



IV-230 - ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR E O REGIME PLUVIOMÉTRICO NOS SERTÕES DE CRATEÚS

Francisco Igor Siqueira Evangelista

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús (2019).

Alan Michell Barros Alexandre ⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza (2002), mestre e doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2005 e 2012). Professor Adjunto da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús.

José Kerlly Soares de Araújo

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús (2023), mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará.

Tatiane Lima Batista

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará (2015), mestra em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2018). Professora Assistente da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Professora Machadinha Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús-CE, CEP 63708-825. Fone: +55 (88) 3691-9700 - e-mail: alanmichell@crateus.ufc.br

RESUMO

A região norte do Nordeste brasileiro (NEB) possui alta previsibilidade da precipitação sazonal. Isso se deve principalmente pela influência das temperaturas dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial nos mecanismos que proporcionam a chuva local. Por tanto, indica a possibilidade de inferir sobre características do regime pluviométrico a partir do conhecimento da relação com a variabilidade da Temperatura de Superfície do Mar (TSM), principalmente ligados aos oceanos Atlântico e Pacífico. A região semiárida do NEB tem o regime de chuvas delimitado por uma curta estação chuvosa, no primeiro semestre do ano, e praticamente a ausência destas no restante do ano. Para a Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) essa realidade não é diferente, assim, esse estudo tem como objetivo identificar os índices TSM que possuem maior influência no regime pluviométrico sazonal da RHSC, a partir do método *Random Forest*, de modo a subsidiar a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos locais. Foi observado uma grande influência dos índices TSMs vinculados ao oceano Atlântico, como na medida do Dipolo (TAD) e a Tropical Sul (TAS), no regime de precipitação sazonal da RHSC. Os índices relativos ao oceano Pacífico tiveram performance mediana, cabe destaque o ENSO multivariado (MEI). Os índices que apresentaram menor performance foram a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) e Oscilação Decadal do Pacífico (PDO).

PALAVRAS-CHAVE: Índice TSM, *Random Forest*, RHSC.

INTRODUÇÃO

As chuvas podem ser causadas por mecanismos de diferentes escalas. Na região setentrional do Nordeste Brasileiro (NEB) o mecanismo de grande escala preponderante é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) podendo ser responsável por até 80% da pluviosidade anual. Em menor escala destaca-se os Vórtices Ciclônicos de Alto Nível (VCAN), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e Linhas de Instabilidade (LI) (Molion; Bernardo, 2002, Uvo; Berndtsson, 1996).

A ZCIT é uma zona de baixa pressão na região equatorial, formada pela confluência dos ventos alísios provenientes do hemisfério norte e hemisfério sul em baixos níveis, caracterizada por altas Temperaturas de Superfície do Mar (TSM) e grandes volumes de precipitação (Ferreira; Mello, 2005). A localização da ZCIT varia de sua posição mais ao sul em 4°Sul, entre os meses de fevereiro e abril, e uma posição mais ao norte em 14°Norte, entre agosto e outubro. Estudos como de Namias (1972) e Uvo *et al.* (1998) já indicavam uma



correlação entre os períodos de seca do NEB e o posicionamento mais ao norte da ZCIT, indicando-a como o principal mecanismo de precipitação NEB setentrional durante a quadra chuvosa (fevereiro a maio).

O estudo de Santos *et al.* (2015) indica que o ZCIT e VCAN possui grande influência no regime de precipitação do estado do Ceará. Os VCAN são proeminentes em meados de dezembro para algumas regiões localizadas ao sul do estado, porém tem maior participação no mês de janeiro. De acordo com Coutinho e Sokomoto (2017) a ZCIT é o principal sistema causador de chuvas do Ceará, intensificado em fevereiro e no período do verão para o inverno, ocasionando precipitações e reduzindo a influência dos vórtices ciclônicos, que também podem influenciar negativamente as chuvas, inibindo a translação do ZCIT do hemisfério norte para o sul.

De acordo com Nobre *et al.* (2001), Rajagopalan *et al.* (2002) e Marengo *et al.* (2003), a região norte do NEB possui alta previsibilidade da precipitação sazonal. Nobre (2012) explica que o fenômeno se deve principalmente pela influência das temperaturas dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial nos mecanismos que proporcionam a chuva local. Tal afirmação indica a possibilidade de inferir sobre características do regime pluviométrico a partir do conhecimento da relação com a variabilidade das TSMs. A literatura especializada apresenta alguns índices consagrados de anomalia de TSM para determinadas áreas dos oceanos Atlântico e Pacífico.

