



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

**ANÁLISE DA HABILIDADE PREDITIVA DA PRECIPITAÇÃO COM ÊNFASE NA
SECA METEOROLÓGICA NO NORDESTE BRASILEIRO**

RODRIGO LINS DA ROCHA JÚNIOR

MACEIÓ - AL
Outubro de 2020



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

**ANÁLISE DA HABILIDADE PREDITIVA DA PRECIPITAÇÃO COM ÊNFASE NA
SECA METEOROLÓGICA NO NORDESTE BRASILEIRO**

RODRIGO LINS DA ROCHA JÚNIOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia, área de concentração Estatística Aplicada a Climatologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva.

MACEIÓ - AL

Outubro de 2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 - 1767

R672a Rocha Júnior, Rodrigo Lins da.
Análise da habilidade preditiva da precipitação com ênfase na seca meteorológica no Nordeste brasileiro / Rodrigo Lins da Rocha Júnior. – 2021.
53 f. : il.

Orientador: Francisco Daniel dos Santos Silva.
Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 42-53.

1. Previsão do tempo. 2. Secas - Previsão (Brasil, Nordeste). 3. Estatística aplicada à previsão. I. Título.

CDU: 551.577.38 (812/813)



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

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO


N.º de ordem: MET-UFAL-MS-174.

**"ANÁLISE DA HABILIDADE PREDITIVA DA PRECIPITAÇÃO COM
ÊNFASE NA SECA METEOROLÓGICA NO NORDESTE BRASILEIRO"**

RODRIGO LINS DA ROCHA JÚNIOR

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:

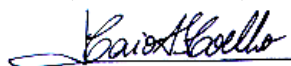

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Orientador)



Prof. Dr. Helber Barros Gomes
(Membro Interno)



Dr. Marcos Paulo Santos Pereira
(Membro Externo)



Prof. Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho
(Membro Externo)

Outubro/2020



Retirantes (Portinari, 1944)

“Miudinhos, perdidos no deserto queimado, os fugitivos agarraram-se, somaram as suas desgraças e os seus pavores.”

Vidas Secas, Graciliano Ramos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder o dom da vida, minha plena saúde e energia que usei para alcançar essa conquista. Muitas foram às vezes que pensei em desistir. Mas sob os cuidados divinos eu superei todas as dificuldades até aqui.

Agradeço muito aos meus pais, que deram tudo de si para me educar e cuidar para que não me faltasse absolutamente nada. Durante o período do mestrado não foi diferente e tive todo apoio para me dedicar unicamente a pós-graduação.

Não há palavras para agradecer ao meu orientador e amigo, professor Fabrício. Desde a graduação acreditou em mim, me ajudou renovar minha esperança no curso e contribuiu com todas as maiores conquistas que tive nos últimos anos. Essa dissertação não é o fim da nossa relação acadêmica, mas sim a conclusão de mais um trabalho conjunto dentre tantos que já fizemos e de tantos que ainda faremos.

Agradeço aos meus amigos e colegas que estiveram ao meu lado durante essa fase da minha vida. Foi sensacional estudar e fazer verdadeira amizade com todos da minha turma de mestrado: Bruno, Sherly, Dagmer e Alexsandra. Espero que todos possamos nos encontrar logo mais para celebrar não só essa conquista, mas a nossa saúde e as próximas conquistas que com certeza que estão por vir.

Agradeço a todos os funcionários que formam o Instituto de Ciências Atmosféricas da UFAL. Digo sem nenhuma dificuldade que considero o ICAT uma das minhas casas. É um lugar que sempre me senti bem e aprendi a amar nesses 7 anos como aluno. Hoje, fora do estado, busco sempre honrar a casa que me formou como profissional e espero poder contribuir sempre mais para que o ICAT seja sempre um instituto reconhecido pela excelência e tradição na meteorologia brasileira.

A todos o meu mais sincero e inexpressável obrigado!

RESUMO

Dos fenômenos naturais adversos, a seca é o que mais afeta a sociedade por atuar sobre grandes extensões territoriais e perdurar por longos períodos de tempo. A seca é um fenômeno caracterizado por um déficit hídrico suficientemente longo para impactar sobre fatores edáficos, meteorológicos, hídricos e sociais. A previsão da seca tem contribuído no mundo todo para ações de mitigação dos impactos do fenômeno e aumento da resiliência. O Brasil possui o maior território semiárido habitado do mundo: o Nordeste. A cada seca que ocorre no Nordeste Brasileiro (NEB), se registra racionamento hídrico, perda de safras, morte de animais e fome de parte da população. Os impactos da seca provocam grande êxodo rural para as cidades litorâneas do NEB e até mesmo para grandes centros urbanos do país. Estudos diversos foram conduzidos para entender a dinâmica da seca no NEB. É conhecido que a ocorrência do fenômeno é em parte modelada pela El Niño Oscilação Sul (ENOS) e parte pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical. Tais fenômenos oceânicos de variabilidade lenta permite antecipar com certa qualidade os acumulados de chuva e a temperatura média dos meses seguintes. Este trabalho analisou a habilidade preditiva da precipitação com ênfase na seca meteorológica no Nordeste Brasileiro a fim de sedimentar uma metodologia que contribua com o enfretamento da seca utilizando os produtos operacionais mais avançados do conjunto de modelos da América do Norte. De forma geral os resultados mostram que a habilidade preditiva da precipitação no NEB é suficientemente boa para gerar previsões operacionais na região. O setor norte do NEB mostrou os melhores resultados entre os períodos analisados. Neste setor a habilidade preditiva da precipitação se estende para além do seu período chuvoso. Seguido do setor norte vem os setores leste e sul com considerável destreza nos seus respectivos períodos chuvosos. A região central por sua vez, representada por parte do semiárido nordestino, mostrou os piores resultados, onde a destreza das previsões de precipitação neste setor é particularmente difícil. Sendo assim as condições de precipitação associadas a seca meteorológica no NEB tem razoável potencial de previsão e o modelo pode ser usado de forma operacional para auxiliar ações de enfretamento da seca.

Palavras-chave: Habilidade preditiva, Previsão climática, Seca meteorológica, Correção de Viés Estatístico, Nordeste Brasileiro.

ABSTRACT

Of the adverse natural phenomena, drought is what most affects society because it acts over large territorial extensions and lasts for long periods of time. Drought is a phenomenon characterized by a water deficit long enough to impact on edaphic, meteorological, water and social factors. The prediction of drought has contributed worldwide to actions to mitigate the impacts of the phenomenon and increase resilience. Brazil has the largest inhabited semi-arid territory in the world: the Northeast. With each drought that occurs in the Northeast of Brazil (NEB), water rationing, loss of crops, death of animals and hunger of part of the population are registered. The impacts of drought provoke a great rural exodus to the coastal cities of NEB and even to large urban centers in the country. Several studies have been conducted to understand the dynamics of drought in NEB. It is known that the occurrence of the phenomenon is partly modeled by the El Niño Southern Oscillation (ENOS) and partly by the Sea Surface Temperature (SST) of the Tropical Atlantic. Such oceanic phenomena of slow variability allow to anticipate with some quality the accumulated rain and the average temperature of the following months. This work analyzed the predictive ability of precipitation with an emphasis on meteorological drought in Northeast Brazil in order to sediment a methodology that contributes to coping with drought using the most advanced operational products of the North American model set. In general, the results show that the NEB precipitation predictive ability is good enough to generate operational forecasts in the region. The northern sector of NEB showed the best results between the periods analyzed. In this sector, the predictive ability of precipitation extends beyond its rainy season. Followed by the northern sector comes the eastern and southern sectors with considerable dexterity in their respective rainy periods. The central region, in turn, represented by the northeastern semi-arid region, showed the worst results, where the dexterity of precipitation forecasts in this sector is particularly difficult. Thus, the precipitation conditions associated with meteorological drought in the NEB have reasonable forecasting potential and the model can be used in an operational way to assist actions to deal with drought.

Keywords: Predictive ability, Climatic forecasting, Meteorological drought, Statistical bias correction, Northeast of Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de mortes em países durante eventos de seca severa. Fonte: Statista (2016).....	16
Figura 2 - Mapa de Localização do Nordeste Brasileiro com a delimitação dos estados (Siglas) e da região do semiárido (Contorno azul).	23
Figura 3 - Domínio do preditor X e do predictando Y (Acima) e (Abaixo) processo de redução do número de variáveis (pontos de grade) para obter séries independentes (ortogonais entre si).	28
Figura 4 – Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e (d; SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre NDJ.	33
Figura 5 - Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e (d; SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre FMA.	34
Figura 6 - Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e (d; SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre MJJ.	35
Figura 7 - Correlação de Pearson entre SPI3 observado e previsto pelo NMME-ACC no domínio do NEB no intervalo de 1082-2010 nos trimestres a) NDJ, b) FMA e c) MJJ. Valores a acima de 0.33 são considerados estatisticamente significantes com nível de confiança de 5%.....	36
Figura 8 - Raiz quadrada do erro médio entre SPI3 observado e previsto pelo NMME-ACC no domínio do NEB no intervalo de 1082-2010 nos trimestres a) NDJ, b) FMA e c) MJJ.	37
Figura 9 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre NDJ.....	38
Figura 10 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre FMA.	39
Figura 11 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre MJJ.	40
Figura 12 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre NDJ.....	40
Figura 13 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre FMA.....	41
Figura 14 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre MJJ.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias de seca definidas pelo National Integred Drought Information para caracterização de intensidade.	30
Tabela 2 - Valores de SPI usados como referência das classes de seca para calcular a probabilidade de referência.	31

LISTA DE ABREVIACOES

NEB – Nordeste Brasileiro

NMME – *North American Multi Model Ensemble*

RNAs – Redes Neurais Artificiais

ACC - Análise de Correlaces Canônicas

RMSE – *Root Mean Square Error*

BSS – *Brier Skill Score*

ROCS - *Relative Operating Characteristic Score*

PDSI – *Palmer Severity Index*

PDSIac – *Autocalibrated Palmer Severity Index*

SPI – Standard Precipitation Index

MOS – *Model Output Statistics*

MCGs – Modelos de Circulao Geral

NDJ – Novembro, Dezembro, Janeiro

FMA – Fevereiro, Março, Abril

MJJ – Maio, Julho, Junho.

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

VCAN – Vrtice Ciclônico de Médios Níveis

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ENOS – El Niño-Oscilaco Sul

DP – Dipolo do Atlântico

DOL – Distúrbio Ondulacrio de Leste

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IDMP - *Integrated Drought Management Programme*

OMM – Organizao Meteorológica Mundial

ARIMA - *Autoregressive integrated moving average*

WNN - *Wavelet Neural Network*

SVR - *Support Vector Regression*

CPT – Climate Predictability Tool

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. SECA NO MUNDO.....	16
3.2. A SECA NO NORDESTE BRASILEIRO	17
3.3. FONTE DE PREVISIBILIDADE	18
3.4. AVANÇOS NA PREVISÃO DE SECA	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. DADOS E ÁREA DE ESTUDO	22
4.2. ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO NORMALIZADA	23
4.3. NORTH AMERICAN MULTI MODEL ENSEMBLE (NMME)	25
4.4. CORREÇÃO DE VIÉS POR CORRELAÇÃO CANÔNICAS	26
4.5. MÉTRICAS DE HABILIDADE	28
Avaliação determinística.....	29
Avaliação probabilística.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1. Análise dos modos	32
5.2. Previsão determinística	35
5.3. Previsão Probabilística.....	37
6. CONCLUSÕES.....	43
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Dos fenômenos naturais adversos, a seca é o que mais afeta a sociedade por atuar sobre grandes extensões territoriais e perdurar por longos períodos (MARENGO et al., 2016). De forma bem geral, seca é caracterizado como um período suficientemente longo de deficiência hídrica para impactar significativamente aspectos edáficos, meteorológicos, hidrológicos e sociais (WILHITE & GLANTZ, 1987; CUNHA et al, 2015; CUNHA et al, 2018; MARENGO et al, 2018; ALVALA et al, 2018; MARTINS et al, 2018). E por tanto, é um fenômeno de difícil caracterização do seu início, extensão espacial-temporal e fim, o que dificulta muito sua monitoração (VICENTE-SERRANO, 2010). Do ponto de vista local, a seca é um fenômeno que está além do escopo da climatologia e passa ser também um fenômeno socioeconômico (Finan & Nelson, 2001). A vulnerabilidade da sociedade depende da interação de diversos fatores como população, convívio social, política, cultural, tecnológica, padrões de uso do solo, uso da água, desenvolvimento econômico e diversidade de economia de base (SPINONI et al, 2013).

Há um interesse especial no estudo da seca no Nordeste Brasileiro (NEB) por ser a região seca mais populosa do mundo, com aproximadamente 35 milhões de habitantes e uma densidade populacional de aproximadamente 34 habitantes por quilometro quadrado (IBGE, 2010). O fenômeno da seca afeta principalmente a população que reside na região semiárida localizada na porção mais central do NEB (Fig.1), criando cenários que ameaçam a segurança hídrica, alimentícia e energética. Mais recentemente, a seca dos anos de 2010-2016 foi a mais duradoura e severa já registrada nas últimas décadas no NEB, o que intensificou o interesse da comunidade científica em estudar o fenômeno e seus impactos na região (MARENGO, 2016; BRITO, 2017)

Trabalhos notáveis foram realizados para a região NEB contribuindo para o entendimento sólido de mecanismos meteorológicos causadores de secas (MOURA & SHUKLA, 1981; NAMIAS, 1972; HASTENRATH, 2006; MARENGO et al., 2013), os aspectos sociais e políticos envolvidos para aumentar a resiliência da população (LEMOS et al., 2002; LEMOS et al., 2007; NELSON & FINAN, 2009) e impactos do fenômeno em culturas diversas (Martins et al., 2018). Outros estudos avaliaram a dinâmica e a mudança dos padrões de seca no NEB usando índices que incorporam variáveis como precipitação, temperatura e evapotranspiração (Canamari et al., 2015; Brito et al. 2017) e outras características estatísticas mais específicas da seca (Awange et al., 2016).

No campo da previsão da seca, Hastenrath et al. (1984) avaliaram o desempenho de modelos de regressões utilizando temperatura da superfície do mar, velocidade do vento e pressão em regiões-chaves do oceano para previsão de seca no NEB em escalas temporais que partem de 2 meses até 7 meses, alcançando uma taxa de acerto de 41-62% de acertos. O modelo conseguiu adiantar a seca extrema de 1958. Porém, mudanças abruptas nos padrões de circulação da atmosfera provocavam erros nas previsões.

