dos Alísios) e VCAN's e Salvador (região sul do Nordeste), com ocasionais ações de Frentes Frias. (MOLION, 2002)

Durante as análises do vento, foram utilizadas duas vertentes para as validações dos modelos. Primeiro as simulações foram confrontadas com os valores observados da velocidade do vento (média horária) e depois esta variável foi substituída pela rajada de vento (máximo horário). Pois durante as análises do modelo RegCM, notou-se que os resultados do modelo possuíam maior similaridade com as rajadas de vento. Nas comparações utilizando a velocidade do vento foi visto que em nenhum dos modelos a frequência e a variação anual da variável foi bem representada. Contudo, o modelo WRF foi o que obteve os valores mais próximos dos dados observados e obteve a melhor simulação ocorrida para o município de Maceió utilizando o RCP 8.5 (ver Tabela 6 e Tabela 11).

Após a substituição da velocidade pela rajada de vento notou-se melhorias na representatividade de ambos os modelos, onde os mesmos demonstraram padrões próximos aos dados observados, sendo o modelo RegCM o que mostrou maior semelhança e inclusive demonstrou as melhores simulações, ambas sem a utilização dos cenários climáticos para as cidades de Fortaleza e Salvador (ver Tabela 7 e Tabela 12).

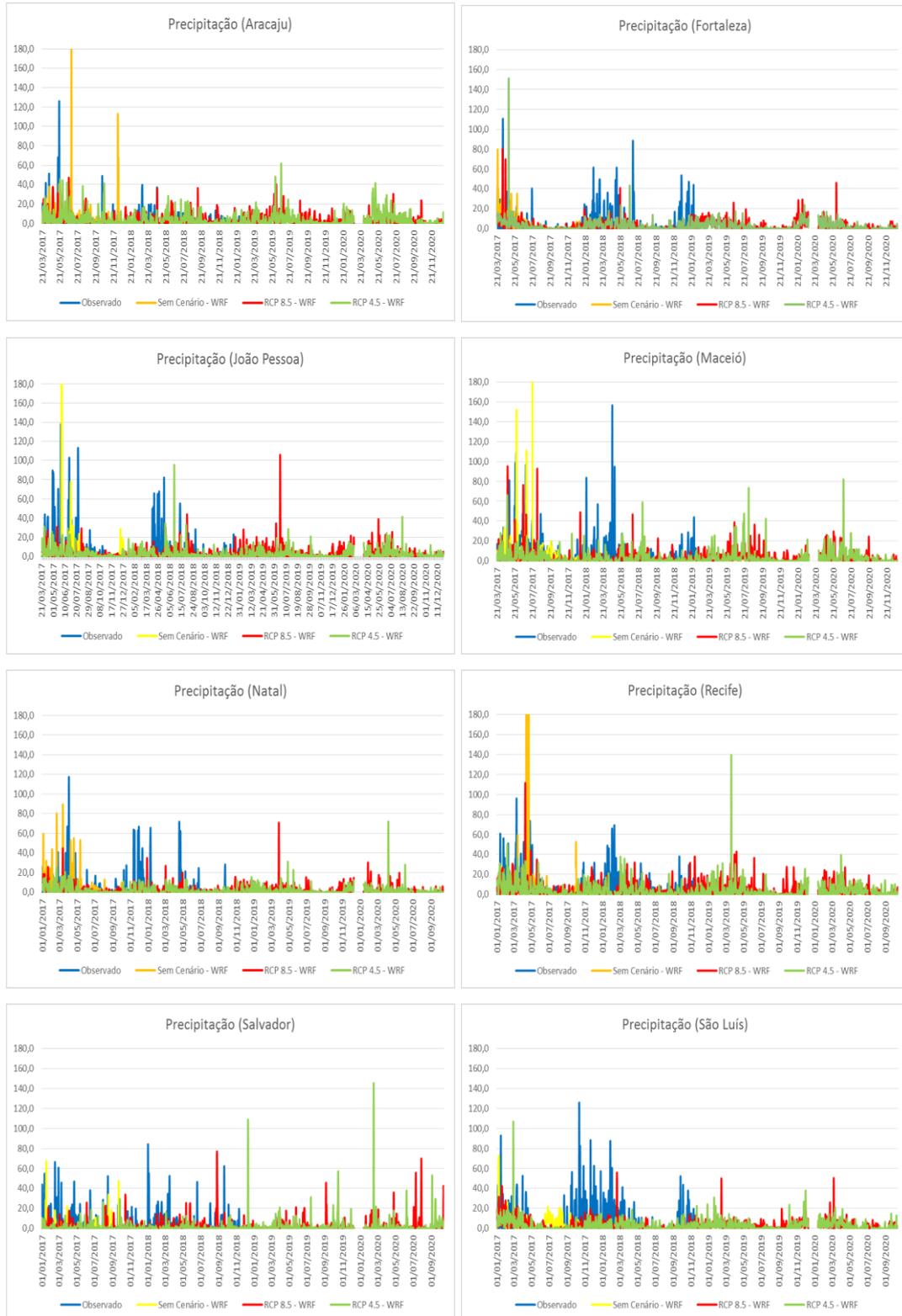
1.11.1. Modelo WRF

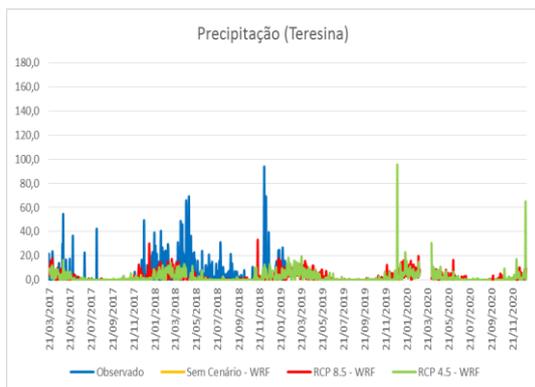
1.11.1.1. Precipitação

Na Figura 2, pode-se notar que na maioria das cidades nos períodos em que houve a ocorrência de precipitação, o modelo também reagiu e simulou a presença de chuva, entretanto não na mesma intensidade os dados reais, também é possível notar alguns casos onde a precipitação foi mais intensa nos dados observados e os modelos registrou valores semelhantes, porém em períodos diferentes. Notou-se ainda na análise gráfica que nas cidades de Aracaju, João Pessoa, Maceió e Recife, ocorreu um erro na simulação sem cenário climático o para o mesmo período, em meados do mês de junho/2017, pois erradamente o modelo registrou precipitação com intensidade acima de 400 mm/dia, fato este que demonstra que o modelo foi

sensível a ocorrência da chuva, porém errando fortemente na intensidade, para trabalhos futuros este seria um importante mês para análises.

Figura 2 - Precipitação das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.





Com o auxílio da Tabela 3, pode-se notar que praticamente todas as cidades apresentaram resultados estatísticos abaixo de serem considerados simulações aceitáveis, para simulações realizadas com o modelo WRF.

Os resultados de coeficiente de correlação, somente a cidade de Fortaleza no cenário RCP 8.5 obteve uma resposta aceitável, indicando que o modelo representou, de forma aceitável a ruim, a variação anual naquela região, nas demais cidades e configurações o modelo não demonstrou bons resultados.

No cálculo de BIAS os resultados do modelo também não foram os melhores em termo de indicadores estatísticos, apresentado altos valores, sejam negativos ou positivos, indicam uma subestimação ou superestimação por parte do modelo. É visto ainda que nas simulações dos cenários os valores de BIAS foram negativos indicando uma subestimação do modelo em relação ao observado, com exceção das cidades de Aracaju, Fortaleza e São Luís, as duas últimas somente no RCP 4.5. Notou-se também que as simulações que utilizaram os cenários climáticos tiveram resultados melhores que a simulação sem cenário, com ressalva das cidades de João Pessoa, Maceió e Salvador.

Já para as análises estatísticas feitas para o MSE e RMSE, foram observados os valores mais distantes do observado (demonstrado maior variabilidade dos dados), o que significa dizer que os valores obtidos através das simulações não se aproximaram dos dados observados, destaque para as cidades de João Pessoa e Recife ambas na simulação sem o uso de cenários climáticos.

Segundo Molion e Bernardo (2002) o regime de chuva da região do Nordeste do Brasil varia de acordo com a posição geográfica, sendo elas a região norte do Nordeste sobre influência da ZCIT, litoral leste do Nordeste com influência da POA e do sistema de brisas marítimas e terrestre e a região sul do Nordeste com influência dos sistemas frontais.

Na análises dos gráficos de precipitação (Figura 2) juntamente com os gráficos de temperatura do ar (Figura 4), nota-se que nas cidades localizadas na região norte do Nordeste no verão do hemisfério sul há um maior índice pluviométrico e menores temperaturas, o que confirma a presença e influência da ZCIT no regime de chuva, visto que no período do verão do hemisfério sul a ZCIT desloca-se para o sul em relação a linha do equador. Enquanto na região sul do Nordeste o regime de chuva ocorre no período de maior atividade dos sistemas frontais, ou seja, nos meses entre novembro e fevereiro. Na região do litoral o período chuvoso compreende os meses de abril a julho, onde há uma maior ação das brisas marítimas e a maior concentração de umidade por influência das perturbações do Alísios.

Tabela 3 - Estatística da simulação do modelo WRF para a variável de precipitação. Verde - melhor valor, vermelho – pior valor estatístico.

WRF	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	-0,06	0,07	0,05	2,56	1,96	4,28	174,09	145,10	324,69	13,19	12,05	18,02
Fortaleza	0,12	0,58	0,40	0,07	-0,05	1,31	150,84	56,95	84,75	12,28	7,55	9,21
João Pessoa	0,21	0,10	0,01	-4,18	-4,36	-2,15	331,09	350,00	1068,95	18,20	18,71	32,69
Maceió	0,14	0,11	0,38	-4,33	-3,84	0,28	288,00	349,15	627,23	16,97	18,69	25,04
Natal	0,04	0,07	0,05	-0,94	-0,83	1,26	119,79	120,50	213,55	10,95	10,98	14,61
Recife	0,36	0,05	0,02	-1,03	-1,27	2,53	146,27	231,99	1243,85	12,09	15,23	35,27
Salvador	-0,02	-0,04	0,08	-3,29	-3,33	-2,56	120,00	123,11	118,23	10,95	11,10	10,87
São Luís	0,11	0,13	0,23	0,07	-0,05	1,31	150,84	56,95	84,75	12,28	7,55	9,21
Teresina	0,23	0,26	-0,04	-0,36	-0,36	5,48	41,32	41,09	283,43	6,43	6,41	16,84

