



Etapas de uma Previsão Climática Sazonal

STEPS OF A SEASONAL CLIMATE FORECAST

GABRIELA MATHIZEN DE CAMPOS SILVA^{1,2}, LUIZ FELIPPE GOZZO^{2,3}, MICHELLE SIMÕES REBOITA⁴

1 - GRADUANDA EM METEOROLOGIA, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), BAURU, SP, BRASIL.

2 - CENTRO DE METEOROLOGIA DE BAURU (IPMET-UNESP), BAURU, SP, BRASIL.

3 - DOCENTE, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), FACULDADE DE CIÊNCIAS, BAURU, SP, BRASIL.

4 - DOCENTE, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (UNIFEI), ITAJUBÁ, MG, BRASIL.

EMAIL: MATHIZENGABRIELA@GMAIL.COM, LUIZ.GOZZO@UNESP.BR, REBOITA@UNIFEI.BR

Abstract: Seasonal climate forecasting is of vital importance to society, having great relevance for various sectors such as agriculture, energy and civil defense. It is a complex process consisting of the gathering and interpretation of a wide range of information complemented with prior knowledge of the regional climatology. This work documents steps for the elaboration of a climate forecast, using the forecast for Brazil during the southern Winter of 2020 as an example. Steps of a forecast (determination of climatologies, diagnostic analysis, seasonal prognosis and subjective validation) are presented and developed, and incorrect predictions of precipitation anomalies over the south and north of the country are analyzed in terms of possible climate forcings that led to their occurrence. Finally, challenges inherent to climate forecasting are listed, such as the joint action and relative impact of different climatic oscillations, the high spatial variability of precipitation and the need to be careful with the indicated predictions of numerical forecasting models.

Resumo: A previsão climática sazonal é de vital importância para a sociedade, tendo grande relevância para diversos setores como o agrícola, energético, defesa civil, etc. É um processo complexo, que consiste na reunião e interpretação de uma gama muito grande de informações, além da necessidade do conhecimento prévio da climatologia de uma certa região. Este trabalho documenta a sequência de passos que constituem a elaboração de uma previsão climática, utilizando como exemplo a previsão para o Brasil no inverno austral de 2020. As etapas de uma previsão (determinação de climatologias, análise diagnóstica, prognóstico sazonal e validação subjetiva) são apresentadas e desenvolvidas, e os prognósticos incorretos de anomalias de precipitação no sul e no norte do país são analisados em termos de possíveis forçantes climáticas que levaram à sua ocorrência. São enumerados, por fim, os desafios inerentes à previsão climática, como a atuação conjunta e a relevância relativa de diferentes oscilações climáticas, a grande variabilidade espacial da precipitação e o cuidado com as previsões indicadas pelos modelos numéricos.

Citation/Citação: Silva, G. M. C., Gozzo, L. F. & Reboita, M. S. (2021). Etapas de uma Previsão Climática Sazonal. *Terraê Didática*, 17(Publ. Contínua), 1-12, e021026. doi: 10.20396/td.v17i0.8665050.

Keywords: Climate modeling. Tools and techniques. Earth Systems..

Palavras-chave: Modelagem climática. Ferramentas e técnicas. Sistema Terra.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 22/03/2021

Revised/Corrigido: 20/07/2021

Accepted/Aceito: 28/07/2021



Introdução

O clima de uma certa região do planeta é resultado da combinação de cinco fatores: latitude, altitude, distância dos oceanos, tipo de superfície e circulação atmosférica (Reboita et al., 2012). Contudo, ele não é estático: padrões de variabilidade oceano/atmosfera (teleconexões), como o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), afetam a circulação atmosférica de modo a causar, por exemplo, mais ou menos chuva em uma determinada estação do ano. Nesse contexto emerge a importância da previsão climática sazonal, técnica que se dirige ao prognóstico das condições do clima num horizonte de cerca de 3 meses à frente. A previsão climática sazonal é de grande importância para a sociedade, sendo um fator relevante para o planejamento socioeconômico, zoneamento agroclimático (Wollmann & Galvani, 2013), geração de energia (Paiva, 2020), defesa civil, dentre outras.

Os modelos numéricos para simulação da atmosfera resolvem os processos físicos, químicos e biológicos, e suas complexas interações, por meio da integração de equações diferenciais dirigidas por condições iniciais e de fronteira, isto é, dados observados (Warner, 2010, Ambrizzi et al., 2019). O alto desempenho atual dos supercomputadores e a técnica de previsão por conjunto ou *ensemble* (média dos resultados de vários modelos, média de várias simulações de um mesmo modelo com diferentes condições iniciais, ou a combinação de ambas), possibilitam previsões de tempo e clima com maior antecedência e acurácia, porém esta acurácia varia de acordo com a localidade. Por exemplo, uma das variáveis-chave para a previsão climática é a temperatura da superfície do mar (TSM), pois o clima tende a responder às suas condições. Logo, regiões onde a TSM determina fortemente o regi-

me climático, como o Norte, Nordeste e Sul do Brasil (Tedeschi et al., 2016, Utida et al., 2019) têm previsibilidade alta, enquanto regiões com influência menos definida dos oceanos (Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, por exemplo) apresentam baixa previsibilidade (Sampaio & Silva Dias, 2014).

A previsão climática sazonal é uma tarefa extremamente complexa que não pode ser realizada puramente por modelos numéricos. Ou seja, ela necessita da participação humana para que a grande quantidade de informações dos modelos seja agrupada e analisada de acordo com os conhecimentos teóricos e práticos de um (conjunto de) meteorologista(s). A realização desta previsão consiste basicamente em quatro etapas: determinação da climatologia da região de interesse, análise das condições atmosféricas e oceânicas atuais, prognóstico e validação.

A *climatologia* da região de interesse pode ser definida, de forma simplificada, como o valor médio das variáveis atmosféricas por um período suficientemente longo; a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017) define um período mínimo de 30 anos para o cálculo das médias. Também faz parte da climatologia de um local a descrição dos sistemas atmosféricos que contribuem para essas médias. Na previsão climática, busca-se a identificação de anomalias no campo previsto em relação ao climatológico, isto é, alterações do valor médio das variáveis atmosféricas como precipitação e a temperatura do ar.

Uma vez que o meteorologista conhece a climatologia da região de interesse, é realizada uma *análise diagnóstica* das condições atmosféricas e oceânicas dominantes ao longo do último mês em relação ao de início da previsão; essa atividade é essencial para contextualizar as previsões que serão geradas, pois muitas vezes a condição futura pode basear-se na continuação do padrão observado. Um exemplo disto é o conhecimento do padrão espacial atual das anomalias de TSM. Devido à grande inércia térmica dos oceanos, estas anomalias tendem a se modificar de forma relativamente lenta; portanto, pode-se esperar que, com frequência, as condições gerais de TSM de um mês sejam semelhantes às do mês seguinte e, sabendo quão bem a atmosfera responde a essas condições, modelos conceituais podem ser aplicados para a previsão (Reboita et al., 2021).

