

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA - PPGC&E**

JANNE LIS HEGUEDUSCH DE SANTIS

**ESTUDO DA PREVISÃO IMEDIATA DOS SISTEMAS CONVECTIVOS  
CONTINENTAIS, COSTEIROS E OCEÂNICOS NA REGIÃO SUDESTE DO  
BRASIL UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE**

MACAÉ-RJ, 2026

JANNE LIS HEGUEDUSCH DE SANTIS

**ESTUDO DA PREVISÃO IMEDIATA DOS SISTEMAS CONVECTIVOS  
CONTINENTAIS, COSTEIROS E OCEÂNICOS NA REGIÃO SUDESTE DO  
BRASIL UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Ricardo Siqueira - UENF

MACAÉ-RJ, 2026

**ESTUDO DA PREVISÃO IMEDIATA DOS SISTEMAS CONVECTIVOS  
CONTINENTAIS, COSTEIROS E OCEÂNICOS NA REGIÃO SUDESTE DO  
BRASIL UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE**

JANNE LIS HEGUEDUSCH DE SANTIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

**Aprovada em 24/02/2026**

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. José Ricardo Siqueira — UENF (Orientador)

---

Prof. Dr. Nivaldo Silveira Ferreira — UENF

---

Profa. Dra. Raquel Jahara Lobosco — UFRJ

---

Prof. Dr. Alfredo Silveira da Silva — UFRJ

MACAÉ-RJ, 2026

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

S236

Santis, Janne Lis Heguedusch de.

ESTUDO DA PREVISÃO IMEDIATA DOS SISTEMAS CONVECTIVOS CONTINENTAIS, COSTEIROS E OCEÂNICOS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE / Janne Lis Heguedusch de Santis. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

90 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Clima e Energia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.

Orientador: Jose Ricardo Siqueira.

1. Sistema Convectivo de Mesoescala. 2. Satélite Meteorológico. 3. Previsão Imediata. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 123

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e por acreditarem nas minhas escolhas, mesmo diante dos desafios. A compreensão, o incentivo e o exemplo de dedicação que sempre me ofereceram foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), pela oportunidade de realizar este mestrado em uma instituição pública, gratuita e de excelência, que representa um espaço de formação crítica e científica de grande relevância para o desenvolvimento do país.

Ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia (PPGC&E), pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e contribuir para a construção de uma ciência comprometida com a sociedade e com o meio ambiente.

Ao meu orientador, pela orientação técnica, científica e intelectual, pela paciência e pelas valiosas contribuições ao longo de todo o processo de pesquisa e escrita desta dissertação.

Aos professores e colegas do programa, pelas trocas de conhecimento, pelas discussões enriquecedoras e pelo companheirismo durante esta jornada.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram com palavras de incentivo, apoio emocional e compreensão nos momentos mais intensos deste percurso acadêmico.

Por fim, agradeço a todas as pessoas e instituições que, de alguma forma, tornaram possível a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Este estudo analisou as previsões imediatas de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs) sobre as regiões continental, costeira e oceânica do sudeste do Brasil no período de 2009–2017. As temperaturas de brilho do canal 4 infravermelho (11  $\mu\text{m}$ ) do Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13), com resolução temporal de 30 minutos e resolução espacial de 4 km, foram combinadas com o método Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (FORTRACC) para identificar, rastrear e realizar a previsão imediata de SCMs na fase de maturação dos sistemas, além de análises estatísticas. Foram identificados 7139 MCSs, sendo aproximadamente 76,8% dos sistemas continentais, 13,7% oceânicos, 9,3% costeiros, 75,8% meso- $\beta$  e 24,1% meso- $\alpha$ . A distribuição sazonal das frequências de ocorrência mostrou um maior número de SCMs no verão e no outono, com forte redução no inverno, quando os SCMs costeiros foram raros. Os SCMs meso- $\beta$  predominaram em todas as estações, com presença mais significativa de sistemas meso- $\alpha$  no verão e no outono. O maior número de SCMs continentais foi favorecido pelo aquecimento diurno e pela orografia da região. A qualidade das previsões foi avaliada utilizando quatro índices de previsão (ACU, BIAS, POD e FAR) e comparando as propriedades físicas previstas e observadas. As previsões apresentaram um melhor desempenho para tempos de previsão de até 60 min, para as propriedades cinemáticas, morfológicas e radiativas dos cinco grupos de SCMs estudados. As ocorrências dos SCMs costeiros e meso- $\alpha$  foram melhor previstas pelo método utilizado, mas as ocorrências dos sistemas continentais e meso- $\beta$  foram superestimadas, especialmente para o tempo de previsão de 120 min. As latitudes e longitudes dos SCMs foram melhor previstas para os tempos de 30-60 min, para todos os grupos de sistemas. Entretanto, a fração convectiva, a temperatura de brilho e a taxa de precipitação foram superestimadas, especialmente para os sistemas continentais e meso- $\beta$ . As análises de RMSEs indicaram erros maiores para as propriedades dos sistemas em tempos de previsão mais longos (90 – 120 min), tais como: latitude central, longitude central e tamanho dos sistemas costeiros e meso- $\alpha$ , e fração convectiva dos sistemas continentais e meso- $\beta$ . Os resultados indicam que os sistemas classificados como meso- $\alpha$  apresentam maior estabilidade estrutural e melhores índices de previsão, enquanto sistemas meso- $\beta$  mostram rápida degradação do desempenho após 60–90 minutos, evidenciando as limitações intrínsecas da extrapolação linear. Observou-se ainda melhor desempenho em sistemas costeiros, sugerindo influência do ambiente sinótico e da organização espacial na manutenção da convecção. Conclui-se que a habilidade preditiva baseada exclusivamente na extrapolação de campos de temperatura de topo de nuvem é dependente da escala e do grau de organização do sistema, sendo mais adequada para sistemas amplamente estruturados. O estudo avança o conhecimento ao demonstrar que a previsibilidade de SCMs não é homogênea, mas condicionada por características multiescalares, oferecendo subsídios objetivos para aplicações operacionais de curto prazo.