A região semiárida do NEB é marcada por grande variabilidade temporal e espacial da precipitação, tanto os longos períodos de escassez hídrica quanto as chuvas intensas acarretam sérios problemas socioeconômicos, os quais são agravados pela recorrência dos eventos (Nobre, 2012). O regime de chuvas é delimitado por uma curta estação chuvosa no primeiro semestre do ano e praticamente a ausência destas no restante do ano. A variabilidade interanual da pluviometria está relacionada a variações de padrões das TSMs sobre as regiões tropicais dos oceanos Atlântico e Pacífico, os quais alteram a posição e a intensidade da ZCIT, ou seja, promovendo ou evitando a entrada da ZCIT no continente (Repelli; Alves, 1996, Ferreira; Mello, 2005).

O estado do Ceará possui seu território quase que totalmente inserido dentro dos limites do semiárido nordestino, com exceção da região litorânea, o que o torna propenso às secas severas, explicando a grande recorrência destas no histórico local. Quando somados os aspectos climáticos e a característica cristalina do solo temos um cenário hidrográfico formado por rios intermitentes, tornando necessária a construção de infraestruturas robustas e o gerenciamento eficiente dos recursos hídricos para manutenção da oferta de água para os múltiplos usos. Diversos autores, como Nóbrega *et al.* (2002), Silva *et al.* (2011) e Da Silva *et al.* (2013) comprovam o alto nível de correlação entre o regime pluviométrico do estado do Ceará e a variabilidade de índices TSMs, com destaque para os derivados do El Niño Oscilação Sul (ENOS), Dipolo do Atlântico (TAD) e a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO).

A Região Hidrográfica do Sertões de Crateús (RHSC) está localizada na porção centro-oeste do estado do Ceará, na fronteira com o estado do Piauí. Essa é marcada por um grande déficit hídrico climatológico onde os totais anuais médios apresentam valores em torno de 800 mm para precipitação e 3500 mm para a evaporação, de acordo com o Plano de Recursos Hídricos da RHSC (SRH-CE, 2021). Por tanto, as características climáticas tornam o sistema hídrico baseado em reservatórios superficiais, extremamente vulnerável aos efeitos de estiagens prolongadas. Atualmente a RHSC conta com uma capacidade de armazenamento de 411,97 hm³ distribuído entre 10 açudes, que abastece uma população em torno de 260.000 habitantes distribuídos em 9 municípios com 6 sedes municipais. Assim, este estudo tem como objetivo identificar os índices TSM que possuem maior influência no regime pluviométrico sazonal da RHSC de modo a subsidiar a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para fins de aplicação da Política Estadual de Recursos Hídricos, o estado do Ceará é dividido em 12 regiões hidrográficas de planejamento, apresentadas na Figura 1, onde a Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) compreende a porção cearense da rede de drenagem do rio Poti.

O *Random Forest* (RF) é um popular e eficaz algoritmo de aprendizado de máquina para seleção de variáveis (Breiman, 2001). Assim, com o objetivo de avaliar a influência dos índices TSM no regime pluviométrico sazonal foi utilizado o método RF onde a mediana da medida de importância para cada variável foi tomada para classificá-las de modo que as TSMs sejam organizadas por ordem de importância.



Figura 1 - Regiões Hidrográficas do Estado do Ceará. Fonte: Adaptado de SRH-CE (2013)

Os índices de anomalias de TSM utilizadas nesse estudo foram definidas com base em ampla revisão bibliográfica de estudos realizados no NEB, com enfoque no estado Ceará, a partir dos índices disponíveis no sítio do *Earth System Research Laboratory* (ESRL) e do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). A série de dados de anomalias das TSMs utilizadas compreendem o período entre 1950 e 2017. Os 12 índices são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Índices climáticos utilizados como variáveis explicativas

Sigla	Índice (em inglês)	Índice (em português)
TAD	<i>Tropical Atlantic Dipole</i>	Dipolo do Atlântico Tropical
TNA	<i>Tropical Northern Atlantic</i>	Atlântico Tropical Norte
TSA	<i>Tropical Southern Atlantic</i>	Atlântico Tropical Sul
NINO1.2	<i>Niño 1 + 2</i>	Niño 1 + 2
NINO3.4	<i>Niño 3.4</i>	Niño 3.4
NINO3	<i>Niño 3</i>	Niño 3
NINO4	<i>Niño 4</i>	Niño 4
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>	Oscilação do Atlântico Norte
MEI	<i>Multivariate ENSO Index</i>	ENSO multivariado
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>	Oscilação Decadal do Pacífico
AMO	<i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i>	Oscilação Multidecadal do Atlântico
ONI	<i>Oceanic Niño Index</i>	Niño Oceânico

Destes 12 índices, cinco representam as variações das TSMs do oceano Atlântico, as outras sete representam o oceano Pacífico. A maior parte destes índices atuam em escalas sazonais, com exceção da escala decadal do PDO (Pacífico) e multidecadal do AMO (Atlântico).