O *prognóstico* é realizado a partir da consulta aos resultados das saídas de diferentes modelos climáticos, geralmente executados por grandes

centros de modelagem atmosférica, associada ao conhecimento dos padrões atuais do clima e utilização de modelos conceituais. Assim, há uma análise crítica por um ou mais profissionais, para determinar se as simulações dos modelos condizem fisicamente com os padrões atmosféricos indicados pelas condições presentes e conhecimentos teóricos.

Por fim, após se passarem os meses da previsão, os meteorologistas realizam a *avaliação* da qualidade do prognóstico por intermédio da comparação do que foi previsto com os dados observados (obtidos por estações meteorológicas ou reanálises, por exemplo). Essa etapa, que pode ser subjetiva (análise qualitativa) e/ou objetiva (análise quantitativa dos erros) é importante para determinar a performance dos modelos e aperfeiçoar as habilidades críticas dos meteorologistas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um exemplo do processo de previsão climática sazonal no Brasil. As previsões de temperatura do ar e precipitação para as cinco regiões do Brasil, durante a estação do inverno austral, junho-julho-agosto (JJA) de 2020, são realizadas para ilustrar as quatro etapas descritas anteriormente. Prognósticos climáticos para o inverno brasileiro têm grande importância socioeconômica principalmente porque este é o período do ano favorável à ocorrência de incursões de ar frio no sul do país (Pezza & Ambrizzi, 1999, Wrege et al., 2018, Lucyrio et al., 2019), chuvas volumosas na costa leste do Nordeste (de Sousa et al., 2016), umidade do ar extremamente baixa em grande parte do país e numerosas queimadas no Brasil Central (Santos et al., 2014, Lemes et al., 2020). Procura-se aqui enfatizar à comunidade usuária das previsões e aos interessados neste tópico, os processos e desafios inerentes à produção da previsão climática sazonal.

Metodologia

Dados

Para o estudo climatológico, diagnóstico e validação da previsão climática sazonal, foi utilizada a reanálise 1 (NCEP1) do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, com resolução espacial horizontal de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ latitude/longitude e frequência mensal para temperatura, disponível em www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis.html (Kalnay et al., 1996). A reanálise é um dos poucos conjuntos de dados que possuem

informações atualizadas no mês da realização da previsão. Para precipitação foram utilizados dados diários do *Climate Prediction Center* (CPC) disponível em www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html, com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ latitude/longitude e disponíveis desde 1979 até o presente (Chen et al., 2008). Para o estudo, os dados diários foram convertidos em mensais.

Anomalias

As anomalias sazonais de temperatura do ar e precipitação foram obtidas por: $A = X - \underline{X}$ onde

A = Anomalia da variável para o inverno brasileiro de 2020;

X = Variável observada (temperatura média/precipitação acumulada para JJA de 2020);

\underline{X} = Normais climatológicas da variável, calculadas a partir dos dados NCEP1 e CPC.

Fontes de monitoramento e previsão

Dados de análise e previsão numérica sazonal foram obtidos das fontes listadas abaixo. A lista não pretende ser definitiva ou esgotar todas as fontes disponíveis de dados climáticos, mas indicar as fontes utilizadas neste trabalho, que são algumas das mais completas e confiáveis.

- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) - São disponibilizados, em <http://clima.cptec.inpe.br/>, mapas para diagnóstico de condições climáticas passadas e previsões a partir dos modelos numéricos que compõem o conjunto Multi Modelo Nacional. Em <http://tempo.cptec.inpe.br/>, foi realizado o monitoramento de frentes frias ao longo do trimestre.
- *Copernicus Climate Change Service* (C3S) - Programa operacional da União Europeia que fornece previsões climáticas em forma de mapas e prognósticos do ENOS em https://climate.copernicus.eu/charts/c3s_seasonal/.
- Conjunto de Multi-Modelos da América do Norte (NMME) - iniciativa do Centro de Previsão do Clima da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) que fornece previsões dos centros de modelagem climática dos Estados Unidos e Canadá, em <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/>.

- *International Research Institute for Climate and Society* (IRI) - cooperação entre o programa climático da NOAA e a Universidade de Columbia dos Estados Unidos da América, disponibiliza mapas de previsão climática sazonal em <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/> e discussões detalhadas sobre o ENOS em <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/>.
- Grupo de Estudos Climáticos (GrEC) grupo de estudo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) - Utilizam modelos numéricos e técnicas estatísticas diversas para realizar análises e previsões do clima do Brasil. Dados disponíveis em http://www.grec.iag.usp.br/data/index_BRA.php.
- Índices de teleconexões – reúne as condições atuais e séries históricas dos principais índices de teleconexão relevantes para a previsão e monitoramento climático do Brasil em <https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/> (Souza & Reboita, 2021).

Resultados e Discussão

As análises ao longo do trabalho são baseadas na atuação de sistemas meteorológicos relevantes para a determinação do clima no Brasil durante o trimestre de inverno. Os principais são: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS - Sun et al., 2017, Reboita et al., 2019), ondas baroclínicas com seus respectivos ciclones extratropicais e frentes frias associados (Vera et al., 2002, Reboita et al., 2017), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT - Poveda et al., 2006) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs - Torres, 2008). Os principais padrões de variabilidade que impactam os sistemas mencionados são o ENOS (Tedeschi et al., 2013), Oscilação de Madden-Julian (OMJ - Alvarez et al., 2016), Modo Anular Sul (MAS - Silvestri & Vera, 2003, Reboita et al., 2009) e Dipolo do Oceano Índico (DOI - Chan et al., 2008, Sena & Magnusdottir, 2021). Uma revisão completa destas e de outras teleconexões e seus impactos na climatologia da precipitação na América do Sul é apresentada em Reboita et al. (2021).

Os resultados e discussões estão divididos em quatro subseções, referentes a cada etapa da previsão: climatologia, análise diagnóstica, prognóstico e validação.

Climatologia

A climatologia de temperatura e precipitação durante o inverno brasileiro para o período 1981-2010 foi calculada a partir dos dados do NCEP1 e CPC (Fig. 1), fornecendo a condição média a partir da qual foram calculadas as anomalias observadas na etapa de validação (Fig. 8). A seguir, há uma breve descrição dos sistemas e fenômenos atmosféricos responsáveis pelo padrão climatológico da estação, em cada região do país.

Região Sul

As temperaturas na região Sul variam em média entre 12 e 15°C durante o inverno. Esses valores amenos decorrem do fato de que a região recebe menos energia solar nestes meses, desfavorecendo o aquecimento do ar e favorecendo a intrusão de massas de ar frio das altas latitudes para as menores latitudes. Além disso, como o relevo de parte da região é bastante elevado, ela comumente registra as menores temperaturas dentre as regiões do Brasil. A formação de ciclones, passagem de frentes frias ou atuação prolongada destas devido ao ASAS, e a formação de linhas de instabilidades são frequentes, causando moderados volumes de chuva (200-400 mm). O principal fenômeno responsável

pela variabilidade climática em escala interanual na região é o ENOS, que em sua fase positiva/negativa provoca significativo aumento/diminuição de chuvas (Grimm, 2011). Numa frequência mais alta de variabilidade, Reboita et al. (2009) e Vasconcellos et al. (2019) mostram influência do MAS, com sua fase positiva (negativa) causando, de forma geral, menor (maior) acumulado de chuva e temperaturas menos (mais) elevadas nesta região.