**Palavras-chave:** Sistema Convectivo de Mesoescala; Satélite Meteorológico; Previsão Imediata.

## ABSTRACT

This study analysed the short-term forecasts of mesoscale convective systems (MCSs) over continental, coastal and oceanic regions of southeast Brazil during 2009-2017. The brightness temperatures of the channel 4 (11  $\mu\text{m}$ ) of the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13), with a temporal resolution of 30 minutes and a spatial resolution of 4 km, were combined with the Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (FORTRACC) method to identify, track, and forecast the MCSs at their mature phase, followed by statistical analyses. A total of 7139 MCSs were found, so that 76.8% of the systems were classified as continental, 13.7% as oceanic, 9.3% as coastal, 75.8% as meso- $\beta$ , and 24.1% as meso- $\alpha$ . Seasonal analyses of the MCS occurrence frequencies showed that the MCSs were more numerous in austral summer (2760 systems, so that 2217 are continental) and fall, with a strong reduction in winter, when coastal MCSs were rare (41 systems). The meso- $\beta$  MCSs were predominant in all the seasons, with a more significant population of meso- $\alpha$  MCSs in austral summer and fall. The largest number of continental MCSs was favored by diurnal warming and orography of the region. The forecasts quality was analysed using four categorical indices (ACU, BIAS, POD and FAR) and by comparing the physical properties of the forecasted and observed MCSs. The forecasts showed better quality for forecasting lead times up to 60 min for both indices and for the kinematic, morphological, and radiative properties of the five MCS groups studied. For forecasting times equal or longer than 90 min, the forecasts quality decreased for all MCS groups, with larger errors for the time of 120 min. The occurrences of the coastal and meso- $\alpha$  MCSs were better forecasted by the method used, but the occurrences of the continental and meso- $\beta$  MCSs were overestimated, especially for the lead time of 120 min. The MCSs latitude and longitude were better forecasted for the 30-60 min timeframe, for all groups. However, the convective fraction, brightness temperature, and rainfall rate were overestimated, especially for continental and meso- $\beta$  MCSs. Larger errors were found for MCS properties for longer times (90 – 120 min), such as: forecasted latitude, longitude, and size of the coastal and meso- $\alpha$  MCSs, and convective fraction of the continental and meso- $\beta$  MCSs. The results also showed that meso- $\alpha$  SCMs had better forecast skill than meso- $\beta$  SCMs, suggesting that larger and more organised systems are better represented by the method, while smaller systems lose forecast quality more quickly after 60–90 min. Coastal SCMs also showed better forecast performance, indicating that the forecast skill depends on the scale and organisation of the systems. Overall, the results may contribute to improving the short-term forecast of these intense weather events. This work showed that the predictability of MCSs is not uniform, but it influenced by multiscale characteristics, providing objective insights for the short-term operational applications.

**Keywords:** Mesoscale Convective System; Meteorological Satellite; Nowcasting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão das regiões convectivas e estratiformes de um SCM.....	12
Figura 2.1 - Representação esquemática das situações de seguimento de SCM .....	21
Figura 2.2 - Imagem de satélite infravermelho de um SCM sobre St. Louis, Missouri.....	24
Figura 3.1 - Mapas políticos e topográficos do Sudeste do Brasil e do Oceano Atlântico adjacente .....	28
Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia.....	29
Figura 3.3 - Representação esquemática do deslocamento do centro de massa do SCM .....	30
Figura 3.4 - Representação esquemática da previsão da deslocação para o mesmo evento de CC .....	32
Figura 4.1 - Distribuições sazonal do número de SCMs em função das: (a) suas regiões de ocorrência e (b) seus tamanhos.....	39
Figura 4.2 - Distribuição espacial dos 7139 SCMs identificados sobre o Sudeste do Brasil e oceânico Atlântico adjacente na sua fase inicial.....	40
Figura 4.3 - Variação do índice ACU dos SCMs ao longo dos tempos de previsão .....	42
Figura 4.4 - Índice de ACU dos SCMs por escala (meso- $\beta$ e meso- $\alpha$ ) e tipo geográfico (continentais, oceânicos e costeiros) .....	43
Figura 4.5 - Variação do índice de BIAS dos SCMs.....	45