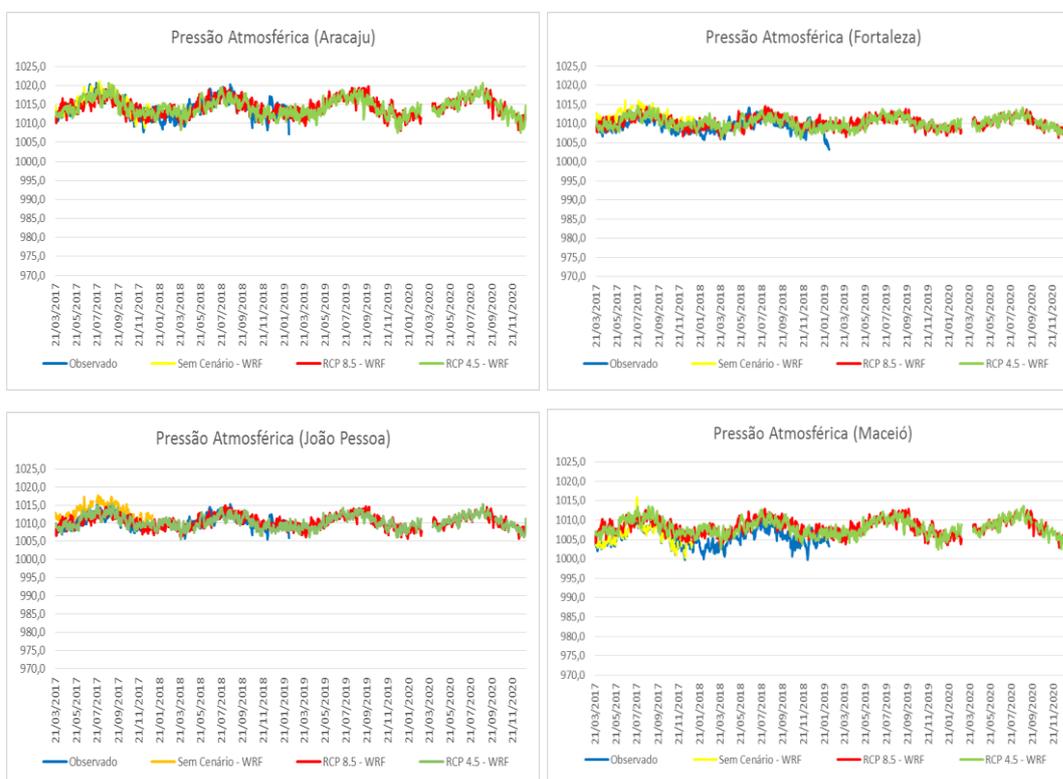
1.11.1.2. Pressão Atmosférica

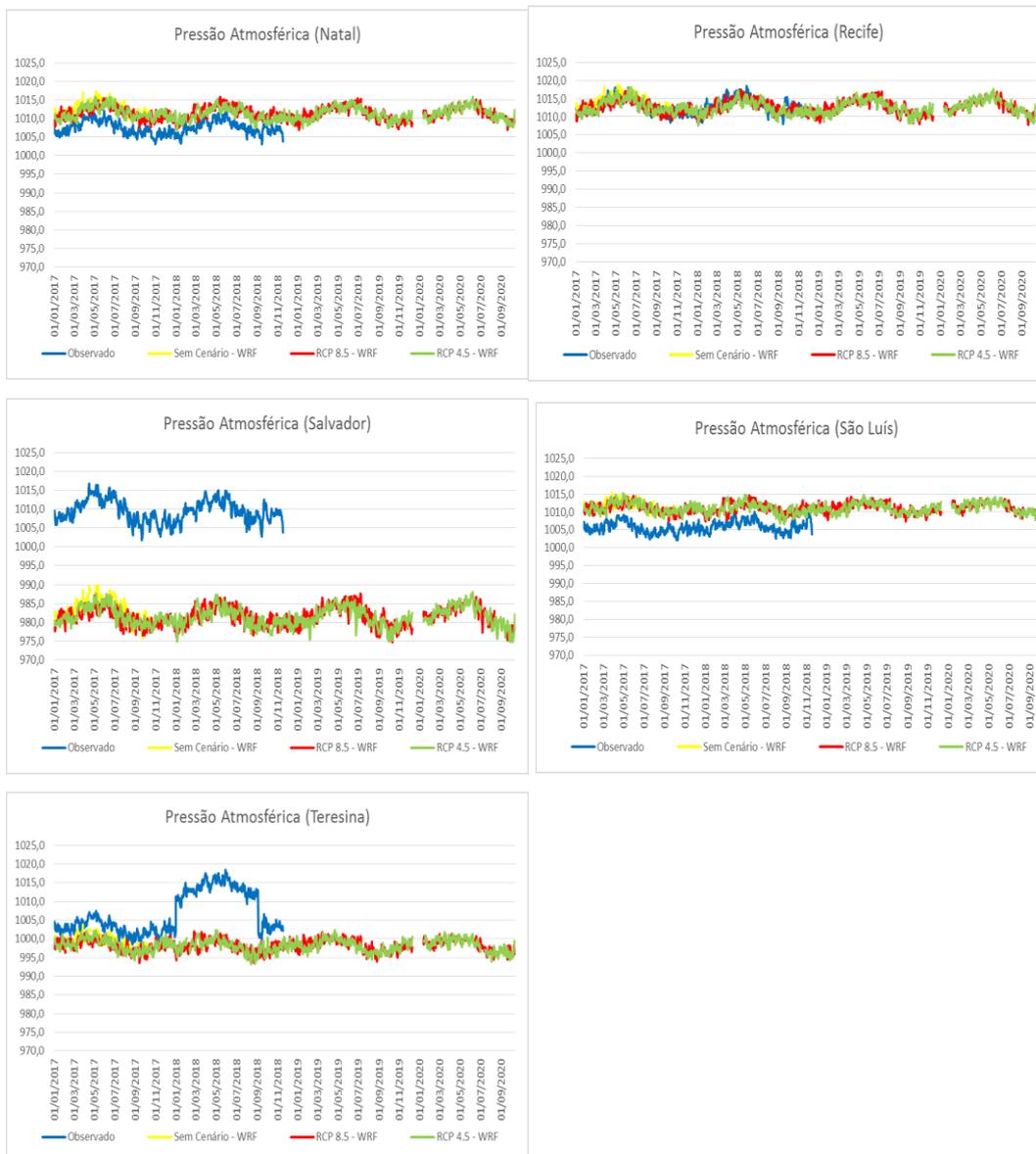
Diferente das simulações de precipitação é visto que para a pressão atmosférica as melhores simulações foram realizadas com o modelo WRF, pois os valores previstos estiveram na maioria das cidades próximo aos dados observados, destaque para as cidades de (Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Maceió, Natal e Recife).

Com base na figura 3, foi possível notar que todas as cidades seguiram os mesmos padrões de variação anual da variável, também se notou que para algumas cidades os dados simulados permaneceram na mesma intensidade dos dados observados, excluindo as cidades de Natal e São Luís em que o modelo superestimou a pressão atmosférica, enquanto que as cidades de Salvador e Teresina houve a subestimação.

Os baixos valores de pressão atmosférica para a cidade de Salvador (subestimação) podem ser explicados pela diferença na altura da superfície representada pelo modelo em comparação ao ponto de medição da estação meteorológica (dados observados). Já para a cidade de Teresina/PI além da subestimação vemos um erro nos dados observados, isto pode ter acontecido por diferentes motivos tais como calibração do equipamento, falha na obtenção dos dados, ou algum fator externo que tenha afetado as medições realizadas pelo instrumento.

Figura 3 - Pressão atmosférica das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.





Confirmando o que pode ser visto na Figura 3, as análises estatísticas para a variável apresentadas na tabela 2, mostraram que nas correlações as simulações realizadas sem cenário climático, apresentaram melhores resultados quando comparadas as simulações utilizaram os cenários, pode-se ressaltar o fato do pior resultado da simulação sem cenário ser mais elevado que o melhor resultado do RCP 8.5.

Nos cálculos de BIAS, MSE e RMSE é reafirmado aos resultados apresentados nos gráficos, onde com exceção das cidades de Natal, Salvador, São Luís e Teresina que apresentaram altos valores, as demais cidades tiveram resultados próximos aos dados medidos na estação meteorológica.

Tabela 4 - Análise estatística da simulação do modelo WRF para a pressão atmosférica próximo a superfície.

WRF	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,73	0,57	0,80	-0,09	-0,36	0,29	3,50	5,24	2,49	1,87	2,29	1,58
Fortaleza	0,65	0,54	0,89	0,88	-2,70	1,95	2,53	2,80	4,81	1,59	1,67	2,19
João Pessoa	0,70	0,57	0,79	0,20	0,21	2,24	2,00	2,43	7,42	1,41	1,56	2,72
Maceió	0,73	0,59	0,92	2,59	2,41	0,07	9,60	9,76	0,80	3,10	3,13	0,89
Natal	0,60	0,51	0,63	3,83	3,76	4,44	17,23	17,00	24,41	4,15	4,12	4,94
Recife	0,74	0,60	0,73	-0,36	-0,48	0,71	2,17	3,20	2,52	1,47	1,79	1,59
Salvador	0,74	0,53	0,94	-27,75	-28,10	-23,20	782,42	804,94	612,30	27,97	28,37	24,75
São Luís	0,44	0,39	0,66	0,88	0,81	1,95	2,53	2,85	4,81	1,59	1,69	2,19
Teresina	0,69	0,55	0,92	-4,52	-4,68	-3,25	22,64	24,93	12,46	4,76	4,99	3,53

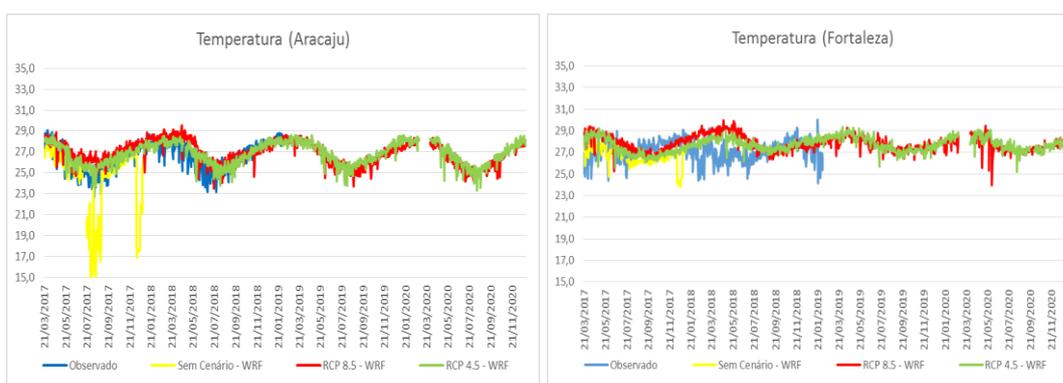
1.11.1.3. Temperatura do ar

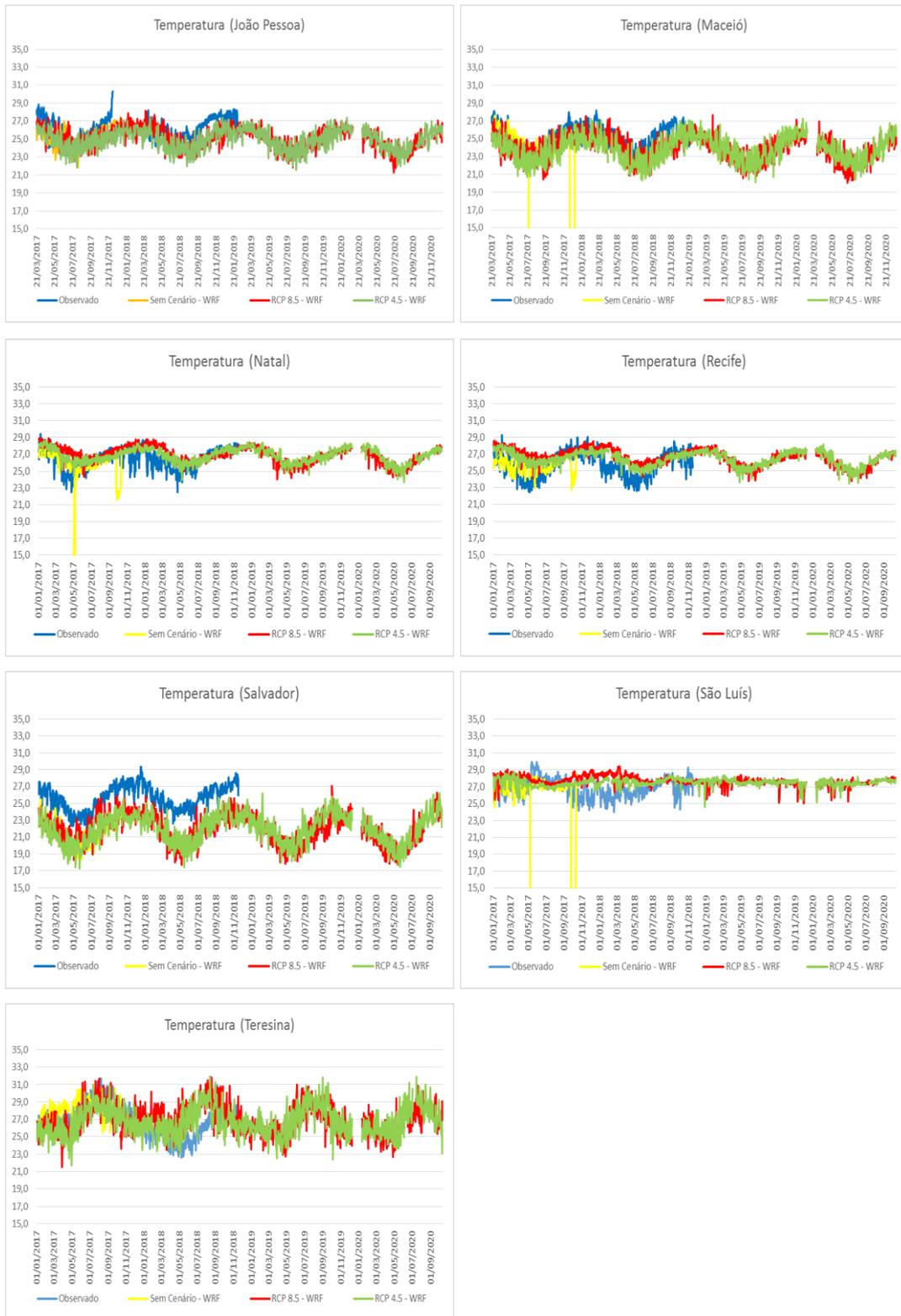
De acordo com a Figura 4, as cidades de Aracaju, Maceió, Natal e São Luís, pode-se destacar algumas falhas cometidas na simulação nos meses entre julho e agosto/2017 e dezembro de 2017, exibindo temperaturas menores do que 15 °C, valores estes muito abaixo do esperado para a região (em torno de 26 °C), foi visto que essa variação não afetou as demais variáveis sendo assim

Vale salientar também, que os municípios de Fortaleza e São Luís apresentaram uma inversão dos dados nas simulações realizadas para estas localidades, com a utilização dos cenários, em relação aos dados do observado ambas no final do ano de 2017, enquanto que nos dados observados a temperatura começa a decrescer, no modelo ela se eleva e depois diminui até o ponto onde o modelo e o observado voltam a exibir a mesma variação. Se analisamos os gráficos de precipitação dessas cidades (ver Figura 2), pode-se notar que no mesmo período da referida inversão, existe a presença de uma forte precipitação no observado que não foi prevista pelo modelo.

Seguindo na mesma linha de raciocínio, destaca-se também que em algumas cidades o modelo demonstrou um pequeno atraso na previsão, em comparação ao observado e na cidade de Salvador, houve uma subestimação dos dados.

Figura 4 – Temperatura do ar das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.





Com o auxílio da Tabela 5, pode-se notar que a cidade de Fortaleza apresentou nos três cenários climáticos as menores correlações, e ainda que as simulações realizadas para a cidade de Salvador demonstraram os piores resultados de BIAS, MSE e RMSE com exceção da simulação sem cenário.

Confirmando o que foi visto nas figuras é possível ver que Fortaleza e São Luís obtiveram uma correlação negativa com o observado, isso afirma a inversão vista nos gráficos. Também é visto que para Salvador todos os valores de BIAS foram altos e negativos, isto confirma a subestimação do modelo.