Todos esses trabalhos fornecem informações úteis para a gestão de risco da seca. Porém, há espaço para avançar na previsão de ocorrência, duração e intensidade de secas no NEB. A previsão deste fenômeno é extremamente útil no NEB para melhor planejamento da cultura, ações de mitigação do impacto da seca por parte do governo, melhor gerenciamento do seguro safra e etc. Muitos métodos foram propostos ao redor do mundo para prover previsões de seca utilizando modelos dinâmicos ou estatísticos. Jalakamali et al. (2015) aplicou modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs), sistemas de inferência Fuzzy, máquinas de vetores de suporte e modelos autoregressivos para previsão de seca no Iran. Marj e Meijerink (2011) incorporaram observações de satélite e índices climáticos como entrada de RNAs para previsão de seca. Madadgar e Moradkhani (2013) desenvolveram um sistema probabilístico utilizando a autoregressão dos índices de seca com cópulas bayesianas para previsão de seca hidrológica no rio Colorado (EUA). Madadgar et al. (2016) desenvolveu um sistema híbrido de previsão de seca utilizando saídas do conjunto de modelos da América do Norte (North American Multi Model Ensemble - NMME) e um modelo empírico baseado em cópulas bayesianas para o domínio do setor oeste do EUA.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a habilidade preditiva da precipitação com ênfase nas condições de seca meteorológica no domínio do NEB do ponto de vista determinístico e probabilístico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Fazer correção de viés do conjunto de modelos climáticos norte-americanos para previsão dinâmica da precipitação com ênfase nas condições de seca no NEB nos trimestres Novembro-Dezembro-Janeiro, Fevereiro-Março-Abril e Maio-Junho-julho que representam os períodos chuvosos das três regiões de regime de precipitação homogênea do NEB;
- 2 Gerar e avaliar previsões probabilísticas baseadas nos níveis de seca definidos pelo National Integrated Drought Information;
- 3 Avaliar a habilidade do sistema em prever precipitação de forma determinística e probabilística;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SECA NO MUNDO

A seca tem se tornado uma preocupação cada vez mais frequente pela comunidade científica. Segundo o reporte especial do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) para um aquecimento da temperatura global de 1.5 °C, publicado em 2018, se espera entre vários casos de extremos climáticos um aumento da frequência de secas e diminuição da disponibilidade hídrica em algumas regiões do planeta. Os efeitos devastadores de grandes secas já foram observados no período moderno. O *Statista Research Department* (2016) reuniu dados para ilustrar o maior número de mortes devido a secas severas ocorridas entre 1900 e 2016 (Fig.1). No gráfico se destaca a seca de 1928 na China que causou a morte de 3 milhões de pessoas.

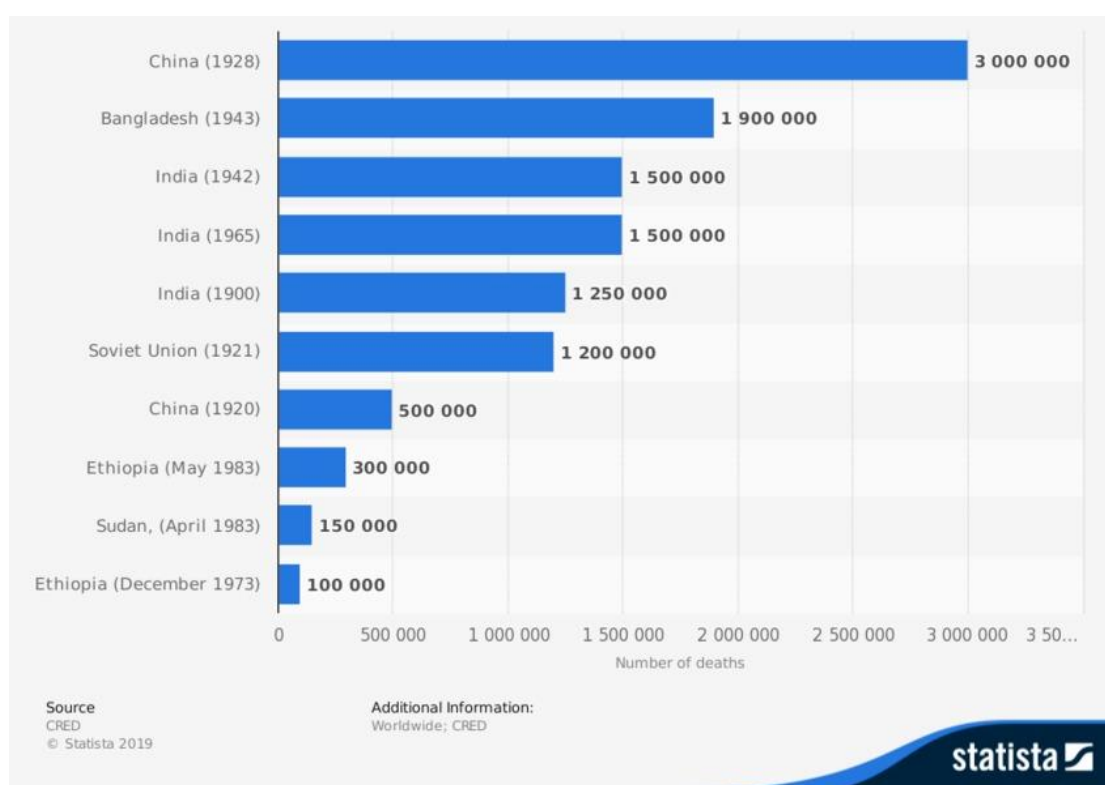


Figura 1 – Número de mortes em países durante eventos de seca severa. Fonte: Statista (2016)

Os efeitos em outros setores são igualmente devastadores. Mais recentemente uma forte seca no ano de 2017 causou perdas significativas nos países banhados pelo rio Danúbio. 51 000 ha de terras de plantação foram perdidas na Hungria, a Áustria teve prejuízo de 140 milhões de euros devido a morte de peixes, a Bósnia e Herzegovina tiveram prejuízos de 126

milhões de euros e perdas de 40% na produção energética, na Romênia o fluxo do rio Danúbio reduziu 60% causando altos preços da eletricidade e problemas no setor de transporte e na Sérvia somando os problemas com agricultura, seca hidrológica e problemas de produção elétrica tiveram um prejuízo de mais de 1 bilhão de euros (Better Prepared for Drought- Danube Drought Strategy, 2019).

As tendências de seca observadas até agora evidenciam um claro aumento global relacionado com as mudanças climáticas. Geng et al. (2015) em seu estudo mostrou que as zonas agrícolas globais com alto risco de seca tiveram um salto de aproximadamente 27% num período de 1980 a 2008. Spinoni et al. (2013) avaliou a tendência da frequência, duração e intensidade de seca para todo o globo e notou aumento significativo em todas as componentes no período 1951-2010. Apesar disso o trabalho mostrou tendências negativas na frequência de secas no hemisfério norte. Vicente-Serrano et al. (2020) avaliou as tendências de seca na Europa Ocidental sob a perspectiva de tendências de curto e longo prazo utilizando séries centenárias que cobriam o período 1851-2018. De forma geral não se observou tendências significativas de longo prazo na Europa Ocidental, por outro lado as tendências de curto prazo nos últimos anos são negativas e significantes apontando para a diminuição da frequência de secas no setor. Este resultado está em concordância com o trabalho anteriormente citado. Gallant et al. (2014) analisou séries de índices compostos de severidade de seca no Estados Unidos, Austrália e Europa por serem de extensões “continentais” e encontrou tendências significativas na persistência de extremos de seca nas três regiões. McGree et al. (2016) verificou tendências amplamente positivas no território das Ilhas do Pacífico e no nordeste da Austrália. Como esforço para mitigar os efeitos globais da seca a Organização Meteorológica Mundial (OMM) em parceria com outros órgãos e institutos formaram o Programa de Gestão Integrada da Seca (*Integrated Drought Management Programme – IDMP*) que reúne dados e informações de todos os países para auxiliar na previsão e ação contra os efeitos da seca.

3.2.A SECA NO NORDESTE BRASILEIRO

O NEB é considerado a região semiárida mais densa do mundo, com uma densidade populacional de 34 habitantes por quilômetro quadrado (MARENGO, 2008). Isso implica em uma considerável vulnerabilidade de população a eventos de seca. A ação da seca sobre o nordestino é tamanha que influencia diretamente na sua cultura, onde diversas obras de literatura como o quadro *Retirantes* de Cândido Portinari (1944) e o livro *Vidas Secas* de

Graciliano Ramos (1938) que expressaram os problemas sociais provocados pelo fenômeno: fome, escassez hídrica, êxodo rural, degradação do solo e outros. Apesar destes problemas serem documentados a quase um século, os métodos de mitigação da seca foram inconsistentes por muitos anos (KENNY, 2010).

A seca faz parte da variabilidade interanual do NEB e deve continuar segundo as projeções climáticas para cenários de mudanças climáticas devido ao efeito estufa (EAKIN et al. 2014). Segundo Rocha et al. (2019) houve um aumento significativo na intensidade da seca no setor nordeste do NEB entre os anos de 1980 e 2015. Cunha et al. (2018) avaliou a tendência de ventos de seca no NEB utilizando dados de alta resolução para discretizar efeitos regionais. O autor notou aumento significativo na frequência de eventos de seca localizado principalmente no setor norte do NEB. Tomasella et al. (2018) avaliou a tendência de desertificação do solo no NEB no período de 2000-2016 utilizando imagens de NDVI. O autor notou aumento significativo na aridez do solo e expansão da área da caatinga. Tendências de desertificação indicam que o NEB pode deixar de ser uma área semiárida para árida. Mariano et al. (2018) confirmou a degradação da vegetação do NEB por conta da ação da seca. Ainda segundo o autor tal degradação está provocando a redução da evapotranspiração do solo, que é uma componente importante para o balanço hídrico. O autor destaca que a seca severa que iniciou em 2012 e durou até 2016 foi crucial para essa degradação acentuada.

As projeções climáticas para o NEB segundo Marengo et al. (2017) são corroborados com os resultados de Mariano et al. (2018). Segundo o autor se espera diminuição da evapotranspiração do NEB, noites mais quentes, aumento da temperatura média no NEB e diminuição da precipitação em alguns setores da região. Por outro os modelos mostram tendências de aumento da precipitação para outros setores. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Rocha et al. (2019). Isso evidencia um aumento nas ocorrências extremas. Ou seja, secas e inundações mais intensas.

3.3.FONTE DE PREVISIBILIDADE

A distribuição da chuva no NEB não é regular. Pode se dividir a região em três setores com variabilidade pluviométrica homogênea: a porção central e sul tem 60% da sua precipitação anual desaguando nos meses de novembro a janeiro, o norte do NEB e a uma porção da parte oeste tem mais de 60% da sua precipitação ocorrendo entre os meses de fevereiro a abril, enquanto o setor do litoral leste tem mais de 50% da sua precipitação anual concentrada entre os meses de maio a julho (STRANG, 1972).

A variabilidade interanual do NEB é explicada principalmente pela influência do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e Dipolo do Atlântico (DA). O aquecimento no Pacífico associado ao ENOS faz com que o ramo descendente da célula de Walker se desloque para leste e se posicione sobre o NEB, gerando uma zona de inibição da precipitação (WALKER, 1928). Zhou e Lau (2001) mostram que em anos de ENOS não só o ramo descendente da célula de Walker está presente sobre o NEB, mas também há influência da célula de Hadley. Em anos de La Niña o efeito oposto acontece: o ramo descendente da célula de Walker se posiciona sobre a Amazônia e as condições para formação de chuva no NEB ficam mais favoráveis. Segundo a literatura, apesar do ENOS ser o principal fenômeno modulador da variabilidade interanual na maior parte do planeta, no NEB ele pode ter o papel de modulador secundário. Hastenrath e Heller (1977) observaram padrões de anomalias de TSM sobre o oceano Atlântico Tropical e associaram a anomalias de precipitação no NEB. A diferença de temperatura do mar entre o Atlântico Sul e o Norte regulam a intensidade das altas subtropicais de cada hemisfério, por consequência exercem influência sobre a intensidade dos ventos alísios e na posição na Zona de Convergência Intertropical.

Segundo Molion e Bernado (2002) os mecanismos moduladores da variabilidade intrasazonal da chuva no NEB podem ser divididos em duas categorias principais: Fenômenos de grande escala, responsáveis pela maior parte da variabilidade climática, e fenômenos de meso e pequena escala. A zona de convergência intertropical (ZCIT) é o principal fenômeno de grande escala que atua sobre o setor norte do NEB (HASTENRATH, 1985, FERREIRA et al., 2005). O sistema é caracterizado pela extensa nebulosidade causada confluência dos ventos alísios na região equatorial. O eixo da ZCIT varia de latitude de acordo com a época do ano. No verão, com o maior aquecimento da temperatura do mar no Atlântico Sul, o eixo da ZCIT se desloca para o hemisfério sul impulsionado pelo anticiclone tropical do hemisfério norte, atingindo o setor norte do NEB (UVO, 1989). Com o eixo da ZCIT “apontado” para o norte do NEB, durante os meses de março a abril, pacotes de instabilidades são guiados pelo fenômeno, provocando chuva na região.

No sul do NEB o principal sistema a influenciar o período chuvoso da região é a incursão profunda de sistemas frontais ou seus restos (KAUSKY, 1979; MOLION & BERNADO, 2002). Segundo Oliveira (1986) a convecção local frequentemente se associa com a passagem de sistemas frontais. Segundo o autor, eventos de frentes continentais desencadeiam uma banda de nebulosidade com eixo deslocado (Noroeste-Sudeste) entre as latitudes 15S e 25S. Essa banda de nebulosidade é chamada de Zona de Convergência da América do Sul (ZCAS). O deslocamento da ZCAS para 12S-15S e seu tempo de duração

na ordem de dias é o que marca o período chuvoso do sul do NEB nos meses de novembro a março.

O fenômeno mais expressivo para o período chuvoso do setor leste do NEB é denominado de Ondas de Leste (OL); também conhecido por Distúrbios Ondulatórios de Leste, Perturbações Ondulatórias dos Alísios e Ondas Africanas; são caracterizadas como pacotes de instabilidade que se propagam pelo fluxo dos ventos Alísios partindo da costa oeste da África até o NEB durante o inverno do hemisfério sul (FERREIRA & DA SILVA MELO, 2005). Segundo Coutinho e Fisch (2007) OLs ocorrem durante todo o ano sobre o leste do NEB, porém sua ocorrência é intensificada nos meses de maio a agosto, marcando o período chuvoso do litoral leste do NEB.

Associado a outros fenômenos tropicais, o chamado Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), é outro fenômeno responsável por parte da precipitação anual em alguns setores do NEB (PINHEIRO et al., 2015). A chuva ocasionada pelo fenômeno depende da sua posição sobre a região. Como documentado por Morais (2016) e De Souza Ferreira et al. (2020), seu centro é caracterizado por estabilidade, enquanto os lugares do NEB localizados sobre a periferia do fenômeno sob recebem toda a chuva da área instável do fenômeno. VCANS pode atuar por até 8 dias e é o principal fenômeno de grande escala que provoca chuva na região central do NEB.