Figura 4.6 - Variação do índice de BIAS dos SCMs por escala (meso- $\beta$ e meso- $\alpha$ ) e tipo geográfico .....	46
Figura 4.7 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Continentais (propriedades cinemáticas) .....	49
Figura 4.8 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Continentais (propriedades morfológicas) .....	50
Figura 4.9 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Continentais radiativas e de precipitação) .....	51
Figura 4.10 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Oceânicos (propriedades cinemáticas) .....	55
Figura 4.11 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Oceânicos (propriedades morfológicas) .....	56
Figura 4.12 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Oceânicos (propriedades radiativas e de precipitação) .....	57
Figura 4.13 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Costeiros (propriedades cinemáticas) .....	61
Figura 4.14 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Costeiros (propriedades morfológicas) .....	62
Figura 4.15 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs Costeiros (propriedades radiativas e de precipitação) .....	63
Figura 4.16 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$ (propriedades cinemáticas) .....	66

Figura 4.17 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$ (propriedades morfológicas) .....	67
Figura 4.18 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$ (propriedades radiativas e de precipitação) .....	68
Figura 4.19 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$ (propriedades cinemáticas) .....	72
Figura 4.20 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$ (propriedades morfológicas) .....	73
Figura 4.21 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$ (propriedades radiativas e de precipitação) .....	74
Figura 5.1 - Esquema de processamento para várias datas.....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Critérios de classificação dos SCMs.....	33
Quadro 3.2 – Propriedades dos SCMs.....	34
Quadro 3.3 – Quadro de verificação da previsão.....	35
Quadro 3.4 – Índices de previsão.....	35
Quadro 4.1 – Distribuição do número total de SCMs identificados na região sudeste do Brasil e região oceânica adjacente.....	37
Quadro 4.2 – Comparação das propriedades entre grupos .....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cb	Cumulonimbus
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CMORPH	Climate Prediction Center Morphing Method
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
FORTRACC	Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters
GOES	Geostationary Operational Environmental
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
JBN	Jatos de Baixos Níveis
LAMET	Laboratório de Meteorologia
LI	Linhas de Instabilidade
MSG	Meteosat Second Generation
RMSE	Root Mean Square Errors
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense

## SUMÁRIO

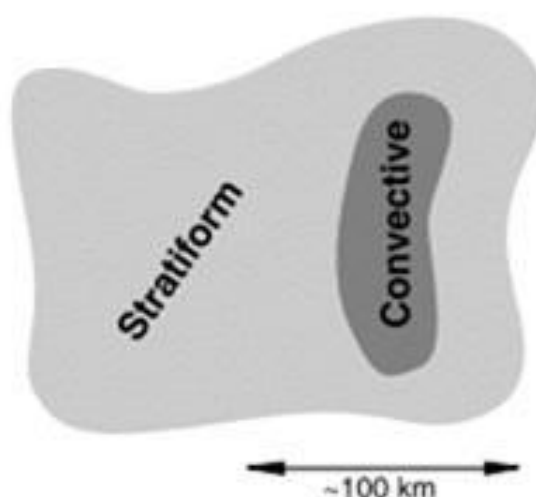
1. INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações iniciais sobre os Sistemas Convectivos de Mesoescala.....	12
1.2 Previsão Imediata dos Sistemas Convectivos de Mesoescala .....	13
1.3 Objetivos.....	15
1.4 Organização do documento.....	15
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3. METODOLOGIA	
3.1 Dados.....	28
3.2 Metodologia.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1 Frequências de ocorrência dos SCMs observados e previstos.....	36
4.2 Análise da qualidade das previsões dos SCMs utilizando índices de previsão.....	41
4.3 Análise da qualidade das previsões das propriedades físicas dos SCMs .....	48
5. PRODUTO TECNOLÓGICO.....	80
6. CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização geral do tema, destacando sua relevância científica e aplicada. Também são introduzidos os principais conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, bem como os objetivos do trabalho.