Tabela 5 - Análise estatística da simulação do modelo WRF para a temperatura atmosférica próximo a superfície

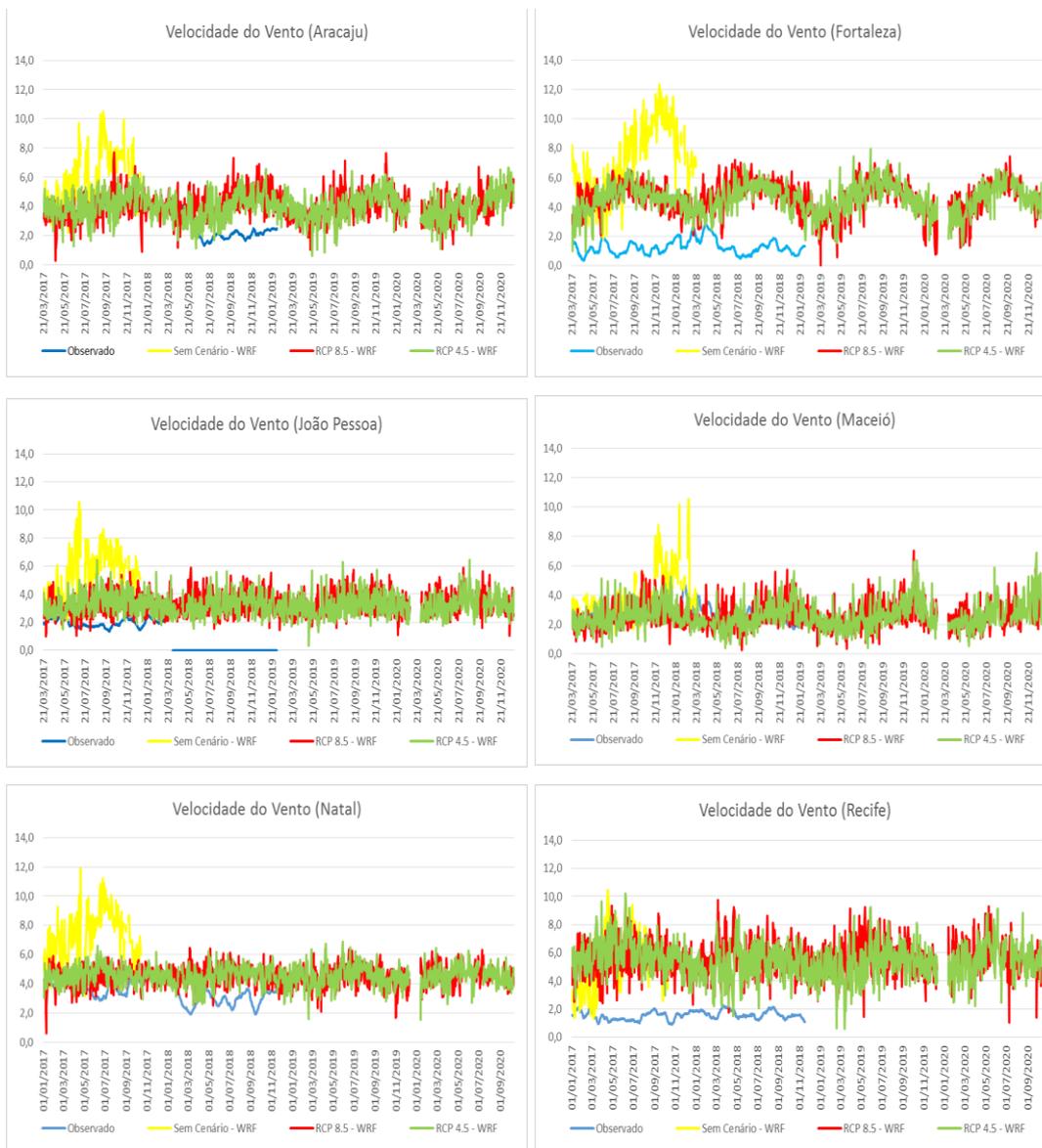
WRF	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,79	0,73	0,48	0,34	0,77	-1,61	0,82	1,50	10,54	0,90	1,23	3,25
Fortaleza	-0,11	-0,09	-0,04	0,05	0,34	-0,60	1,40	4,44	1,55	1,19	2,11	1,25
João Pessoa	0,55	0,55	0,42	-1,11	-0,78	-0,70	2,76	2,05	1,95	1,66	1,43	1,40
Maceió	0,64	0,61	0,15	-1,38	-1,01	-1,07	3,30	2,52	15,27	1,82	1,59	3,91
Natal	0,58	0,40	0,26	0,43	0,91	-0,37	1,36	2,37	3,51	1,16	1,54	1,87
Recife	0,44	0,40	0,32	1,09	1,54	0,09	2,94	4,22	1,69	1,71	2,06	1,30
Salvador	0,66	0,58	0,83	-3,70	-2,91	-3,09	15,41	10,42	11,51	3,93	3,23	3,39
São Luís	-0,36	-0,34	0,25	0,05	0,45	-0,60	1,40	1,50	1,55	1,19	1,22	1,25
Teresina	0,66	0,65	0,39	-1,41	-0,95	0,07	3,92	2,92	2,07	1,98	1,71	1,44

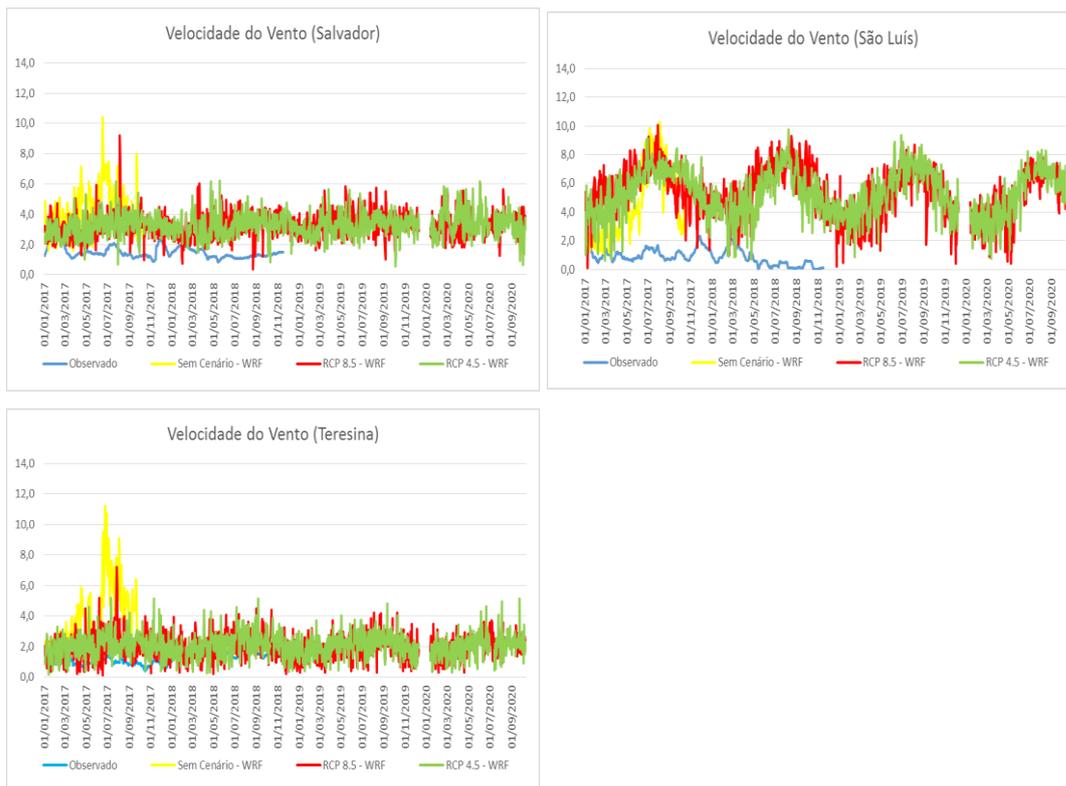
1.11.1.4. Vento

1.11.1.4.1. Velocidade do Vento

As variabilidades previstas para as cidades nordestinas são apresentadas na Figura 5, sendo possível afirmar que o modelo WRF não obteve uma boa reprodução desta variável, visto que as indicações estatísticas apresentaram os piores resultados quando comparado aos dados observados, com exceção das cidades de Maceió e Teresina, onde os dados simulados foram próximos aos dados coletados. Notou-se ainda que em quase todas as cidades o modelo produziu resultados acima do observado.

Figura 5 - Velocidade do vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.





Na análise estatística (Tabela 6) é visto que em algumas cidades o modelo obteve resultados de certo modo aceitáveis, com destaque para a cidade de Maceió que obteve os melhores resultados de BIAS, MSE e RMSE em todas as simulações. Em afirmação ao que foi visto nas figuras temos que as correlações são baixas em praticamente todas as cidades, também é possível ver que somente nas simulações com cenários para a cidade de Maceió o BIAS foi negativo, confirmando assim a superestimação do modelo. Vale ressaltar ainda que por causa de falhas existente no observado a cidade de Aracaju não possui dados de velocidade do vento para o ano de 2017.

Tabela 6 - Análise estatística da simulação do modelo WRF para a velocidade do vento próximo a superfície

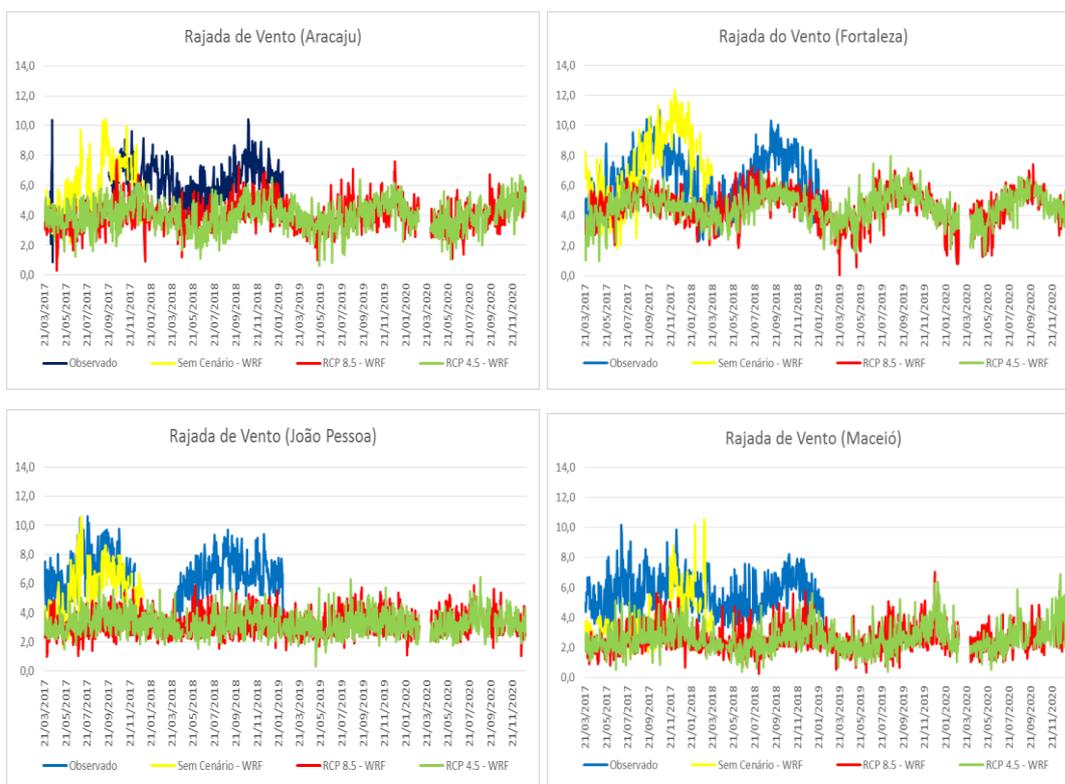
WRF	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário
Aracaju												
Fortaleza	0,02	-0,17	0,17	3,47	3,60	5,88	13,21	13,96	43,67	3,64	3,74	6,61
João Pessoa	-0,20	-0,11	-0,62	1,38	1,23	3,24	2,74	2,37	15,20	1,66	1,54	3,90
Maceió	0,25	0,42	0,53	-0,17	-0,26	1,22	0,77	0,65	3,77	0,88	0,80	1,94
Natal	-0,29	0,03	-0,46	0,89	0,77	3,31	1,54	1,24	15,42	1,24	1,11	3,93
Recife	-0,41	0,01	-0,50	4,46	4,16	3,40	21,94	19,08	17,41	4,68	4,37	4,17
Salvador	-0,20	-0,06	-0,16	1,47	1,58	2,24	3,09	3,45	7,91	1,76	1,86	2,81
São Luís	0,23	0,05	0,34	3,47	3,60	5,88	13,21	13,96	43,67	3,64	3,74	6,61
Teresina	0,03	0,04	0,23	1,06	1,07	2,49	1,71	1,99	11,01	1,31	1,41	3,32