3.4. AVANÇOS NA PREVISÃO DE SECA

Uma das mais importantes ferramentas de enfrentamento da seca é as previsões do fenômeno. As previsões de seca quando conciliadas com o monitoramento do fenômeno formam um sistema de informações de grande confiabilidade para gerenciamento de crise. Para prever o fenômeno muitas classes de modelos têm sido usadas. Rahmat et al. (2017) validou um modelo estatístico baseado em cadeias de Markov para prever a seca em curto prazo de Victoria na Austrália. Zhang et al. (2020) comparou o desempenho de modelos autoregressivos integrados com médias móveis (*Autoregressive integrated moving average* - ARIMA), Redes Neurais de Ondeletas (*Wavelet Neural Network* – WNN) e Máquina de Vetor (*Vector Machine* - SMV) para previsão de séries de Índice de Precipitação Normalizada (Standard Precipitation Index – SPI) em Sanjiang Plain, China. Extraordinariamente o método ARIMA obteve resultados substancialmente melhores em comparação com as demais técnicas, mesmo sendo a técnica mais “rudimentar”. Dehe Xu et al. (2020) por outro uniu os modelos ARIMA e Regressão Vetorial de Suporte (*Support Vector Regression* – SVR) num único modelo híbrido para previsão de seca na província

chinesa de Henan. Os resultados mostraram boa habilidade preditiva do modelo para previsões de até 2 meses a frente. Outro método empírico e híbrido a mostrar resultados significativos foi o modelo combinado entre Transformação Empírica de Ondeletras (*Empirical Wavelet Transform* – EWT) e ARIMA validado por Shaari et al. (2018).

Apesar dos modelos estatísticos fornecerem boas previsões com pouco custo operacional, os modelos dinâmicos ou híbridos (que integram previsões de modelos dinâmicos e modelos estatísticos) tem sido os mais efetivos para se obter as melhores previsões de seca. Shin et al. (2019) aplicaram com sucesso redes Bayesianas para melhorar as previsões de diversos modelos dinâmicos para prever a seca hidrológica na Coreia do Sul e converte-las em previsões probabilísticas. Xu et al. (2018) melhoram consideravelmente as previsões brutas do North American Multi Model Ensemble utilizando o método SVR e um modelo de Média Baysiana (MB) para o território da China. Os produtos do NMME foram utilizados como entrada de um modelo hidrológico para previsão de seca hidrológica na bacia do rio Han, na China, no trabalho de Ma e Ye (2019). Para previsões de 1 a 4 meses de antecedência o modelo mostrou ótima habilidade preditiva. Ainda para a China, o modelo Climate Forecast Sistem versão 2 foi validado para toda superfície continental chinesa para previsão do SPI6 no trabalho de Lang et al. (2020). O modelo sozinho conseguiu produzir previsões úteis ao gerenciamento de seca.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.DADOS E ÁREA DE ESTUDO

O Nordeste Brasileiro se encontra numa região equatorial entre os paralelos 1-21°S e os meridianos 32-49°W. A região ocupa uma área de aproximadamente 1,800,55 km², que representa 20% do território do Brasil (Fig.2). Possui nove estados. São eles: Alagoas (AL), Piauí (PI), Maranhão (MA), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA). A vegetação característica da costa leste é mata atlântica. A vegetação presente na porção central do NEB (região semiárida) é a caatinga. A região de transição entre a caatinga e a mata Atlântica é chamada de Agreste. A topografia da região unido com a atuação de variados sistemas meteorológicos provocam uma grande variabilidade climática. O NEB possui três áreas de variabilidade pluviométrica homogênea: a porção central, o norte e a parte leste (CAVALCANTE, 2016; MARENGO et al, 2017 & ALVALÁ et al., 2017). A região do semiárido é caracterizado como a região onde a precipitação anual é menor que 700 mm.

Faram utilizados dados de precipitação em grade proveniente do Global Precipitation Climatology Center que fornece dados de 1900 até 2010 numa grade de resolução 1x1. Os dados do GPCC são gerados a partir de observações de superfície sem considerar dados de satélite. O método de interpolação utilizado é o Angular Distance Weithing, que consiste em ponderar as estações próximas aos pontos estimados considerando o ângulo entre o ponto e as estações e considerando o decaimento de correlação em função da distância de cada estação de superfície. Alguns trabalhos validaram o produto do GPCC para algumas regiões do Brasil. Limberger e Silva (2018) avaliaram o produto para a região Amazônica. Barbosa et al. 2020 validaram o produto para a sub bacia do rio Guamá no setor nordeste do estado do Pará. Ambos os trabalhos tiveram resultados satisfatórios que qualificam a base de dados para este trabalho.

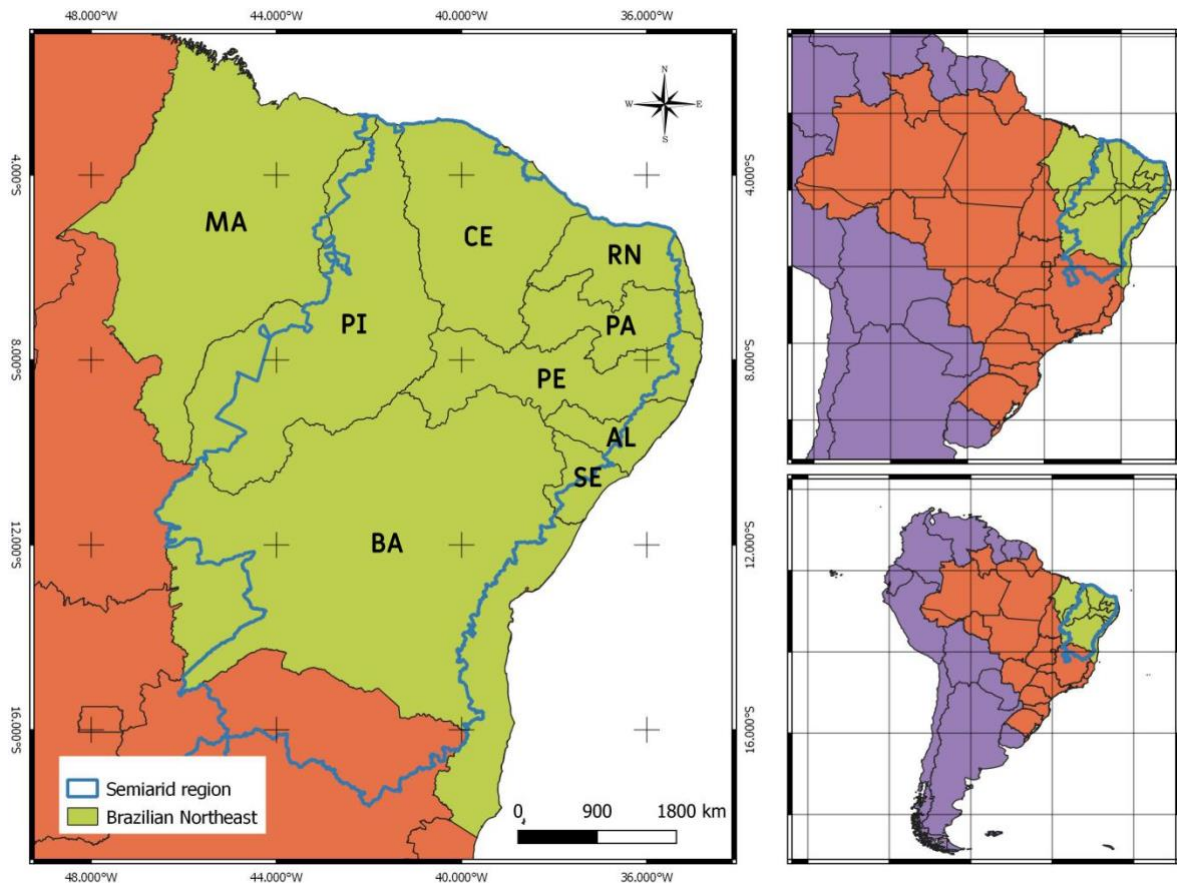


Figura 2 - Mapa de Localização do Nordeste Brasileiro com a delimitação dos estados (Siglas) e da região do semiárido (Contorno azul).

4.2. ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO NORMALIZADA

Diversos índices foram criados com o objetivo de estudar a quantitativamente a seca. O Palmer Drought Severity Index (PDSI) foi o primeiro índice desenvolvido para essa finalidade e foi muito importante por incorporar os efeitos da evapotranspiração. Como os parâmetros do PDSI eram fixos e tinham sido originalmente calculados para o EUA, posteriormente foi definido o PDSI autocalibrado (PDSIac), que estimava seus parâmetros com base em características inerentes as séries (Wells et al., 2004). Porém, o PDSI e o PDSIac não permitiam análises em múltiplas escalas temporais. Sendo assim, McKee et al. (1993) desenvolveu o Standard Precipitation Index (SPI). A característica principal do SPI é assumir que a precipitação é a variável chave para a classificação da seca. O cálculo do SPI é baseado em longas séries de registros de precipitação em diferentes escalas de tempo, como 1, 3, 6 ou 12 meses. Desde a sua criação, diversos trabalhos utilizaram o SPI para estudos espaciais e temporais da seca (LIVADA & ASSIMAKOPOULOS, 2007; LABUDOVÁ et al., 2016; PRABNAKORN et al., 2019) e diversos centros ambientais tornaram o SPI o índice oficial para monitorar o fenômeno (CPTEC, 2014; CMA, 2015).

Além disso, o SPI é o índice de seca recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2012).

O SPI é baseado em técnicas estatísticas aos quais podem quantificar o grau de seca comparando um período de chuva acumulada num intervalo temporal de 1 a 24 meses com o acumulado histórico de chuva para o mesmo período. Por exemplo, um SPI de 3 meses para julho irá comparar o acumulado observado nos meses de maio, junho e julho com o acumulado histórico para o mesmo período. Nesse caso de SPI para três meses, o índice será denominado de SPI3. Normalizando a precipitação é possível comparar estações em locais diferentes com variabilidades distintas, permitindo uma melhor análise da distribuição espacial da seca e sua frequência.

Para calcular o SPI, o acumulado de precipitação observado (X_t) é filtrado por uma função de distribuição de probabilidade gamma ($G(X_t)$) com os parâmetros previamente estimados. Os parâmetros de forma (α) e de escala (β) da função gamma é estimado pelo método de máxima verossimilhança. Como a função gamma é indeterminada para $X_t = 0$, a função de filtro para os valores de X_t é dada por:

$$H(X_t) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{para } q = (m/N)$$

onde m é o número de observações 0, N o número de observações da série e G_x a função gamma.

Posteriormente $H(X_t)$ é transformada numa função gaussiana para obter o valor final do SPI seguindo as equações:

$$SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0.5 < H(x) < 1$$

com

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0.5 < H(x) < 1$$

$$C_0 = 2.515517 \quad ; \quad C_1 = 0.802853 \quad ; \quad C_2 = 0.010328 \quad ; \quad d_1 = 1.432788 \quad ; \quad d_2 = 0.189269 \quad ; \\ d_3 = 0.001308$$

O cálculo das séries de SPI a partir dos dados do GPCC foram feitos utilizando o pacote *SPEI* em linguagem de programação R. O pacote foi desenvolvido por Vicente e Serrano (2010) para cálculo do Índice de Precipitação e Evapotranspiração Normalizados e SPI.

4.3. NORTH AMERICAN MULTI MODEL ENSEMBLE (NMME)

O NMME é um esforço de várias agências para fornecer um conjunto operacional de previsões de modelos climáticos globais (KIRTMAN et al., 2014). O projeto fornece previsões de nível global proveniente dos centros de previsões do EUA e Canadá (BOLINGER et al., 2017). No NMME, estão incluídas as previsões do Sistema de Previsão do Clima, versão 2 (CFSv2; SAHA et al., 2014); o Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; ZHANG et al., 2007) e os modelos GFDL Forecast-Oriented Low Ocean Resolution (FLOR; JIA et al., 2015); o Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas (NCAR); o Community Climate System Model, versão 4 (CCSM4; GENT et al., 2011); o National Aeronautics and Space Administration (NASA) e Goddard Earth Observing System, versão 5 (GEOS-5), dados do oceano e modelos de gelo marinho e sistemas de assimilação de dados (VERNIERES et al., 2012; BOROVNIKOV et al., 2017); e dois modelos do Canadian Meteorological Centre (Third Generation Canadian Coupled Global Climate Model (CanCM3) e Fourth Generation Canadian Coupled Global Climate Model (CanCM4); MERRYFIELD et al., 2013). O NMME é o resultado da integração desse conjunto de modelos. A lista completa de modelos utilizados é descrita em detalhes por Kirtman et al., (2014). O hindcast do NMME abrange o período de 1982 a 2010. As previsões do NMME começam sempre no dia 15 do mês antecedente ao trimestre da previsão. Ou seja, a rodada para a previsão do trimestre FMA é iniciada no dia 15 de janeiro, a rodada para a previsão do trimestre MJJ é iniciada no dia 15 de abril e a previsão para o trimestre NDJ é iniciada em 15 de outubro. A resolução espacial das previsões é de $1^\circ \times 1^\circ$. A previsão do NMME consiste na média simples das previsões de todos os modelos apresentados anteriormente. Além disso é disponibilizado todos os modelos do conjunto individualmente. Neste trabalho foi utilizado a média de todos os modelos para gerar as previsões de precipitação no NEB. Ou seja, todos os modelos usados tem igual importância.

4.4. CORREÇÃO DE VIÉS POR CORRELAÇÃO CANÔNICAS

O desempenho dos MCGs a nível local é frequentemente pobre por possuírem um erro sistemático chamado de viés. Tendo isso em vista, o erro sistemático de MCGs frequentemente precisam ser quantificados e calibrados. O método de tratamento desse viés é denominado na literatura por Estatística de Saída de Modelo (Model Output Statistics - MOS), termo definido por Glahn e Lowry (1972). MOS consiste em melhorar as previsões de MCGs utilizando relações estatísticas entre variáveis locais observadas e variáveis previstas pelo modelo. Frequentemente essas relações estatísticas encontradas por métodos de MOS tem um embasamento físico. Ou seja, os sinais de fenômenos que influenciam na previsão podem ser melhor detalhados quando aplicado métodos estatísticos que maximizem essa relação. Outra vantagem trazida pelo uso de MOS é aumentar a resolução espacial da previsão. Esse processo é chamado de redução de escala (*Downscaling*). Embora a redução de escala seja um método muito usado em ciências climáticas, neste trabalho foi realizado somente a correção de viés, sem utilizar o método dado o fato da base do GPCC ter a mesma resolução da saída dos modelos do NMME.

Inúmeros métodos de MOS estatísticos foram usados com sucesso para correção do viés de modelos ou *downscaling*. Sachindra et al., (2013) utilizou Máquina de Vetores de Suporte e Regressão Linear Múltipla para fazer *downscaling* do fluxo de captação do rio Bellfield na porção noroeste da Austrália. Alaya et al. (2016) desenvolveu um modelo baseado em Regressão Quantílica, Regressão Logística e Copula Gaussiana para *downscaling* da precipitação, temperatura máxima e mínima na província de Quebec, Canadá. Benestad et al. (2015) encontrou significativa melhora em previsões de MCGs em *downscaling* da temperatura média em partes do território da Europa e China utilizando análise de componentes principais.