No que se refere aos dados de precipitação sazonal, estes foram obtidos através da análise das séries históricas de 73 estações pluviométricas com área de influência na RHSC, tendo como fonte o sistema Hidroweb da Agência Nacional de Água e Saneamento (ANA). A precipitação média regional foi calculada utilizando o método de Thiessen.

De acordo com a análise da distribuição precipitação mensal climatológica, apresentada na Figura 2, o regime pluviométrico foi dividido em 4 períodos representativos do período chuvoso na região hidrográfica:

- DJFMAM - semestre chuvoso, de dezembro a maio, englobando a chuvas de pré-estação e quadra chuvosa;
- FMAM - quadra chuvosa, de fevereiro a maio;
- DJF - primeiro trimestre chuvoso, de dezembro a fevereiro;
- MAM - segundo trimestre chuvoso, de março a maio.

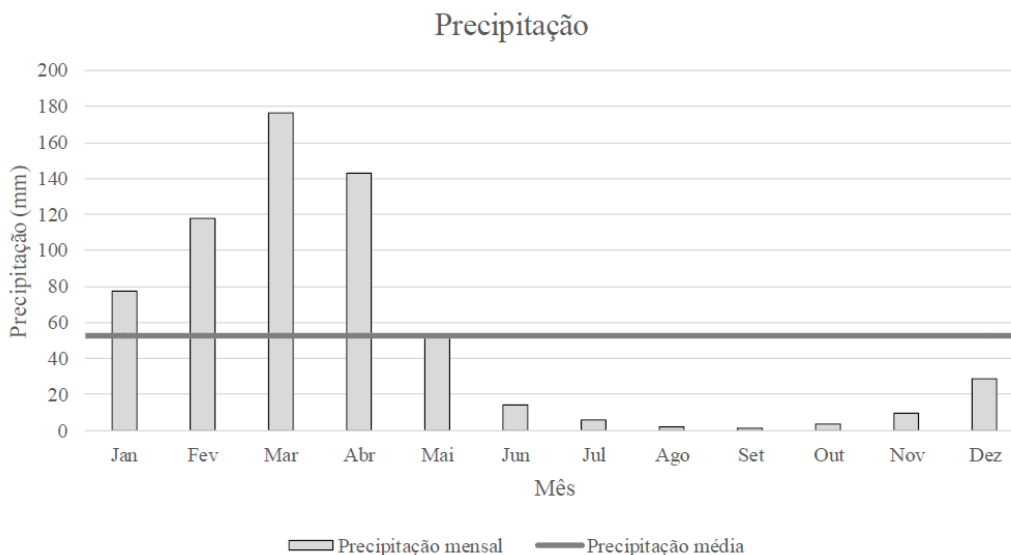


Figura 2: Regime de precipitação mensal na RHSC

Os índices TSM avaliados como variáveis explicativas foram definidos como a média das anomalias de temperatura para 4 trimestres: dezembro a fevereiro (DJF), setembro a novembro (SON), julho a agosto (JJA), e março a maio (MAM). Portanto, para cada período chuvoso foram avaliadas separadamente as relações com quatro conjuntos de índices TSM trimestrais imediatamente anteriores.

Dessa forma, a estratégia metodológica utilizada nessa análise se resume a avaliação da importância de cada um dos 12 índices TSM obtidos nos quatro trimestres preditores DJF, SON, JJA e MAM, com variáveis explicativas da precipitação sazonal da RHSC em quatro períodos chuvosos distintos, semestral DJFMAM, quadra FMAM, trimestres DJF e MAM.

RESULTADOS

Como descrito anteriormente, foi utilizado o método *Random Forest* (RF) para classificação dos índices climáticos em ordem de importância, assim como em Carvalho (2021) a mediana da medida de importância para cada variável foi tomada para classificá-las.

Cada período teve o modelo compilado com 50 sets de treino/teste, onde a etapa de treino corresponde a criação das árvores de decisão, salientando que o modelo escolhe a melhor divisão de um subconjunto aleatório de variáveis de entrada, e a fase de teste que consiste em analisar o desempenho do modelo. A métrica utilizada para o desempenho foi a média do Erro Quadrático Médio (EQM) dividido pelo desvio padrão, indicando a importância variável na classificação. Na apresentação dos resultados do RF, adotou-se o *boxplot* (diagrama de caixa) por melhor representar a variabilidade analisados.

Na determinação no nível de influência dos índices Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para diferentes períodos de precipitação na RHSC foram avaliados 12 índices entre o primeiro e o quarto trimestres de antecedência (*lag* trimestral variando de 1 a 4). Os resultados para o período chuvoso semestral, de dezembro a maio (DJFMAM), são apresentados na Figura 3 com os cinco principais índices preditivos das anomalias de TSM para os períodos de setembro a novembro (SON), junho a agosto (JJA), março a maio (MAM) e dezembro a janeiro (DJF).