Região Sudeste

Como esta região se localiza entre as latitudes médias e a região tropical, sofre influência de sistemas distintos característicos dos dois regimes atmosféricos. No extremo sul do Sudeste a temperatura segue a influência e padrão da região Sul por estar em uma região de transição. Já para as localidades do Rio de Janeiro, Espírito Santo, faixa leste de Minas Gerais e faixa litorânea de São Paulo, as temperaturas médias amenas (18-21°C) justificam-se pelo deslocamento dos sistemas frontais e ciclones que eventualmente avançam para menores latitudes, e pelo relevo mais elevado. O inverno é o período seco, com precipitação média entre 25-100 mm, pois a fase inativa da monção durante JJA (Raia & Cavalcanti, 2008) desfavorece o transporte de umidade desde as regiões tropicais e a formação de zonas de convergência de umidade sobre o Sudeste. Além disso, o ASAS se intensifica e expande para oeste nessa época, criando uma forçante dinâmica que inibe precipitação convectiva.

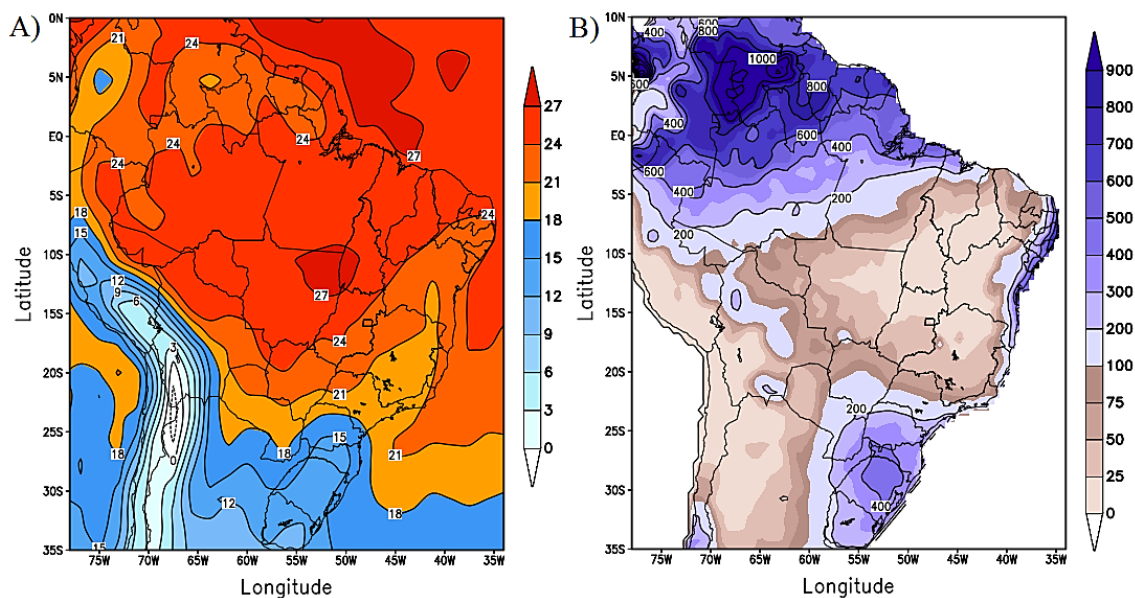


Figura 1. Normais climatológicas (1981-2010) para o trimestre JJA de (A) temperatura do ar em superfície (°C) e (B) precipitação (mm) no Brasil. Elaboração: próprios autores. Fonte: NCEP/NCAR e CPC

tiva sobre o sudeste (Degola, 2013, Reboita et al., 2019), enquanto mantém as frentes frias atuando sobre a região sul.

Região Centro-Oeste

O Centro-Oeste também está localizado na região subtropical, porém o comportamento da temperatura e precipitação diferem do padrão climatológico do Sudeste. Esta região possui menor influência de sistemas frontais (principalmente em sua porção central e norte) e não sofre influência direta do ASAS. Os volumes de chuvas são menores, devido ao período inativo da monção sul-americana. Registra-se em média entre 1-50 mm de chuva na maior parte da região, e as temperaturas médias variam entre 21-27°C.

Região Nordeste

Devido à localização da região nos trópicos, há maior aquecimento desta em comparação às previamente descritas; as temperaturas médias são elevadas, entre 21 e 24°C. Os volumes de precipitação elevados (400-700 mm) ao longo da faixa litorânea leste, devem-se à intensificação do ASAS e à ocorrência dos DOLs, que atingem o pico de atividade durante o inverno (Gomes et al., 2019). No interior nordestino, os volumes climatológicos de precipitação são baixos em JJA, entre 1-25 mm, principalmente pela migração da ZCIT para o hemisfério norte (MASTER IAG-USP, Reboita et al., 2016). Em relação à variabilidade climática, a OMJ possui sinal mais significativo nas anomalias de chuva do Nordeste durante o verão, porém durante o inverno em escala intrasazonal há tendência de anomalias positivas no norte da região durante as fases 1 e 2, e anomalias negativas na faixa leste nas fases 7 e 8 (Valadão et al., 2017). Para a escala interanual, o ENOS apresenta um sinal bem modesto no Nordeste durante o inverno, sendo mais influente na determinação do clima na região para as outras estações (Kayano et al., 2017).

Região Norte

A maior parte dessa região também está localizada em regiões tropicais, com temperaturas médias de 24 a 27°C no inverno. O centro-sul da região passa nestes meses por sua estação seca, mas por ser uma região úmida, coberta pela maior floresta tropical do mundo, os acumulados ainda ficam entre 200 e 900 mm. A migração para norte da ZCIT causa

precipitação em torno de 1000 mm sobre Roraima, Amapá e norte do Amazonas. A variabilidade interanual devido ao ENOS mostra uma diminuição/aumento da chuva acumulada no norte da região na fase positiva/negativa da oscilação, e uma tendência de temperaturas acima da média no centro-oeste da região durante JJA (Kayano et al., 2017). Já em escala intrasazonal, Mayta et al. (2019) mostram um sinal de aumento de chuvas no oeste e sudoeste da região durante as fases 7 e 8 da OMJ (quando a convecção da oscilação localiza-se próxima da longitude 180°W), e ligeira diminuição das chuvas no norte (principalmente em Roraima) durante a fase 2 (quando o pulso de convecção da OMJ localiza-se sobre o Oceano Índico, em torno de 80°E).