### 1.1 Considerações iniciais sobre os Sistemas Convectivos de Mesoescala

Os sistemas convectivos de mesoescala (SCMs) são um conjunto de nuvens de grande desenvolvimento vertical, que podem chegar a 15 km de altitude. Esses sistemas são caracterizados por rápida formação, ampla extensão e elevada capacidade de gerar precipitação intensa. Os SCMs são compostos por nuvens cumulonimbus (CB), que apresentam extensão de 2 a 20 km, sendo interligadas por nuvens estratiformes, com desenvolvimento vertical menos acentuado. A Figura 1 ilustra a divisão de um SCM em regiões convectivas e estratiformes, destacando as diferenças estruturais entre essas áreas. Esta divisão é importante para compreender a dinâmica interna dos SCMs e melhorar a precisão das previsões meteorológicas, especialmente em relação à intensidade e à distribuição espacial das chuvas produzidas.



**Figura 1:** Divisão das regiões convectivas e estratiformes de um SCM. Fonte: Houze (1997).

Os SCMs no Sudeste do Brasil podem se organizar na forma de linhas de instabilidade, caracterizadas por uma distribuição linear de células convectivas. Essas estruturas consistem em uma linha principal de convecção, seguida por uma região de precipitação estratiforme (Ferreira, 2010). Diferentemente das regiões subtropicais da América do Sul (por exemplo, no norte da Argentina e no sul do Brasil), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) são raros na região Sudeste devido à ausência de condições atmosféricas que favoreçam sua sustentação. A falta de áreas extensas de baixa pressão e de forçantes dinâmicas que prolonguem a convecção dificulta a formação desses grandes sistemas. Como resultado, a atividade convectiva no Sudeste brasileiro é dominada por sistemas de menor escala e evolução mais rápida, os quais exercem um impacto significativo na variabilidade climática e na previsão de eventos extremos.

Os SCMs se formam quando nuvens originadas em resposta à instabilidade convectiva se unem e se organizam em uma única estrutura de nuvem com uma grande cobertura de nuvens cirriformes na parte superior e áreas de chuva contínuas abrangendo grandes regiões (Houze, 2004). Dentre as suas principais características, estão a formação de nuvens *cumulonimbus* e a capacidade de produzir precipitação intensa em um curto período de tempo. Portanto, rastrear e prever estes sistemas é essencial para reduzir impactos socioeconômicos, permitindo ações preventivas e respostas rápidas por parte de setores como a defesa civil e o planejamento urbano.

## **1.2 Previsão imediata dos Sistemas Convectivos de Mesoescala**

A previsão imediata dos SCMs desempenha um papel essencial para prevenir os impactos negativos associados aos SCMs, devido à sua rápida evolução e ao seu grande potencial de causar eventos extremos. O Sudeste do Brasil é fortemente impactado pelos SCMs, principalmente no verão austral, no outono e na primavera austral (Siqueira; Marques, 2021). Os SCMs de longa duração e de movimento lento são uma das principais causas de inundações, e esses sistemas também produzem frequentemente granizo, ventos fortes e até tornados (Houze, 2004). Segundo Vila *et al.* (2008), o conhecimento da evolução dos SCMs também é importante para

entender o tempo e o clima, especialmente nos Trópicos. Dada a importância dos SCMs, evidencia-se a necessidade de se realizar um estudo para o aperfeiçoamento dos métodos de previsão de tempo nos centros de previsão do tempo brasileiros, bem como para as instituições de defesa civil, agricultura, hidroeletricidade e produção de petróleo offshore, a fim de evitar catástrofes e prejuízos.

Diversos estudos realizaram a previsão imediata de SCMs utilizando imagens de satélite. Dentre eles, destaca-se o trabalho de Vila *et al.* (2008), que desenvolveram o método de Previsão e Rastreamento da Evolução de Aglomerados de Nuvens (FORTRACC), que rastreia a evolução dos SCMs a partir de imagens infravermelho de satélite e realiza previsões de até 180 minutos com base em parâmetros como a temperatura do topo das nuvens e o deslocamento do centro de massa dos sistemas. Destaca-se também Walker *et al.* (2012), que investigaram métodos de previsão imediata baseados em satélite, utilizando dados de radar principalmente para verificação, com foco no rastreamento de objetos de nuvens e na previsão da iniciação convectiva, visando apoiar análises meteorológicas operacionais nos Estados Unidos. Kolios e Feidas (2013), que utilizaram métodos automatizados para rastreamento de SCMs no Mediterrâneo.

