



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **DESEMPENHO DAS PREVISÕES SAZONAIS DO MODELO ETA ANINHADO AO MODELO BESM DO INPE**

Roberto Leo dos Santos Baltazar

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC/INPE, orientada pela PhD.  
Chou Sin Chan e Dra. Claudine Pereira  
Dereczynski.

INPE  
São José dos Campos  
2024

## RESUMO

Modelos climáticos globais são ferramentas cruciais para a simulação do tempo e clima ao redor do globo. Contudo, as baixas resoluções de suas previsões sazonais oferecem informações limitadas para o planejamento e atuação em nível local. Modelos climáticos regionais permitem um aumento da escala espacial, resultando em um detalhamento adicional das previsões geradas pelos modelos globais, o que possibilita previsões voltadas para áreas mais restritas e com propósitos mais específicos. O objetivo deste trabalho é avaliar as previsões climáticas sazonais do modelo regional Eta aninhado ao modelo global Brazilian Earth System Model (BESM), ambos modelos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em eventos extremos no país. Ademais, investiga-se as forçantes climáticas predominantes durante os eventos de extremos climáticos ocorridos na região da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. O modelo regional Eta fornece previsões climáticas sazonais para todo o Brasil com resolução de 40 km. As previsões sazonais consideradas do modelo Eta40km utilizam a temperatura da superfície do mar prevista pelo modelo BESM. Anteriormente, avaliou-se o desempenho das previsões sazonais do modelo Eta40kmBESM em relação à Reanálise ERA5 e ao Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) para eventos extremos secos e chuvosos no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro para o período 1987-2010. Foram também comparadas as avaliações das previsões de precipitação, temperatura do ar a 2m, pressão a nível médio do mar, movimento vertical e temperatura em níveis de pressão do modelo Eta40kmBESM e do BESM, identificando semelhanças entre os erros nos dois modelos. Nesta etapa do trabalho, foi calculado o Skill Score das previsões de precipitação e de temperatura dos dois modelos, o número de acertos dos sinais das previsões em cada ponto de grade, o Erro Médio (EM) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) da temperatura média e da chuva média total. Os resultados preliminares indicam que o modelo regional Eta40BESM apresentou mais áreas de skill em suas previsões de precipitação do que o modelo global BESM, assim como menores valores de EM e REQM.

Palavras-chave: Previsões climáticas. América do Sul. Avaliação de modelos.

## LISTA DE FIGURAS

**Pág.**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 : O item a.1) apresenta os valores estimados de Precipitação Total Acumulada (em mm) pelo produto MSWEP para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. Os itens a.2) e a.3) apresentam as previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e global BESM, respectivamente, para o mesmo período. Os itens b.1) e b.2) representam os valores de Erro Médio das previsões, respectivamente, dos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao produto do MSWEP. Os itens c.1) e c.2) representam os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM, respectivamente, em relação ao produto do MSWEP para o mesmo período.....           | 9  |
| Figura 2: Valores de Skill Score das previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada do Eta40BESM e BESM em relação ao produto MSWEP, para o período de dezembro, janeiro e fevereiro de 1988 a 2010.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 10 |
| Figura 3: Percentual Médio de Acerto das previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada dos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao produto MSWEP para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. O percentual foi baseado no acerto dos sinais das anomalias previstas para cada ponto de grade do domínio estudado, podendo ser sinal positivo, negativo ou neutro.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 11 |
| Figura 4: O item a.1) apresenta os valores estimados de Temperatura do Ar a 2m (em °C) pela reanálise do ERA5 para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z. Os itens a.2) e a.3) apresentam as previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e global BESM, respectivamente, para o mesmo período. Os itens b.1) e b.2) representam os valores de Erro Médio, respectivamente, das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5. Os itens c.1) e c.2) representam os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM, respectivamente, em relação à reanálise do ERA5 para o mesmo período. .... | 15 |

Figura 5: Valores de Skill Score das previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m do Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5, para o período de dezembro, janeiro e fevereiro de 1988 a 2010 no horário de 00Z..... 17

Figura 6: Percentual Médio de Acerto das previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m dos modelos Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5 para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. O percentual foi baseado no acerto dos sinais das anomalias previstas para cada ponto de grade do domínio estudado, podendo ser sinal positivo, negativo ou neutro. .... 18

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

|       |                                                  |
|-------|--------------------------------------------------|
| INPE  | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais        |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| BESM  | Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre           |
| ZCIT  | Zona de Convergência Intertropical               |
| ZCAS  | Zona de Convergência do Atlântico Sul            |
| EM    | Erro médio                                       |
| REQM  | Raiz do Erro Quadrático Médio                    |
| SS    | Skill Score                                      |

## SUMÁRIO

|                                         | <b><u>Pág.</u></b> |
|-----------------------------------------|--------------------|
| 1 INTRODUÇÃO .....                      | 1                  |
| 1.1 Objetivos Gerais e Específicos..... | 1                  |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....            | 2                  |
| 3 DADOS E METODOLOGIA .....             | 3                  |
| 4 RESULTADOS.....                       | 6                  |
| 4.1 Precipitação .....                  | 6                  |
| 4.2 Temperatura do ar a 2 metros.....   | 12                 |
| 5 CONCLUSÃO .....                       | 18                 |
| 5.1 Agradecimentos.....                 | 19                 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....        | 20                 |

# **1 INTRODUÇÃO**

A variabilidade climática se refere a flutuações do clima acima ou abaixo da média climatológica a longo prazo. Essas oscilações podem apresentar valores extremos, geralmente resultando em grandes prejuízos e perdas de vidas quando enfrentados com despreparo. Eventos extremos de variabilidade climática na precipitação podem ocasionar em crises hídricas e, conseqüentemente, energéticas em períodos de seca extrema, enquanto períodos extremos chuvosos podem causar desastres como inundações, deslizamentos e escorregamentos de terra. Nesse sentido, previsões sazonais de precipitação, geradas através de modelos numéricos, são muito úteis pois permitem identificar a qualidade da estação chuvosa com alguns meses de antecedência.

Modelos climáticos globais são instrumentos capazes de realizar previsões de tempo e clima em grande escala, porém suas baixas resoluções resultam em previsões sazonais consideradas grosseiras para o planejamento e atuação em escala local. A redução da escala das previsões se torna possível através da implementação de modelos regionais climáticos, que adicionam detalhamento adicional às previsões dos modelos globais. Os modelos regionais utilizam condições iniciais, de contorno lateral e inferior fornecidas pelos modelos globais, que introduzem informações sobre a circulação atmosférica de grande escala enquanto o modelo regional agrega informações detalhadas do clima em escala local. O aumento da resolução permite que previsões sejam feitas para áreas mais limitadas e com fins mais específicos, além de permitir uma melhor reprodução de eventos extremos climáticos.