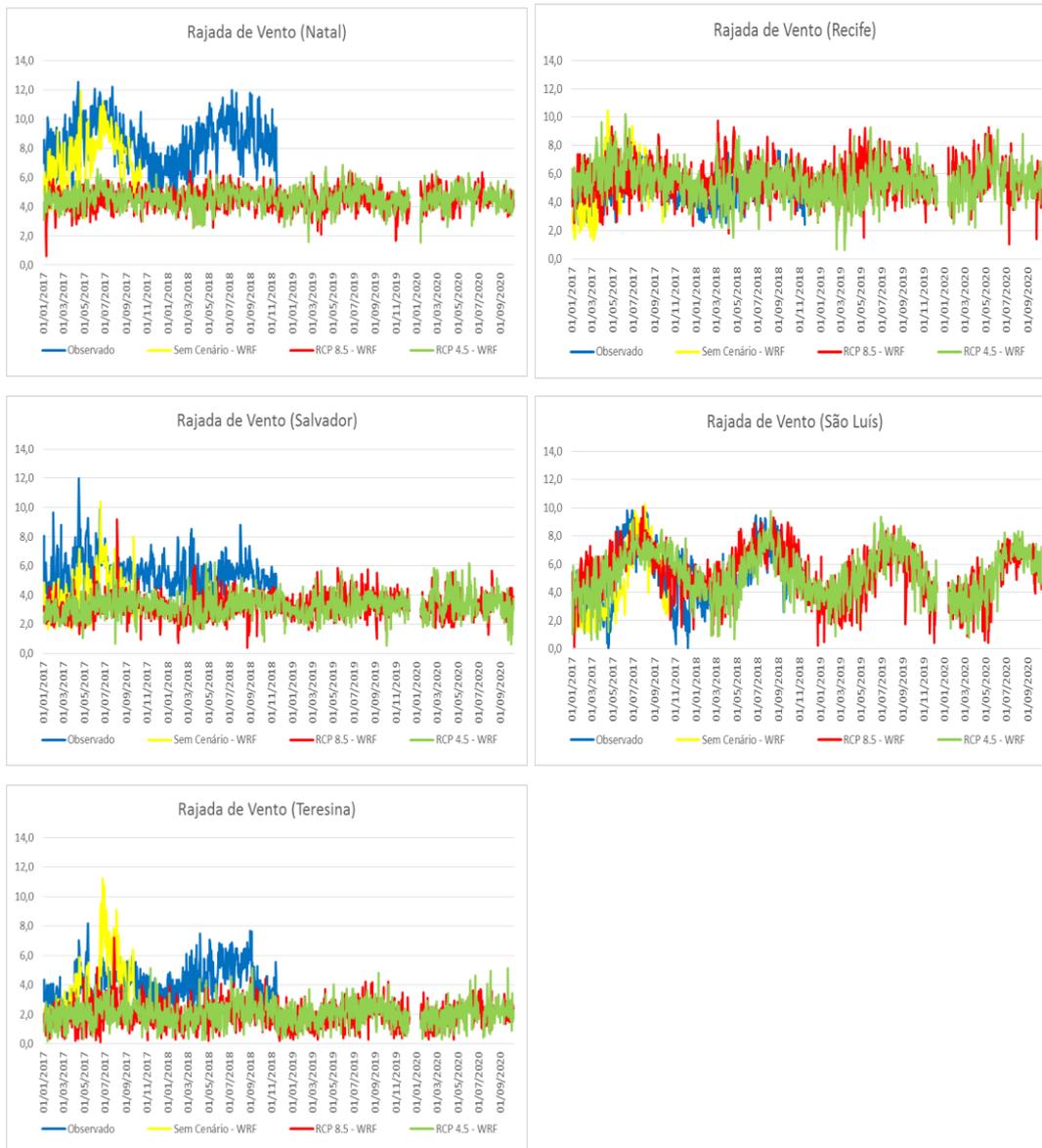
1.11.1.4.2. Rajada de vento

Quando analisado rajada de vento em substituição a velocidade do vento, notou-se uma sensível melhoria nos indicadores estatísticos, o que levou a duas observações: a primeira foi o número de falhas presentes nos dados de algumas cidades; a segunda foi à similaridade entre o comportamento dos dados produzidos pelos modelos e os dados observados. Sendo este destaque notado após a substituição, que representou melhorias nas comparações realizadas. Possivelmente os dados previstos pelo modelo apresentam tendências de padrões de valores máximo nas horas de registro.

Comparando as figuras da velocidade do vento (Figura 5) e rajada do vento (Figura 6) é possível ver que na maioria das cidades os dados simulados se assemelharam com os dados reais, se equiparando na frequência e na intensidade da variável, destaque para as cidades de Recife e São Luís que demonstraram uma melhora significativa. Outras modificações em decorrência da substituição da variável se deram nas cidades de Maceió, Natal e Teresina, onde os dados do modelo se distanciaram do observado e no fato de que o modelo passou a subestimar a variável do vento.

Figura 6 - Rajada de vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo WRF.





Na Tabela 7 temos a confirmação estatística do que foi visto nas figuras 5 e 6. Foi observado que com a substituição houve na maioria das cidades um aumento nas correlações do modelo, destaque para São Luís que exibiu os melhores resultados para as simulações com cenários. Na análise de BIAS é visto que com exceção de Recife e das simulações sem cenários de Fortaleza e São Luís as simulações tiveram valores negativos confirmando assim a subestimação do modelo. É visto também que com a substituição houve uma diminuição significativa nos resultados de MSE e RMSE de algumas cidades.

Tabela 7 - Análise estatística da simulação do modelo WRF para a rajada de vento.

WRF	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,13	0,01	0,27	-0,85	-0,78	-0,03	2,99	2,80	1,28	1,73	1,67	1,13
Fortaleza	0,51	0,48	0,75	-2,23	-2,13	0,82	7,36	7,04	2,76	2,71	2,65	1,66
João Pessoa	0,22	0,15	0,48	-3,18	-3,35	-0,98	13,28	14,71	3,54	3,64	3,83	1,88
Maceió	0,20	0,13	0,56	-3,09	-3,17	-1,36	11,62	12,26	4,09	3,41	3,50	2,02
Natal	0,25	0,04	0,36	-4,04	-4,17	-1,12	18,68	20,20	4,20	4,32	4,49	2,05
Recife	0,11	0,12	0,51	0,83	0,53	0,19	3,22	2,84	2,79	1,80	1,69	1,67
Salvador	-0,01	-0,11	0,55	-2,67	-2,56	-1,43	9,71	9,51	4,01	3,12	3,08	2,00
São Luís	0,58	0,54	0,68	-2,23	-2,11	0,82	7,36	6,89	2,76	2,71	2,63	1,66
Teresina	0,18	0,16	0,59	-1,84	-1,83	-0,08	4,67	4,89	2,75	2,16	2,21	1,66

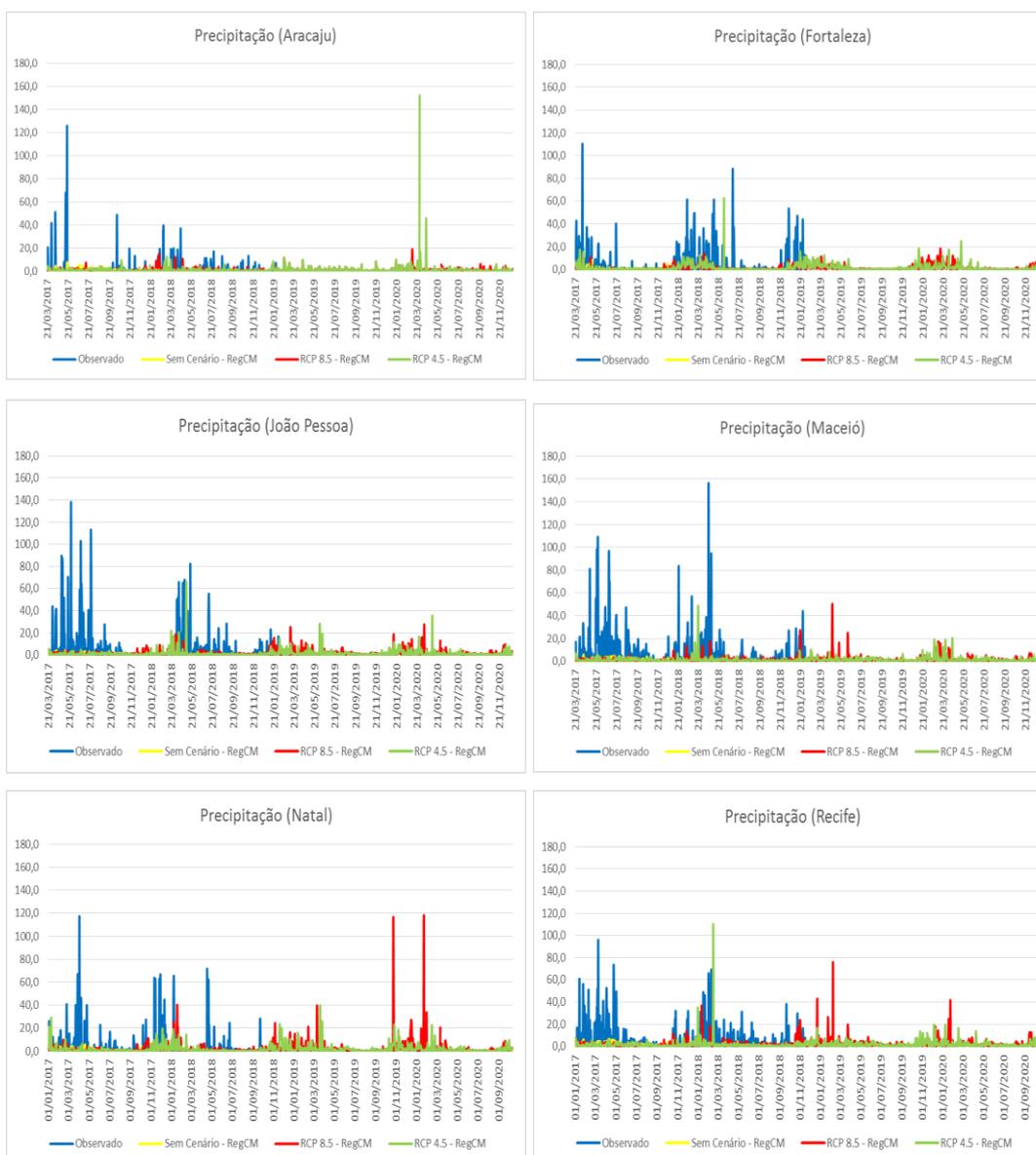
1.11.2. Modelo RegCM

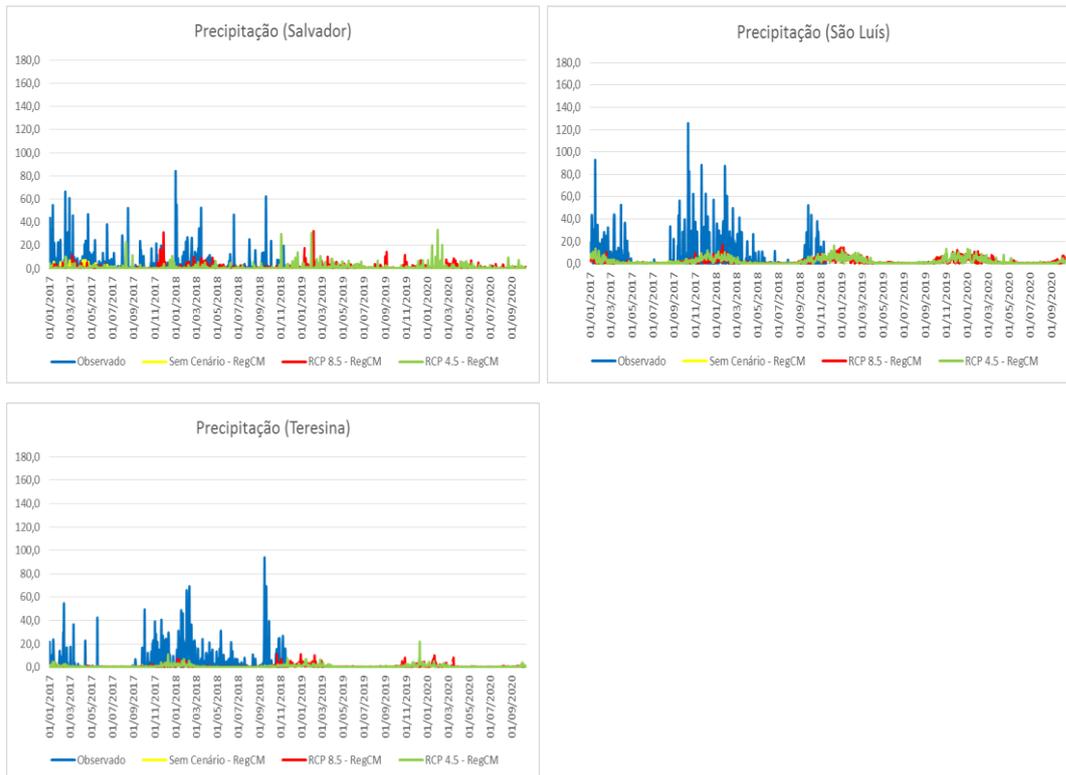
1.11.2.1. Precipitação

Assim como no modelo WRF, também o modelo RegCM não obteve valores estatísticos que pudessem conferir-lhe a classificação de satisfatórios, então as correlações e os cálculos de BIAS, MSE e RMSE obtidos foram muito abaixo do esperado, com exceção de algumas cidades na simulação sem cenário.

Analisando os gráficos presente na Figura 7, pode-se afirmar que o modelo apresentou em todas as suas configurações resultados abaixo dos valores observados. É possível atestar também que o modelo não respondeu tão bem aos dias com registro de chuva. O modelo somente conseguiu responder a casos de chuva muito intensas.

Figura 7 - Precipitação diária das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.





Com base na tabela 8, temos a confirmação estatística do que foi exposto nos gráficos da figura 7. As correlações em todas as cidades e simulações foram abaixo da classificação aceitável. Outros pontos que merecem destaque se encontram no cálculo de BIAS onde, sem exceção, todos os valores das simulações foram negativos indicando assim a subestimação da variável, e nos cálculos de MSE e RMSE todas as simulações apresentaram resultados muito alto ($MSE > 40$ e $RMSE > 6$, valores considerados altos).