Recentemente, Siqueira e Marques (2021) analisaram a qualidade das previsões de SCMs no Sudeste do Brasil e no oceano Atlântico adjacente no período de 2009 a 2017 utilizando o método FORTRACC, que é atualmente operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os autores identificaram, rastrearam e analisaram as previsões de forma geral para tempos de previsão de 30 a 120 minutos, isto é, considerando a população total de 7139 SCMs sobre a região. Como resultado do trabalho de Siqueira e Marques, apontou-se a necessidade de analisar de forma mais aprofundada a qualidade das previsões para SCMs com diferentes características físicas e morfológicas, como posição, tamanho, fração convectiva, temperatura de brilho e taxa de precipitação, bem como para sistemas pertencentes a diferentes grupos geográficos (continentais, oceânicos e costeiros) e tamanhos (meso- $\beta$  e meso- $\alpha$ ) em diferentes cenários, realizando posteriormente a comparação da previsão entre estes grupos, respectivamente. Essa lacuna constituiu a principal motivação do presente trabalho.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a previsão imediata de SCMs com diferentes características que ocorreram no Sudeste do Brasil no período de 2009 a 2017 utilizando imagens do satélite meteorológico GOES-13 (Geostationary Operational and Environmental Satellite) e o método FORTRACC.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar as frequências de ocorrência dos SCMs rastreados e previstos;
- Analisar a qualidade das previsões dos SCMs com diferentes tamanhos e em diferentes cenários (regiões continentais, costeiras e oceânicas, horários de maturação, entre outros);
- Analisar a qualidade das previsões das propriedades dos SCMs, como duração, tamanho, temperatura do topo de nuvem, velocidade, direção e taxa de precipitação, entre outras.

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO**

O presente documento está organizado conforme segue. No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico e bibliográfico do presente trabalho. No Capítulo 3, são detalhados os dados e a metodologia utilizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões. O Capítulo 5 descreve o produto técnico-tecnológico gerado a partir da pesquisa. As conclusões são apresentadas no Capítulo 6.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O rastreamento dos SCMs tem desempenhado um papel importante para a realização das suas previsões, possibilitando uma compreensão detalhada de sua dinâmica e evolução, e fornecendo subsídios para a emissão de alertas precoces e a implementação de medidas preventivas. Desta forma, foram promovidos avanços significativos nos métodos de previsão meteorológica, aumentando a precisão das estimativas e contribuindo para o fortalecimento da resiliência e segurança habitacional para sociedade. De acordo com Siqueira e Marques (2021), os SCMs são classificados em três categorias principais com base na sua extensão horizontal: meso-alfa, meso-beta e meso-gama. Os SCMs meso-alfa são os maiores sistemas, com uma extensão horizontal de 200 a 2.000 km e geralmente associados a eventos meteorológicos de grande escala, como frentes frias e ciclones extratropicais. Os SCMs meso-beta possuem uma dimensão intermediária, variando entre 20 a 200 km e são frequentemente associados a tempestades severas, incluindo chuvas intensas e granizo. Já os SCMs meso-gama são os menores, com dimensões inferiores a 20 km e associados a fenômenos locais.

Maddox (1980) realizou um estudo dos complexos convectivos de mesoescala (CCMs), definindo e classificando estes sistemas meteorológicos de grande escala que frequentemente causam fortes chuvas e ventos nos Estados Unidos da América, examinando o seu ciclo de vida e os fatores meteorológicos associados à sua formação e à sua dissipação. Utilizando dados de satélite GOES-1 e de superfície, o autor descreveu o ciclo de vida dos CCMs e os fatores associados à sua formação, destacando sua relação com instabilidades atmosféricas e interações com sistemas frontais. O estudo revelou que os CCMs são frequentemente gerados por interações entre sistemas frontais e a instabilidade convectiva local, os mesmos podem se desenvolver rapidamente e manterem a sua atividade por várias horas, afetando grandes áreas e favorecendo a ocorrência de eventos meteorológicos severos. O autor também destacou a importância de se monitorar continuamente esses sistemas, enfatizando que a previsão da sua formação e da sua evolução é essencial para minimizar os danos produzidos pelos CCMs.

Em um estudo posterior, Maddox (1983) aprofundou a análise das condições meteorológicas que acompanharam dez CCMs utilizando imagens de satélite do GOES-1. Tais imagens capturavam dados infravermelhos essenciais para observar as características de longo ciclo de vida desses sistemas. O trabalho foi realizado com base em análises atmosféricas em regiões dos Estados Unidos da América, observando como os CCMs estavam frequentemente associados à presença de cavados de ondas curtas na média troposfera. Os dados incluíram parâmetros como temperatura do topo das nuvens (extraída das imagens infravermelho), e advecção de ar quente e umidade em baixos níveis, que contribuem notavelmente para o desenvolvimento e a intensificação dos CCMs. As análises meteorológicas foram realizadas utilizando séries temporais, visando compreender a interação entre os CCMs e o ambiente de grande escala.

Os critérios de classificação de Maddox (1983) para os CCMs foram detalhados em diferentes estudos com base em características físicas específicas. Maddox definiu os CCMs como grandes aglomerados de nuvens convectivas, que apresentam uma cobertura de nuvens quase circular em imagens infravermelho de satélite. O autor estabeleceu critérios como uma temperatura de topo de nuvem inferior a  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  em uma área mínima de  $50.000\text{ km}^2$  por pelo menos seis horas. Além disso, o sistema deveria exibir uma área maior que  $100.000\text{ km}^2$  com temperaturas inferiores a  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , refletindo a presença de uma extensa região convectiva e estratiforme durante sua maturação. Posteriormente, Maddox manteve os critérios básicos de temperatura e tamanho estabelecidos anteriormente, mas adicionou análises detalhadas sobre o ciclo de vida dos CCMs. O autor enfatizou a evolução dinâmica dos sistemas, observando como a expansão da sua área fria (pixels com temperaturas  $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) eram indicadores de crescimento e duração do sistema. Também destacou-se a influência de cavados de ondas curtas e a advecção de ar quente na formação de grandes áreas convectivas dos sistemas.