## **1.1 Objetivos Gerais e Específicos**

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o desempenho das previsões sazonais do modelo climático regional Eta (Mesinger et al., 2012; Chou et al., 2020) aninhado ao modelo global BESM, ambos desenvolvidos pelo INPE. Com isso em mente, constata-se os seguintes objetivos específicos:

I. Avaliar as previsões climáticas sazonais do modelo Eta aninhado ao modelo BESM em eventos extremos no país;

II. Investigar as forçantes climáticas predominantes durante os eventos de extremos climáticos ocorridos na região da bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Previsões sazonais geradas por modelos climáticos globais geralmente possuem detalhamento insuficiente para a tomada de ações em escalas locais, devido à baixa resolução dos modelos. Ao mesmo tempo, a utilização de modelos climáticos globais de alta resolução exige recursos computacionais cujo acesso ainda é bastante limitado, tornando a redução de escala através de modelos climáticos regionais uma opção mais viável para gerar previsões sazonais mais detalhadas (Laprise et al. 2000). A primeira tentativa de explorar a aplicação de modelos regionais para a redução da escala de previsões na América do Sul foi feita por Chou et al. (2000), aninhando o modelo regional Eta ao modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Chou et al. (2000), assim como Menéndez et al. (2001), Nicolini et al. (2002) e Misra et al. (2002), conseguiram demonstrar que as previsões do modelo climático global foram melhoradas pelo modelo regional Eta, sendo capaz de reproduzir anomalias climáticas observadas. Os autores também destacaram a utilidade de modelos regionais climáticos aninhados a modelos globais para previsões climáticas.

Chou et al. (2020) avaliou 10 anos de previsões retrospectivas regionais sobre a América do Sul do modelo climático regional Eta com resolução 40km, aninhado ao modelo global do CPTEC, realizando comparações a dados observacionais. Chou et al. (2020) encontrou que as previsões subestimaram os valores de precipitação na porção central do Brasil durante o verão, enquanto superestimou a precipitação no Sul e ao longo da costa leste brasileira durante o inverno. Resultados de *skill score* também indicaram a habilidade do modelo de reproduzir a variabilidade interanual das anomalias de precipitação na porção norte do continente sul-americano. No Brasil, a habilidade de previsão encontrada foi mais alta nas regiões Norte e Nordeste, com o Sul demonstrando habilidade moderada e o Sudeste valores mais baixos. O estudo também encontrou que as habilidades de previsão durante os eventos extremos de El Niño e La Niña se mostraram mais altas do que durante anos neutros, além de demonstrar maior

habilidade em comparação a previsões de modelos climáticos globais. Em geral, Chou et al. (2020) encontrou que o processo de redução de escala das previsões a partir da aplicação do modelo regional Eta ao modelo global do CPTEC adicionou valor às previsões sazonais sobre a América do Sul, com efeito visível durante as estações chuvosas de DJF a MAM, assim como durante a estação de transição SON. Concluiu-se que as previsões sobre a América do Sul com o modelo climático regional Eta acoplado ao modelo climático global do CPTEC demonstraram maior resolução, provendo informações mais detalhadas e uma maior habilidade de previsão sazonal de precipitação.

Anteriormente, Chou et al. (2005) gerou e avaliou em seu trabalho previsões sazonais do modelo Eta sobre a América do Sul, focando na previsibilidade de precipitação em períodos de tempo em escalas sazonais, mensais e semanais. O modelo constava de uma resolução de 40 km e utilizou previsões do modelo climático global do CPTEC como contorno lateral. Chou et al. (2005) encontrou que as previsões sazonais do modelo Eta apresentavam valores totais comparáveis aos observados, além de representar bem os sistemas de precipitação de larga escala sobre a América do Sul, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). As previsões do modelo Eta demonstraram maior habilidade de previsão de precipitação sobre a região amazônica e menor sobre o nordeste brasileiro. Valores totais de precipitação indicaram que o modelo conseguiu capturar a variabilidade intrasazonal, como o início da monção. Comparações com as previsões do modelo climático global do CPTEC demonstraram uma melhora ao utilizar o modelo Eta em suas previsões, e comparações com a climatologia indicaram que as previsões sazonais do modelo Eta produziram informações úteis adicionais.

### **3 DADOS E METODOLOGIA**

O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM - *Brazilian Earth System Model*) é um modelo climático global acoplado oceano-atmosfera que vem sendo desenvolvido e aprimorado pelo INPE (Nobre et al., 2013), cuja versão mais recente possui componente atmosférica de resolução T62L28 (resolução horizontal de aproximadamente 200 km e

28 níveis verticais) representada pelo modelo de circulação geral atmosférico do INPE. A sua componente oceânica é representada pelo MOM5 (Modular Ocean Model version 5), modelo de circulação geral oceânica do GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) que possui 50 níveis e resolução horizontal variando 0,25° entre 10°S e 10°N, 1° entre 10°N/S e 45°N/S e 2° entre 45°N/S e 90°N/S. A resolução do modelo é constante de 1° em longitude.

O modelo Eta se trata de um modelo climático regional desenvolvido pela Universidade de Belgrado junto ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (Mesinger et al. 1988), que entrou em operação no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Black 1994) e foi implementado em 1996 no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde tem gerado previsões sazonais desde 2001. (Chou et al., 2020; Chou et al 2005; Chou, 1996).

Na etapa anterior deste trabalho, foram consideradas as previsões do modelo regional Eta aninhado ao modelo global BESM, realizadas para as variáveis de precipitação, temperatura do ar a 2 metros, temperatura do ar em 850, 500 e 250 hPa, pressão a nível médio do mar, movimento vertical a 500 hPa e altura geopotencial a 850 e 500 hPa. Foram geradas previsões nos horários de 00, 06, 12 e 18Z para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período de 1988-2010 (23 anos), cobrindo o domínio da América do Sul. As previsões do modelo Eta40BESM foram comparadas aos dados observacionais de mesmo horário e período para a avaliação de seu desempenho. Foram utilizados dados de observação obtidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ReAnalysis 5* (ERA5) (Hersbach et al., 2020) para as variáveis de temperatura a 2 metros, temperatura do ar, pressão a nível médio do mar, movimento vertical, altura geopotencial e temperatura do ar em 250, 500 e 850 hPa enquanto dados do *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) (Beck et al., 2019) foram utilizados para precipitação. Para cada variável, foram calculadas as métricas de erro médio, raiz do erro quadrático médio, anomalia, desvio padrão e coeficiente de correlação de Pearson. Em seguida, as previsões do modelo regional Eta40BESM foram comparadas às do modelo global BESM, a fim de se identificar a origem dos erros encontrados nas previsões de precipitação e temperatura do ar em 250, 500 e 850 hPa do Eta40BESM. A etapa anterior do estudo encontrou que o modelo Eta40BESM foi capaz

de prever sinais de anomalia predominantes similares aos observados e seus padrões espaciais, mas falhou ao simular corretamente suas intensidades, apresentando superestimativas e subestimativas em seus valores. Apesar disso, ocorreu uma quantidade significativa de casos em que o modelo regional não conseguiu reproduzir satisfatoriamente em suas previsões tanto os sinais quanto os padrões espaciais das anomalias observadas, resultando em previsões com erros ou malsucedidas. Ao comparar as previsões de anomalia de precipitação do modelo Eta40BESM com as do modelo BESM, foram encontradas semelhanças nos sinais e distribuição espacial entre as previsões dos dois modelos, sugerindo que as previsões do modelo regional tenham herdado erros e acertos do modelo global. Já para as previsões de anomalia de temperatura em níveis de pressão, as previsões do Eta40BESM se mostraram quase idênticas às do BESM, variando apenas em intensidade, de modo que as anomalias previstas pelo Eta40BESM foram menos intensas e mais próximas da observação.