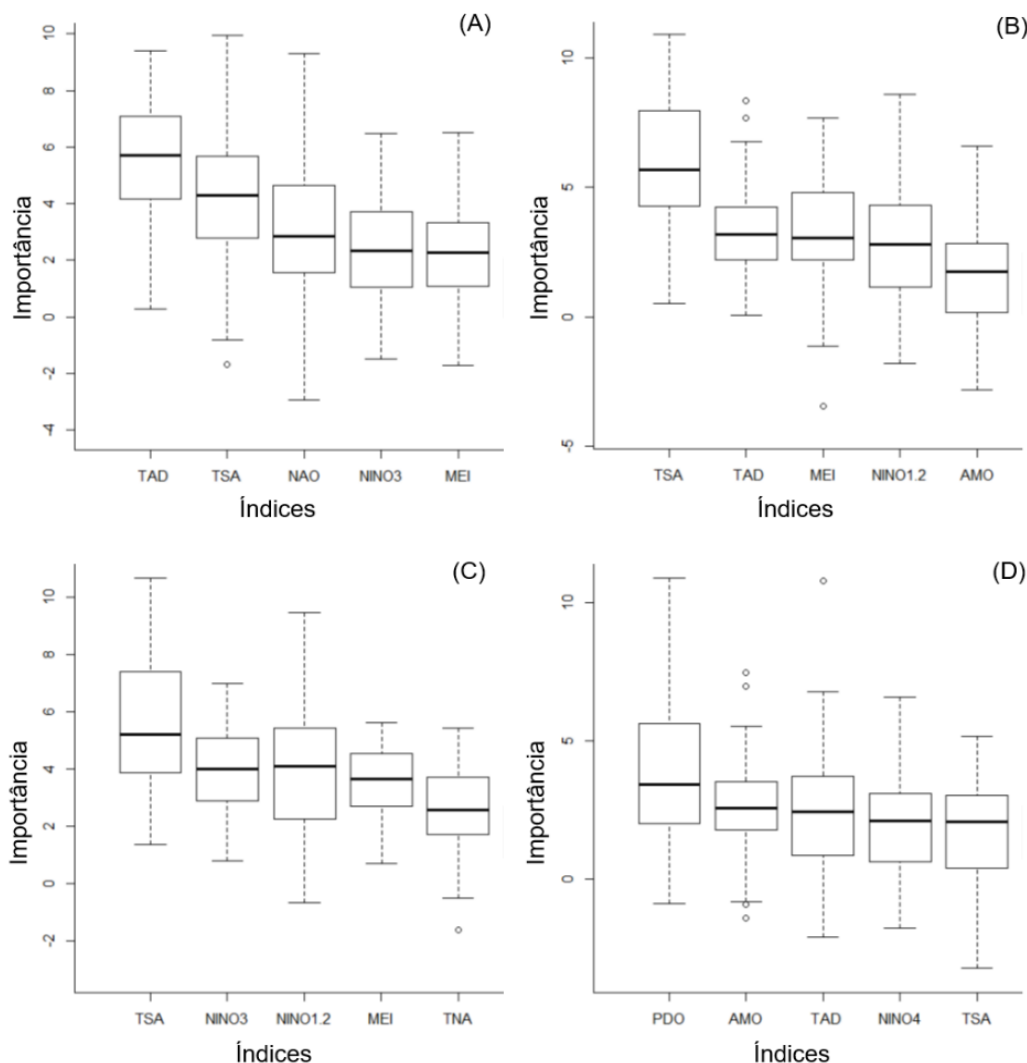


Figura 3: Boxplot para os índices TSM analisados no período de SON (A), JJA (B), MAM (C) e DJF (D) relativos ao período chuvoso DJFMAM.

A partir da análise dos resultados obtidos para o semestre chuvoso DJFMAM (Figura 3) percebe-se a grande importância dos índices Atlântico Tropical Sul (TSA) e Dipolo do Atlântico Tropical (TAD) bem classificado nos períodos SON, JJA e MAM. Estas se distanciam das primeiras posições em DJF, no entanto a variabilidade relativa de importância entre os índices é muito pequena. Ainda em relação a DJF a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) apresenta-se como índice mais importante, no entanto em JJA e MAM esta apresentou importância negativa. Cabe destaque que no período MAM o TAD apresentou valores negativos de importância, sendo classificado como a variável menos importante, mesmo possuindo grande relevância nos demais períodos.

Para a quadra chuvosa, de fevereiro a maio (FMAM), os resultados com os cinco índices TSM mais importantes para os diferentes *lags* temporais são apresentados na Figura 4. As Figura 5 e 6 apresentam os resultados das avaliações realizadas para o primeiro trimestre chuvoso, de dezembro a fevereiro (DJF), e para o segundo trimestre chuvoso, de março a maio (MAM), respectivamente.