Velasco e Fritsch (1987) estudaram a evolução dos CCMs em regiões tropicais e subtropicais das Américas, com ênfase à variabilidade espacial e temporal destes sistemas. Foram utilizadas temperaturas de brilho do satélite GOES no canal infravermelho, dados de radar e estações meteorológicas de superfície, para analisar as características dinâmicas dos CCMs, sua formação e evolução, bem como para refinar os métodos de previsão imediata dos CCMs. O estudo revelou que os CCMs ocorrem com uma frequência similar nas regiões tropicais e subtropicais da América do Sul e América do Norte, sendo predominantemente noturnos e terrestres. Os autores classificaram os CCMs com base em limiar de temperatura abaixo de 235 K, para identificar aglomerados de nuvens convectivas. Os autores concluíram que a previsão imediata dos CCMs depende da capacidade de observar a atmosfera em tempo real, e que a combinação destes dados é essencial para melhorar as previsões de tempo.

Velasco e Fritsch (1987) aplicaram os critérios de classificação de CCMs elaborados por Maddox (1980) para a identificação de CCMs na América do Sul. Os autores classificaram os SCMs com base em temperaturas inferiores a  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a área convectiva, e ampliaram a análise para incluir áreas com temperaturas abaixo de  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  em regiões periféricas. Os mesmos destacaram que a duração mínima do CCM deveria ser de 6 horas, reforçando a importância das escalas temporais e espaciais para diferenciar estes sistemas de tempestades menores ou transitórias.

Machado e Rossow (1993) estudaram a evolução dos SCMs tropicais com foco na América do Sul e em áreas associadas a climas tropicais úmidos utilizando imagem do canal 7 do satélite GOES-7 e do *International Satellite Cloud Climatology Project* (Projeto Internacional de Climatologia de Nuvens por Satélite - ISCCP). Os autores apresentaram metodologias inovadoras para a identificação e rastreamento desses sistemas, que permitiram analisar as propriedades morfológicas e radiativas dos SCMs durante os seus ciclos de vida. Os autores enfatizaram a importância das análises temporal e espacial desses sistemas, permitindo uma melhor compreensão da dinâmica do seu desenvolvimento. Os autores também exploraram a relação entre as variáveis meteorológicas e a formação dos SCMs, destacando-se a necessidade de se utilizar diferentes tipos de dados para melhorar as suas previsões.

Este estudo representou um avanço significativo no campo da previsão imediata, contribuindo para a identificação de padrões e comportamentos dos SCMs que afetam diretamente a previsão de eventos meteorológicos severos, especialmente na região tropical.

De acordo com Machado, Guedes e Alves (1997), foi analisada a estrutura interna dos SCMs ao longo das diferentes fases do seu ciclo de vida, buscando identificar padrões de formação, maturação e dissipação desses sistemas. Para isso, os autores estudaram cerca de 12.500 SCMs com raio maior que 100 km e duração superior a 6 horas, utilizando imagens do projeto ISCCP para o monitoramento espacial e temporal dos sistemas. A análise mostrou que a formação e evolução dos SCMs estão diretamente associadas à instabilidade térmica, à disponibilidade de umidade e à atuação de forçantes dinâmicas, como frentes frias e áreas de baixa pressão. O estudo também evidenciou que os SCMs podem variar desde tempestades isoladas até complexos convectivos de mesoescala (CCMs), caracterizados por maior intensidade, maior extensão horizontal e maior potencial para gerar eventos meteorológicos extremos. Os autores destacam que compreender a estrutura interna e a variabilidade ao longo do ciclo de vida dos SCMs é fundamental para aprimorar os métodos de previsão e avançar no entendimento dos mecanismos físicos responsáveis pela ocorrência de eventos severos associados a esses sistemas.