Análise diagnóstica

A análise diagnóstica começa com a verificação das condições registradas de TSM, apresentadas aqui para os dois meses que antecederam o prognóstico. Como o clima tende a responder à TSM, é importante verificar como esta variável se comportou no período anterior ao prognóstico, e também uma tendência de como ela evoluiu de um mês para outro (Fig. 2). As TSM do Pacífico equatorial mostraram um resfriamento de abril a maio, sugerindo possível futura transição de

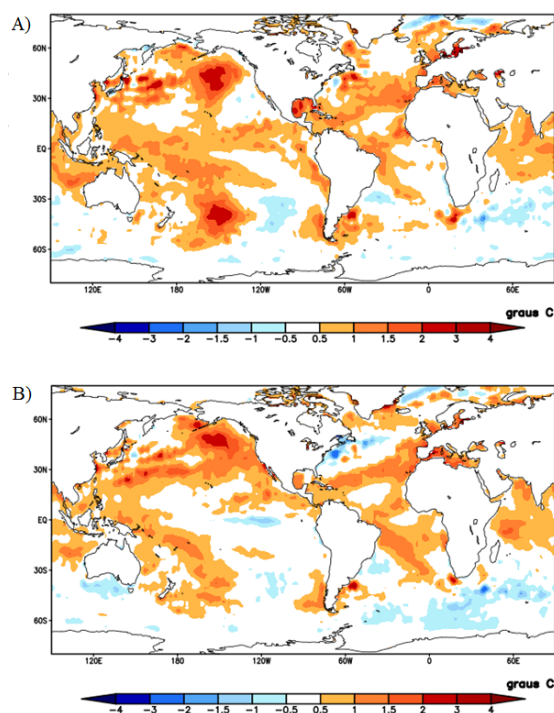


Figura 2. Anomalia da TSM (°C) observada nos meses de abril (A) e maio (B) de 2020. Fonte: CPTEC-INPE

condição de *El Niño* para *La Niña*. Já a persistência de anomalias positivas intensas a oeste da Austrália e Oceania sinalizam fase negativa do DOI. Na bacia do Atlântico, TSM acima da média foi registrada próximo à costa do Nordeste, enquanto na altura da costa do Sudeste, houve anomalia fria de TSM.

Durante o mês de maio, algumas das anomalias observadas podem ser associadas às condições de TSM descritas acima: precipitação (Fig. 3A) acima da média foi favorecida no Norte do Brasil devido à ZCIT mais ao sul de sua posição climatológica (respondendo à TSM quente do Atlântico Tropical), enquanto anomalias negativas de precipitação entre SP e leste do MS correspondem ao padrão esperado em fases negativas do DOI (Gozzo, Verdelho & Custódio, 2020). Nas demais áreas do Sudeste, ligeira anomalia positiva de chuva pode estar ligada à anomalia de TSM negativa do Atlântico Subtropical, possivelmente pelo gradiente meridional de TSM favorecer a formação de mais ciclones (Bombardi et al., 2014).

As anomalias de temperatura de forma geral respondem às anomalias de precipitação (Fig. 3B, 3C): temperaturas mínimas abaixo da média foram registradas em regiões mais secas (como São Paulo e leste de Santa Catarina), enquanto temperaturas máximas abaixo da média ocorreram em regiões de volumes de chuva anormalmente altos (como o centro-norte de Minas Gerais). Importante ressaltar que esta correspondência entre as anomalias nem sempre é tão evidente (Fig. 3).

Prognóstico

Na etapa prognóstica, compilam-se as informações previstas de anomalias de TSM, precipitação e temperatura pelos modelos. Estas previsões numéricas são contextualizadas a partir da análise diagnóstica e avaliadas de acordo com os modelos conceituais do clima e com os conhecimentos práticos dos meteorologistas, para assim ao final de tudo ser gerada uma previsão.

Para o trimestre JJA/2020, todos os modelos dinâmicos e estatísticos apontam para uma situação de ENOS neutro (Fig. 4), portanto espera-se que este fenômeno não tenha grande impacto sobre a definição do clima no período. O prognóstico de anomalias de TSM global a partir do *ensemble* de modelos do C3S (Fig. 5) indica o resfriamento das águas do Pacífico Tropical, mas ainda com fraca intensidade. O mapa também mostra que as condições de anomalias oceânicas para o trimestre devem permanecer semelhantes ao registrado no mês de maio: o Atlântico Tropical Sul e a região da bacia do Prata seguem com águas mais quentes, e o DOI deve se manter em fase negativa.

A configuração de anomalias de TSM previstas sugere que a chuva ficará acima da média no norte da região Norte e no leste do Nordeste, devido respectivamente à atuação da ZCIT mais ao sul de sua posição climatológica e da intensificação dos DOLs. No sul do país, a chuva deve ficar acima da média, respondendo a possível maior atividade ciclogênica na região da bacia do Prata. A região de São Paulo mantém as condições mais secas, com a

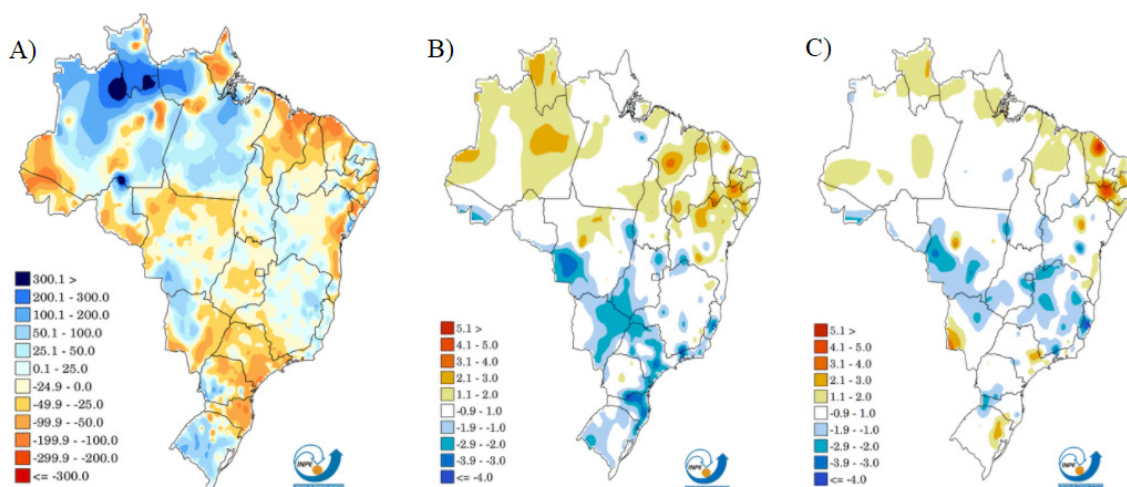


Figura 3. Anomalias observadas de (A) precipitação acumulada (mm), (B) temperatura mínima (°C), (C) temperatura máxima (°C) para o mês de maio de 2020. Fonte: CPTEC-INPE