Para a etapa atual do trabalho, foram comparados os valores de Precipitação Total Acumulada estimada pelo MSWEP e Temperatura do Ar a 2m da reanálise do ERA5, considerados como os dados de observação no estudo, com as previsões sazonais realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e do modelo global BESM de cada variável, a fim de se identificar semelhanças e discrepâncias entre seus valores. A partir disso, foram também realizados os cálculos de Erro Médio e Raiz do Erro Quadrático Médio das previsões dos dois modelos em relação aos seus respectivos produtos e reanálises. Foram também calculados os valores de Skill Score a partir dos coeficientes de correlação das anomalias das previsões sazonais com os dados observados pelo MSWEP e reanálise do ERA5. O acerto das previsões foi calculado a partir do número de acerto dos sinais das anomalias de Precipitação Total Acumulada e Temperatura do Ar a 2m para cada ponto de grade dentro da região da bacia hidrográfica do São Francisco, mascarando os valores de Skill Score inferiores a 0,3. Valores próximos de zero até meio desvio padrão (positivos ou negativos) foram considerados anomalias neutras, enquanto valores inferiores e superiores foram considerados negativos e positivos, respectivamente.

A série de dados do trabalho foi definida pela disponibilidade de anos com previsões retrospectivas do modelo Eta40km-BESM e originalmente constava de 30 anos, possuindo período de 1981-2010, porém precisou ser reduzida por conta de erros

detectados na configuração das previsões dos anos de 1981-1986. Os meses considerados para as previsões sazonais foram os de dezembro, janeiro e fevereiro.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Precipitação**

A figura 1 a) apresenta as climatologias dos valores de precipitação total acumulada (em milímetros) estimados pelo produto MSWEP e previstos pelos modelos Eta40BESM e BESM, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010.

Através do produto MSWEP na figura 1, é possível visualizar os padrões de distribuição espacial da precipitação sobre o continente sul-americano e parte dos oceanos adjacentes durante o verão austral, com os valores acumulados mais significativos distribuídos sobre a região continental entre 0° e 30°S, a região oceânica da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) entre as latitudes de 0° e 5°N e sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se estende desde a região amazônica até o Atlântico Sul em direção noroeste-sudeste. Em território brasileiro, destacam-se os maiores valores acumulados sobre o sul e oeste da Amazônia, cobrindo o Norte e parte do Centro-Oeste do Brasil. Esse mesmo padrão de distribuição espacial da precipitação pode ser notado nas previsões sazonais realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e pelo modelo global BESM, de modo que suas divergências das observações ocorrem majoritariamente em intensidade dos valores acumulados de chuva. O único padrão de precipitação que não foi bem representado por um dos modelos foi a previsão da precipitação na ZCIT pelo BESM, que subestimou consideravelmente a quantidade de chuva acumulada na região equatorial oceânica.

As previsões do modelo Eta40BESM reproduzem corretamente a distribuição de acumulados significativos de precipitação sobre o Brasil, com valores acima de 500 mm sobre o Sudeste, Centro-Oeste e partes do Nordeste e Norte, enquanto acumulados menores são vistos no Sul, extremo norte da região Norte e na porção leste do Nordeste. Os valores mais elevados de chuva acumulada sobre a região amazônica, que variaram entre 1000 mm e 1300 mm segundo o MSWEP, foram subestimados na previsão do

Eta40BESM, onde os maiores acumulados variaram entre 900 mm e 1000 mm. Sobre o oceano Atlântico, o Eta40BESM conseguiu representar bem a presença e posicionamento da ZCAS, porém superestimou a intensidade da precipitação na região, principalmente na costa dos estados do Espírito Santo e Bahia. Já sobre a região equatorial, a previsão sazonal do modelo regional Eta40BESM divergiu do produto de precipitação observada do MSWEP, representando uma configuração de banda dupla da ZCIT, com uma faixa de precipitação entre 0° e 5°N e outra mais ao sul, entre 0° e 10°S. Apesar disso, os maiores acumulados de chuva na previsão do Eta40BESM estão localizados sobre a primeira faixa mais ao norte, coincidindo com o posicionamento e intensidade da banda única da ZCIT apresentada pelo MSWEP. Ao comparar os valores de precipitação total acumulada prevista pelo modelo global BESM com os previstos pelo modelo regional Eta40BESM e estimados pelo produto MSWEP, percebe-se que seus acumulados apresentaram uma distribuição espacial semelhante sobre o território brasileiro, concentrando mais chuva sobre o Sudeste, parte do Sul, Centro-Oeste e partes do Norte e Nordeste, prevendo menos precipitação para o extremo sul e norte do país. No Nordeste, o BESM previu valores menores de precipitação ao longo da região costeira. Sobre as regiões oceânicas, as previsões do modelo global não reproduziram corretamente o posicionamento e magnitude da precipitação sob a banda da ZCAS, deslocando-a para sul e subestimando sua intensidade. O mesmo pôde ser visto na região equatorial sob a ZCIT, em que os valores acumulados previstos pelo BESM foram muito abaixo do observado, também apresentando um padrão de distribuição mais esparsa e remetente a uma configuração de banda dupla da ZCIT, que não foi observada pelo MSWEP.

A figura 1 apresenta os valores de b) erro médio (EM) e c) raiz do erro quadrático médio (REQM) da precipitação total acumulada (em mm) prevista pelos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao MSWEP, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. Nota-se que nos campos de erro médio, os dois modelos apresentam uma tendência de subestimar a precipitação prevista sobre o território continental brasileiro, com valores de erro tornando-se mais neutros ou até positivos para a porção mais ao sul do país, de 20°S para latitudes mais altas. No modelo regional Eta40BESM, a intensidade dos erros negativos se mostrou significativamente menor do que as do modelo global BESM, sugerindo que, embora o

Eta40BESM ainda tenha uma tendência de subestimativa na previsão da chuva no Brasil, ele apresenta uma melhora em relação ao BESM, apresentando valores de precipitação acumulada mais próximos dos observados. Na região Sul, onde o BESM previu sinais positivos de erro médio e uma superestimativa da precipitação, o modelo Eta40BESM predominou valores de erro médio próximos a zero. Sobre o oceano Atlântico, foi possível notar uma superestimativa das previsões de precipitação sobre a porção oceânica da ZCAS por parte do Eta40BESM, enquanto o modelo global BESM subestimou os valores na mesma região. Além disso, o Eta40BESM superestimou a precipitação acima e abaixo da região da Zona de Convergência Intertropical, subestimando-a em seu posicionamento central, fazendo com que a ZCIT apresentasse caráter de banda dupla em suas previsões. O modelo BESM, por outro lado, completamente subestimou a chuva prevista para a região oceânica equatorial, não representando corretamente o posicionamento nem a intensidade da ZCIT.