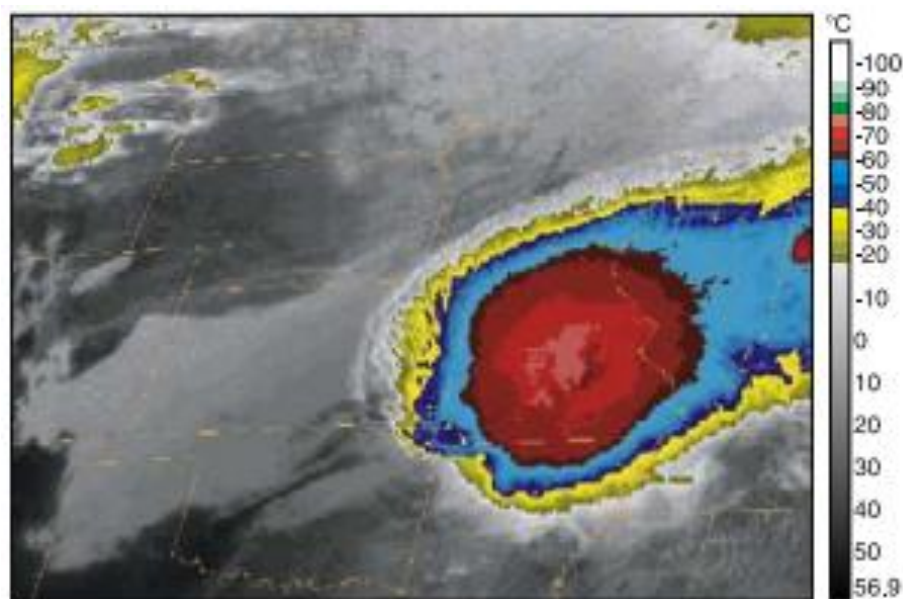
Machado *et al.* (1998) realizaram um estudo aprofundado de rastreamento de SCMs tropicais, subtropicais e de latitudes médias, com foco no desenvolvimento de algoritmos para detecção automática desses sistemas e na análise das suas propriedades morfológicas e radiativas ao longo do ciclo de vida. Para isso, utilizaram imagens no canal infravermelho do satélite GOES-7 e dados do projeto ISCCP, com alta resolução temporal e espacial sobre as Américas, abrangendo áreas continentais e oceânicas. As análises incluíram variáveis como temperatura do topo das nuvens e mostraram como a dinâmica dos sistemas variava de acordo com o ambiente local. O estudo representou um avanço significativo na eficiência da

identificação de tempestades severas e na compreensão do ciclo de vida dos SCMs, evidenciando que o uso de canais infravermelhos em satélites geoestacionários é essencial para identificar a formação de nuvens convectivas, especialmente em regiões tropicais. Os autores concluíram que a combinação de diferentes tipos de dados de satélite permite melhor identificação dos SCMs em fase inicial e que o rastreamento em tempo real é fundamental para aprimorar a previsão imediata desses sistemas.

Com base nesses resultados, Machado *et al.* (1998) destacaram que o rastreamento de SCMs (especialmente com o uso integrado de satélites e radares) é fundamental para melhorar as previsões de eventos meteorológicos extremos e compreender sua relação com a dinâmica atmosférica em escala global. Os autores enfatizaram ainda a relevância dos SCMs para a climatologia e para a previsão de tempestades severas em regiões tropicais e subtropicais, mostrando que critérios baseados em temperatura do topo de nuvens, tamanho e duração fornecem uma estrutura consistente para identificar e caracterizar esses sistemas, bem como para descrever sua variabilidade espacial e temporal.

Houze (2004) estudou a dinâmica e a estrutura dos SCMs, abordando a evolução da sua circulação interna e os processos físicos associados. Para isso, baseou-se em uma combinação de dados observacionais provenientes de satélites, métodos atmosféricos e diferentes tipos de observações meteorológicas, reunidos a partir de estudos de campo e da literatura especializada. O autor realizou uma análise física detalhada desses sistemas, descrevendo sua estrutura interna e o papel da convecção organizada na formação de tempestades severas, bem como a forma como a circulação em larga escala interage com os SCMs, afetando a sua propagação e duração. Destacou também que esses sistemas são caracterizados por grandes aglomerados de nuvens, que podem se estender por centenas de quilômetros e estão frequentemente associados a chuvas intensas e prolongadas.

A Figura 2.1 mostra a representação esquemática de um SCM extraída de Houze (2004). A mesma se trata de um exemplo típico de nuvens convectivas intensas em imagem de satélite infravermelho, mostrando a estrutura complexa de um SCM, com o topo das nuvens mais frias, uma característica chave para rastreamento e previsão, conforme abordado por Houze (2004). No contexto do Sudeste do Brasil, embora os complexos convectivos de mesoescala sejam menos frequentes, ocorrem sistemas convectivos de mesoescala organizados, como linhas de instabilidade e aglomerados convectivos de menor extensão (meso- $\beta$  e meso- $\alpha$ ), cuja organização estrutural é análoga à ilustrada na Figura 2.1, com topos frios e ampla cobertura de nuvens altas que favorecem o rastreamento e a previsão imediata.