Para este estudo foi escolhido aplicar Análise de Correlações Canônicas (ACC). ACC é um método estatístico que identifica um par de padrões em dois conjuntos de dados multivariados e gera variáveis transformadas que projetam os padrões das séries originais (WILKS, 2010). ACC é aplicado como método de *downscaling* e MOS em inúmeros trabalhos (MANZANAS et al., 2018). Dan et al., (2016) utilizou CCA para *downscaling* de projeções de precipitação diária do CMIP5 para a bacia do rio Yangtze-Huaihe, China. Tiwari et al. (2019) comparou *downscaling* proveniente de métodos estatísticos (ACC) e métodos dinâmicos (Modelo Regional) para o norte da Índia e concluiu que os dois métodos

melhoram significativamente a previsão dos MCGs. Tomozeiu e Pasqui (2017) investigaram a mudança da temperatura do ar em áreas agrícolas da Itália utilizando cenários futuros com escala reduzida por ACC.

ACC pode ser utilizada de duas formas, como definido em Barnston e Tippet (2017), a primeira como um modelo de previsão puramente estatístico que relaciona padrões de anomalias em observações recentes (por exemplo, anomalias na temperatura da superfície do mar) a padrões de anomalia climática em um trimestre subsequente (por exemplo, anomalias de precipitação) com base em um período extenso de hindcast, sem envolvimento de nenhum modelo dinâmico (BARNETT & PREISENDORFER, 1987; BARNSTON, 1994; JOHANSSON et al. 1998). A outra maneira de se utilizar ACC, e que foi usada nesta pesquisa (ver Fig. 1 de BARNSTON E TIPPET, 2017), foi relacionar os dados brutos da previsão de precipitação proveniente do NMME para os trimestres chuvosos do NEB inicializados no mês anterior com as observações de SPI3 correspondentes para cada trimestre em um período de hindcast. O domínio preditivo para o NEB foi projetado para ser maior que o NEB (Fig.3 painel superior direito), enquanto o domínio preditor tentou abranger uma área grande suficiente para abarcar a maior parte dos fenômenos de baixa frequência que atuam sobre a variabilidade climática do NEB (Fig.3 painel superior esquerdo). As áreas do preditando e do preditor foram escolhidas baseadas nos resultados alcançados no trabalho de Barnston e Tippet (2017) ao utilizar as referidas dimensões de território.

Assim como descrito em Barnston e Tippet (2017), uma pré-ortogonalização é realizada utilizando análise de funções ortogonais empíricas (EOF), também denominada por Componentes Principais, de forma separada aos hindcasts do modelo (variável X, ou preditor) e nas correspondentes observações (variável Y ou preditando), e o conjunto das séries temporais de componentes principais de maior importância dessas EOFs é usada como entrada para a ACC (Fig.3 painel inferior). Esta metodologia reduz o número de variáveis usadas pela ACC preservando padrões de variabilidade mais coerentes (BARNETT & PREISENDORFER. 1987).

Para aplicar ACC foi utilizado o software *Climate Predictability Tool* (CPT). O CPT é uma ferramenta amplamente usada para fazer redução de escala de modelos climáticos (MANSON E TIPPETT, 2017; ESQUIVEL et al., 2018; HOSSAIN et al; 2019). O software aplica o pré-processamento de EOF antes do método ACC e depois estima o modelo por um processo de validação cruzada. Ou seja, o conjunto de dados (*hindcast*) para estimativa do

modelo é particionado em subconjuntos mutuamente exclusivos que alguns serão usados para estimar o modelo e o conjunto restante para validação. O método de validação cruzada se caracteriza por esse processo de treino e validação se repetindo até que todos os conjuntos tenham sido usados em algum momento para validar o modelo sem ter sido usado para treina-lo. Esse processo permite a ótima validação de um modelo utilizando todos os dados disponíveis para estimar os parâmetros (STONE, 1978 PICARD & COOK,1984, BROWNE, 2000). É muito útil para validação de previsões climáticas por ser ter séries de dados muito curtas para validar.

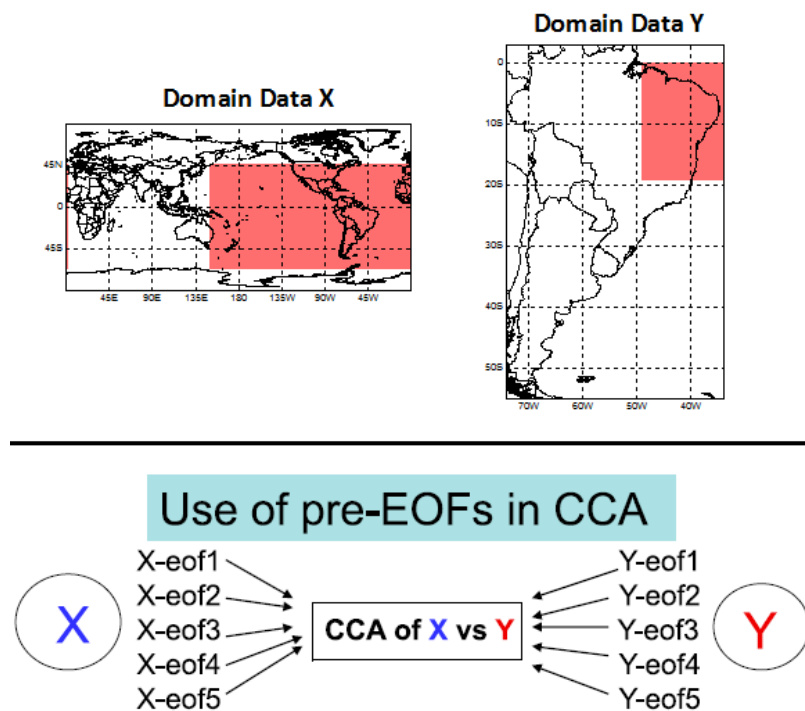


Figura 3 - Domínio do preditor X e do preditando Y (Acima) e (Abaixo) processo de redução do número de variáveis (pontos de grade) para obter séries independentes (ortogonais entre si).

Uma análise dos dois primeiros modos do preditor e preditando obtidos por EOF no processo de pré-processamento dos dados para aplicar ACC foi realizada para avaliar a natureza da destreza de previsão alcançada pelo modelo. A escolha dos dois primeiros modos se deu por mostrarem os padrões mais significantes para explicar a dinâmica fisicamente coerente que o NMME conseguiu alcançar. Os demais modos se mostraram padrões difíceis de associar com fenômenos conhecidos.

4.5.MÉTRICAS DE HABILIDADE

As previsões de seca no NEB serão avaliadas por diversos métodos que medirão a confiabilidade, acurácia e exatidão do modelo. As previsões provenientes do modelo serão de dois tipos: determinística e probabilística. Previsões determinísticas se refere a tentar

acertar o valor mais próximo de SPI que será observado no período seguinte. As métricas determinísticas irão dar um parâmetro da distribuição média da precipitação. Previsões probabilísticas se referem a probabilidade do SPI ser igual ou abaixo de um valor ou patamar crítico no período seguinte. As métricas probabilísticas medirão a capacidade do modelo em prever os extremos de seca. Os dois tipos de previsões podem servir a usuários distintos e sua natureza exige métricas de habilidade distintos. Todas as métricas apresentadas a seguir tiveram como referência principal Wilks (2010). Outros trabalhos foram usados como referência complementar (KHARIN & ZWIRS, 2003; FAWCETT, 2006; WEIGEL et al., 2007; BRADLEY et al., 2008; MA et al., 2018).

Avaliação determinística

1. Root Mean Square Erros (RMSE): RMSE é a diferença quadrática do erro médio entre valores previstos e observados. A métrica mensura o quão próximo do valor real o modelo consegue chegar. Quanto mais próximo de zero, melhor é a previsão. RMSE é uma métrica muito sensível ao erro, ou seja, ela tende a subestimar o poder preditivo de modelos. É uma característica bastante aproveitada dado que se um modelo demonstra valores de RMSE razoáveis, ele pode ser ainda melhor na prática. Na equação o_k representa os valores de SPI observado e y_k representa os valores de SPI previstos pelo modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2}$$

2. Coeficiente de Correlação de Pearson (r): Para mensurar a associação entre as variáveis previstas e observadas com um único valor, utilizamos o coeficiente de correlação de Pearson. Quanto mais o valor de r estiver perto da unidade, maior é a associação entre duas variáveis. Se o valor da unidade for -1, indica correlação inverna.

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}$$

Onde x_i é a previsão do modelo, y_i os valores de SPI observados, \bar{x} e \bar{y} as respectivas médias aritméticas de cada série.

Avaliação probabilística

As previsões probabilísticas de seca consistem na probabilidade do valor de SPI ser igual ou maior (menor) que um valor D pré-definido que represente um nível de seca. Diferente de previsões sazonais probabilísticas da precipitação e temperatura que é dado em tercís que representam valores abaixo, próximo e acima da normal climatológica, a previsão de seca é de natureza binária. Ou seja, o modelo prevê a probabilidade de uma seca de nível D ocorrer. Desta forma há uma flexibilidade e subjetividade nos resultados que podem ser processados pelo usuário final. A flexibilidade consiste em se obter a probabilidade de ocorrência do nível de seca que mais interessar ao usuário. A subjetividade consiste em o usuário definir qual o limiar da previsão considerar para que ações de enfrentamento sejam tomadas. Desta forma, avaliamos as previsões probabilísticas para os níveis de seca definidos pelo National Integrated Drought Information System dos Estados Unidos representados na tabela 1.

Tabela 1 – Categorias de seca definidas pelo National Integrated Drought Information para caracterização de intensidade.

Categoria	Intensidade	Limiares de SPI
D0	Fraca	-0.5 a -0.8
D1	Moderada	-0.8 a -1.3
D2	Severa	Acima de -1.3

1. Brier Score (BS): BS é essencialmente a média quadrática da diferença entre a previsão em probabilidade y_i e a observação o_i do fenômeno a ser previsto, onde o assume o valor 1 quando o evento ocorreu e 0 quando o evento não ocorreu (Eq.1). Quanto mais próximo de 0 for o valor de BS, melhor é o desempenho do modelo.

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_i - o_i)^2 \quad (1)$$

2. Brier Skill Score (BSS): O BS pode mensurar a precisão de uma previsão, mas para o resultado ser considerado relevante para uso operacional é preciso fazer alguma comparação relativa com alguma outra previsão de referência. O BSS consiste na mensuração de habilidade relativa de um modelo a um modelo de referência (Eq.2). A referência usada foi o BS obtido ao usar climatologia (BS_{ref}) como previsão de seca. O valor de BS_{ref} é dado pela distribuição normal padronizada do SPI. Como cada classe de seca contém um intervalo,

foi escolhido valores intermediários de SPI (Não necessariamente a média) para representar a classe. A partir desses valores de SPI foi calculado a probabilidade de referência (Tabela 2). Posteriormente a probabilidade de referência foi aplicada sobre a eq.1 para obter a BS_{ref} .

Tabela 2 - Valores de SPI usados como referência das classes de seca para calcular a probabilidade de referência.

Classe de seca	SPI de referência	Probabilidade de referência (%)
D0	-0.7	24
D1	-1	16
D2	-1.3	8

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (2)$$

3. Relative Operating Characteristic Score (ROCS): ROCS é uma métrica derivada da chamada Curva ROC (Relative Operating Characteristic Curve) que consiste na avaliação de habilidade do modelo discriminar com alta probabilidade a ocorrência e a não ocorrência de um evento comparando taxas de acerto e a taxas de falso alarme. A curva ROC é calculada plotando num plano cartesiano as taxas de acertos e taxas de falso alarme em função de limiares de probabilidade variando de 0 a 1. Integrando a curva ROC se obtém o valor ROCS. ROCS com valor igual ou inferior a 0.5 indica inabilidade preditiva, enquanto que ROCS igual a 1 indica previsão perfeita. Segundo alguns trabalhos, ROCS acima de 0.7 configurar boas discriminações das ocorrências para aplicações operacionais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise dos modos

A figura 4 exibe o padrão espacial dos dois primeiros modos principais do NMME (a e d) e do SPI no NEB (c e f) para o trimestre NDJ. Juntamente com o padrão espacial dos modos está incluindo as séries temporais dos modos (b e e). O padrão espacial marcado na região equatorial do Atlântico no primeiro modo do NMME (Fig. 4a) aponta para uma clara relação com o fluxo dos ventos alísios. Esse padrão é reforçado ao se observar o padrão do primeiro modo do SPI do nordeste (Fig. 4c) que mostra uma intensidade maior do seu modo no extremo norte do NEB. Observando as séries dos modos (Fig. 4b), nota-se que há uma clara tendência geral negativa nas séries. No final das séries há o que parece ser uma mudança para tendências positivas. Desta forma, o fenômeno associado ao modo pode ter ciclos interanuais definidos. Intensidade relativa alta do modo do NMME é visto também no Pacífico Sul. Essa região do Pacífico é reconhecida por exercer influência sobre as ondas de Rossby que se deslocam até e atuam sobre a América do Norte (MULLER & AMBRIZZI, 2007). Tal teleconexão pode se concretizar por meio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Tal hipótese é levantada por Lee et al., (2013). Ou seja, as ondas de Rossby ao exercer influência sobre a ASAS, por sua vez perturbam o fluxo dos ventos alísios. Porém, em NDJ o principal fenômeno gerador de chuva são os VCANs. O padrão espacial do modo 1 do NMME se relaciona também com a ocorrência de VCANs. Segundo Appenzeller et al., (1996) quebras de ondas de Rossby na alta troposfera sobre o Atlântico Sul podem levar a invasões de ar estratosféricos no NEB e conseqüentemente desencadear a formação de VCANs.

O segundo modo do NMME apresenta forte intensidade no Pacífico Equatorial (Fig. 4d). Tal padrão aponta para a influência do ENOS sobre o NEB. Sobre a maior parte do Brasil se observa intensidade inversa à observada no Pacífico central. Exceto no extremo sul do Brasil que há valores igualmente positivos. O padrão de influência do ENOS para o Brasil se encaixa no observado no mapa do modo 2 para o NMME, já que eventos de ENOS positivo tendem a causar secas no NEB e períodos de elevada precipitação no sul do Brasil, enquanto eventos de ENOS negativo tendem a causar o efeito oposto (CAVALCANTE, 1996; DE MELO, 1999; BERLATO et al., 2003).