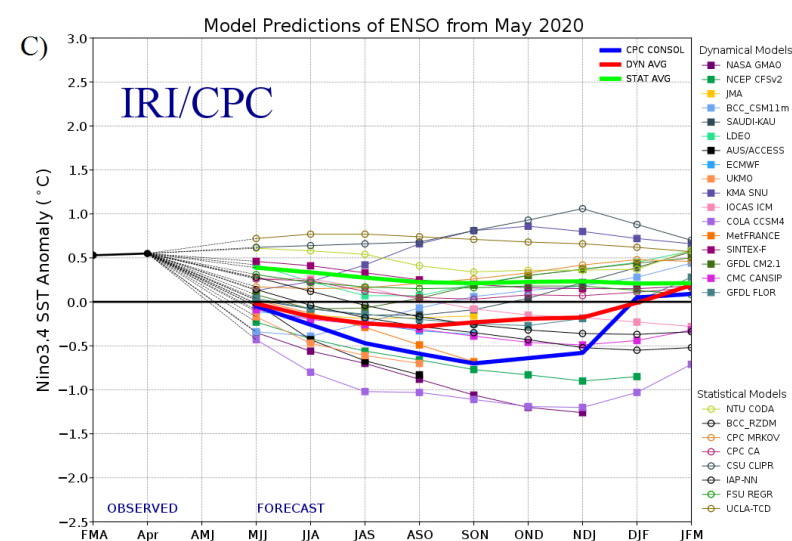
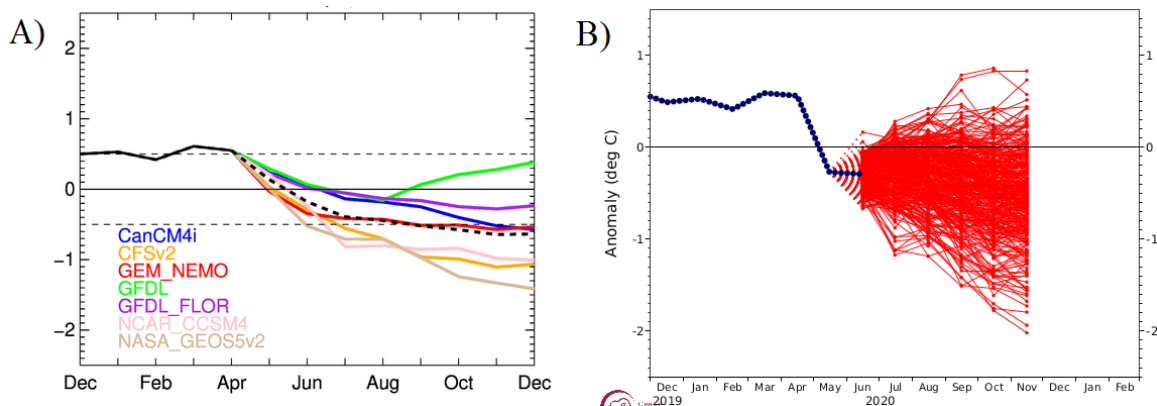


Figura 4. Dados observados (dezembro-maio) e sugestões dos modelos para ocorrência do ENOS para região do NIÑO3.4 do A) NMME, B) CS3 e C) IRI

continuidade da fase negativa do DOI. Pela manutenção do padrão geral de TSM, pode-se esperar que o Centro-Oeste mantenha a anomalia predominantemente seca registrada durante o mês de maio. As saídas dos modelos numéricos (Fig. 6) corroboram algumas das suposições: de forma geral, os modelos indicam chuvas ligeiramente acima da média no norte do Norte e no norte e leste do Nordeste, bem como anomalias secas no Centro-Oeste e grande parte do Sudeste. Apenas no Sul as previsões numéricas divergem do que é esperado conceitualmente: há um leve sinal de anomalia negativa de precipitação. Com tal indicação, esperam-se chuvas dentro da média para a região.

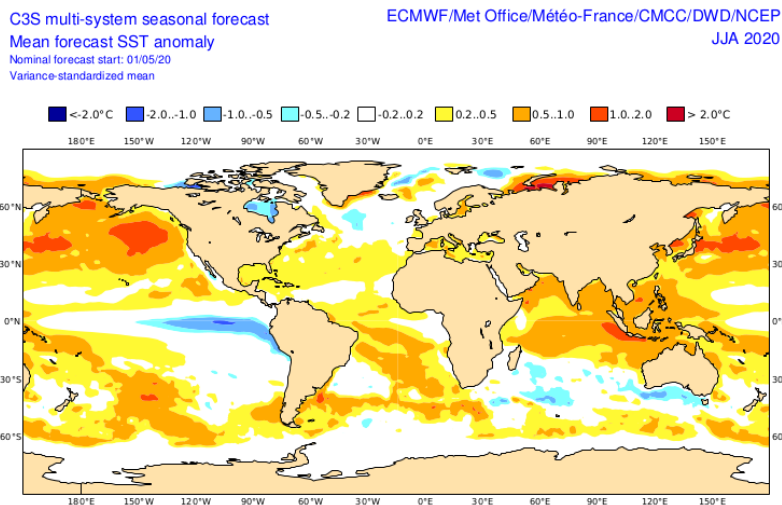


Figura 5. Prognóstico numérico da anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$) para os meses de JJA de 2020. Fonte: C3S

Já em termos de temperatura sazonal, os modelos indicam predomínio de anomalias quentes sobre quase todo o Brasil (Fig. 7), com os maiores desvios positivos esperados para o Centro-Oeste e grande parte do Sudeste, regiões onde também se espera um trimestre mais seco que a média. Temperaturas em torno da média são previstas para grande parte da região Nordeste, e pode-se

supor, devido à influência das águas mais quentes do Atlântico Tropical, que anomalias quentes ocorram ao longo da costa leste da região.

Considerando todos os aspectos citados acima, chega-se ao prognóstico climático sazonal resumido na Tabela 1. Como o intuito do trabalho é apresentar o método de previsão e descrever informações gerais das características da estação (mais quente/fria ou seca/úmida, em relação à média climatológica), o prognóstico é apenas qualitativo, sem considerar a magnitude das anomalias.

Validação

Depois de passado o trimestre para o qual foi realizado o prognóstico, a última etapa é a validação do prognóstico, confrontando a previsão com

dados observados ao longo do período. As anomalias observadas de precipitação do trimestre JJA/2020 (Fig. 8A) mostram que se confirmaram as previsões de chuva abaixo da média no Centro-Oeste, em torno da média em grande parte do Sudeste e do Nordeste, e acima da média para o leste do Nordeste. Para a temperatura, pode-se considerar que os prognósticos de temperatura acima da média foram acertados, de forma geral, para o Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (Fig. 8B). No Centro-Oeste, as temperaturas ficaram em torno da média. Já em relação às anomalias globais de TSM, o campo observado (figura não mostrada) ficou muito próximo ao previsto. Os índices referentes ao ENOS e DOI mantiveram seu sinal neutro.