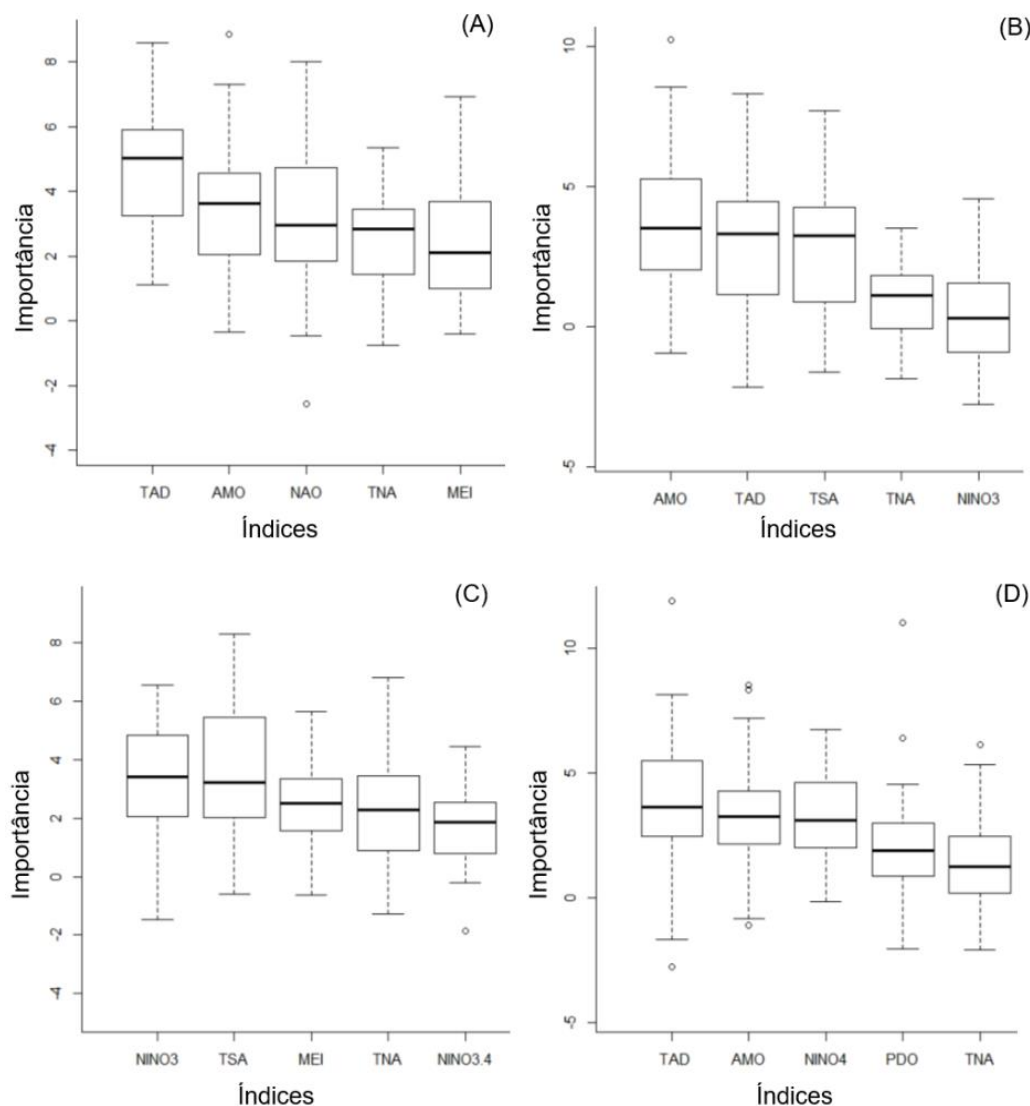


Figura 4: Boxplot para os índices TSM analisados no período de SON (A), JJA (B), MAM (C) e DJF (D) relativos ao período chuvoso FMAM.

Na Figura 4 observa-se os resultados obtidos na análise da quadra chuvosa FMAM. O índice TAD e Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) possuem grande relevância variando entre a primeira e segunda posição em nível de importância nos períodos SON, JJA e DJF. No entanto, o AMO possui importância negativa no período MAM. O Atlântico Tropical Norte (TNA) apresenta-se entre os 5 índices mais importante em todos os períodos analisados. Apesar de PDO possuir uma certa importância no período DJF, foram obtidos valores negativos da mediana nos demais períodos. O mesmo acontece com a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) que possui uma certa relevância para o período SON e valores negativos de importância para os demais.