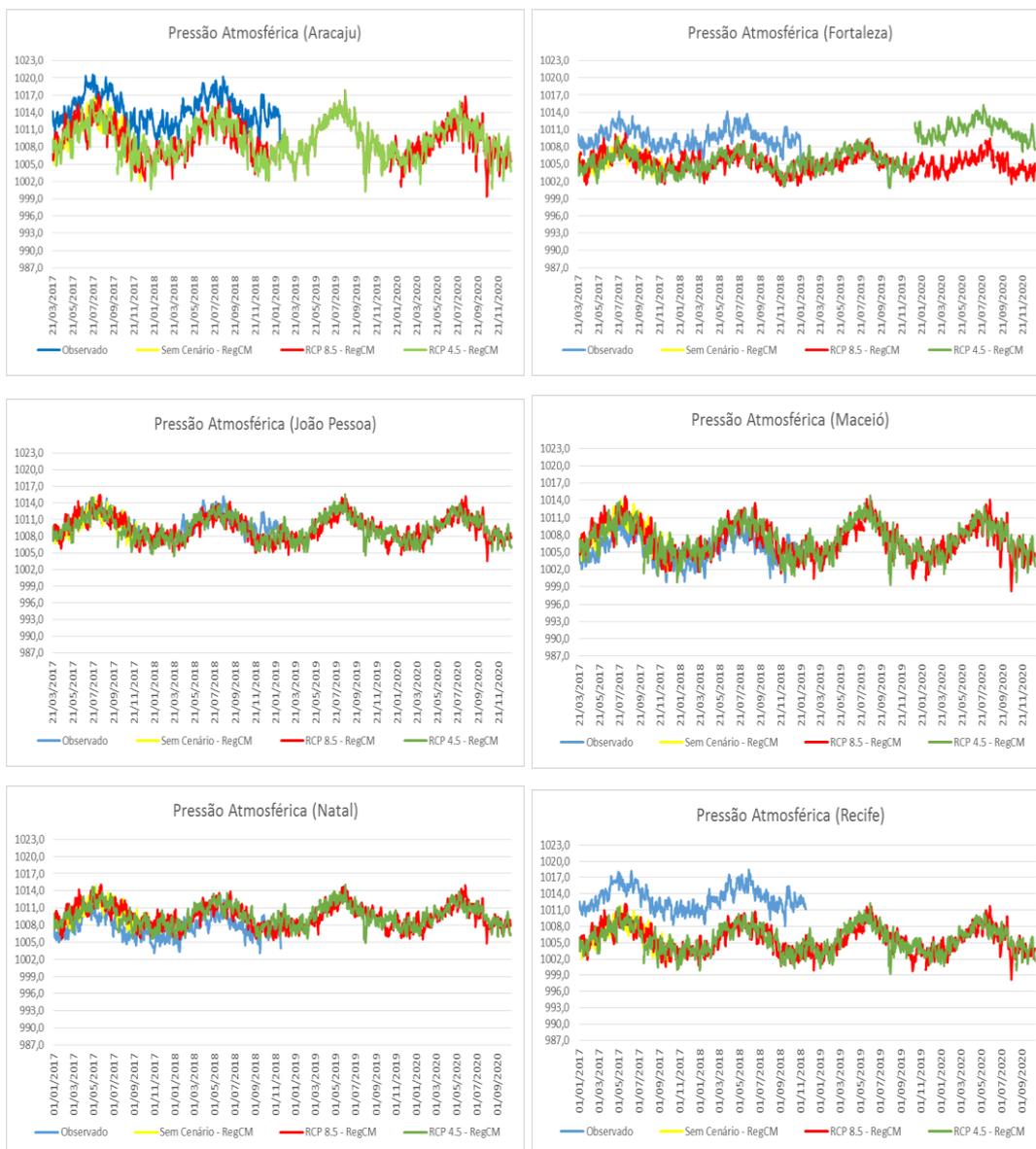
Tabela 8 - Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a variável de precipitação

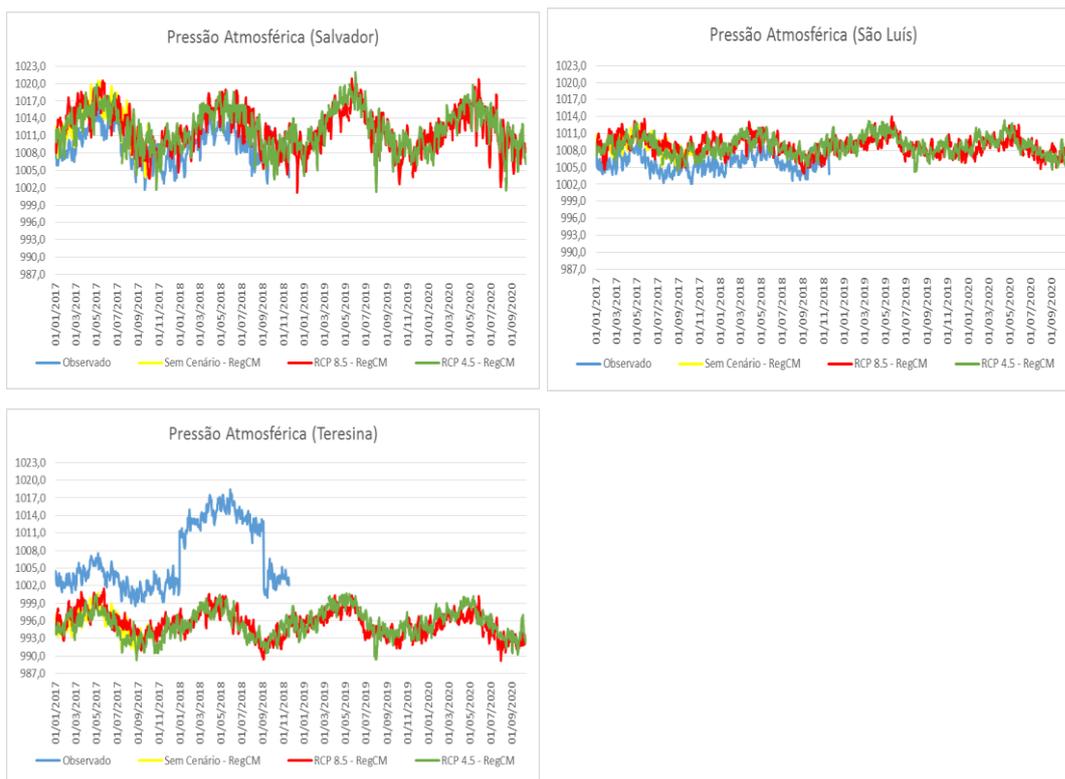
RegCM	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	-0,03	-0,07	0,24	-1,15	-1,36	-0,79	104,68	105,09	98,22	10,23	10,25	9,91
Fortaleza	0,17	0,18	0,51	-2,03	-2,24	-2,14	82,59	83,28	77,24	9,09	9,13	8,79
João Pessoa	0,08	0,05	0,30	-6,57	-6,65	-6,45	367,96	369,20	361,15	19,18	19,22	19,00
Maceió	0,20	0,27	0,45	-7,25	-7,51	-6,88	302,97	306,08	288,64	17,41	17,50	16,99
Natal	-0,01	0,08	0,08	-2,48	-2,68	-2,42	116,78	111,25	109,27	10,81	10,55	10,45
Recife	0,04	0,18	0,37	-5,29	-5,49	-4,78	182,69	180,92	166,91	13,52	13,45	12,92
Salvador	0,03	0,01	0,33	-3,92	-4,26	-3,89	114,88	115,22	104,01	10,72	10,73	10,20
São Luís	0,24	0,24	0,30	-2,03	-2,24	-2,14	82,59	83,28	77,24	9,09	9,13	8,79
Teresina	0,14	0,14	0,23	-1,38	-1,42	-1,49	42,27	42,50	43,86	6,50	6,52	6,62

1.11.2.2. Pressão Atmosférica

Com o auxílio da Figura 8, pode-se perceber que o modelo RegCM teve, para algumas cidades, sucesso em reproduzir o padrão sazonal (coeficiente de correlação expressivo), porém não foi tão bem-sucedido a representação da intensidade da variável (erros relativamente altos). É notável também que nas cidades de João Pessoa, Maceió, Natal e Salvador o modelo demonstrou padrões semelhantes ao observado. Também é possível visualizar a subestimação do modelo para as cidades de Aracaju, Fortaleza, Recife e Teresina.

Figura 8 - Pressão atmosférica das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.





Portanto, a Tabela 9 confirma os resultados apresentados na figura 8, por meio do coeficiente de correlação, fica destacado o fato do modelo ter conseguido representar bem o padrão anual da variável, sendo as melhores correlações observadas na simulação sem o uso de cenários climáticos.

Também podemos ver que nas cidades onde houve a subestimação do observado os valores de BIAS estão negativos, enquanto que os que apresentaram valores positivos estão acima do observado. No cálculo de MSE e RMSE é possível ver se os dados simulados ficaram próximos ou distantes dos dados reais. Dito isso pode-se notar que a cidade de João Pessoa apresentou os melhores resultados de BIAS, MSE e RMSE em todas as simulações e as cidades de Fortaleza, Recife e Teresina tiveram resultados estatísticos bom em termos de coeficiente de correlação e péssimos em termos de erros (MSE e RMSE).

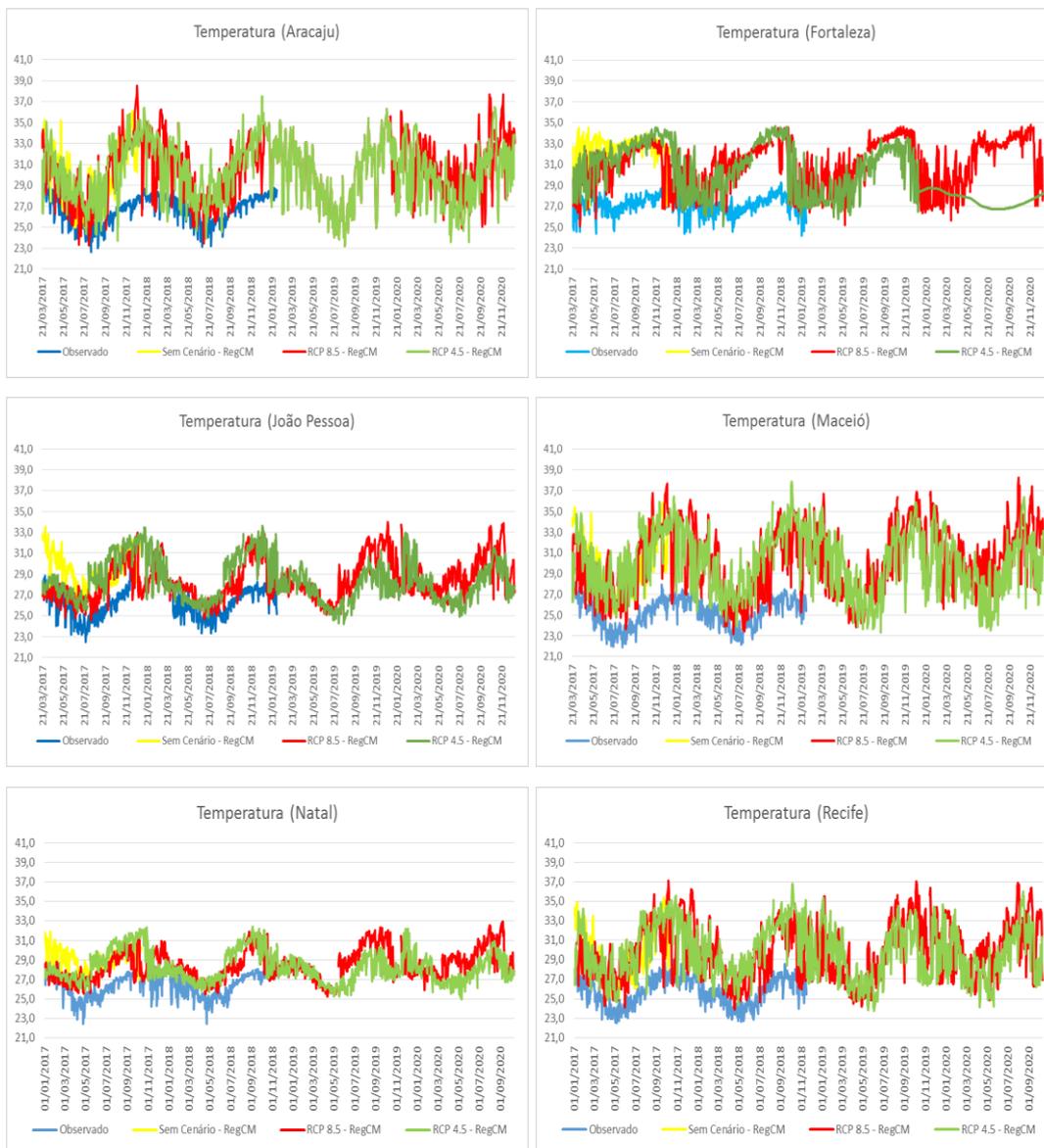
Tabela 9 - Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a pressão atmosférica próximo a superfície

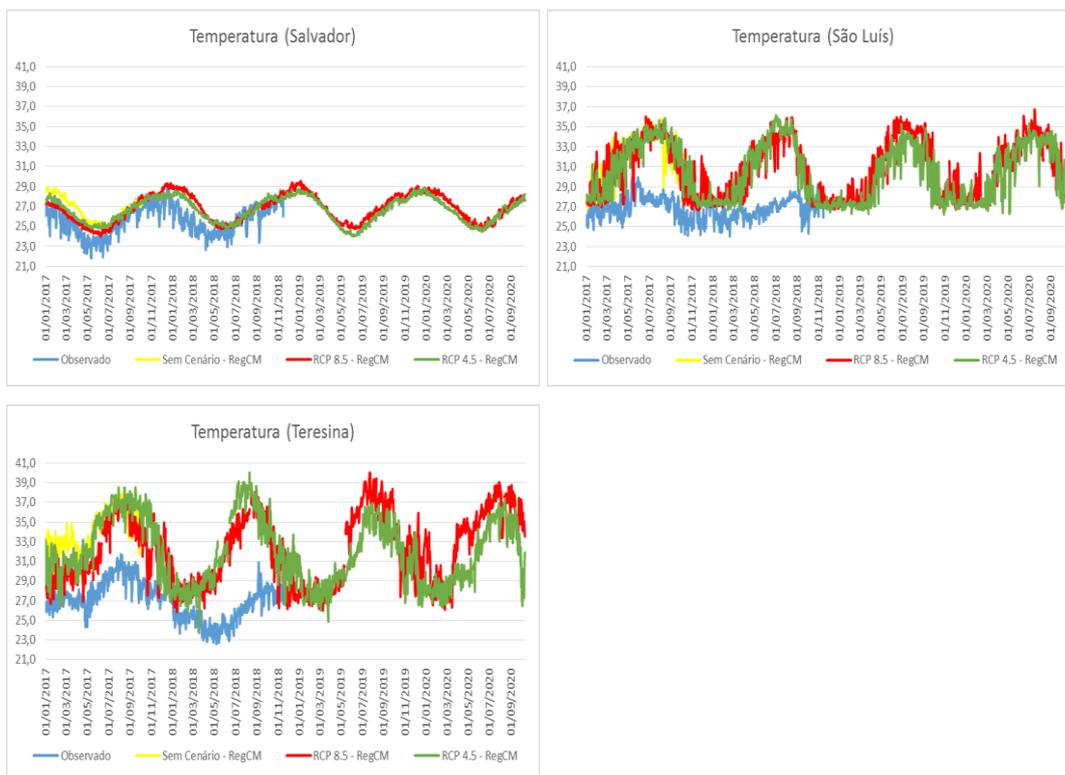
RegCM	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário
Aracaju	0,65	0,63	0,80	-4,90	-4,49	-4,63	30,21	27,39	24,76	5,50	5,23	4,98
Fortaleza	0,67	0,54	0,96	-4,41	-3,89	-4,28	21,77	17,98	18,57	4,67	4,24	4,31
João Pessoa	0,68	0,59	0,83	-0,47	0,05	-0,34	2,41	2,75	1,25	1,55	1,66	1,12
Maceió	0,68	0,65	0,99	1,82	2,31	2,42	7,43	10,48	6,06	2,73	3,24	2,46
Natal	0,68	0,53	0,66	2,03	2,46	2,27	6,22	9,27	7,28	2,50	3,04	2,70
Recife	0,70	0,59	0,77	-7,05	-6,68	-7,00	54,11	49,93	51,32	7,36	7,07	7,16
Salvador	0,68	0,64	0,99	2,80	3,32	3,41	14,28	19,55	11,96	3,78	4,42	3,46
São Luís	0,53	0,42	0,70	3,03	3,54	3,33	21,77	17,98	18,57	4,67	4,24	4,31
Teresina	0,75	0,66	0,97	-7,54	-6,50	-7,27	60,98	46,30	53,40	7,81	6,80	7,31

1.11.2.3. Temperatura do ar

Na Figura 9 mostra a comparação feita entre os dados simulados pelo modelo RegCM e os dados observados, que diferem do observado em relação ao intervalo da variável e em alguns casos no padrão de variação anual. Pode-se afirmar que todas as simulações do modelo estão acima do observado, ou seja, o modelo tem a tendência de superestimar a observação, onde possivelmente o modelo precisa de uma melhor representação local da topografia, ocupação do solo.