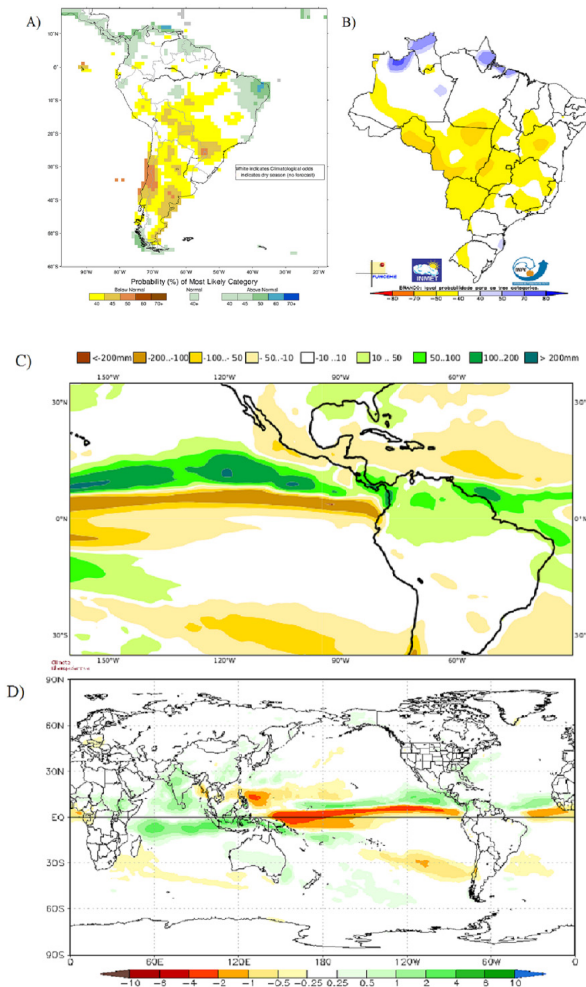


Figura 6. Prognóstico de precipitação para JJA do (A) IRI (probabilidade de anomalia, em %), (B) CPTEC-INPE (probabilidade de anomalia, em %), (C) C3S (anomalia, em mm) e (D) NMME (anomalia, em mm)

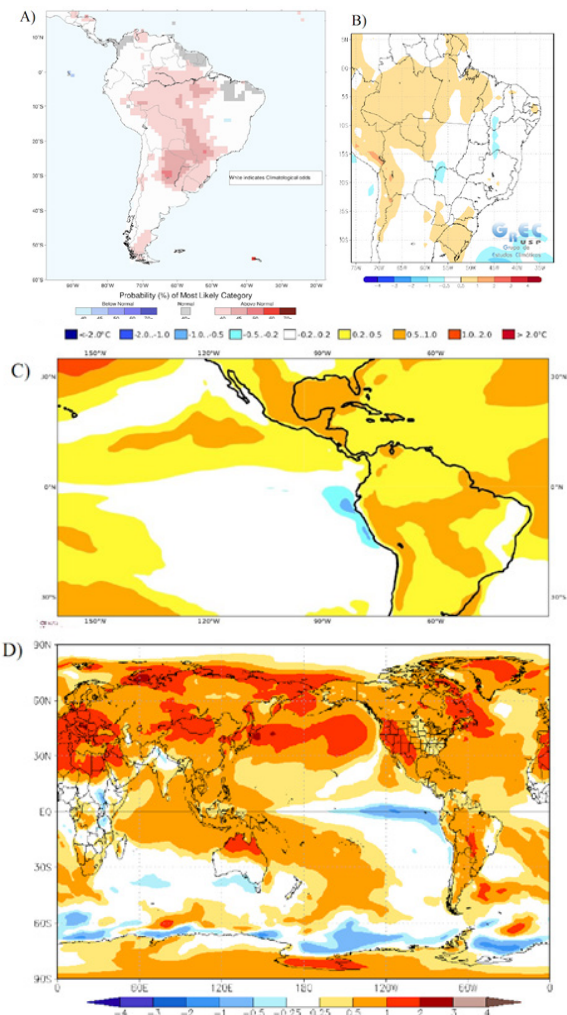


Figura 7. Prognóstico de temperatura do ar para JJA (A) IRI (probabilidade de anomalia, em %), (B) GrEC-USP (anomalia, em °C), (C) C3S (anomalia, em °C) e (D) NMME em °C

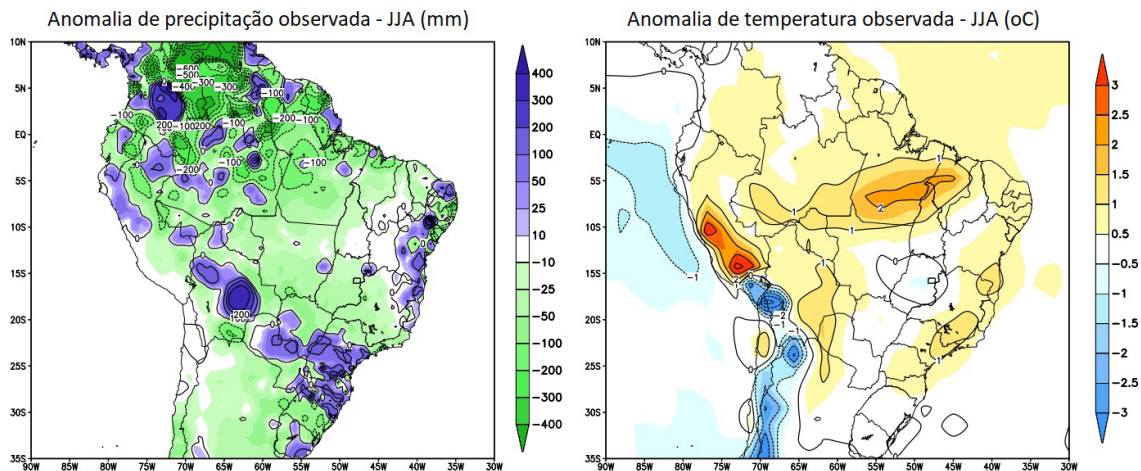


Figura 8. Anomalias de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) observadas para JJA/2020. Elaboração: próprios autores. Fontes: CPC e NCEP1

Um erro significativo do prognóstico climático ocorreu para a precipitação na região Sul, para a qual foi prevista chuva dentro da média (Tab. 1) e ocorreu forte anomalia positiva (Fig. 8A). Isto pode ser associado a um número ligeiramente maior de frentes atuantes neste inverno, em relação à climatologia - foram registradas 14 frentes frias no Sul do país, enquanto a média da estação é em torno de 10 (Rodrigues et al., 2004). Embora a expectativa da maior atuação de frentes tenha sido considerada no prognóstico, a chuva ainda foi maior do que inicialmente previsto. Além disso, mais uma teleconexão que pode ter tido influência nas chuvas abundantes do Sul foi o MAS, que esteve negativo em grande parte dos meses de julho e agosto (Fig. 9B) e, portanto, pode ter contribuído para a maior ocorrência de chuvas na região Sul (Vasconcelos et al., 2019).