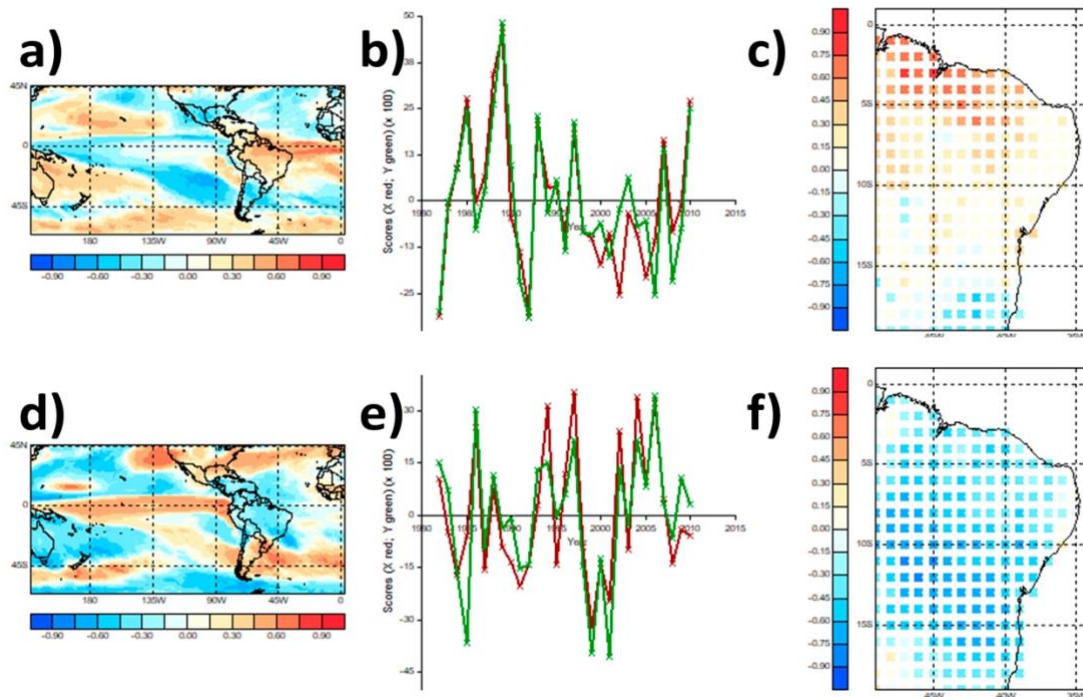


Figura 4 – Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e d); SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre NDJ.

A figura 5 exibe o padrão espacial dos modos principais do NMME (a e d) e SPI (c e f) do NEB no trimestre FMA. Na figura está também as séries temporais dos respectivos modos (b e e). O padrão espacial observado para o primeiro modo do NMME em FMA aponta claramente para a atuação da ZCIT, mostrando uma extensa faixa sobre a região equatorial onde tipicamente a ZCIT está localizada. Durante FMA a ZCIT está em sua localização máxima a sul. Portanto, como já mencionado, é o fenômeno mais importante para o NEB nesta época do ano. O modo 1 do SPI (Fig. 5c) mostra que o fenômeno tem uma expressiva influência sobre o NEB, chegando a alcançar a porção central da região.

O segundo modo do NNME e SPI por sua vez não mostra um sinal muito claro. A série de ambos os modos apresenta uma tendência negativa com uma possível inversão de crescimento no final. Dado o padrão espacial do modo 2 do SPI (Fig. 5f) com intensidade considerável no litoral leste, é possível que seja provocado pela atuação de distúrbios ondulatórios de leste (DOLs). Como já mencionado, segundo Coutinho e Fisch (2007) as DOLs ocorrem durante todo o ano, com máxima intensidade de março/abril a julho/agosto (GOMES et al, 2019). O modo pode indicar o início da intensificação das DOLS para o inverno.

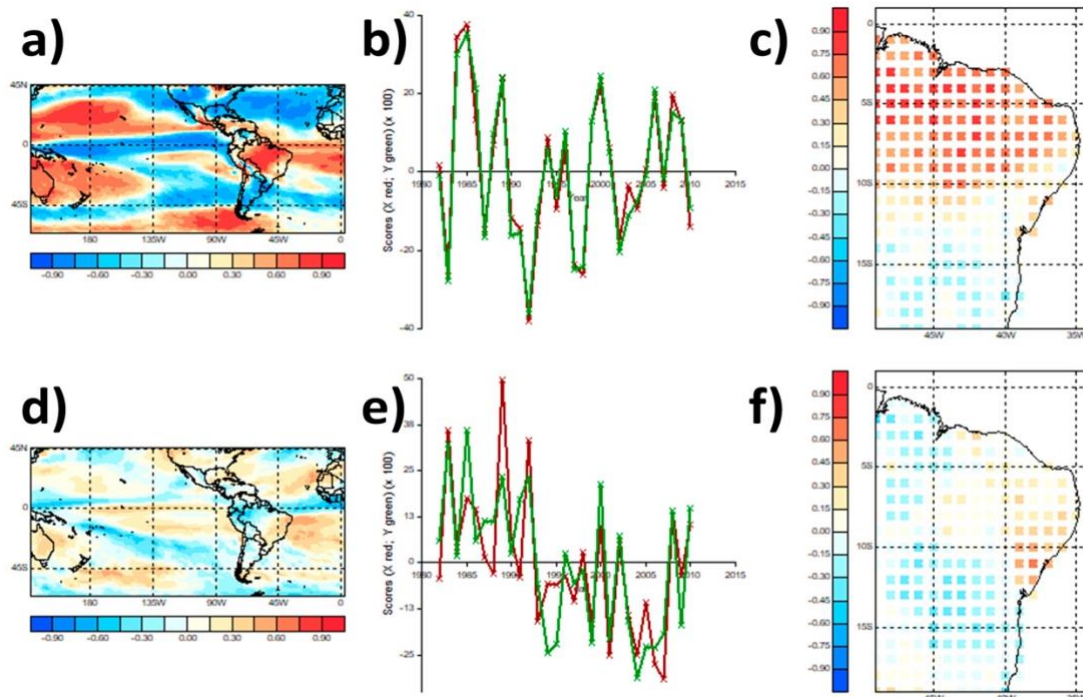


Figura 5 - Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e d; SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre FMA.

A figura 6 exibe os padrões espaciais dos modos principais do NMME (a e d) e SPI (c e f) do trimestre MJJ justamente com as séries temporais dos modos (b e e). O padrão espacial do primeiro do NMME (Fig. 6a) apresenta dois sinais expressivos: Um faixa intensa sobre o Pacífico e um gradiente que corta a América do Sul e o Atlântico sul. Os dois sinais podem está ligados por algum sistema que atua em latitudes mais extremas e avançam o continente. Neste caso, uma hipótese válida é que o sinal pode representar a atuação conjunta de incursão de sistemas frontais e intensificação da ASAS durante o inverno, gerando a aumento no número de episódios de DOLs. Segundo Carpenedo e Ambrizzi (2020), durante o outono e inverno nota-se uma anomalia no campo da pressão ao nível do mar associado a ASAS. Essa anomalia fortalece o ramo leste e oeste do sistema e por consequência intensifica a velocidade do vento na costa leste do NEB. Nota-se que o padrão espacial do modo 1 de SPI sobre o NEB cobre praticamente toda região, com maior destaque para a porção norte.

O modo 2 do NMME por sua vez mostra um sinal confuso (Fig. 6d). Há relativa intensidade evidente sobre o Pacífico Equatorial, o que pode estar relacionado a uma leve influência do ENOS sobre a região. De forma geral, essa e as demais imagem mostram que o Atlântico tem um papel primordial, seja por influência direta (Dipolo do Atlântico) ou indireta (perturbações no campo dos ventos Alísios).

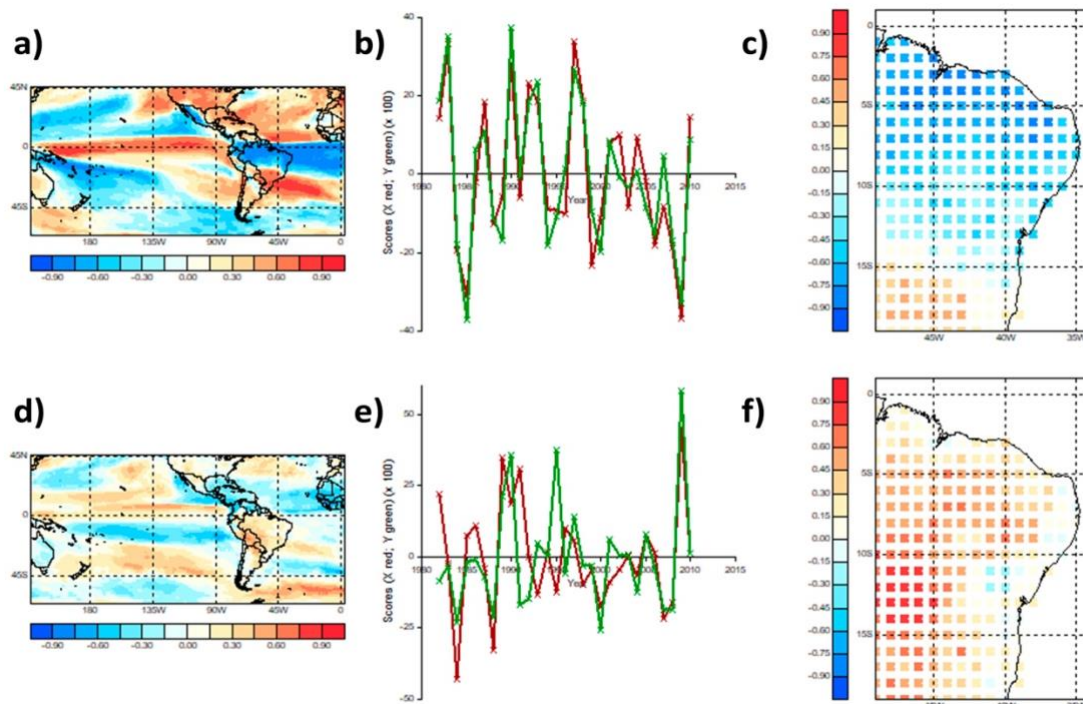


Figura 6 - Padrão espacial dos modos principais do NMME (a e d; SPI (c e f) e séries temporais dos modos (b e e) do trimestre MJJ.

5.2. Previsão determinística

A figura 7 exibe os valores de correlação entre o SPI3 e a previsão proveniente do NMME-ACC para o NEB nos três trimestres em análise. O trimestre NDJ (Fig.7a) se observa valores de correlação variando entre 0.3 e 0.8 em todo o território do NEB. O sul do NEB obteve os maiores valores (entre 0.6 e 0.8) assim como uma pequena região do setor nordeste do NEB. Neste trimestre praticamente todo território do NEB obteve correlação estatisticamente significativa. Os VCANs que se formam associados a Alta Bolívia e que atuam no verão do hemisfério sul podem explicar parte deste resultado (LOURENÇO et al., 1996). Segundo Ramírez (1999), os episódios de VCANs são mais intensos em anos de ENOS. Sendo um fenômeno bem correlacionado com o ENOS, modelos globais tendem a ter maior desempenho em modelar fenômenos de maior escala.

No trimestre FMA (Fig.7b) o setor norte da região apresenta valores de correlação estatisticamente significantes variando de 0.3 a 0.77. A porção noroeste obteve os maiores valores por ser o período de atuação máxima da ZCIT no hemisfério sul. Trabalhos como Machado e Rocha (2011) e Cruz et al., (2013) mostram que os modelos dinâmicos climáticos possuem boa destreza para simular a posição média da ZCIT. Desta forma, a previsão de precipitação proveniente do sistema é consequentemente melhor estimado.

No trimestre MJJ é observado valores de correlação estatisticamente significantes na porção central até a porção norte do NEB (Fig.7c). Nessa porção os valores oscilam entre 0.4 e 0.83. Os maiores valores são observados no litoral norte do NEB. Esse período é caracterizado pela ocorrência das Ondas de Leste que atuam principalmente no litoral do NEB, o que explica o melhor desempenho do modelo nessa região (MOTA et al., 1996; FERREIRA et al., 2005 e COUTINHO et al., 2007).

Mo e Lyon (2015) analisaram o potencial do NMME em prever a seca global. Os resultados de correlação de Pearson encontrado pelos autores foram bastante similares. Em NDJ os maiores valores estão concentrados no norte e no interior sul do NEB, em FMA concentrado no norte e em MJJ no norte e no leste. Em termos de valores de correlação, pelo fato dos autores terem também usado a base de dados do GPCC, os valores concordam com os encontrados neste trabalho. Valores semelhantes foram encontrados por Thober et al. (2015) ao analisar a destreza do NMME em prever a seca no continente europeu.

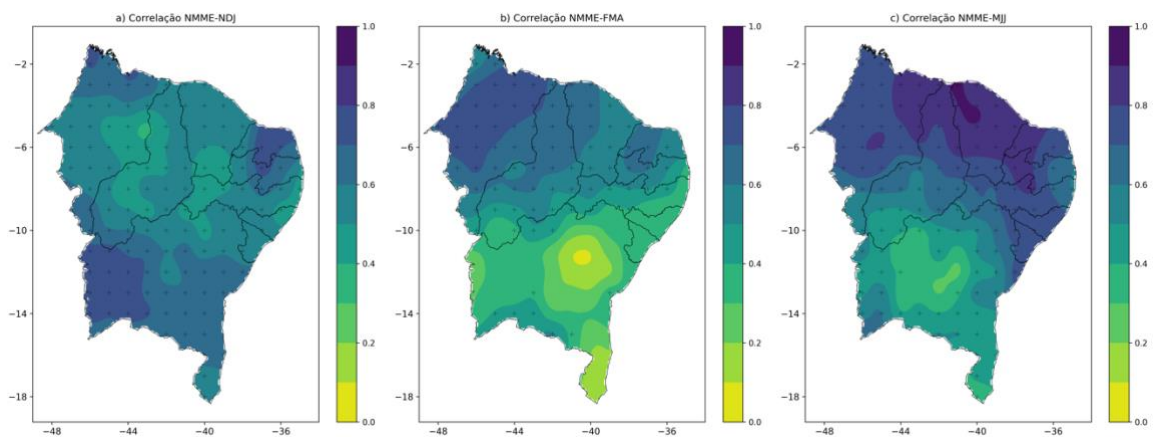


Figura 7 - Correlação de Pearson entre SPI3 observado e previsto pelo NMME-ACC no domínio do NEB no intervalo de 1082-2010 nos trimestres a) NDJ, b) FMA e c) MJJ. Valores a acima de 0.33 são considerados estatisticamente significantes com nível de confiança de 5%.

A figura 8 ilustra os mapas de Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) para os três trimestres. Esta estatística mostra o viés da previsão em termos absolutos. No trimestre NDJ se observa que a porção sul e litoral nordeste do NEB apresentam os menores valores de RMSE (0.5 a 0.7 unidades de SPI) (Fig.8a). A porção central do NEB apresenta maior erro de previsão com valores de RMSE acima de 0.8. O trimestre FMA apresenta os melhores valores de RMSE no norte da região e setor oeste (Fig.8b). Os valores nessas regiões estão variando de 0.6 a 0.8 unidades de SPI. O litoral leste e algumas regiões na porção central do NEB obtiveram resultados inferiores com valores de RMSE acima de 0.8 unidades de SPI.