Ao se considerar os campos de Raiz do Erro Quadrático Médio, busca-se identificar se potenciais erros foram mascarados ou amortecidos por sinais opostos nos erros médios em uma mesma região. Para o modelo regional Eta40BESM, foi possível notar que as regiões com os maiores valores de REQM coincidem com as de EM vistas anteriormente e que, de fato, locais com EM próximo a zero também apresentaram REQM baixo. A distribuição de valores mais elevados de REQM se encontra predominantemente sobre a região amazônica do Brasil, se estendendo para parte do Centro-Oeste. Também foi possível visualizar REQM considerável sobre outras regiões da América do Sul nas previsões do modelo BESM, principalmente sobre a Bolívia, Paraguai e Argentina, enquanto o Eta40BESM reduziu significativamente a distribuição espacial dos mesmos erros, predominando valores mais baixos de REQM nessas regiões. Sobre os oceanos, novamente foi possível perceber regiões de REQM mais elevado próximas às zonas de convergência nas previsões de ambos os modelos, porém os valores se mostraram bem menos intensos e cobrindo regiões menores nas previsões do modelo regional Eta40BESM do que nas do global BESM, sugerindo uma tendência menor de erro na previsão de precipitação sobre o mar.

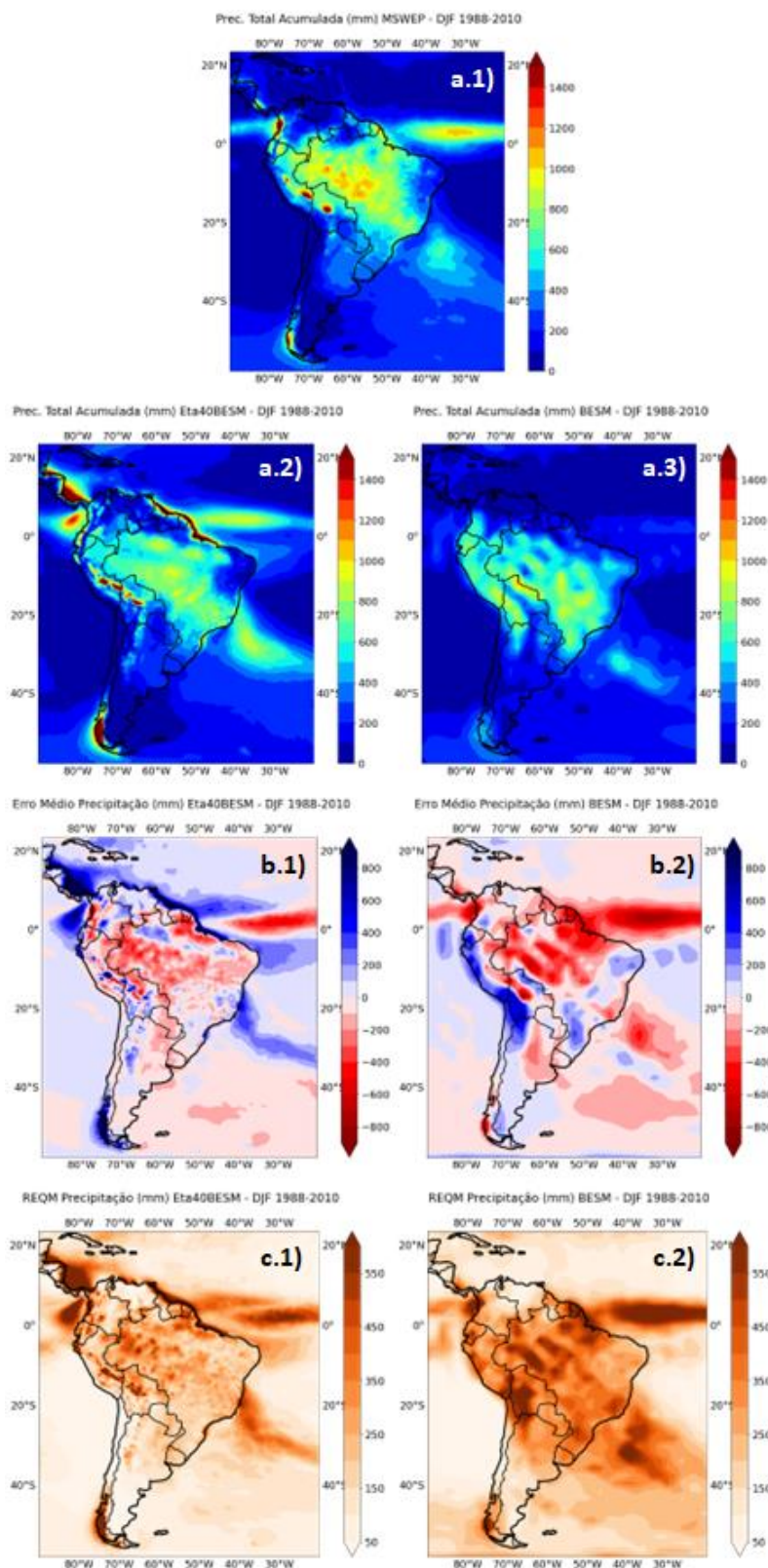


Figura 1 : O item a.1) apresenta os valores estimados de Precipitação Total Acumulada (em mm) pelo produto MSWEP para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. Os itens a.2) e a.3) apresentam as previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e global BESM, respectivamente, para o mesmo

período. Os itens b.1) e b.2) representam os valores de Erro Médio das previsões, respectivamente, dos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao produto do MSWEP. Os itens c.1) e c.2) representam os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM, respectivamente, em relação ao produto do MSWEP para o mesmo período.

A figura 2 apresenta os valores de correlação, ou Skill Score (SS), das previsões sazonais de precipitação realizadas pelos modelos Eta40BESM e BESM em comparação ao produto MSWEP, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. Os valores de Skill Score estão mascarados para mostrar somente correlações positivas acima de 0,3. Foi possível notar poucas regiões de SS significativo e valores baixos de correlação entre as previsões dos dois modelos e a precipitação observada, porém o modelo regional Eta40BESM acrescentou valor significativo às suas previsões, apresentando mais regiões de SS positivo do que as previsões do modelo global BESM. No Brasil, valores positivos de SS podem ser vistos sobre a região Norte, principalmente no extremo norte do país. Sobre os oceanos, regiões de SS positivo foram vistas nas baixas latitudes dos oceanos Atlântico e Pacífico para o Eta40BESM, próximos do posicionamento da banda de precipitação da ZCIT, assim como em latitudes mais altas, sobre a costa da Argentina e no oceano Pacífico por volta de 40° S.