Outro erro importante do prognóstico ocorreu para a região Norte: devido à expectativa de que a ZCIT atuasse com maior intensidade ao sul de sua posição climatológica acompanhando a anomalia de TSM do Atlântico Tropical (Fig. 5), foi prevista chuva acima da média no extremo norte (Tab. 1). De forma geral, porém, foram registradas anomalias negativas (Fig. 8A). Isto pode ter decorrido da permanência da OMJ na fase 2 (Fig. 9A) em grande parte do trimestre, o que tende a diminuir

a precipitação no extremo norte do Brasil em escala intrasazonal (Mayta et al., 2019)

É interessante ressaltar que estes modos de variabilidade climáticos de frequência mais rápida, como o MAS e a OMJ podem ter tido um impacto significativo nas anomalias de JJA/2020 devido à neutralidade do ENOS. Se um evento de *La Niña* estivesse estabelecido previamente, seriam esperadas chuvas acima (abaixo) da média no Norte (Sul) do Brasil, pois o sinal do ENOS tende a ser dominante sobre as outras variabilidades.

Conclusão

A previsão climática sazonal, produto de grande importância social e econômica, apresenta grandes desafios em seu desenvolvimento. O objetivo deste trabalho foi descrever as etapas típicas da previsão, esperando fornecer um panorama dos dados, técnicas e desafios envolvidos a usuários e interessados em geral. Estas são as etapas seguidas para se chegar à previsão climática em centros e laboratórios de previsão, como o GrEC-USP.

A partir da previsão sazonal para o Brasil durante o inverno de 2020, foram ilustradas as etapas de climatologia, análise diagnóstica, prognóstico e validação. A climatologia forneceu o estado médio a partir do qual foram calculadas as anomalias previstas, enquanto a análise diagnóstica permitiu determinar a permanência ou alteração de certas condições climáticas anteriores ao período de interesse. No prognóstico, as condições climáticas esperadas conceitualmente a partir da distribuição de anomalias globais de TSM foram complementadas pelas indicações de modelos numéricos,

Tabela 1: Teste de Kruskal-Wallis

	NDVI
Qui-quadrado	0,163
Graus de Liberdade	2
Significância	0,922

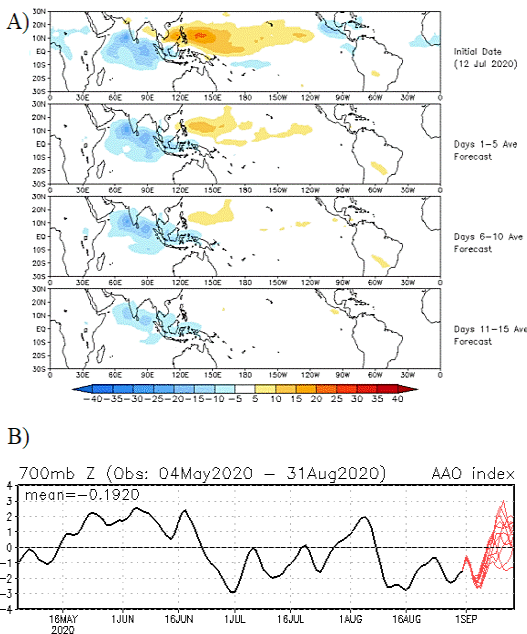


Figura 9. (A) Anomalias de radiação de onda longa emergente (em W.m-2) filtradas na escala intrassazonal. Observação de 12/07/2020 (primeiro painel) e previsão para os 15 dias seguintes (painéis abaixo). Fonte: NOAA. (B) Série temporal observada do índice MAS de maio a setembro de 2020 (linha preta) e previsão dos modelos para 15 dias (linhas vermelhas). Fonte: NOAA

gerando por fim a previsão. A validação, última etapa do processo, permitiu avaliar a partir dos dados registrados no período o desempenho dos modelos e a qualidade das análises técnicas.

Ao longo do desenvolvimento das etapas, alguns desafios importantes na previsão climática foram evidenciados: 1) hipóteses básicas nem sempre podem ser admitidas como universais (por exemplo, não é sempre e em todos os locais que uma maior quantidade de chuva acumulada implica menor temperatura média sazonal); 2) deve-se avaliar com cuidado e dar-se o devido peso às previsões numéricas a partir dos modelos; por exemplo, no trimestre estudado, os modelos não indicaram a precipitação acima da média na região Sul; 3) quando o principal modo de variabilidade climática do planeta, o ENOS, está próximo da neutralidade, outras forçantes de diferentes escalas adquirem maior relevância na determinação do clima de certas regiões e geram uma dificuldade adicional no processo de previsão; 4) a precipitação representa uma variável de difícil previsibilidade, por conta de sua grande variabilidade espacial e por ser uma variável derivada de outras nos modelos numéricos; portanto, a previsão climatológica de

chuva representa uma tendência, uma sugestão geral do que deve acontecer, e não a condição exata para todas as localidades; 5) a previsão apresenta diferentes níveis de complexidade de acordo com o grau de dependência do clima de uma região em relação às anomalias globais de TSM.

O panorama fornecido neste trabalho ilustra o complexo processo de previsão climática sazonal. Trabalhos futuros podem acrescentar à discussão análises de variáveis complementares (como pressão ao nível do mar, altura geopotencial e ventos em diferentes níveis da troposfera) nas etapas de diagnóstico e prognóstico, e aprimorar um processo objetivo de validação (com o uso de métodos estatísticos de avaliação de erros).

Referências

- Alvarez, M. S., Vera, C. S., Kiladis, G. N., & Liebmann, B. (2016). Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. *Climate Dynamics*, 46(1-2), 245-262. doi: 10.1007/s00382-015-2581-6.
- Ambrizzi, T., Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, & Llopart, M. (2019). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 98-120. doi: 10.1111/nyas.13932.
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., & Cardoso, C. D. S. (2013). Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(1), 43-56. doi: 10.1590/S0102-77862013000100005.
- Bombardi, R. J., Carvalho, L. M., Jones, C., & Reboita, M. S. (2014). Precipitation over eastern South America and the South Atlantic Sea surface temperature during neutral ENSO periods. *Climate Dynamics*, 42(5-6), 1553-1568. doi: 10.1007/s00382-013-1832-7.
- Chan, S. C., Behera, S. K., Yamagata, T. (2008). Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. *Geophysical Research Letters*, 35(14). doi: 10.1029/2008GL034204.
- Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V. B., Kousky, V. E., Higgins, R. W., & Janowiak, J. E. (2008). Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D4). doi: 10.1029/2007JD009132.
- Degola, T. S. D. (2013). *Impactos e variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros*. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. 91p. (Dissert. Mestrado).
- Gomes, H. B., Ambrizzi, T., da Silva, B. F. P., Hodges, K., Dias, P. L. S., Herdies, D. L., ... & Gomes, H. B. (2019). Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, 53(3), 1393-1411. doi: 10.1007/s00382-019-04667-7