Figura 9 - Temperatura do ar das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.





Na Tabela 10 é possível ver que os dados simulados obtiveram correlações medias em relação ao observado, sendo a cidade de Fortaleza a que apresentou as menores correlações em todas as configurações do modelo. Os dados estatísticos também nos confirmam a superestimação do modelo através do cálculo de BIAS, onde é visto que não houve a ocorrência de valores negativos e que na maioria das cidades o valor de BIAS foi acima do observado. O mesmo padrão de valores elevados pode ser observado nos cálculos de MSE e RMSE. Outro ponto a ser destacado é a boa performance do modelo para a simulação da cidade de Salvador que obteve os melhores resultados em todas as configurações do modelo, com exceção da correlação da simulação sem cenário.

Tabela 10 - Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a temperatura atmosférica

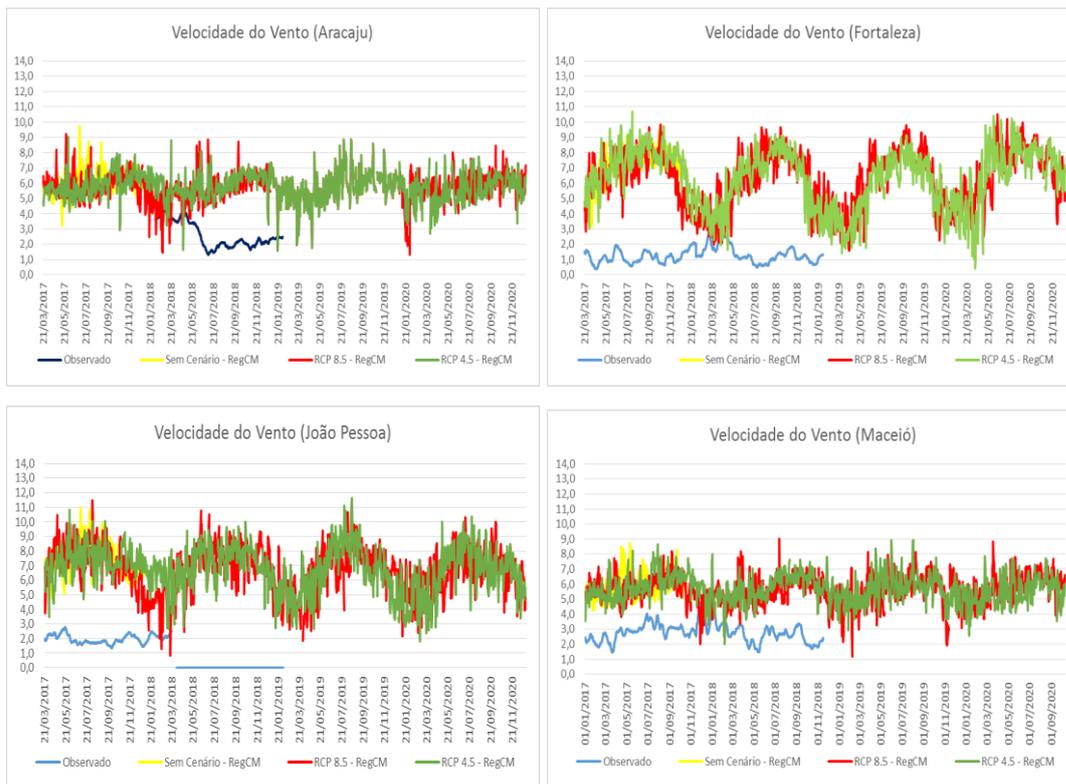
RegCM	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário
Aracaju	0,55	0,58	0,69	3,76	3,62	3,81	19,08	19,77	19,11	4,37	4,45	4,37
Fortaleza	0,34	0,30	0,38	4,61	3,80	5,35	24,56	17,41	30,16	4,96	4,17	5,49
João Pessoa	0,51	0,51	0,74	2,38	1,51	3,05	8,95	4,56	11,31	2,99	2,14	3,36
Maceió	0,52	0,55	0,81	5,09	4,73	5,13	31,82	29,55	29,58	5,64	5,44	5,44
Natal	0,39	0,44	0,55	2,36	1,52	2,81	8,60	4,27	9,26	2,93	2,07	3,04
Recife	0,63	0,60	0,77	4,33	3,82	4,16	23,74	19,55	20,76	4,87	4,42	4,56
Salvador	0,84	0,86	0,75	1,07	0,72	1,53	1,85	1,08	3,29	1,36	1,04	1,82
São Luís	0,50	0,47	0,52	4,61	3,80	5,35	24,56	17,41	30,16	4,96	4,17	5,49
Teresina	0,76	0,82	0,82	5,35	3,92	6,11	33,61	19,23	38,86	5,80	4,39	6,23

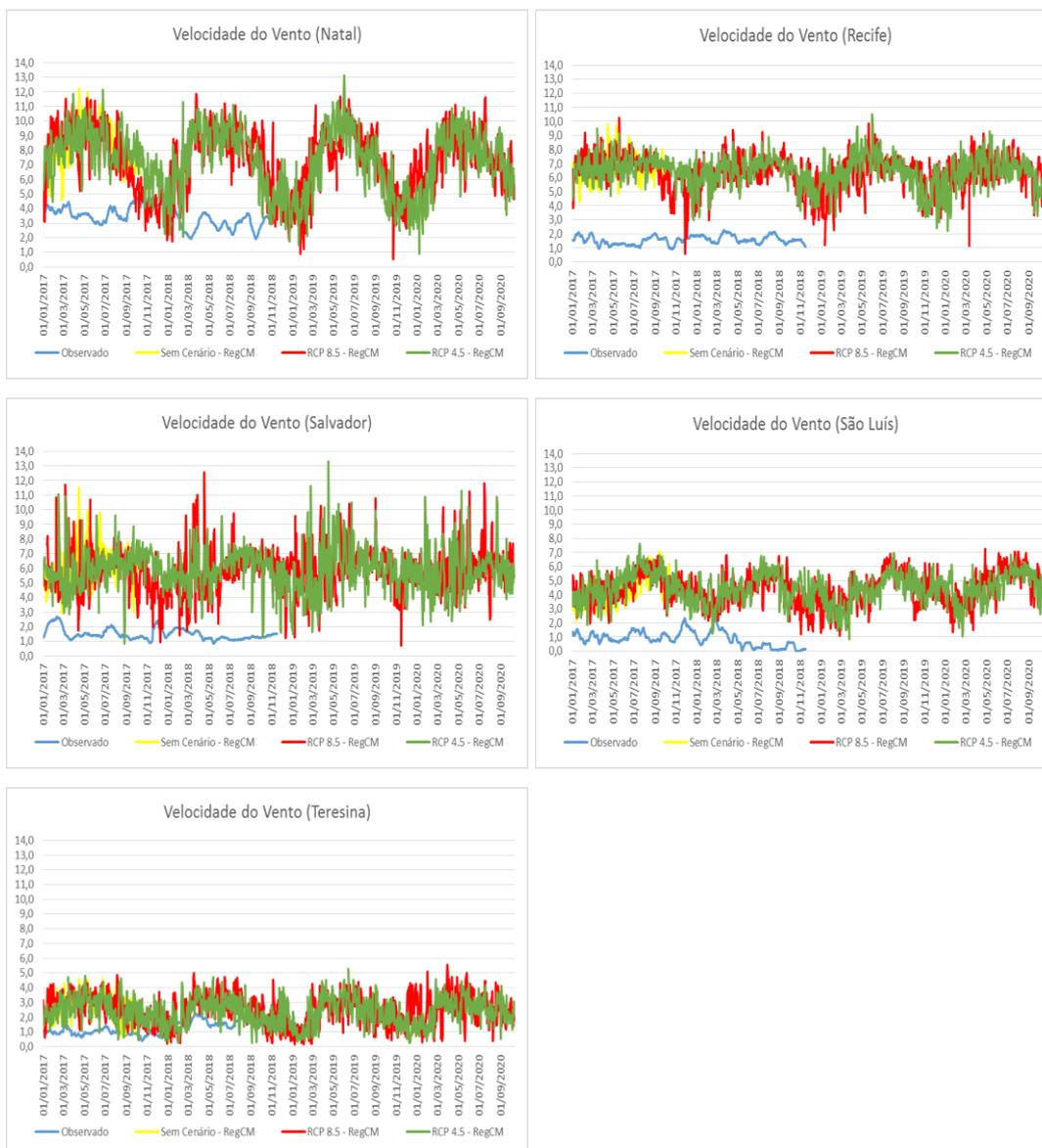
1.11.2.4. Vento

1.11.2.4.1. Velocidade do Vento

Aparentemente os dados observados de velocidade do vento, apresentam problemas, pois os mesmos não demonstram padrões sazonais. Que seria algo comum em resposta as variações da temperatura do ar e pressão atmosférica (ver figura 10). Fato este que não acontece com os dados previstos pelo modelo RegCM para as cidades nordestinas estudadas. Com base ainda nas simulações realizadas, pode-se destacar padrões semelhantes para as cidades, por exemplo Maceió, Aracaju, Salvador e Recife se assemelham na variabilidade da intensidade do vento, assim como Natal e Fortaleza e ainda São Luiz e Teresina. Vale destacar também que as simulações com cenários climáticos são semelhantes entre si (RCP 4.5 e 8.5) e ainda parecido com as simulações sem cenários.

Figura 10 - Velocidade do vento próximo a superfície das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.





Como citado anteriormente, os dados simulados não possuem semelhança com os dados reais, isso pode ser confirmado nos cálculos de coeficiente de correlação, BIAS, MSE e RMSE (ver Tabela 11).

Para o coeficiente de correlação todas as simulações apresentam valores abaixo do observado, o que implica dizer que o modelo não acompanhou a variação sazonal da variável. Analisando os resultados de BIAS é visto que em nenhuma das simulações os valores ficaram próximos do ideal e também confirma a superestimação do modelo tendo em vista que todos os valores foram positivos. Semelhante ao BIAS os valores obtidos de MSE e RMSE foram acima do que era esperado, indicando assim que os dados produzidos ficaram distantes dos dados coletados.