No trimestre MJJ se observa um claro desempenho superior na porção norte do NEB. Os valores de RMSE variam de 0.2 a 0.7 unidades de SPI se estendendo até quase metade do território do NEB. A porção sudoeste do NEB obteve os piores resultados, com valores de RMSE em torno de 1 unidade de SPI.

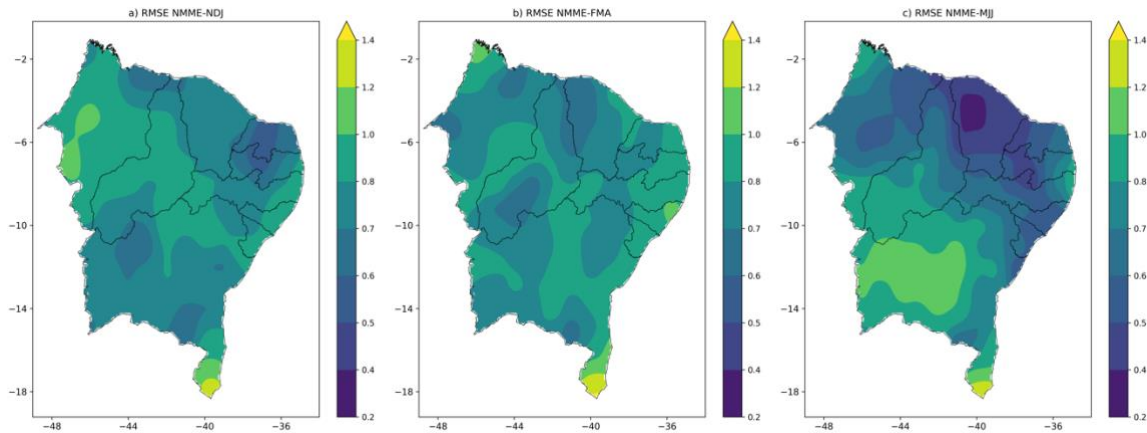


Figura 8 - Raiz quadrada do erro médio entre SPI3 observado e previsto pelo NMME-ACC no domínio do NEB no intervalo de 1082-2010 nos trimestres a) NDJ, b) FMA e c) MJJ.

5.3.Previsão Probabilística

As figuras 9, 10 e 11 ilustram os valores de Brier Skill Score (BSS) dos trimestres NDJ, FMA e MJJ para cada intensidade seca prevista. BSS representa a destreza espacial das previsões probabilísticas geradas pelo modelo NMME-ACC. Vale lembrar que BSS igual a 1 significa previsão perfeita, enquanto valor igual a zero indica previsão sem poder preditivo significativo em comparação com a climatologia. As previsões são consideradas úteis o ponto de vista operacional quando tem BSS acima de 0.05 (Valor crítico para um nível de confiança estatística acima de 95%) (DUTRA et al., 2014).

No trimestre NDJ os valores de BSS mais altos referentes a previsão de secas fracas (D0) são observados na porção norte e sudoeste do NEB (Fig.9a). Os valores nas regiões citadas variam de 0.10 a 0.35. A porção central do NEB, mais especificamente o interior dos estados da Bahia, Piauí e Pernambuco possuem o BSS abaixo de 0.05, sendo lugares com a previsão insignificante do ponto de vista estatístico. O BSS para secas moderadas (D1) apresenta uma perda de habilidade na porção norte do NEB mesmo tendo valores acima de 0.10 na maior parte (Fig.9b). Por outro lado, o setor sul ganha mais habilidade nessa intensidade de seca. Os valores de BSS no setor sul para secas D1 variam de 0.5 a 0.35. Para secas severas (D2) a habilidade de predição decai bastante em várias partes da região NEB. O extremo norte do estado do Maranhão exhibe valores de BSS ainda bons (0.25 em média)

juntamente com a porção sudoeste. O ganho de destreza em relação a climatologia é em média de 25%. Para esse trimestre o padrão especial de maiores destrezas observadas está de acordo com o resultado da figura 4a e 5b. A variabilidade provocada por VCANs no setor sudeste do NEB influencia sobre os três níveis analisados. Os valores de destreza mais altos observados no norte do NEB, principalmente nos níveis D0 e D2 podem também estarem associados a posição média de VCANs no NEB. A precipitação ocasionada por VCANs ocorre na sua periferia, enquanto no centro do sistema há estabilidade atmosféricas (Pinheiro et al., 2015). Isso explicaria pelo menos parte deste padrão observado em NDJ. Os padrões concordam com os resultados de Ramírez (1988) que aplicou funções EOF sobre anomalias de vorticidade no NEB. Em D0 (Fig.9a) se observa que há um núcleo sobre o centro do NEB sem destreza significativa. Esse padrão continua em D1 (Fig.9b) um pouco mais distorcido.

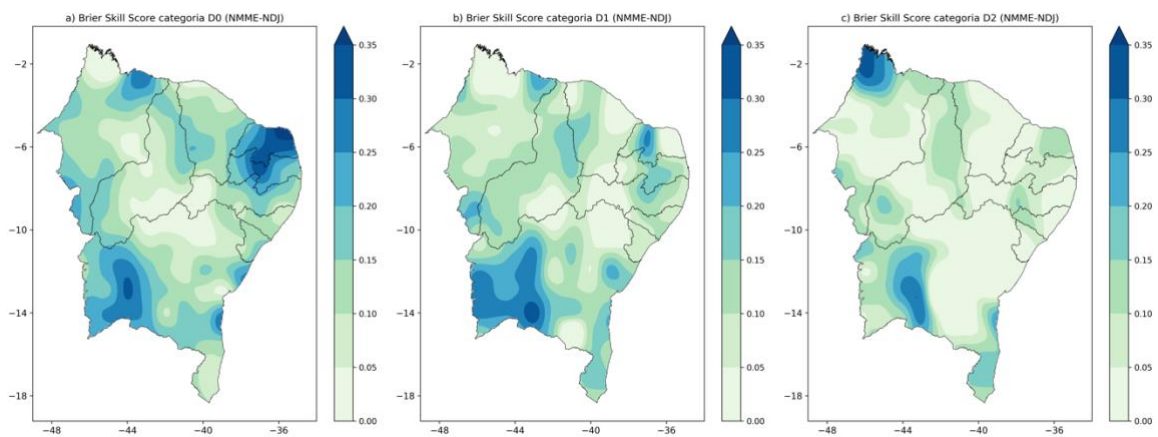


Figura 9 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre NDJ.

No que se refere a previsão de seca nível D0 no trimestre FMA, habilidade satisfatória foi obtida na porção noroeste da região do NEB. Os maiores valores de BSS obtidos estão acima de 0,35. Nessa região o BSS varia em torno de 0,20. Valores acima de 0,05 ainda são registrados mais ao centro da região, findando ao chegar no estado da Bahia. O litoral leste e o sul do NEB não obtiveram resultados satisfatórios. Resultado semelhante foi obtido para previsão de seca nível D1 (Fig.10b). A porções noroeste do NEB obteve uma área mais ampla de valores acima de 0,35. O litoral norte do NEB teve uma significativa melhoria em comparação com a previsão de seca nível D0, enquanto o litoral leste e o sul do NEB permaneceram sem desempenho aceitável. A habilidade preditiva do modelo cai bastante para o nível D2 de seca (Fig.10c). Neste nível somente parte do litoral norte obtém valores de BSS em torno de 0,15 e um ponto localizado no interior do Piauí. O fato dos maiores

valores de BSS terem sido obtidos no setor noroeste da região indicam relação com a ZCIT em sua posição máxima no hemisfério sul (COELHO et al., 2004). Em D1 (Fig.10b) se observa uma pequena área com destreza um pouco abaixo dos valores observados a noroeste. Uma hipótese levantada para explicar esse padrão é a atuação de bandas duplas da ZCIT documentada em detalhes por Teodoro et al., (2019). A ocorrência de bandas duplas da ZCIT provoca um aprofundamento ainda maior da banda de nebulosidade do sistema. Tal resultado em D1 pode indicar que o NMME tenha algum poder de previsão dos feitos da banda dupla da ZCIT.

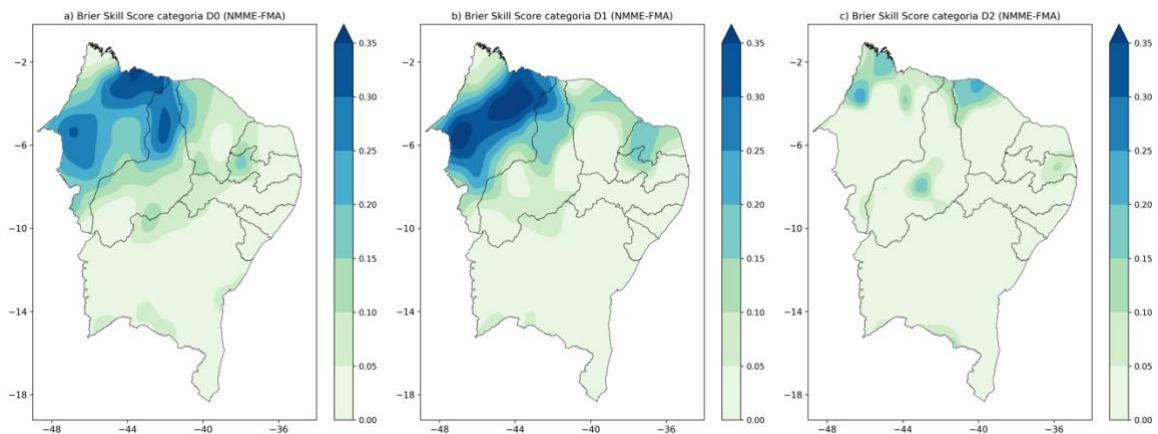


Figura 10 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre FMA.

O trimestre MJJ exhibe um desempenho bem superior em comparação com o trimestre FMA no norte da região NEB (Fig.11). A porção de boa destreza para secas D0 e D1 são bem semelhantes, com valores de BSS variando em torno de 0,25 (Fig.11a-b). Como mencionando anteriormente, a precipitação deste trimestre é proveniente principalmente da atuação das OLs. Para previsão de seca nível D2 o desempenho diminui significativamente na maior parte do litoral nordestino. Alguns pontos mantêm bom desempenho das previsões.

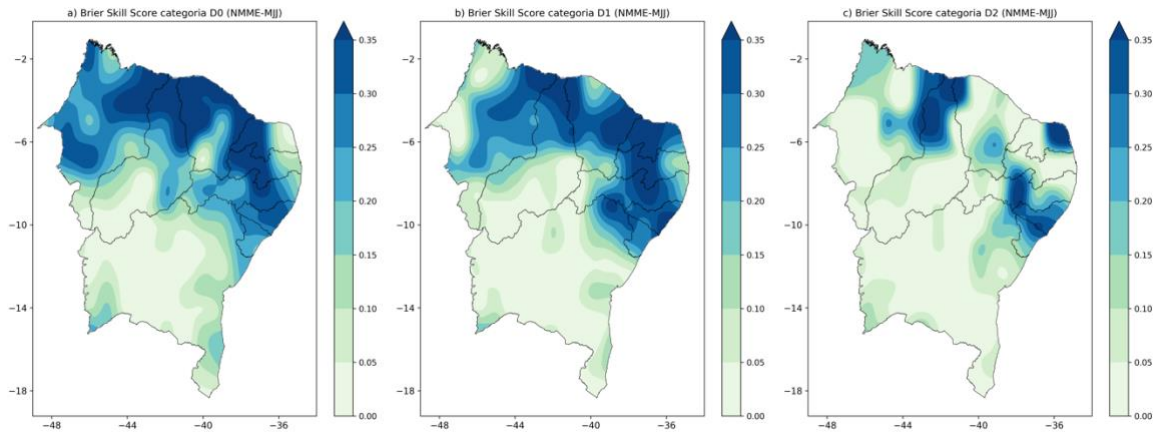


Figura 11 - Brier Skill Score para previsões de seca a) fraca D0, b) moderada D1 e c) severa D2 no trimestre MJJ.

A figura 12 mostra os campos de ROC score (ROCS) para os três níveis de seca analisados no trimestre NDJ. Valores de ROC score acima de 0.7 são frequentemente considerados bons pela literatura para aplicações operacionais (ARCHER & FOWLER, 2008; BARNSTON, 2010; BARNSTON & MASON, 2011). Tendo em isso em vista, se observa que o poder preditivo do modelo é mais abrangente do que o mostrado pelo BSS. Quase a completa área do NEB exibe valores de ROCS acima de 0.7. Os maiores valores são observados para previsões de seca D2 (Fig.12c). Isso demonstra um poder considerável do modelo em prever eventos extremos de seca nesse período. O norte do NEB é o setor com maior destreza para todos os níveis. A diferença de valores de ROCS nesse setor não tão grande quanto os demais. No setor central do NEB há um evidente ganho de desempenho em alguns pontos quando se avança nos níveis de seca. Exceto para o nordeste do estado da Bahia (Fig.12c). A porção sudoeste do NEB também teve um aumento no poder preditivo ao avançar pelos níveis de seca. Para previsão de nível D0 os valores de ROCS nesse setor gira em torno de 0.8, ao avançar para o nível D2 os valores de ROCS passam a girar em torno de 0.9.

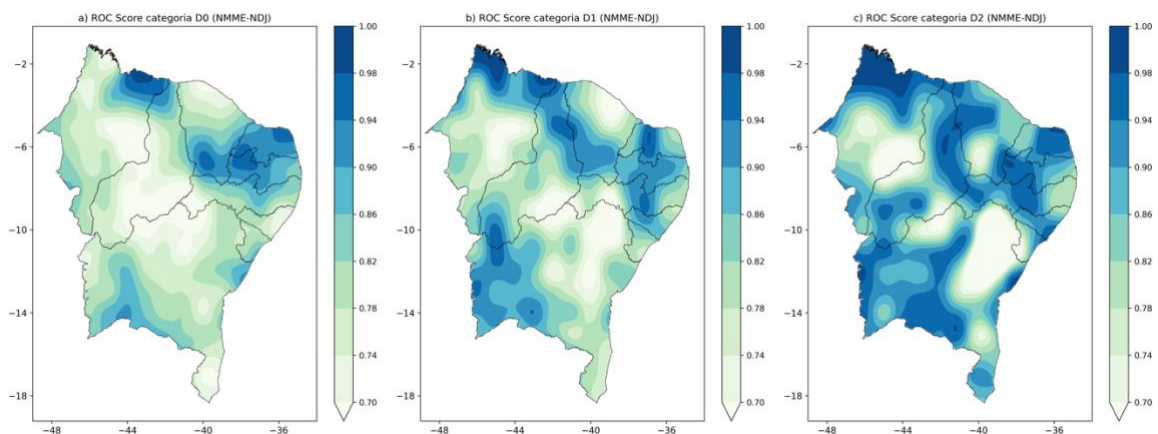


Figura 12 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre NDJ.