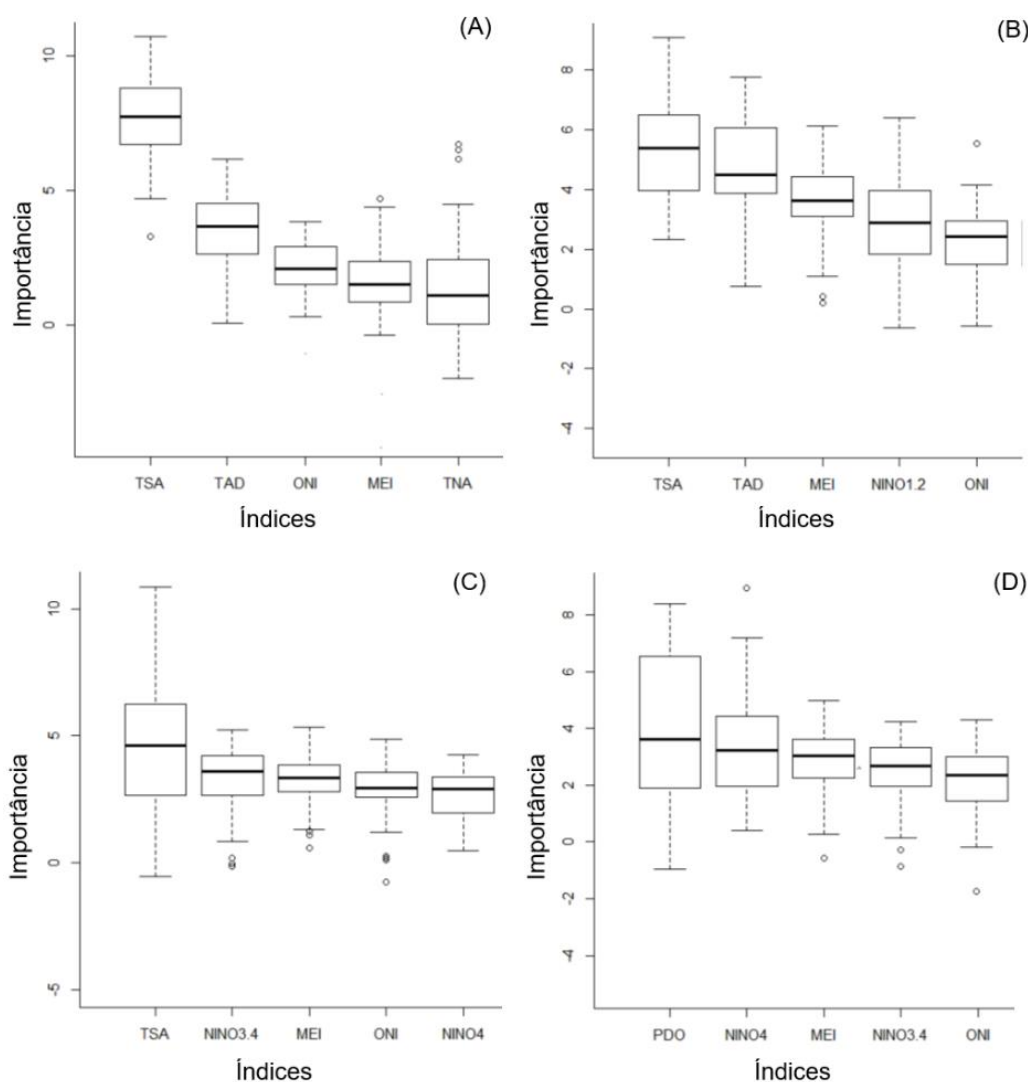


Figura 5: Boxplot para os índices TSM analisados no período de SON (A), JJA (B), MAM (C) e DJF (D) relativos ao período chuvoso DJF.

De acordo com a Figura 5, que apresenta os resultados obtidos na análise do primeiro trimestre chuvoso DJF, percebe-se o índice TSA como a variável de maior importância nos períodos SON, JJA e MAM, e o índice TAD como a segunda para SON e JJA. O ENSO Multivariado (MEI) e Nino Oceânico (ONI) estão entre os cinco principais índices em todos os períodos analisados. Observa-se também que outros índices baseados no El Nino como NINO1.2, NINO3.4 e NINO4 apresentam entre os mais importantes diferente do que foi observado para os períodos chuvoso de DJFMAM e FMAM. Apesar do PDO apresentar-se como a variável

mais importante para os períodos DJF ela possui valores negativos ou muito próximos de zero nos demais períodos. Por outro lado, ainda sobre DJF, os índices TSA e TAD apresentaram valores de mediana de importância negativa.