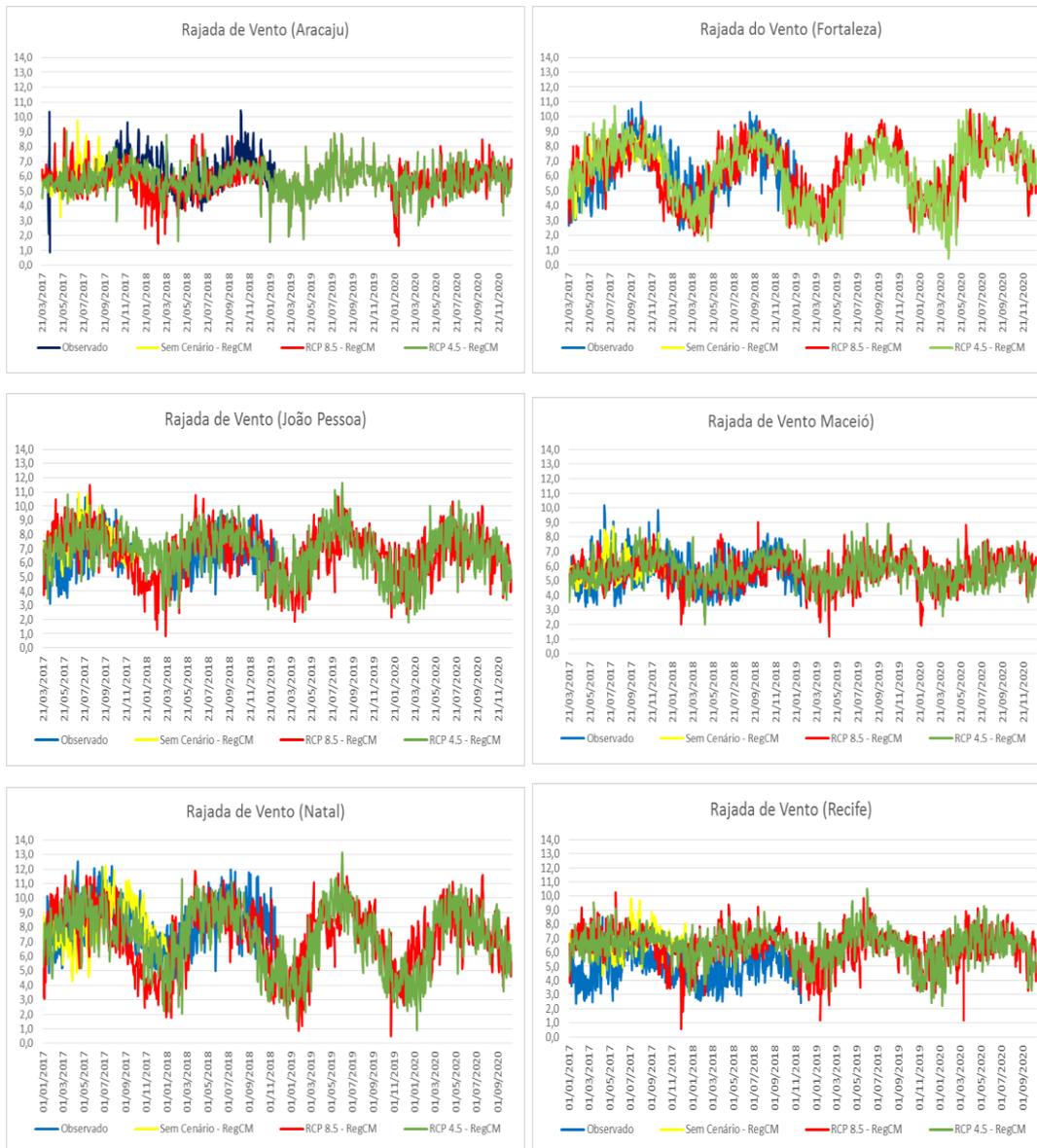
Tabela 11 – Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a velocidade do vento.

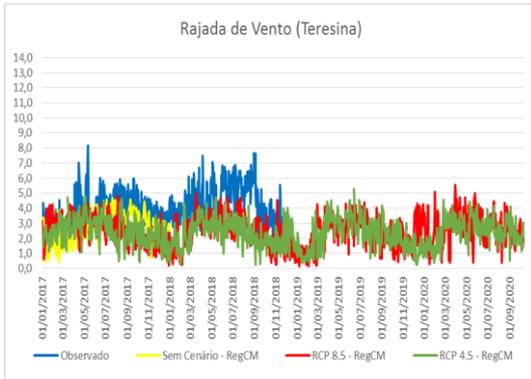
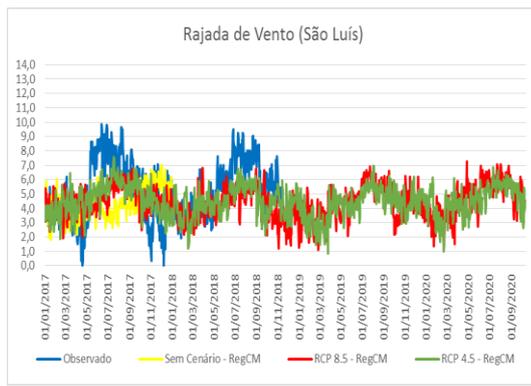
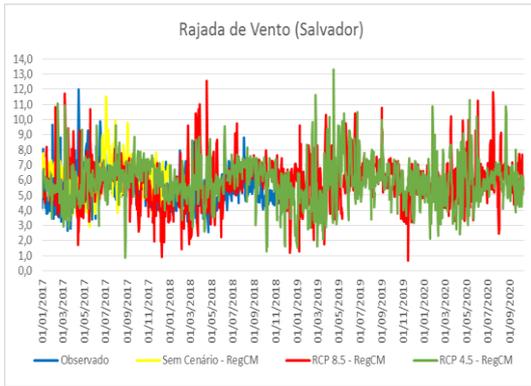
RegCM	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário
Aracaju												
Fortaleza	0,10	0,00	0,01	6,13	5,62	6,10	40,18	34,27	40,22	6,34	5,85	6,34
João Pessoa	-0,12	0,01	-0,49	5,23	5,35	5,18	29,44	31,31	29,53	5,43	5,60	5,43
Maceió	0,43	0,04	0,30	2,98	2,99	2,91	9,85	10,03	10,07	3,14	3,17	3,17
Natal	-0,24	-0,41	-0,43	4,41	4,42	4,30	22,22	24,18	22,62	4,71	4,92	4,76
Recife	0,02	-0,09	-0,40	5,15	5,31	5,12	28,06	29,97	28,11	5,30	5,48	5,30
Salvador	-0,04	-0,06	-0,30	4,22	4,13	4,18	20,19	19,65	20,26	4,49	4,43	4,50
São Luís	0,21	0,10	0,06	6,13	5,62	6,10	40,18	34,27	40,22	6,34	5,85	6,34
Teresina	0,04	0,24	0,11	1,59	1,83	1,56	3,34	4,04	3,37	1,83	2,01	1,84

1.11.2.4.2. Rajada de vento

Similar ao ocorrido na validação das simulações realizadas com o modelo WRF, foi feito a comparação da rajada de vento com o modelo RegCM e o observado. Semelhante ao ocorrido no WRF os dados do RegCM apresentaram uma melhor resposta, tanto na Figura 11 quanto nas análises estatísticas (Tabela 12) das simulações. Pode-se destacar as cidades de Fortaleza, João Pessoa e Natal que na análise da velocidade do vento foram as que apresentaram as maiores diferenças gráficas. Ainda na figura é possível ver a diminuição da superestimação do modelo e que em alguns casos como São Luís e Teresina o modelo passou a subestimar o observado.

Figura 11 - Rajada de vento das capitais do Nordeste brasileiro utilizando o modelo RegCM.





Quando comparamos com os dados utilizados na velocidade do vento vemos que os dados de rajada possuem maior semelhança com os dados produzidos. Isso pode ser confirmado observando o aumento dos valores de correlação e a diminuição dos resultados de BIAS, MSE e RMSE que ficaram mais próximos do ideal.

Tabela 12 - Análise estatística da simulação do modelo RegCM para a Rajada de vento

RegCM	Correlação			BIAS			MSE			RMSE		
Cidades	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário	RCP 4.5	RCP 8.5	S/ Cenário
Aracaju	-0,02	0,26	0,32	-0,13	-0,19	-0,23	1,22	0,96	0,97	1,11	0,98	0,99
Fortaleza	0,50	0,47	0,71	0,54	-0,04	0,29	2,69	3,08	1,67	1,64	1,75	1,29
João Pessoa	0,05	-0,06	0,49	0,42	0,67	0,61	3,05	4,08	2,12	1,75	2,02	1,46
Maceió	0,06	0,13	0,72	0,10	0,07	0,17	2,31	2,19	0,85	1,52	1,48	0,92
Natal	0,12	0,22	0,36	-0,43	-0,50	-0,45	3,61	5,15	3,11	1,90	2,27	1,76
Recife	0,22	-0,02	0,25	1,60	1,72	1,64	4,23	5,68	4,32	2,06	2,38	2,08
Salvador	0,00	-0,01	0,73	0,16	0,01	0,48	3,49	4,03	1,20	1,87	2,01	1,10
São Luís	0,60	0,38	0,46	0,54	-0,04	0,29	2,69	3,08	1,67	1,64	1,75	1,29
Teresina	0,09	-0,13	0,27	-1,27	-1,07	-1,13	3,20	3,04	2,54	1,79	1,75	1,59

1.12. Previsão e cenários climáticos

Com base nos anexos referentes aos cenários climáticos, os resultados obtidos a partir das análises da variável de precipitação nas previsões não diferem muito do que foi visto nos tópicos anteriores. Da mesma forma foi observado que os modelos não obtiveram êxito em replicar o comportamento diário e anual da variável. Nas análises estatísticas é visto que os modelos demonstraram baixos níveis de correlação, subestimação dos dados observados, com exceção para a simulação do modelo WRF para a cidade de Aracaju, e baixa proximidade entre os valores dos dados observados e dos simulados. É possível dizer ainda que fazendo uma comparação do desempenho entre os modelos pode-se citar que para os dois cenários empregados nas previsões o modelo WRF apresentou melhor resultados que o RegCM.

Para a pressão atmosférica os cálculos mostram que os modelos tiveram correlações moderadas na maioria das cidades, indicando assim uma pequena taxa de acerto em reproduzir a variação anual da variável meteorológica. Para os demais cálculos observa-se que no modelo WRF com os dois cenários utilizados 4 cidades, Aracaju, Fortaleza, João Pessoa e Recife, obtiveram resultados aceitáveis somente no cálculo de BIAS, enquanto que no RegCM apenas a cidade de João Pessoa demonstrou resultados satisfatórios em ambos os cenários.

Os resultados obtidos pelos modelos para a temperatura do ar não diferem muito do que foi visto para a pressão atmosférica. Os modelos demonstraram resultados que podem ser considerados satisfatórios para algumas cidades. Comparando a performance dos modelos é visto que nos dois cenários utilizados ambos obtiveram boas correlações, mas ao observamos os cálculos de BIAS, MSE e RMSE constata-se que o modelo WRF exibiu um melhor desempenho.

Semelhante ao que ocorreu nas simulações a previsão dos modelos para a variável de vento, quando utilizando os dados de velocidade do vento, apresentou dados estatísticos abaixo do que seria considerado uma rodada ideal. Ambos modelos apresentaram baixa correlação com a variável, porém no WRF é possível ver que em algumas cidades o modelo obteve valores de BIAS, MSE e RMSE aceitáveis, indicando que os números gerados foram próximos aos dados reais.

Nas rodadas de previsões também houve a substituição da velocidade pela rajada de vento, é visto que após a modificação as correlações dos modelos permaneceram abaixo do ideal, mesmo que o RegCM tenha apresentado uma melhora. Nos cálculos de BIAS, MSE e

RMSE o modelo WRF demonstrou uma resposta negativa a mudança onde os valores se distanciaram do observado, enquanto que no modelo RegCM ocorreu o oposto havendo uma aproximação entre os dados produzidos e os coletados.

Durante as análises é visto que para ambos os modelos as projeções embora tenham certa similaridade com os dados observados em nenhuma das variáveis foi observada uma simulação perfeita ou com todos os cálculos se aproximando de valores que possam ser considerados satisfatórios, em alguns casos isso pode ser considerado positivo já que esses cenários se baseiam na emissão de gases favoráveis ao efeito estufa. Pode-se dizer então, caso os modelos estejam calibrados e simulando corretamente, que os níveis de emissão da cidade estão abaixo do que é projetado nos cenários climáticos dos RCP's 4.5 e 8.5.

Ver tabelas em anexo.

CONCLUSÕES

Por fim mediante ao que foi mostrado neste estudo, é possível concluir que o modelo RegCM 4.7 apresentou certa dificuldade em representar algumas das variáveis utilizadas neste presente trabalho tanto nas rodadas de simulações quanto nas de previsão, a exemplo da precipitação, obtive baixos índices estatísticos. O mesmo pode ser dito sobre o modelo WRF, que também dificuldade com a variável precipitação, porém ambos os modelos mostraram serem sensíveis quando na ocorrência de chuva, com maior sensibilidade para o modelo WRF.

Ainda sobre a performance dos modelos é válido afirmar que mediante o apresentado os modelos conseguiram representar os padrões sazonais das variáveis de pressão atmosférica, temperatura do ar e rajada de vento, mesmo que em algumas cidades tenham superestimado ou subestimado os dados observados.

Foi constatado que das variáveis em que os modelos obtiveram êxito em reproduzir as simulações sem o uso dos cenários climáticos apresentaram um número maior de cidades com uma boa resposta estatística em relação as simulações com o uso dos cenários. Isso sugere afirmar que a situação da atmosfera nas cidades presente na pesquisa difere da atmosfera presente nos cenários, ou seja, o nível de concentração de poluente na atmosfera é diferente dos níveis adotados pelos RCP's. Embora os dados compreendam um período curto (apenas 4 anos) é possível ver que nas simulações com os cenários climáticos os modelos apresentam um aumento na temperatura do ar e uma diminuição na precipitação.

Comparando o desempenho das simulações e previsões dos modelos entre si é possível afirmar que para a variável de precipitação, embora ambos tenham obtido resultados baixos, foi verificado que o modelo RegCM obteve uma melhor resposta estatística. Para a pressão atmosférica os dois obtiveram resultados similares com pequenas diferenças quanto a variação anual e o intervalo da variável. Na temperatura da atmosfera é observado que enquanto o modelo WRF demonstrou melhores valores para os cálculos de BIAS, MSE e RMSE, o RegCM teve uma melhor correlação com o observado. Isso indica que o RegCM obteve um melhor resultado reproduzindo a sazonalidade da variável, porém o WRF alcançou dados mais próximos do observado. Em relação ao vento foi averiguado que ambos os modelos tiveram pouca semelhança com a velocidade do vento, porém ainda assim o modelo WRF atingiu melhores respostas do que o RegCM. Após a substituição da velocidade pela rajada de vento temos que no WRF a modificação afetou mais significativamente os cálculos de BIAS, MSE e RMSE, enquanto que no modelo RegCM o aprimoramento foi em todos os cálculos estatísticos.

Com base no estudo pode-se mencionar que o modelo WRF obteve melhores resultados estatísticos em comparação ao modelo RegCM, nas variáveis pressão atmosférica, temperatura do ar, velocidade do vento e em destaque a precipitação onde o modelo WRF obteve valores de BIAS, MSE e RMSE melhores que o RegCM, porém isso não descarta o uso do modelo RegCM já que o modelo possui outras configurações e aspectos que podem ser melhor aproveitadas em estudos que não foram abordados na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALIGO, E. A.; GALLUS JR, W. A.; SEGAL, M. On the impact of WRF model vertical grid resolution on midwest summer rainfall forecasts. *Weather and Forecasting*, v. 24, n. 2, p. 575-594, 2009.