- Gozzo, L. F., Verdelho, F. F., & Custódio, M. S. (2020). Análise sinótica e climatológica do extremo de precipitação ocorrido em maio de 2017 no centro-oeste do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27. URL: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/72560>. doi: 10.5380/rb-clima.v27i0.72560.
- Grimm, A. M. (2011). Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537-554. doi: 10.1007/s00477-010-0420-1
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Joseph, D. (1996). Projeto de reanálise de 40 anos do NCEP/NCAR. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-472.
- Kayano, M. T., Andreoli, R. V., de Souza, R. A. F., & Garcia, S. R. (2017). Spatiotemporal variability modes of surface air temperature in South America during the 1951–2010 period: ENSO and non-ENSO components. *International Journal of Climatology*, 37, 1-13. doi: 10.1002/joc.4972.
- Lemes, M. D. C. R., Reboita, M. S., & Capucin, B. C. (2020). Impactos das queimadas na Amazônia no tempo em São Paulo na tarde do dia 19 de agosto de 2019. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(3), 983-993. doi: 10.26848/rbgf.v13.3.p983-993.
- Lucyrio, V., Reboita, M. S., & Albieri, M. D. C. G. (2019). Ondas de frio intensas sobre o centro-norte do estado de São Paulo de 1961 a 2017. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25. doi: 10.5380/ab-clima.v25i0.68125.
- Master/IAG. s.d. *Zona de Convergência Intertropical*. Universidade de São Paulo. São Paulo. URL: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula15/>. Acesso em: 22.10.2020.
- Mayta, V. C., Ambrizzi, T., Espinoza, J. C., & Silva Dias, P. L. (2019). The role of the Madden–Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *International Journal of Climatology*, 39(1), 343-360. doi: 10.1002/joc.5810.
- Paiva, L. F. G. D. (2020). *Interferência da previsão climática na previsão de vazões e suas consequências para a operação e planejamento do sistema interligado nacional: aplicação na Bacia do Rio São Francisco*. Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco. 223p. (Tese Doutorado).
- Pezza, A. B. e Ambrizzi, T. (1999). Um estudo das flutuações de temperatura para o período de inverno na América do Sul, correlacionando a Patagônia com o Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 14(1), 23-34.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3-27. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.10.031.
- Raia, A., & Cavalcanti, I. F. A. (2008). The life cycle of the South American monsoon system. *Journal of Climate*, 21(23), 6227-6246. doi: 10.1175/2008JCLI2249.1.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. D. (2009). Relação entre o modo anular sul e os sistemas atmosféricos no hemisfério sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(1), 48-55. doi: 10.1590/S0102-77862009000100005.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. S., Rehbein, A., Drumond, A., da Rocha, R. P., & Souza, C. A. (2021). Impacts of teleconnection patterns on South America Climate: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*. doi: 10.1111/nyas.14592.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Silva, B. A., Pinheiro, R. F., & Da Rocha, R. P. (2019). The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. *Frontiers in Earth Science*, 7, 8. doi: 10.3389/feart.2019.00008.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., & Custódio, I. S. (2017). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171-186. doi: 10.1590/0102-77863220010.
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. da. (2012). Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terra Didática*, 8(1), 34-50. doi: 10.20396/td.v8i1.8637425.
- Reboita, M. S., Rodrigues, M., Armando, R., Freitas, C., Martins, D., & Miller, G. (2016). Causas da Semi-aridez do Sertão Nordeste. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19, 254-277. doi: 10.5380/abclima.v19i0.42091
- Rodrigues, M. L. G., Franco, D., & Sugahara, S. (2004). Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(2), 135-151. doi: 10.1590/S0102-261X2004000200004.
- Sampaio, G., & Dias, P. L. S. (2014). Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. *Revista USP*, 103, 41-54. doi: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p41-54
- Santos, P. R., Silvério, A. C. M., Pereira, G., Rocha, L. C., & Cardozo, F. S. (2014). Análise da frequência da incidência de queimadas na América do Sul para o período de 2000 a 2012. *Revista Territorium Terram*, 2(4), 101-112.
- Sena, A. C., & Magnusdottir, G. (2021). Influence of the Indian Ocean Dipole on the large-scale circulation in South America. *Journal of Climate*, 34(15), 6057-6068. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0669.1
- Silvestri, G. E., & Vera, C. S. (2003). Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, 30(21). doi: 10.1029/2003GL018277.
- Souza, C. A. de, & Reboita, M. S. (2021). Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. *Terra Didática*, 17(Publ. Cont.), e02109. doi: 10.20396/td.v17i00.8663474.
- Sousa, F. D. A. S. de, Vieira, V. R., Paulo, R. V. de, Melo, V. S., & Guedes, R. W. S. (2016). Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(02), 430-439. doi: 10.26848/rbgf.v9.2.p430-439.
- Sun, X., Cook, K. H., & Vizy, E. K. (2017). The South Atlantic subtropical high: climatology and inter-annual variability. *Journal of Climate*, 30(9), 3279-3296. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0705.1.
- Tedeschi, R. G., Cavalcanti, I. F., & Grimm, A. M.

- (2013). Influences of two types of ENSO on South American precipitation. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1382-1400. doi: 10.1002/joc.3519.
- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., & Cavalcanti, I. F. (2016). Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4797-4814. doi: 10.1002/joc.4670.
- Torres, R. R. (2008). *Análise e Modelagem dos Distúrbios Ondulatórios de Leste que atuam na Costa Leste do Nordeste do Brasil*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (Mestrado em Meteorologia).
- Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., ... & Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8. doi: 10.1038/s41598-018-38003-6.
- Valadão, C. E., Carvalho, L. M., Lucio, P. S., & Chaves, R. R. (2017). Impacts of the Madden-Julian oscillation on intraseasonal precipitation over North-east Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1859-1884. doi: 10.1002/joc.4818.
- Vasconcellos, F. C., Pizzochero, R. M., & de Albuquerque Cavalcanti, I. F. (2019). Month-to-month impacts of Southern annular mode over South America climate. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1), 783-792. doi: 10.11137/2019_1_783_792.
- Vera, C. S., Vighiarolo, P. K., & Berbery, E. H. (2002). Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130(3), 684-699. doi: 10.1175/1520-0493(2002)130<0684:CSSSWO>2.0.CO;2.
- Warner, T. T. (2010). *Previsão numérica do tempo e do clima*. Cambridge University Press.
- Wollmann, C. A., & Galvani, E. (2013). Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. *Sociedade & Natureza*, 25(1), 179-190. doi: 10.1590/S1982-45132013000100014
- World Meteorological Organization. (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normal, WMO-No. 1203*. Geneva, Switzerland.
- Wrege, M. S., Fritzsons, E., Soares, M. T. S., Prela-Pântano, A., Steinmetz, S., Caramori, P. H., ... & Pandolfo, C. (2018). Risco de ocorrência de geadas na região centro-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22. doi: 10.5380/abclima.v22i0.57306.