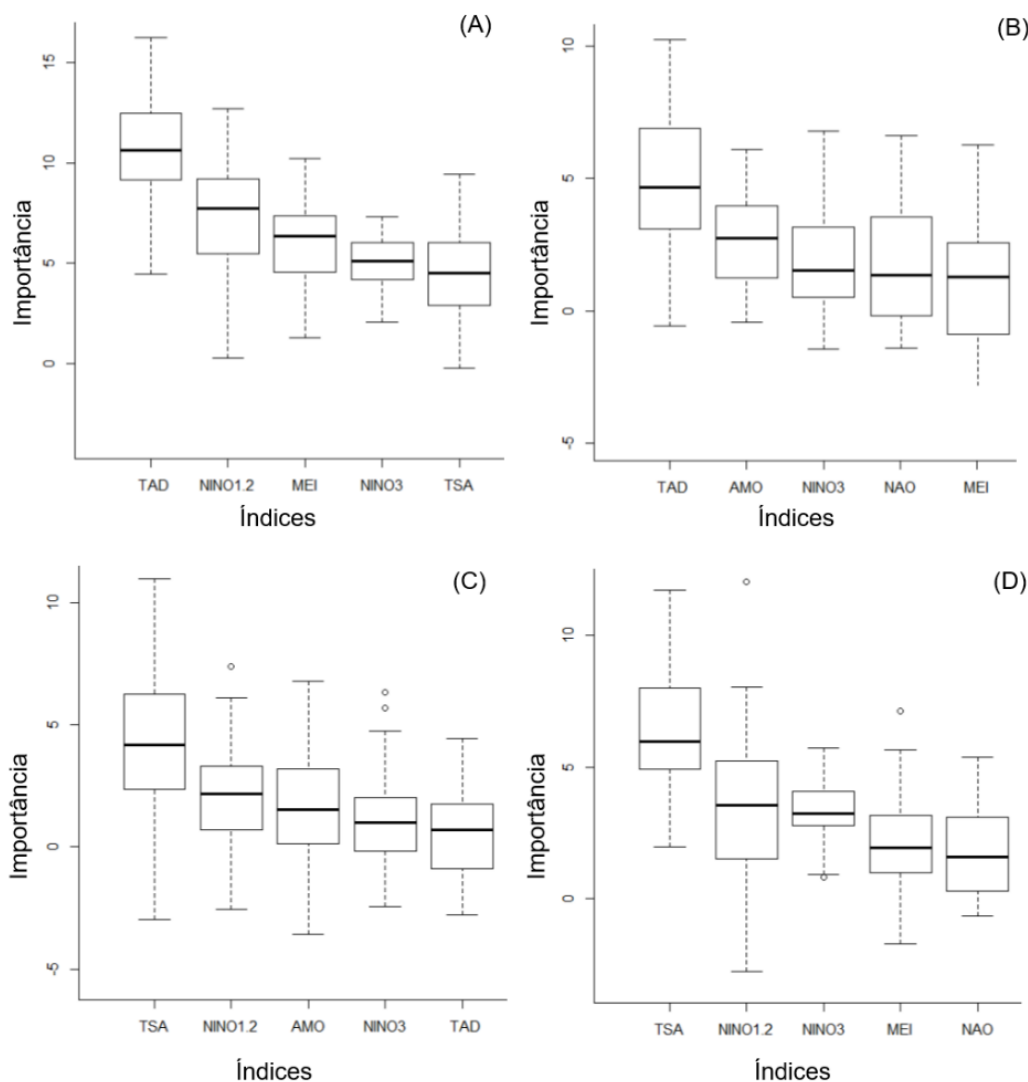


Figura 6: Boxplot para os índices TSM analisados no período de DJF (A) SON (B), JJA (C) e MAM (D) relativos ao período chuvoso MAM.

Analisando a Figura 6, que apresenta os resultados obtidos na análise do segundo trimestre chuvoso FMA, percebe-se o TAD como a variável de maior importância nos períodos DJF e SON e o TSA como a variável de maior importância nos períodos JJA e MAM. Já o NINO1.2 representa a segunda variável mais importante para DJF, JJA e MAM. O NINO3 está entre os cinco principais índices em todos os períodos analisados e o MEI para os períodos DJF, SON e MAM. TSA e NINO1.2 apresentarem-se como a variáveis importante para os demais períodos estas obtiveram valores negativos para o período SON.



Análise Geral

O Atlântico Tropical Sul (TSA) foi o índice classificado mais vezes como a variável mais importante pelo RF, com um total de sete vezes das 16 possíveis, que corresponde a 43,75% dos casos. O Dipolo do Atlântico Tropical (TAD) é o segundo índice que mais vezes foi classificado como variável principal, com total de cinco vezes, o que equivale a 31,25% dos casos.

Percebe-se a grande influência das anomalias de TSM que envolvem o dipolo do atlântico na precipitação sazonal da RHSC, onde estes foram classificados como os mais importantes em 75% das situações analisadas. Em apenas um dos períodos chuvosos (trimestre de dezembro a fevereiro DJF com o preditor DJF, com *lag* trimestral quatro) não esteve entre as três variáveis mais importantes. Ademais, salienta-se que o Atlântico Tropical Norte (TNA) foi a única variável que nunca esteve entre os três índices mais importantes, mas apareceu seis vezes entre a quarta e quinta posição de importância.