Na figura 13 se observa os valores de ROCS para todos os níveis de seca no trimestre FMA. É observado um padrão de aumento da destreza com o avançar dos níveis. O setor sul do NEB começa a ganhar poder preditivo a partir do nível D1 (Fig.13b). Apesar do ganho preditivo nesse setor, uma boa parte ainda continua a ter valores abaixo de 0.7, mas ainda considerados significantes. O setor com os melhores resultados no trimestre FMA é o setor norte. O resultado neste setor está coerente com o BSS observado para o mesmo trimestre (Fig.10). No litoral leste se observa aumento do valor de ROCS ao aumentar os níveis de seca. Em D0 (Fig.13a) não há poder preditivo, já em D2 se observa valores de ROCS em torno de 0.78 neste setor.

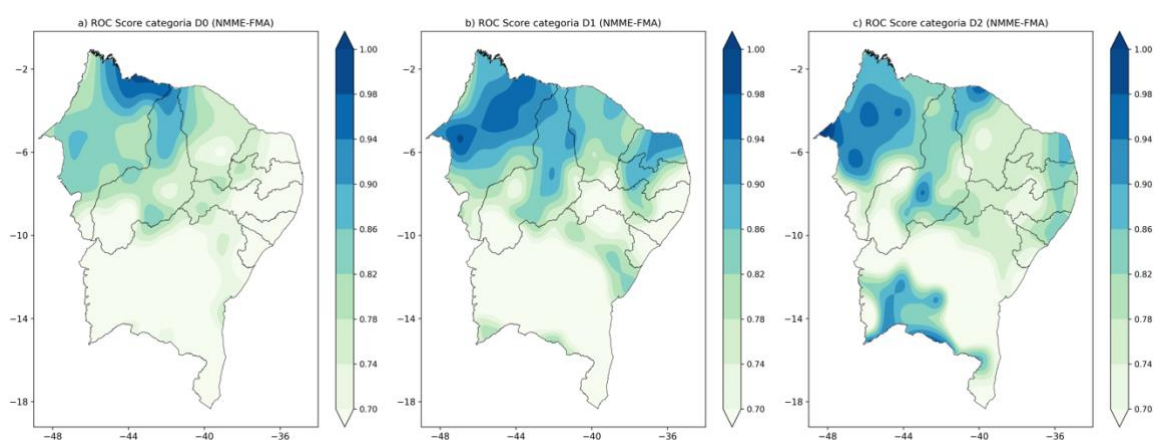


Figura 13 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre FMA.

A figura 14 exhibe os valores de ROCS para o trimestre MJJ em todos os níveis de seca analisados. Se observa valores de ROCS bem altos na porção norte do NEB, abrangendo parte do litoral leste. Mais uma vez o padrão de maior destreza em eventos mais extremos de seca é observado aqui. O extremo sul do estado da Bahia mostra uma certa uniformidade de destreza sem variar muito. A região central do NEB por outro lado não apresenta valores expressivos, dando a concluir que há uma ótima discriminação dos eventos de seca previstos neste período no NEB.

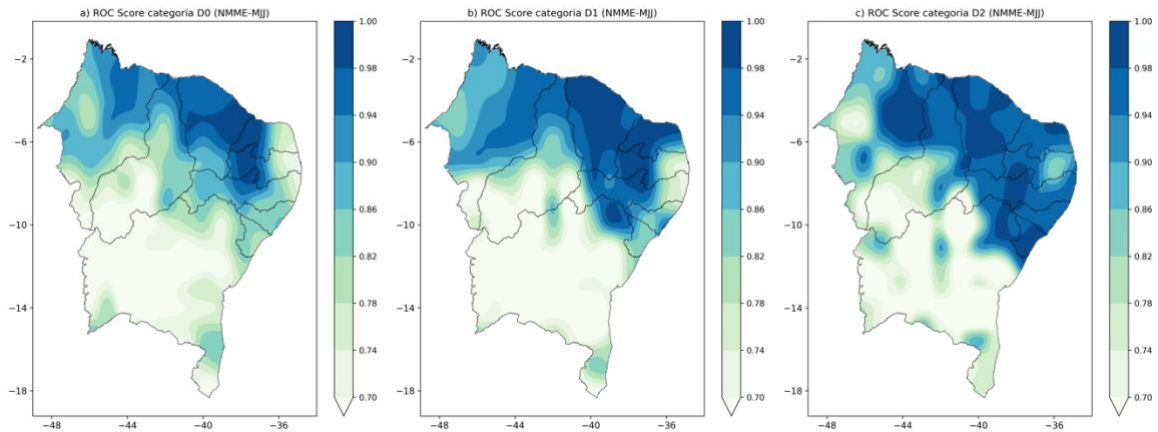


Figura 14 - ROC score da previsão dos níveis de seca a) D0, b) D1 e c) D2 para o trimestre MJJ.

Em termos numéricos os resultados alcançados neste trabalho são semelhantes a de outros trabalhos ao redor do mundo. Ma et al., (2019) avaliou a destreza do NMME em prever a seca sobre a bacia do rio Han. A média de BSS encontrado pelo autor é de 30% no período do verão, enquanto o BSS para o NEB em média foi de 28%. O mesmo autor, agora em 2018 (MA et al., 2018), também avaliou a destreza do NMME em prever a seca agora na bacia do rio Heihe utilizando como referência o SPI1, ou seja, na escala de temporal de um mês. Em termos determinísticos o autor alcançou um RMSE médio de 1.2. Durante o verão, que é o período de maior previsibilidade para o noroeste da China. Em termos de BSS, o trabalho alcançou um valor médio de 25% para um lead time de 1 mês. No EUA resultados bem significativos foram encontrados por Lorenz et al. (2018) utilizando um integrante do conjunto de modelos norte-americanos, o GFS. Para o setor centro-leste do EUA o modelo alcançou valores de BSS de até 45% em relação a climatologia. Esse resultado pode indicar que ao se aplicar modelos individuais ou ponderar a importância de cada modelo pela sua taxa de acerto pode trazer resultados melhores. Resultados ainda mais significativos foram encontrados por Trambauer et al. (2015) ao avaliar a destreza do modelo do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF) para secas de escalas de tempo de 6 meses na bacia do rio Limpopo no sul da África. ROCS de até 75% e BSS de até 45%. Os valores alcançados pelo autor sustentam a hipótese de que é possível melhorar a destreza de modelos em prever a seca ao aplicar previsões para escalas de tempo maiores.

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve o objetivo de avaliar a habilidade preditiva de precipitação com ênfase na seca meteorológica no Nordeste Brasileiro utilizando os produtos operacionais dos modelos norte-americanos (NMME), convertendo as previsões de precipitação em SPI para quantificar níveis de seca e calcular a probabilidade de ocorrência de determinadas intensidades nos três trimestres mais importantes do ponto de vida da quadra chuvosa no NEB: Novembro, dezembro e outro que consiste no trimestre chuvoso do setor norte; fevereiro, março e abril que representa o período chuvoso da porção mais ao sul do NEB e maio, junho e julho; representando o período chuvoso do litoral leste e norte do NEB.

A análise dos modos principais das previsões do NMME e do SPI para os três trimestres analisados mostrou que a destreza geral alcançada pelos modelos parte da capacidade do NMME em modelar padrões de conexões entre fenômenos oceânicos (Fases do ENOS e diferença de temperatura do Atlântico norte e sul) e sistemas de grande escala que provocam chuva no NEB (ZCIT, DOLs e VCANs).

Os resultados das previsões determinísticas avaliadas por correlação de Pearson e Raiz Quadrada do Erro médio mostram no geral que há considerável destreza nas previsões de precipitação para o NEB. O norte do NEB mostra destreza expressiva em todos os trimestres analisados, tendo seu melhor desempenho em novembro, dezembro e janeiro. A porção sul da região por sua vez mostrou previsibilidade significativa nos trimestres NDJ e MJJ. A porção central do NEB, onde está localizado a maior parte do semiárido nordestino é a região com menor destreza. Em termos determinísticos essa porção mostra importante destreza nos meses de novembro, dezembro e janeiro. No trimestre FMA a destreza das previsões para esse setor decai bastante. Por outro lado, a partir do trimestre MJJ o setor começa retomar poder preditivo.

Para um produto operacional é necessário transformar as previsões determinísticas para probabilísticas. Tal tratamento inclui nas previsões a incerteza envolvida. Tal procedimento traz vantagens do poder preditivo do modelo e na forma que as previsões serão usadas para tomadas de decisão. De forma geral o modelo mostrou destreza em praticamente todo o NEB. Utilizando as estatísticas Brier Skill Score e ROC score foi possível identificar destreza importante em todo o NEB. Principalmente levando em conta o ROC score. A estatística ROCS mostrou o desempenho do modelo melhor para os níveis mais altos de seca, indicando boa aptidão do modelo em prever eventos extremos de seca. O Brier Skill Score por sua vez foi mais conservador em termos de extensão territorial.

A seca no Nordeste Brasileiro é potencialmente previsível, principalmente eventos mais extremos. Os métodos aplicados nesse estudo podem ser convertidos em produto operacional que dê suporte a governos e empresas agirem pró-ativamente contra a seca. É necessário avaliar a habilidade preditiva de outros regimes de seca, tal como seca hidrológicas em escala de meses e secas sociais em escala de anos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALVALA, Regina et al. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, n. AHEAD, p. 0-0, 2017.
- APPENZELLER, C. H.; DAVIES, H. C.; NORTON, W. A. Fragmentation of stratospheric intrusions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. D1, p. 1435-1456, 1996.
- ARCHER, David Ronald; FOWLER, Hayley J. Using meteorological data to forecast seasonal runoff on the River Jhelum, Pakistan. **Journal of Hydrology**, v. 361, n. 1-2, p. 10-23, 2008.
- AWANGE, Joseph L.; MPELASOKA, Freddie; GONCALVES, Rodrigo M. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. **Science of the Total Environment**, v. 566, p. 1472-1488, 2016.
- BARNETT, T. P.; PREISENDORFER, R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 9, p. 1825-1850, 1987.
- BARNSTON, Anthony G. et al. Verification of the first 11 years of IRI's seasonal climate forecasts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, n. 3, p. 493-520, 2010.
- BARNSTON, Anthony G. Linear statistical short-term climate predictive skill in the Northern Hemisphere. **Journal of Climate**, v. 7, n. 10, p. 1513-1564, 1994.
- BARNSTON, Anthony G.; MASON, Simon J. Evaluation of IRI's seasonal climate forecasts for the extreme 15% tails. **Weather and forecasting**, v. 26, n. 4, p. 545-554, 2011.
- BARNSTON, Anthony G.; TIPPETT, Michael K. Do statistical pattern corrections improve seasonal climate predictions in the North American Multimodel Ensemble models?. **Journal of Climate**, v. 30, n. 20, p. 8335-8355, 2017.
- BERLATO, Moacir Antonio; FARENZENA, Homero; FONTANA, Denise Cybis. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.
- BOLINGER RA, Gronewold AD, Kompoltowicz K, Fry LM (2017) Application of the NMME in the Development of a New Regional Seasonal Climate Forecast Tool. **Bulletin of the American Meteorological Society** 98(3): 555–564.

- Borovikov A, Cullather R, Kovach R, Marshak J, Vernieres G, Vikhliaev Y, Zhao B, Li Z (2017) GEOS-5 seasonal forecast system. **Climate Dynamics**. doi:10.1007/s00382-017-3835-2.
- BRADLEY, A. Allen; SCHWARTZ, Stuart S.; HASHINO, Tempei. Sampling uncertainty and confidence intervals for the Brier score and Brier skill score. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 5, p. 992-1006, 2008.
- BRITO, Sheila S. Barros et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517-529, 2018.
- BROWNE, Michael W. Cross-validation methods. **Journal of mathematical psychology**, v. 44, n. 1, p. 108-132, 2000.
- CANAMARY, E. A.; REIS JR, D. S.; MARTINS, E. S. Evaluation of ensemble SPI forecasts for Ceará, Northeastern Brazil. **Drought: Research and Science-Policy Interfacing**, p. 245, 2015.
- CARPENEDO, Camila Bertolotti; AMBRIZZI, Tércio. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 605-613, 2020.
- CAVALCANTI, Iracema FA. Episódios El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. **Climanálise Especial**, 1996.
- CAVALCANTI, Iracema FA. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de textos, 2016.
- CHEN, Si et al. Bayesian change point analysis for extreme daily precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 7, p. 3123-3137, 2017.
- CHEN, Si et al. Bayesian change point analysis for extreme daily precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 7, p. 3123-3137, 2017.
- COUrinHO, Eliane De Castro; FISCH, Gilberto. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 193-203, 2007.
- CRUZ, Ana Luísa; FONSECA, Josiane F. Bustamante; DEREZYNSKI, Claudine Pereira. Avaliação da Climatologia das Previsões Climáticas Sazonais para o Período Chuvoso da Região Nordeste do Brasil. 2013.

CUNHA, A. P. M. et al. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 494-505, 2015.

CUNHA, Ana Paula MA et al. Changes in the spatial–temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 10, p. e855, 2018.

CUNHA, Ana Paula MA et al. Changes in the spatial–temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 10, p. e855, 2018.

DA COSTA BARBOSA, Ivan Carlos et al. Precipitation evaluation based on CHIRPS and GPCC data with surface measurements of sub-basinGuamá River in Northeast Pará. **Ciência e Natura**, v. 42, p. 32, 2020.

DA ROCHA JÚNIOR, Rodrigo Lins et al. Analysis of the Space–Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. **Geosciences**, v. 9, n. 11, p. 457, 2019.

DE JANEIRO, Rio. IBGE, 2010. **www.ibge.gov.br/censo2010**. Acesso, v. 8, p. 09-11, 2014.

DE MELO, Josemir Camilo. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, n. 20, p. 13-21, 1999.

DE OLIVEIRA, Alda Santos. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul ea convecção da Amazônia**. 1986. Tese de Doutorado. INPE.

DE SOUZA FERREIRA, Glauber Willian; REBOITA, Michelle Simões; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis nas Cercanias do Nordeste do Brasil: Climatologia e Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p. 568-585, 2020.

DELWORTH, Thomas L. et al. A link between the hiatus in global warming and North American drought. **Journal of Climate**, v. 28, n. 9, p. 3834-3845, 2015.

DELWORTH, Thomas L. et al. Simulated climate and climate change in the GFDL CM2. 5 high-resolution coupled climate model. **Journal of Climate**, v. 25, n. 8, p. 2755-2781, 2012.

DUTRA, E. et al. Global meteorological drought-Part 2: Seasonal forecasts. **Hydrology & Earth System Sciences**, v. 18, n. 7, 2014.