BBC Weather. Country Guide. Consultado em 11 de junho de 2008. Arquivado do original em 11 de janeiro de 2009.

CARVALHO, D. J. S. Otimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica. 2009. 60 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física) - Universidade de Aveiro, 2009.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software*, v. 33, p. 23-34, 2012.

DA ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; CUADRA, S. V. Characterization of wet and dry spells simulated by RegCM4 over the South America. *Geophysical Research Abstracts*, v. 14, EGU2012-10962, 2012.

EMERY, C.; TAI, E.; YARWOOD, G. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Austin, TX: Environment International Corporation, 2001.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.

FERREIRA, A. P. G. F. Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal continental. 2007. 125 f. Relatório (Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2007.

Geography of Brazil. Central Intelligence Agency: The World Factbook. 2008. Consultado em 3 de junho de 2008.

GIORGI, F.; Solmon, F.; Giuliani, G. 2016. Regional Climatic Model RegCM User's Guide Version 4.5. Trieste, Italy May 23.

GONÇALVES, J. S. Avaliação da previsão numérica sazonal de precipitação para o Rio Grande do Sul. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

HENDERSON, D.; PAIMAZUMDER, D.; MÖLDERS, N. Evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model over Siberia. [S.l: s.n.], 2007.

<https://www.ictp.it/research/esp/models/regcm4.aspx>. Consultado em 16 de março de 2018

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Consultado em 24 de setembro de 2015.

IPCC, 2000 – Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570 Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

JANKOV, I.; GALLUS JR, W. A.; SEGAL, M.; KOCH, S. E.; SHAW, B. The impact of different WRF Model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Weather and Forecasting*, v. 20, n. 6, p. 1048-1060, 2005.

JURY, M. R.; CHIAO, S.; HARMSEN, E. W. Mesoscale structure of trade Wind convection over Puerto Rico: composite observations and numerical simulation. *Boundary Layer Meteorology*, v. 132, n.2, p. 289-313, 2009.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região Nordeste do Brasil. In: Iracema F. A. Cavalcanti et al. (orgs). *Tempo e Clima no Brasil*, São Paulo: Oficina dos Textos, p. 213-233, 2009.

MACHADO, R. D.; DA ROCHA, R. P. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: Avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n.1, p.121-136, 2011.

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 2, p. 25-41.

MENDES, C. DO R. S. Proposta de uma metodologia livre para avaliação do potencial eólico de Minas Gerais. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ), São João del Rei, 2011.

Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais à mudança do clima no Brasil / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

MOLION, L.C.B, BERNARDO, Sergio O. Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2002.

Natural Regions. Encarta. MSN. Consultado em 11 de junho de 2008. Arquivado do original em 31 de outubro de 2009.

OLIVEIRA A. S. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). 1986.

PAIMAZUMDER, D.; MÖLDERS, N. Theoretical assessment of uncertainty in regional averages due to network density and design. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, n.8, p. 1643-1666, 2009.

PELLEGRINI, C. C.; CERQUEIRA, S. A. A. G.; SILVA, A. F. G. Algumas características da ilha térmica urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo, SP. Anais... Rio de Janeiro: SBMet, 2008.

Posição Geográfica. Web Ciência. Consultado em 5 de maio de 2010.

PRABHA, T.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events. Computers and electronics in agriculture, v. 64, n. 2, p. 234-247, 2008.

REBOITA, M. S. et al. Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes. Climate Research, v. 60, n. 3, p. 215-234, aug. 2014.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. Terra didática, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

Rivers and Lakes. Encarta. MSN. Consultado em 11 de junho de 2008. Arquivado do original em 31 de outubro de 2009.

ROSSBY, C. -C. 1945. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves. J. Meteor. 2, 187-204.

Ufs/Seplan. 1979, 'Clima de Sergipe' In Atlas de Sergipe, UFS-SEPLAN, Aracaju.

VAN, T P. et al. Seasonal prediction of surface air temperature across Vietnam using the regional climate model version 4.2 (RegCM4.2). Hindawi, v. 2014, p. 1–13, 2014.

ANEXOS

1. Modelo WRF

1.1. Precipitação

Tabela 13 - Análise estatística da previsão do modelo WRF para a precipitação.

WRF	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	-0,05	0,10	1,96	1,53	100,04	81,07	10,00	9,00
Fortaleza	0,12	0,30	-0,96	-1,37	138,25	123,09	11,76	11,10
João Pessoa	0,11	0,10	-2,25	-1,82	197,17	146,22	14,04	12,09
Maceió	0,09	0,06	-2,51	-2,61	208,54	251,68	14,44	15,86
Natal	0,11	0,07	-1,02	-0,90	107,34	113,51	10,36	10,65
Recife	0,11	0,01	-1,02	-1,18	133,03	166,20	11,53	12,89
Salvador	0,01	-0,03	-2,67	-2,07	93,70	113,92	9,68	10,67
São Luís	0,09	0,18	-2,66	-2,60	174,07	160,08	20,41	19,58

Teresina	0,29	0,09	-2,00	-2,28	84,86	109,41	9,21	16,18
----------	------	------	-------	-------	-------	--------	------	-------

1.2. Pressão

Tabela 14 - Análise estatística da previsão do modelo WRF para a Pressão atmosférica próximo a superfície

WRF	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,61	0,57	-0,11	-0,09	4,64	4,98	2,15	2,23
Fortaleza	0,51	0,50	0,71	0,83	3,24	3,43	1,80	1,85
João Pessoa	0,61	0,53	-0,06	0,09	2,04	1,02	1,43	1,01
Maceió	0,62	0,59	2,49	2,61	10,00	10,63	3,16	3,26
Natal	0,56	0,57	3,69	3,89	16,63	17,89	4,08	4,23
Recife	0,63	0,61	-0,46	-0,34	3,10	3,03	1,76	1,74
Salvador	0,61	0,55	-27,44	-27,81	772,85	784,47	27,80	28,01
São Luís	0,35	0,36	5,16	5,16	30,16	29,56	8,50	8,41
Teresina	0,14	0,19	-8,36	-8,60	101,62	104,13	15,60	15,79

1.3. Temperatura

Tabela 15 - Análise estatística da previsão do modelo WRF para a temperatura atmosférica.

WRF	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,77	0,68	0,17	0,53	0,73	1,24	0,85	1,11
Fortaleza	-0,14	-0,21	0,43	0,74	1,54	2,22	1,24	1,49
João Pessoa	0,51	0,44	-1,07	-0,33	2,52	0,86	1,59	0,93
Maceió	0,62	0,60	-1,47	-1,08	3,66	2,65	1,91	1,63
Natal	0,59	0,41	0,38	0,74	1,16	1,95	1,08	1,40
Recife	0,52	0,44	0,79	1,23	2,16	3,22	1,47	1,80
Salvador	0,68	0,61	-3,69	-3,26	15,51	12,60	3,94	3,55
São Luís	-0,24	-0,39	0,64	1,12	1,96	3,10	2,17	2,73
Teresina	0,31	0,27	-0,27	0,31	4,44	4,71	3,26	3,36

1.4. Vento

1.4.1. Velocidade do vento

Tabela 16 - Análise estatística da previsão do modelo WRF para a velocidade do vento.

WRF	Correlação	BIAS	MSE	RMSE
-----	------------	------	-----	------

Cidades	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP
	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Aracaju								
Fortaleza	-0,27	-0,33	3,22	3,48	12,20	13,61	3,49	3,69
João Pessoa	0,05	-0,11	2,07	0,52	5,97	0,99	2,44	1,00
Maceió	0,02	0,10	-0,21	-0,21	1,06	0,96	1,03	0,98
Natal	-0,10	-0,05	1,07	1,05	2,08	2,13	1,44	1,46
Recife	-0,31	0,01	3,92	4,03	17,49	17,78	4,18	4,22
Salvador	-0,16	-0,08	1,67	1,69	3,62	3,72	1,90	1,93
São Luís	-0,20	-0,39	4,50	4,96	23,77	27,83	7,54	8,16
Teresina	0,07	0,02	0,82	0,79	1,40	1,43	1,83	1,85

1.4.2. Rajada de vento

Tabela 17 - Análise estatística da previsão do modelo WRF para a rajada de vento.

WRF	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP
Cidades	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Aracaju	0,26	0,23	-1,70	-1,57	2,41	4,74	1,55	2,18
Fortaleza	0,53	0,41	-1,82	-1,65	5,65	5,47	2,38	2,34
João Pessoa	0,23	0,08	-2,84	-1,40	11,66	6,14	3,42	2,48
Maceió	0,23	0,13	-2,96	-2,98	10,55	10,77	3,25	3,28
Natal	0,16	0,04	-3,75	-3,81	16,83	17,33	4,10	4,16
Recife	0,20	0,06	0,59	0,67	2,54	2,92	1,59	1,71
Salvador	-0,03	-0,07	-2,28	-2,30	7,29	7,47	2,70	2,73
São Luís	0,52	0,53	0,20	0,63	3,47	3,65	2,88	2,96
Teresina	0,18	0,17	-2,01	-2,06	5,59	5,86	3,66	3,74

2. Modelo RegCM

2.1. Precipitação

Tabela 18 - Análise estatística da previsão do modelo RegCM para a precipitação.

RegCM	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP	RCP
Cidades	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Aracaju	-0,01	-0,01	-0,77	-0,72	56,02	56,48	7,49	7,52
Fortaleza	0,12	0,13	-2,30	-2,76	111,99	109,67	10,58	10,47

João Pessoa	0,09	-0,01	-2,75	-2,78	153,72	154,24	12,40	12,42
Maceió	0,03	0,01	-4,66	-4,65	220,18	219,57	14,84	14,82
Natal	0,02	0,10	-1,65	-1,55	111,39	108,08	10,55	10,40
Recife	0,12	0,06	-3,81	-3,61	135,56	129,31	11,64	11,37
Salvador	0,00	0,01	-3,14	-3,12	95,74	94,24	9,79	9,71
São Luís	0,26	0,19	-3,90	-4,31	174,66	182,67	13,22	13,52
Teresina	0,26	0,15	-3,52	-3,54	105,41	107,69	10,27	10,38

2.2. Pressão

Tabela 19 - Análise estatística da previsão do modelo RegCM para a pressão atmosférica.

RegCM	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,63	0,61	-5,13	-4,92	32,93	31,20	5,74	5,59
Fortaleza	0,54	0,44	-4,29	-4,15	21,46	20,98	4,63	4,58
João Pessoa	0,62	0,57	-0,20	0,02	1,01	1,15	1,00	1,07
Maceió	0,64	0,62	1,61	1,82	7,32	8,54	2,71	2,92
Natal	0,67	0,57	1,94	2,04	6,13	7,31	2,48	2,70
Recife	0,67	0,62	-7,32	-7,22	58,33	57,18	7,64	7,56
Salvador	0,63	0,61	2,67	2,91	14,63	17,09	3,83	4,13
São Luís	0,48	0,33	2,73	2,91	10,17	12,33	4,93	5,43
Teresina	0,47	0,30	-11,27	-10,71	153,90	145,09	19,19	18,64

2.3. Temperatura

Tabela 20 - Análise estatística da previsão do modelo RegCM para a temperatura da atmosfera.

RegCM	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,59	0,60	3,93	3,58	20,64	18,79	4,54	4,33
Fortaleza	0,41	0,27	3,87	3,63	19,99	17,19	4,47	4,15
João Pessoa	0,61	0,60	0,99	0,63	3,74	1,91	1,93	1,38
Maceió	0,55	0,59	5,18	4,55	33,36	28,05	5,78	5,30
Natal	0,44	0,51	2,16	1,65	7,39	4,51	2,72	2,12
Recife	0,60	0,56	4,45	3,68	24,92	19,33	4,99	4,40

Salvador	0,77	0,74	0,97	0,94	1,82	1,93	1,35	1,39
São Luís	0,45	0,45	3,96	4,01	22,48	22,44	4,74	4,74
Teresina	0,50	0,53	5,63	4,65	41,73	28,70	6,46	5,36

2.4. Vento

2.4.1. Velocidade do vento

Tabela 21 - Análise estatística da previsão do modelo RegCM para a velocidade do vento.

RegCM	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju								
Fortaleza	-0,39	-0,41	5,14	4,89	30,96	28,53	5,56	5,34
João Pessoa	-0,02	-0,12	2,18	2,23	12,30	13,08	3,51	3,62
Maceió	0,13	-0,18	2,95	2,77	9,94	9,19	3,15	3,03
Natal	-0,31	-0,43	4,11	3,96	21,90	22,56	4,68	4,75
Recife	0,00	0,05	4,90	4,83	25,56	25,34	5,06	5,03
Salvador	-0,13	-0,15	4,38	4,14	21,43	20,12	4,63	4,49
São Luís	-0,22	-0,08	3,57	3,44	14,71	13,40	3,84	3,66
Teresina	0,03	0,13	1,11	1,30	2,18	2,72	1,48	1,65

2.4.2. Rajada de vento

Tabela 22 - Análise estatística da previsão do modelo RegCM para a rajada de vento.

RegCM	Correlação		BIAS		MSE		RMSE	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Aracaju	0,20	0,20	-0,30	-0,53	1,48	1,88	1,22	1,37
Fortaleza	0,63	0,56	0,14	-0,13	2,24	2,86	1,50	1,69
João Pessoa	0,10	0,04	0,18	0,28	1,27	1,70	1,13	1,31
Maceió	0,23	0,17	0,24	0,05	1,76	1,92	1,33	1,38
Natal	0,30	0,40	-0,67	-0,85	4,49	5,44	2,12	2,33
Recife	0,23	0,13	1,61	1,53	4,25	4,81	2,06	2,19
Salvador	0,06	0,04	0,47	0,22	2,87	3,58	1,70	1,89
São Luís	0,53	0,40	-0,65	-0,81	3,48	4,44	1,86	2,11
Teresina	0,16	0,15	-1,69	-1,51	4,58	4,13	2,14	2,03