Entre os índices TSM derivados do El Niño Oscilação Sul (ENOS) cabe destaque para ENSO multivariado (MEI) que aparece 12 vezes entre as cinco variáveis mais importantes (75%) e seis vezes como a terceira mais importante (37,5%), apesar de não estar na primeira ou segunda melhor performance em nenhum dos cenários. O NINO 1.2 se apresenta três vezes com o segundo índice mais importante e isso acontece especificamente no período chuvoso de março a maio MAM. Já o NINO3 surge sete vezes entre os cinco índices mais importantes.

A Oscilação do Atlântico Norte (NAO) foi o índice classificado mais vezes como a variável menos importante no total seis vezes, correspondendo a 37,5% das possibilidades, além de estar entre os três índices menos importante em 56,25% dos casos. A Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) ficou em segundo lugar, no total de quatro vezes como a variável menos importante, ou seja 25% do total.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o nível de importância dos índices climáticos, baseados na medida da anomalia das TSMs (Temperatura de Superfície do Mar) localizadas no oceano Pacífico Equatorial e oceano Atlântico Tropical, como variáveis explicativas do regime pluviométrico da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), em diferentes períodos, a partir do método *Random Forest* (RF) e uma série histórica de 67 anos de dados hidrometeorológicos.

O Atlântico Tropical Sul (TSA) foi o índice classificado mais vezes como a variável mais importante pelo RF, representando um total de 43,75% dos casos. O Dipolo do Atlântico Tropical (TAD) é o segundo índice mais vezes classificado como a variável mais importante em 31,25% dos casos. Foi verificada a grande influência das TSM que envolvem o dipolo do atlântico na precipitação sazonal da RHSC, onde foram classificados como os mais importantes em 75% das situações analisadas.

Entre os índices TSM derivados do El Niño Oscilação Sul (ENOS) cabe destaque para ENSO multivariado (MEI) aparece entre as cinco principais variáveis em 75% dos casos e 37,5% como terceira mais importante, apesar de não aparecer na primeira ou segunda posição em nenhum dos casos.

A Oscilação do Atlântico Norte (NAO) foi o índice classificado mais vezes como a variável menos importante com total de 37,5 %, além de estar entre os três índices menos importante em 56,25% dos casos. A Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) ficou em segundo lugar como variável menos importante, ou seja, em 25% das possibilidades analisadas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARVALHO, T. M. N.; SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, V. C. Urban water demand modeling using machine learning techniques: Fortaleza - Brazil Case Study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 147, p. 1, 2021.
2. COUTINHO, M. D. L.; SAKAMOTO, M. S. Análise sinótica da intensa precipitação observada no litoral do Ceará em 7 de abril de 2016. In: *Geosp – Espaço e Tempo*, v. 21, n. 3, p. 858-871, 2017.
3. DA SILVA, D. F. *et al.* Previsão Climática e de Ciclos Climáticos para o Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, p. 959-970, 2013.
4. FERREIRA, A.G.; MELLO, N.G.S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 01, n. 01, p. 15-28, 2005.
5. MARENGO, J. A. *et al.* Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, v. 21, p. 459–475, 2003.
6. MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-4, 2002.
7. NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. *Institution of Oceanography, La Jolla, Calif.* p. 336-343, 1972.
8. NOBRE, P. As origens das águas no Nordeste: A questão da água no Nordeste. In: *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – Brasília, DF: CGEE*, 2012.
9. NOBRE, P. *et al.* Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Region Spectral Models at IRI. *Bulletin American Meteorological Society*, v. 82, p. 2787-2796, 2001.
10. NÓBREGA, R. S. *et al.* O fenômeno El Niño e a influência conjunta do dipolo do Atlântico no Estado do Ceará. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, XI, p. 22, 2002.
11. RAJAGOPALAN, B. *et al.* Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles. In: *Monthly Weather Review*, v.130, n. 7, p. 1792 - 1811, 2002.
12. SANTOS, J. M.; SOARES, L. P. A precipitação para o estado do ceará e sua relação coma dinâmica climática. In: *II Workshop Internacional sobre água no semiárido brasileiro, 2015. SILVA, D. F. et al. Efeitos da associação de eventos de ENOS e ODP sobre o Estado do Ceará. Revista de Geografia (UFPE)*, v. 29, n. 2, p.114-135, 2012.
13. SILVA; D. F.; GALVÍNIO, J. D. Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.4, n.4, p. 665-676, 2011.
14. UVO, C. R. B.; BERNDTSSON R. Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil. In: *J. Geophysic Research*, v. 101, n. D2, p. 4221-4233, 1996.
15. UVO, C. B. *et al.* The relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. *Journal of Climate*, v.11, n. 10, p. 551-562, 1998.