- EAKIN, Hallie C.; LEMOS, Maria C.; NELSON, Donald R. Differentiating capacities as a means to sustainable climate change adaptation. **Global Environmental Change**, v. 27, p. 1-8, 2014.
- EGOZCUE, J. J.; RAMIS, C. Bayesian hazard analysis of heavy precipitation in eastern Spain. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 10, p. 1263-1279, 2001.
- EGOZCUE, J. J.; RAMIS, C. Bayesian hazard analysis of heavy precipitation in eastern Spain. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 10, p. 1263-1279, 2001.
- FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern recognition letters**, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006.
- FERREIRA, Antonio Geraldo; DA SILVA MELLO, Namir Giovanni. 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, 2005.
- FERREIRA, Raquel Johansson; MICHELETO, RoBeRta GoulaRt. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 367-374, 2005.
- FINAN, Timothy J.; NELSON, Donald R. Making rain, making roads, making do: public and private adaptations to drought in Ceará, Northeast Brazil. **Climate research**, v. 19, n. 2, p. 97-108, 2001.
- FOX, Neil I.; WIKLE, Christopher K. Providing distributed forecasts of precipitation using a Bayesian nowcast scheme. **Atmospheric Science Letters**, v. 6, n. 1, p. 59-65, 2005.
- FOX, Neil I.; WIKLE, Christopher K. Providing distributed forecasts of precipitation using a Bayesian nowcast scheme. **Atmospheric Science Letters**, v. 6, n. 1, p. 59-65, 2005.
- GALLANT, Ailie JE; KAROLY, David J.; GLEASON, Karin L. Consistent trends in a modified climate extremes index in the United States, Europe, and Australia. **Journal of climate**, v. 27, n. 4, p. 1379-1394, 2014.
- GAO, Shibo et al. Application of a Bayesian inflation approach to EnSRF radar data assimilation to improve the analysis and forecasting of an MCS. **Meteorological Applications**.

GAO, Shibo et al. Application of a Bayesian inflation approach to EnSRF radar data assimilation to improve the analysis and forecasting of an MCS. **Meteorological Applications**.

GENG, Guangpo et al. Agricultural drought hazard analysis during 1980–2008: a global perspective. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 389-399, 2016.

GENT PR, Danabasoglu G, Donner LJ, Holland MM, Hunke EC, Jayne SR, Lawrence DM, Neale RB, Rasch PJ, Vertenstein M, Worley PH, Tang Z-L, Zhang M (2011) The Community Climate System Model Version 4. **Journal of Climate** 24: 4973-4991.

GLAHN, Harry R.; LOWRY, Dale A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. **Journal of applied meteorology**, v. 11, n. 8, p. 1203-1211, 1972.

HASTENRATH, Stefan; HELLER, Leon. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.

HASTENRATH, Stefan. Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. **Progress in Oceanography**, v. 70, n. 2-4, p. 407-415, 2006.

HASTENRATH, Stefan. **Climate and Circulation of the Tropics**. Springer Science & Business Media, 2012.

HASTENRATH, Stefan. Interannual variability and annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 6, p. 1097-1107, 1984.

JALALKAMALI, Amir; MORADI, Mehdi; MORADI, Nasrin. Application of several artificial intelligence models and ARIMAX model for forecasting drought using the Standardized Precipitation Index. **International journal of environmental science and technology**, v. 12, n. 4, p. 1201-1210, 2015.

JIA L, YANG X, Vecchi GA, Gudgel RG, Delworth TL, Rosati A, Stern WF, Wittenberg AT, Krishnamurthy L, Zhang S, Msadek R, Kapnick S, Underwood S, Zeng F, Anderson WG, Balaji V, Dizon K (2015) Improved Seasonal Prediction of Temperature and Precipitation over Land in a High-Resolution GFDL Climate Model. **Journal of Climate** 28: 2044-2062.

JIA, Liwei et al. Improved seasonal prediction of temperature and precipitation over land in a high-resolution GFDL climate model. **Journal of Climate**, v. 28, n. 5, p. 2044-2062, 2015.

KENNY, Mary Lorena. Drought, clientalism, fatalism and fear in Northeast Brazil. **Ethics, Place & Environment**, v. 5, n. 2, p. 123-134, 2002.

KHARIN, Viatcheslav V.; ZWIERS, Francis W. On the ROC score of probability forecasts. **Journal of Climate**, v. 16, n. 24, p. 4145-4150, 2003.e

KIRTMAN, Ben P. et al. The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 4, p. 585-601, 2014.

KOUSKY, Vernon E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

LABUDOVÁ, L.; LABUDA, M.; TAKÁČ, J. Comparison of SPI and SPEI applicability for drought impact assessment on crop production in the Danubian Lowland and the East Slovakian Lowland. **Theoretical and applied climatology**, v. 128, n. 1-2, p. 491-506, 2017.

LANG, Yang et al. Do CFSv2 Seasonal Forecasts Help Improve the Forecast of Meteorological Drought over Mainland China?. **Water**, v. 12, n. 7, p. 2010, 2020.

LEE, Sang-Ki et al. Interhemispheric influence of the northern summer monsoons on southern subtropical anticyclones. **Journal of climate**, v. 26, n. 24, p. 10193-10204, 2013.

LEMOS, Maria Carmen de Mello. A tale of two policies: the politics of climate forecasting and drought relief in Ceará, Brazil. **Policy Sciences**, v. 36, n. 2, p. 101-123, 2003.

LEMOS, Maria Carmen et al. Drought, governance and adaptive capacity in North East Brazil: A case study of Ceará. **Occasional paper for UNDP**, v. 2008, 2007.

LIMBERGER, Leila; SILVA, Maria Elisa Siqueira. Precipitação observada na Amazônia Brasileira: Redes convencionais e dados da Reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

LIVADA, I.; ASSIMAKOPOULOS, V. D. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). **Theoretical and applied climatology**, v. 89, n. 3-4, p. 143-153, 2007.

LORENZ, D. J. et al. Forecasting rapid drought intensification using the Climate Forecast System (CFS). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 16, p. 8365-8373, 2018.

LOURENÇO, Maria Cristina Maciel; FERREIRA, Nelson Jesus; GAN, Manoel Alonso. Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical. **Climanálise Especial**, v. 10, p. 163-167, 1996.

MA, Feng; YE, Aizhong; DUAN, Qingyun. Seasonal drought ensemble predictions based on multiple climate models in the upper Han River Basin, China. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 12, p. 7447-7460, 2019.

MA, Feng; YE, Aizhong; DUAN, Qingyun. Seasonal drought ensemble predictions based on multiple climate models in the upper Han River Basin, China. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 12, p. 7447-7460, 2019.

MADADGAR, Shahrbanou et al. A hybrid statistical-dynamical framework for meteorological drought prediction: Application to the southwestern United States. **Water Resources Research**, v. 52, n. 7, p. 5095-5110, 2016.

MADADGAR, Shahrbanou; MORADKHANI, Hamid. A Bayesian framework for probabilistic seasonal drought forecasting. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 6, p. 1685-1705, 2013.

MANZANAS, R. et al. Can bias correction and statistical downscaling methods improve the skill of seasonal precipitation forecasts?. **Climate dynamics**, v. 50, n. 3-4, p. 1161-1176, 2018.

MARENGO, José A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARENGO, Jose A. et al. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013.

MARENGO, Jose A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2010.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

- MARIANO, Denis A. et al. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129-143, 2018.
- MARJ, Ahmad Fatehi; MEIJERINK, Allard MJ. Agricultural drought forecasting using satellite images, climate indices and artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 24, p. 9707-9719, 2011.
- MARTINS, Minella A. et al. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural systems**, v. 160, p. 21-30, 2018.
- MCGREE, Simon; SCHREIDER, Sergei; KULESHOV, Yuriy. Trends and variability in droughts in the Pacific islands and Northeast Australia. **Journal of Climate**, v. 29, n. 23, p. 8377-8397, 2016.
- Merryfield WJ, Lee W-S, Boer GJ, Kharin VV, Scinocca JF, Flato GM, Ajayamohan RS, Fyfe JC, Tang Y, Polavarapu S (2013). The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I: Models and Initialization. **Monthly Weather Review** 141: 2910-2945.
- MO, Kingtse C.; LYON, Bradfield. Global meteorological drought prediction using the North American multi-model ensemble. **journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 3, p. 1409-1424, 2015.
- MOLION, Luiz Carlos Baldicero, and S. de O. Bernardo. "Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro." **Revista Brasileira de Meteorologia** 17.1 (2002): 1-10.
- MORAIS, M. D. C. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam no Nordeste do Brasil: estudo observacional e numérico. 2016.
- MOTA, GALDINO VIANA; GANDU, ADILSON WAGNER. Análise de distúrbios ondulatórios de leste que afetam o Nordeste brasileiro: um estudo de caso. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos do Jordão (SP)**. 1996. p. 450-454.
- MOURA, Antonio D.; SHUKLA, Jagadish. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MSADEK, Rym et al. Importance of initial conditions in seasonal predictions of Arctic sea ice extent. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 14, p. 5208-5215, 2014.

MÜLLER, Gabriela V.; AMBRIZZI, Tércio. Teleconnection patterns and Rossby wave propagation associated to generalized frosts over southern South America. **Climate Dynamics**, v. 29, n. 6, p. 633-645, 2007.

NAMIAS, Jerome. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil 1. **Tellus**, v. 24, n. 4, p. 336-343, 1972.

NELSON, Donald R.; FINAN, Timothy J. Praying for drought: persistent vulnerability and the politics of patronage in Ceará, Northeast Brazil. **American Anthropologist**, p. 302-316, 2009.

PICARD, Richard R.; COOK, R. Dennis. Cross-validation of regression models. **Journal of the American Statistical Association**, v. 79, n. 387, p. 575-583, 1984.

PINHEIRO, José Ueliton. Vórtices ciclônicos em altos níveis sobre o nordeste do Brasil e mudanças climáticas: análise para o clima atual e cenários futuros. 2015.

PRABNAKORN, Saowanit et al. Assessment of drought hazard, exposure, vulnerability, and risk for rice cultivation in the Mun River Basin in Thailand. **Natural Hazards**, p. 1-21, 2019.

RAHMAT, Siti Nazahiyah; JAYASURIYA, Niranjali; BHUIYAN, Muhammed A. Short-term droughts forecast using Markov chain model in Victoria, Australia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 1-2, p. 445-457, 2017.

RAMÍREZ, María Cleofé Valverde; KAYANO, Mary Toshie; FERREIRA, Nelson Jesus. PADRÕES CLIMÁTICOS DOS VÓRTICES CICLÔNICOS EM ALTOS NÍVEIS NO NORDESTE DO BRASIL, PARTE III: ANÁLISE OBJETIVA. 1988.

RUGGIERI, Eric. A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 2, p. 520-528, 2013.

RUGGIERI, Eric. A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 2, p. 520-528, 2013.

SAHA S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Behringer D, Hou Y-T, Chuang H-Y, Iredell M, Ek M, Meng J, Yang R, Mendez MP, van den Dool H, Zhang Q, Wang W, Chen M, Becker E (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal of Climate** 27: 2185-2208.

SHAARI, Muhammad Akram; SAMSUDIN, Ruhaidah; ILMAN, Ani Shabri. Forecasting drought using modified empirical wavelet transform-arma with fuzzy C-means clustering. **Energy**, v. 11, n. 3, p. 1152-1161, 2018.

SHIN, Ji Yae et al. Probabilistic long-term hydrological drought forecast using Bayesian networks and drought propagation. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. e1827, 2020.

SPINONI, Jonathan et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2792-2804, 2014.

SPINONI, Jonathan et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2792-2804, 2014.

STONE, M. Cross-validation: A review. **Statistics: A Journal of Theoretical and Applied Statistics**, v. 9, n. 1, p. 127-139, 1978.

TEODORO, Thales Alves; REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 282-298, 2019.

THOBER, Stephan et al. Seasonal soil moisture drought prediction over Europe using the North American Multi-Model Ensemble (NMME). **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 6, p. 2329-2344, 2015.

TIAN, Di et al. Assessing GFDL high-resolution climate model water and energy budgets from AMIP simulations over Africa. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 14, p. 8444-8459, 2016.

TIWARI, P. R. et al. Comparison of statistical and dynamical downscaling methods for seasonal-scale winter precipitation predictions over north India. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1504-1516, 2019.

TOMASELLA, Javier et al. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018.

TOMOZEIU, R.; PASQUI, M.; QUARESIMA, S. Future changes of air temperature over Italian agricultural areas: a statistical downscaling technique applied to 2021–2050 and 2071–2100 periods. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 130, n. 5, p. 543-563, 2018.

UVO, Cíntia Regina Bertacchi; UVO, Cíntia Regina Bertacchi. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. INPE, 1989.

VALVERDE RAMÍREZ, Mara Cleofé. Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 1, p. 92-93, 1999.

VECCHI, Gabriel A. et al. On the seasonal forecasting of regional tropical cyclone activity. **Journal of Climate**, v. 27, n. 21, p. 7994-8016, 2014.

Vernieres G, Rienecker MM, Kovach R, Keppenne C (2012) The GEOS-iODAS: description and evaluation. NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, NASA TM—2012-104606, vol 30.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, Sergio M. et al. Long-term variability and trends in meteorological droughts in Western Europe (1851–2018). **International Journal of Climatology**, 2020.

WALKER, Gilbert T. Ceará (Brazil) famines and the general air movement. **Beitr. Phys. d. Frein. Atmosph**, v. 14, p. 88-93, 1928.

WELLS, Nathan; GODDARD, Steve; HAYES, Michael J. A self-calibrating Palmer drought severity index. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2335-2351, 2004.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: the role of definition, planning for drought, 11-27. **West View Pres**, 1987.

WILKS, Daniel S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.

WINTON, Michael et al. Has coarse ocean resolution biased simulations of transient climate sensitivity?. **Geophysical research letters**, v. 41, n. 23, p. 8522-8529, 2014. WMO, 2012. Standardized Precipitation Index User Guide (Geneva).

WU, Dan; JIANG, Zhihong; MA, Tingting. Projection of summer precipitation over the Yangtze–Huaihe River basin using multimodel statistical downscaling based on canonical correlation analysis. **Journal of Meteorological Research**, v. 30, n. 6, p. 867-880, 2016.

XU, Dehe et al. Application of a Hybrid ARIMA–SVR Model Based on the SPI for the Forecast of Drought—A Case Study in Henan Province, China. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 7, p. 1239-1259, 2020.

XU, Lei et al. An evaluation of statistical, NMME and hybrid models for drought prediction in China. **Journal of Hydrology**, v. 566, p. 235-249, 2018.

YANG, Xiaosong et al. Seasonal predictability of extratropical storm tracks in GFDL's high-resolution climate prediction model. **Journal of Climate**, v. 28, n. 9, p. 3592-3611, 2015.

ZHANG S, HARRISON MJ, ROSATI A, WITTENBERG A (2007) System Design and Evaluation of Coupled Ensemble Data Assimilation for Global Oceanic Climate Studies. **Monthly Weather Review** 135: 3541-3564.

ZHANG, Yuhu et al. Comparison of the ability of ARIMA, WNN and SVM models for drought forecasting in the Sanjiang Plain, China. **Natural Resources Research**, v. 29, n. 2, p. 1447-1464, 2020.

ZHOU, Jiayu; LAU, K.-M. Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 13, p. 1623-1644, 2001.