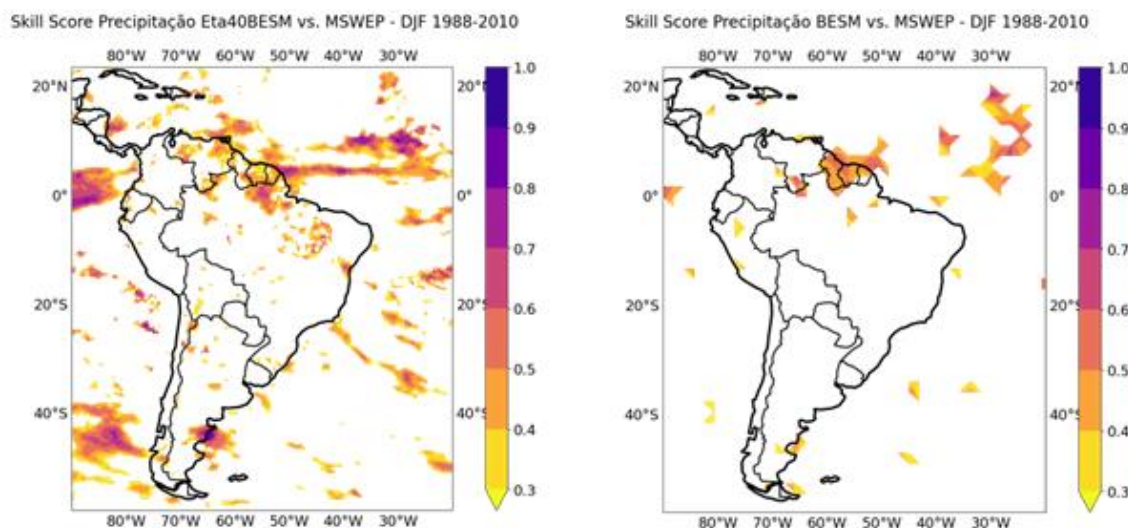


Figura 2: Valores de Skill Score das previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada do Eta40BESM e BESM em relação ao produto MSWEP, para o período de dezembro, janeiro e fevereiro de 1988 a 2010.

A figura 6 considera o número de pontos de grade em que as previsões sazonais realizadas pelos modelos Eta40BESM e BESM acertaram os sinais (positivos ou negativos) das anomalias de precipitação, em relação ao produto MSWEP, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. Os gráficos de barra estão dispostos em percentual médio de acerto das previsões de cada modelo ao longo dos 23 anos da série. Nota-se que o percentual de acerto médio das previsões de anomalias positivas e negativas do modelo regional Eta40BESM foi levemente menor do que o do modelo global BESM, porém o Eta40BESM apresentou um percentual de acerto muito maior para anomalias neutras, de modo que o percentual total de acerto das previsões se mostrou significativamente maior para o Eta40BESM do que para o BESM. Uma possível explicação para esse comportamento seria a tendência do modelo global BESM de superestimar ou subestimar a precipitação mais intensamente do que o regional Eta40BESM, de forma a acertar mais frequentemente as anomalias com fortes sinais positivos ou negativos, embora errando muito mais nas previsões de sinais mais fracos, que seriam consideradas previsões de anomalias neutras.

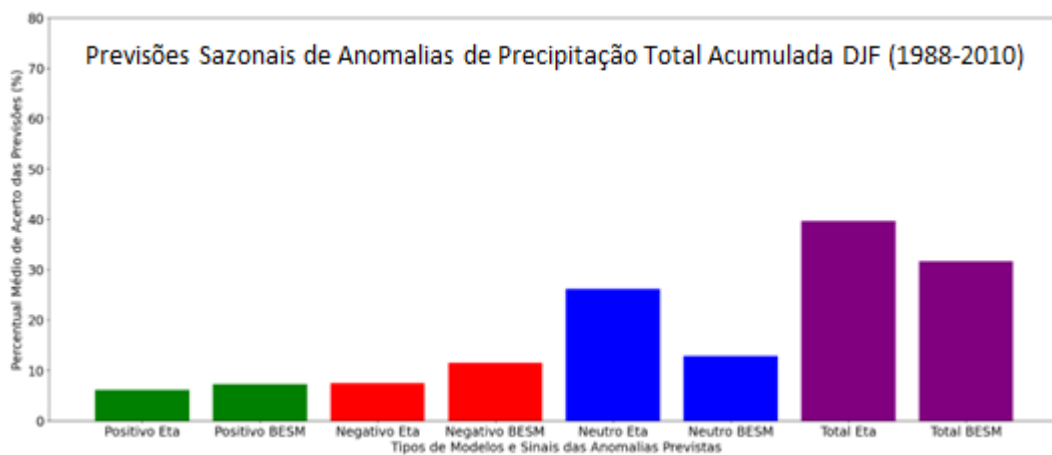


Figura 3: Percentual Médio de Acerto das previsões sazonais de Precipitação Total Acumulada dos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao produto MSWEP para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. O percentual foi baseado no acerto dos sinais das anomalias previstas para cada ponto de grade do domínio estudado, podendo ser sinal positivo, negativo ou neutro.

## 4.2 Temperatura do ar a 2 metros

A figura 4 a) apresenta as climatologias dos valores médios de temperatura do ar a 2 metros (em graus celsius) estimados pela reanálise do ERA5 e previstos pelos modelos Eta40BESM e BESM, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z.

Os campos de temperatura do ar a 2 metros na figura 4 permitem visualizar que o modelo regional Eta40BESM conseguiu reproduzir adequadamente em suas previsões os padrões espaciais de temperatura retratados pela reanálise do ERA5, apresentando valores mais elevados sobre as regiões Centro-Oeste, Norte e na porção norte do Nordeste do Brasil, enquanto as regiões Sul e Sudeste apresentaram valores de temperatura do ar mais baixos, principalmente em regiões próximas ao litoral. Também foi possível notar padrões espaciais semelhantes de temperaturas mais elevadas ao norte da Argentina e Paraguai, em que o modelo regional Eta40BESM se mostrou capaz de simular corretamente. Apesar da boa representação dos padrões de distribuição espacial das regiões relativamente mais aquecidas e resfriadas, o modelo regional diferiu da reanálise do ERA5 na intensidade das temperaturas, subestimando os seus valores em toda a região continental da América do Sul. Sobre as regiões oceânicas, a previsão sazonal do modelo Eta40BESM se mostrou bem próxima ao ERA5 em padrões espaciais e magnitude dos valores de temperatura, exceto pelas regiões a sudeste da Argentina e a oeste do Chile, onde o modelo regional não conseguiu representar o adentramento de temperaturas mais baixas próximo à Corrente das Malvinas e à região de ressurgência da costa chilena. Ao comparar a reanálise do ERA5 e a previsão do modelo regional Eta40BESM com a do modelo global BESM, nota-se também padrões espaciais semelhantes entre as três climatologias, porém o modelo BESM superestimou fortemente os valores de temperatura em relação ao ERA5, principalmente sobre as regiões das baixas latitudes, entre 10° N e 10° S. Também nota-se uma região de intensa superestimativa das temperaturas do ar na a leste da Cordilheira dos Andes, especialmente sobre o norte da Argentina, Uruguai, Paraguai e Bolívia, com temperaturas ultrapassando 31°C, enquanto os valores do ERA5 se mantiveram entre 27°C e 29°C e os do Eta40BESM, entre 25°C e 27°C. Sobre o território brasileiro, os padrões espaciais da previsão de temperatura do ar a 2m do modelo global BESM divergiram do modelo regional Eta40BESM e da reanálise do ERA5 sobre a região

Sudeste, onde os menores valores foram vistos sobre o interior do continente, em vez das regiões próximas ao litoral, como foi no ERA5 e no Eta40BESM.

A figura 4 b) apresenta os valores de erro médio (EM) e c) raiz do erro quadrático médio (REQM) da temperatura do ar a 2 metros (em graus celsius) prevista pelos modelos Eta40BESM e BESM em relação ao ERA5, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z. A partir do erro médio da previsão sazonal do Eta40BESM, é possível notar uma predominância de valores negativos de erro médio sobre todo o continente sul-americano e, principalmente, sobre o território brasileiro. Os valores mais altos de EM se encontram sobre a região costeira do Sudeste e Nordeste, assim como sobre o Norte do Brasil. Regiões mais interiores do Sudeste, Centro-Oeste e Sul apresentam valores próximos a zero. A partir disso, torna-se possível notar uma clara tendência do modelo regional Eta40BESM em subestimar os valores de temperatura do ar a 2m em relação à reanálise do ERA5 em todo o território brasileiro, principalmente nas regiões de mais baixas latitudes e próximas ao litoral. À medida que as latitudes se tornam mais altas, os valores de EM passam a ficar menos intensos e, em algumas regiões da Argentina e Chile, passam a ser positivos. Essa transição de EM negativo para positivo em latitudes mais altas pode ser mais facilmente visualizado sobre as regiões oceânicas, em que os valores de EM são negativos acima e positivos abaixo de 30°S no oceano Atlântico, enquanto no oceano Pacífico os valores de erro são positivos desde em toda a sua extensão no domínio estudado. Esse comportamento indica a possibilidade do modelo regional Eta40BESM não estar simplesmente subestimando temperaturas em latitudes baixas e superestimando em latitudes altas, mas sim suavizando-as em todo o seu domínio de previsão e não representando corretamente a amplitude térmica latitudinal da região. Já o modelo global BESM, por outro lado, apresenta uma predominância de erro médio positivo em suas previsões sazonais de temperatura do ar a 2m em todo o continente e regiões oceânicas do domínio estudado, com exceção da porção mais ao norte da região Sudeste, se estendendo para o norte do Nordeste, onde foram vistos valores de EM negativo. Sobre a Argentina e o Uruguai, valores positivos muito intensos de EM também são notados.

Através dos valores de Raiz do Erro Quadrático Médio, é possível visualizar a localização e magnitude dos erros das previsões sazonais dos modelos Eta40BESM e

BESM em relação à reanálise do ERA5, de forma independente do sinal positivo ou negativo dos erros nos valores de temperatura do ar a 2 metros. Nota-se que os maiores valores de REQM no modelo regional Eta40BESM se encontram nas regiões Sudeste e Nordeste, com uma distribuição meridional ao longo do litoral. Essa região de alto REQM coincide com a localização dos maiores valores de erro médio negativo visto anteriormente, confirmando a sua intensidade. No restante do território brasileiro, os valores de REQM se mostraram relativamente baixos, principalmente na região Sul. Para o modelo global BESM, valores significativos de REQM são vistos de forma espalhada sobre o Brasil em todas as regiões, não apresentando um padrão de distribuição específico, porém concordando com as regiões de EM mais significativas vistas anteriormente. Na Argentina e Uruguai, intensos valores de REQM são notados em concordância com os EM fortemente positivos vistos na região. Sobre as regiões oceânicas do Atlântico Sul e do Pacífico, padrões semelhantes de distribuição espacial e intensidade de REQM são percebidos nas previsões dos dois modelos Eta40BESM e BESM, sugerindo a possibilidade de os erros do modelo regional terem sido herdados pelo modelo global ao qual está aninhado.

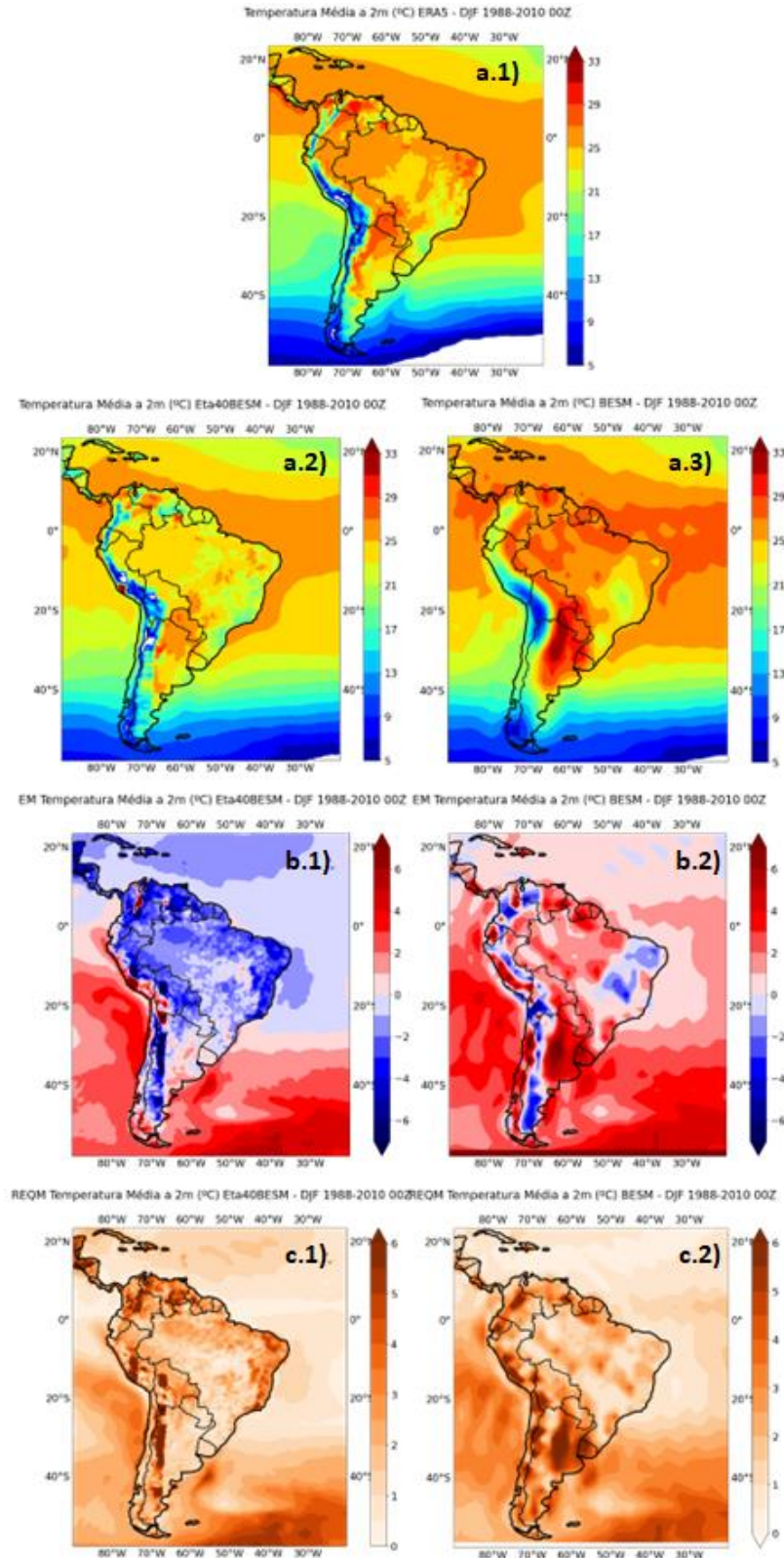


Figura 4: O item a.1) apresenta os valores estimados de Temperatura do Ar a 2m (em °C) pela reanálise do ERA5 para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z. Os itens a.2) e a.3) apresentam as previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e global BESM, respectivamente, para o

mesmo período. Os itens b.1) e b.2) representam os valores de Erro Médio, respectivamente, das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5. Os itens c.1) e c.2) representam os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio das previsões dos modelos Eta40BESM e BESM, respectivamente, em relação à reanálise do ERA5 para o mesmo período.

A figura 5 apresenta os valores de correlação, ou Skill Score (SS), das previsões sazonais de temperatura do ar a 2 metros realizadas pelos modelos Eta40BESM e BESM em comparação à reanálise do ERA5, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z. Os valores de Skill Score estão mascarados para mostrar somente correlações positivas acima de 0,3.

Comparando os valores de Skill Score do modelo regional Eta40BESM com os do modelo global BESM, pode-se notar uma grande semelhança nos padrões de distribuição das correlações, assim como em suas magnitudes, indicando que as previsões dos dois modelos apresentam comportamento que acompanha a realidade nas mesmas regiões. Essa semelhança entre as correlações sugere também que o modelo regional Eta40BESM esteja herdando características em suas previsões do modelo global BESM.

Nas dois modelos, os maiores valores de Skill Score de suas previsões estão concentrados sobre latitudes mais baixas, com correlações positivas chegando a valores de 0,9 próximas ao equador, principalmente nas regiões oceânicas. Sobre o território brasileiro, as previsões do modelo global BESM concentram suas maiores correlações sobre a região amazônica, na porção noroeste do Brasil, onde o SS predomina valores acima de 0,7. No modelo regional Eta40BESM, por outro lado, é possível visualizar valores positivos de correlação mais espalhados pelo país, incluindo as regiões Norte, Nordeste e parte do Centro-Oeste, acima da latitude de 10° S. Apesar da maior distribuição espacial de correlações, os valores de Skill Score do modelo regional Eta40BESM se mostraram menores que os do BESM, predominando valores acima de 0,5 e, sobre a região amazônica, entre 0,6 e 0,8. Sobre as regiões oceânicas, o Skill Score entre os dois modelos se manteve quase idêntico, apontando forte grau de parentesco entre as previsões do modelo global e regional sobre o mar. No oceano Pacífico, o modelo Eta40BESM foi o único a indicar valores de correlação muito alta, entre 0,9 e 1,0.

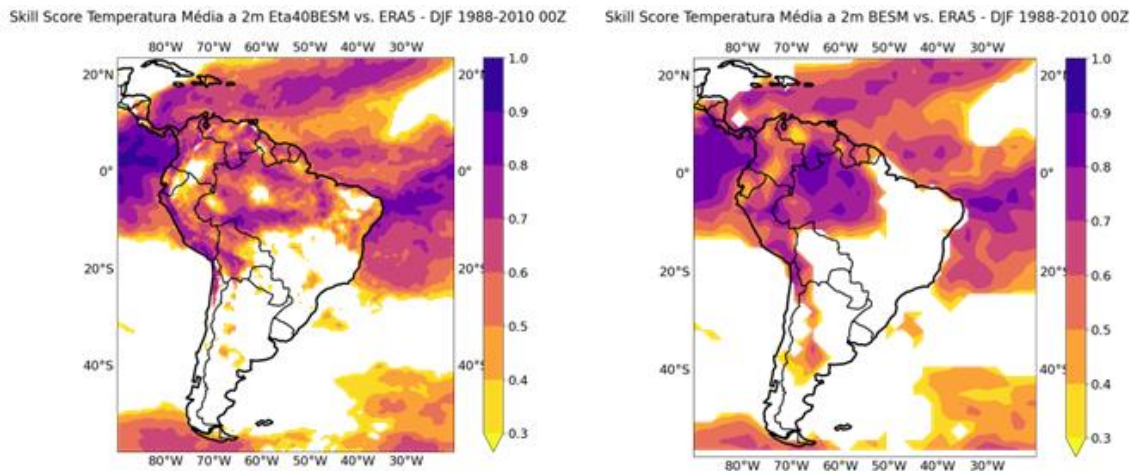


Figura 5: Valores de Skill Score das previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m do Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5, para o período de dezembro, janeiro e fevereiro de 1988 a 2010 no horário de 00Z.

A figura 6 considera o número de pontos de grade em que as previsões sazonais realizadas pelos modelos Eta40BESM e BESM acertaram os sinais (positivos ou negativos) das anomalias de temperatura do ar a 2 metros, em relação à reanálise do ERA5, para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010 no horário de 00Z. Os gráficos de barra estão dispostos em percentual médio de acerto das previsões de cada modelo ao longo dos 23 anos da série.

Através da análise do gráfico na figura, pode-se identificar que o modelo regional Eta40BESM apresentou um percentual de acerto parecido ao do modelo global BESM, tanto para sinais neutros quanto positivos e negativos de anomalias de temperatura do ar a 2 metros, porém o Eta40BESM demonstrou uma melhora no acerto de anomalias positivas em relação ao BESM. Considerando o acerto total dos dois modelos, o modelo regional Eta40BESM apresentou uma melhora geral em relação ao global BESM, majoritariamente por conta do melhor desempenho nas previsões de sinais positivos de anomalia.

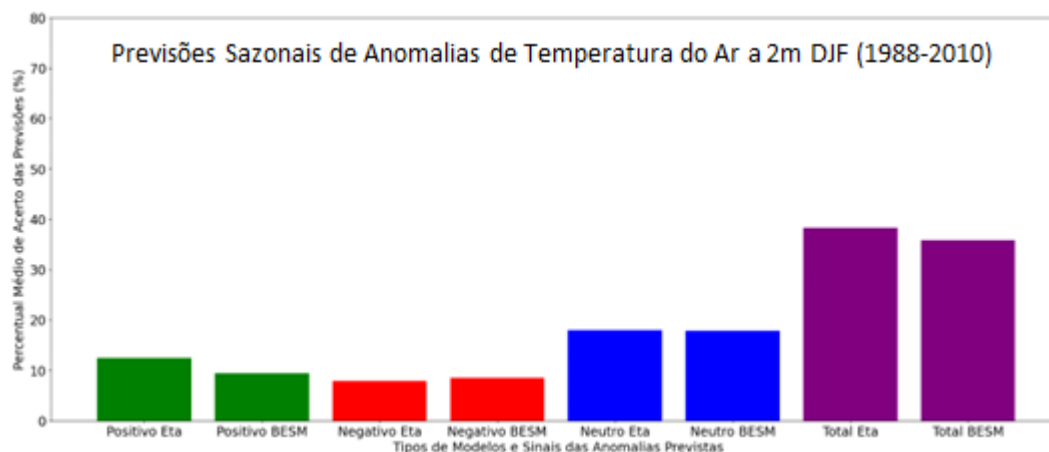


Figura 6: Percentual Médio de Acerto das previsões sazonais de Temperatura do Ar a 2m dos modelos Eta40BESM e BESM em relação à reanálise do ERA5 para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro do período de 1988 a 2010. O percentual foi baseado no acerto dos sinais das anomalias previstas para cada ponto de grade do domínio estudado, podendo ser sinal positivo, negativo ou neutro.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse estudo foram avaliadas as previsões sazonais de precipitação total acumulada e temperatura do ar a 2 metros realizadas pelo modelo regional Eta40BESM e o modelo global BESM para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro, isto é, o verão austral e período chuvoso para a região Sudeste, a fim de comparar seus desempenhos utilizando como referência os dados do produto MSWEP e da reanálise do ERA5. O modelo regional Eta40BESM demonstrou capacidade de reproduzir corretamente os padrões espaciais de precipitação sobre o território brasileiro, assim como boa parte das regiões oceânicas adjacentes, em suas previsões sazonais. As maiores discrepâncias entre as previsões e observações ocorreram nos valores precipitados, onde o Eta40BESM subestimou a precipitação acumulada sobre a maior parte do Brasil, enquanto superestimou sobre a região oceânica da Zona de Convergência do Atlântico Sul e ao redor da linha do equador, dividindo a Zon de Convergência Intertropical em duas bandas de precipitação. Apesar disso, as previsões do modelo Eta40BESM se mostraram mais próximas da realidade em comparação ao BESM, que subestimou a precipitação mais intensamente tanto no continente quanto nas regiões oceânicas da ZCAS e ZCIT. Os erros identificados nas previsões do modelo regional Eta40BESM

também foram menores que os do modelo global BESM, apresentando valores de Raiz do Erro Quadrático Médio mais baixos e cobrindo uma distribuição espacial menor que o BESM. Também foi identificada uma maior correlação entre as previsões sazonais do Eta40BESM e os valores observados pelo MSWEP, sugerindo uma melhora em relação às previsões do BESM, embora ainda continue sendo um valor relativamente baixo de correlação. Além disso, o modelo regional Eta40BESM obteve um maior percentual total de acerto nos sinais das previsões de anomalias de precipitação do que o global BESM, influenciado pela sua maior capacidade de prever anomalias neutras.

As previsões de temperatura do ar a 2 metros do modelo regional Eta40BESM, assim como as de precipitação, apresentaram uma predominância de subestimativa em relação às observações sobre o território brasileiro, principalmente ao longo da costa do Brasil, se estendendo do Sudeste ao Nordeste. Já sobre o oceano, as previsões apresentaram subestimativa em latitudes baixas e superestimativa em latitudes altas, sugerindo uma tendência do modelo Eta40BESM de suavizar as temperaturas do ar e não representar corretamente a intensidade do contraste térmico latitudinal. O modelo global BESM, por outro lado, apresentou uma forte superestimativa nas previsões em todo o domínio estudado, com maior intensidade sobre o continente e oceanos em latitudes mais altas. A correlação entre as previsões de temperatura do ar a 2 metros dos dois modelos e as observações se manteve bem semelhante em distribuição espacial e valor, porém o modelo Eta40BESM apresentou mais regiões com correlação significativamente positiva do que o BESM, principalmente sobre as regiões Norte e Nordeste do Brasil. O percentual de acerto do sinal das anomalias de temperatura do ar a 2 metros dos dois modelos também se mostrou parecido, porém o Eta40BESM acertou mais previsões com sinais positivos de anomalia que o BESM, resultando em um percentual de acerto total maior para o modelo regional.

## **5.1 Agradecimentos**

Agradecimento especial ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao CNPQ pelo apoio ao trabalho, desenvolvido com bolsa CNPq PIBIC/CNPq/INPE 133540/2021-9 e ao Laboratório de Prognósticos em Mesoescala da UFRJ.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J. 2005. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, 12: 537-555. doi: <<https://doi.org/10.5194/npg-12-537-2005>>
- CHOU, S.C.; DEREZYNSKI, C.P.; GOMES, J.L.; PESQUERO, L.F.; ÁVILA, A.M.H.; RESENDE, N.C.; ALVES, L.F.; RUIZCÁRDENAS, R.; SOUZA, C.R.; BUSTAMANTE, J.F.F. 2020. Ten-year hindcasts of Eta seasonal forecasts. In Press. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. doi: <<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181242>>
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L.S.P.; ALMEIDA, R.A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELAO, G.P.; BOTTINO, M.J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S.N.; COSTA, M.C.; SILVA, M.B.; IRBER, JR. L.C.; MARCONDES, G.G. 2013. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, 26: 6716-6732.
- MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; et al. 2012. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 116, 63–79. doi: <<https://doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>>
- MESINGER, F.; JANJIC, Z.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D.G. 1988. The Step-Mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment, **Monthly Weather Review**, 116(7), 1493-1518.
- BLACK, T. L. 1994. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples, **Weather and Forecasting**, v. 9(2), 265-278.
- CHOU, S.C. 1996. **Modelo Regional Eta**. Climanálise. Edição Comemorativa de 10 anos, INPE, São José dos Campos. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. 2020; 146: 1999–2049. doi: <<https://doi.org/10.1002/qj.3803>>

BECK, H.E.; WOOD, E.F.; PAN, M.; FISHER, C.K.; MIRALLES, D.G.; VAN DIJK, A.I.J.M.; MCVICAR, T.R.; ADLER, R.F. 2019. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 100(3), 473-500.

LAPRISE, R.; VARMA, M.R.; DENIS, B.; CAYA, D.; ZAWADZKI, I. 2000. Predictability of a Nested Limited-Area Model, **Monthly Weather Review**, 128(12), 4149-4154.

LAPRISE, R.; ELÍA, R.; CAYA, D.; BINER, S.; LUCAS-PICHER, P.; DIACONESCU, E.; LEDUC, M.; ALEXANDRU, A.; SEPAROVIC, L. 2008. Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 100, 3–22 (2008). doi: <<https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9>>

MENÉNDEZ, C.G.; SAULO, A.C.; LI, Z.X. 2001. Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. **Climate Dynamics** 17, 219–231 (2001). doi: <<https://doi.org/10.1007/s003820000107>>

NICOLINI, M.; SALIO, P.; KATZFEY, J.J.; MCGREGOR, J.L.; SAULO, A.C. 2002. January and July regional climate simulation over South America, **Journal of Geophysical Research**, 107(D22), 4637. doi: <<https://doi.org/10.1029/2001JD000736>>

MISRA, V.; DIRMEYER, P.A.; KIRTMAN, B.P.; JUANG, H.M.H.; KANAMITSU, M. 2002. Regional simulation of interannual variability over South America, **Journal of Geophysical Research**, 107 (D20). doi: <<https://doi.org/10.1029/2001JD900216>>