**Figura 2.1:** Representação esquemática de um SCM. Fonte: Houze (2004).

Recentemente, Jacinto, Eloi e Sakamoto (2022) analisaram as principais características dos SCMs no Nordeste do Brasil. Para tal, os autores utilizaram o método FORTRACC para rastrear esses sistemas, analisando o ciclo de vida dos SCMs, a distribuição espacial, a frequência sazonal e o tamanho médio no período de 2000 a 2016. Os resultados apontaram que, em média, ocorrem 321 SCMs por

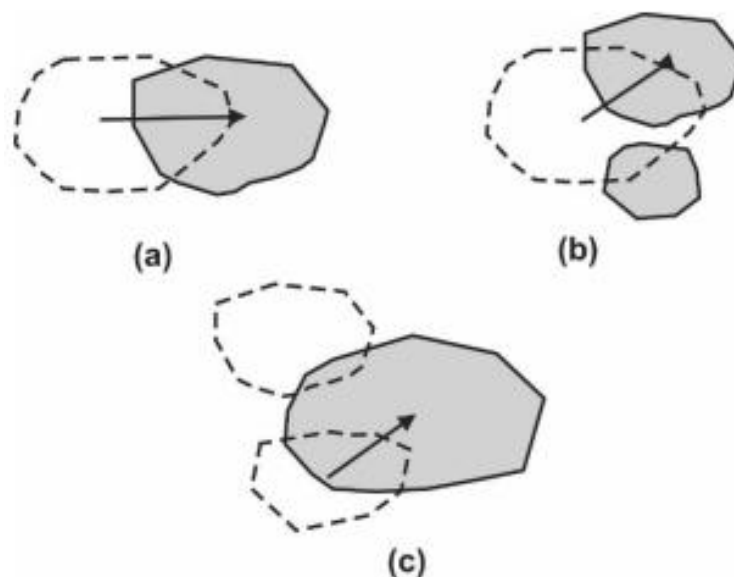
ano na região, com maior incidência no mês de março, e menor incidência em agosto. Além disso, verificou-se que esses sistemas tendem a se formar predominantemente durante o dia, atingindo a maturidade após três a quatro horas da sua formação. A análise também revelou que a densidade de formação dos SCMs é maior sobre o continente que sobre o oceano, sendo distribuída de maneira desigual ao longo do território nordestino. Estes resultados destacaram a importância dos SCMs para a dinâmica atmosférica da região, além de fornecerem subsídios para estudos futuros voltados à previsão e o monitoramento desses sistemas meteorológicos.

O estudo de Ribeiro *et al.* (2023) analisou um CCM ocorrido entre os dias 15 e 16 de outubro de 2016 no sul da América do Sul, abrangendo desde o noroeste da Argentina até o oeste do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizadas imagens de satélite GOES-13, dados de reanálise e o produto de precipitação CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Method), um campo de precipitação estimado por satélite do NOAA/CPC, com resolução espacial de aproximadamente  $0,25^\circ$  (~25 km) e temporal de 30 minutos, permitindo uma investigação detalhada das variáveis meteorológicas associadas ao evento. As análises foram conduzidas em diferentes horários sinóticos, considerando parâmetros como temperatura do ar, umidade específica, vento, vorticidade e anomalias da temperatura da superfície do mar. Os resultados indicaram que, além dos efeitos locais, a formação e a intensificação do CCM foram influenciadas por interações de multiescala, destacando-se o papel dos Jatos de Baixos Níveis (JBN) no transporte de calor e umidade para a região.

A previsão imediata dos SCMs utilizando imagens de satélite tem sido objeto de diversos estudos (Vila *et al.* (2008), Walker *et al.* (2012), Koilios e Feidas (2013) e Siqueira e Marques (2021)). Estes estudos trouxeram contribuições importantes, sendo que alguns acrescentaram metodologias inovadoras buscando aprimorar os métodos de previsão imediata.

O estudo de Vila *et al.* (2008) teve como foco o desenvolvimento e a avaliação do método FORTRACC para identificação, rastreamento e previsão imediata de SCMs, utilizando principalmente sistemas observados sobre regiões tropicais e subtropicais da América do Sul. O foco principal foi no desenvolvimento e na validação do método FORTRACC para rastrear e prever o ciclo de vida dos SCMs, utilizando imagens do canal infravermelho termal do satélite GOES-13. A aplicação do método concentrou-se no rastreamento e na previsão de tempestades severas na América do Sul, com destaque para a bacia do Prata, na Argentina. Os SCMs foram rastreados e previstos em intervalos de 30 minutos, com previsões de até 120 minutos, avaliando a evolução do deslocamento e do tamanho dos sistemas. O desempenho do FORTRACC foi validado por meio da comparação entre as imagens previstas e observadas, demonstrando boa concordância nos tamanhos e nas temperaturas observados em previsões de curtíssimo prazo. Os resultados de Vila *et al.* (2008) mostraram que método utilizado apresentou uma acurácia (ACU) média de 95%, atribuída principalmente à correta previsão da não ocorrência de SCMs. No entanto, observou-se que a qualidade da previsão diminuiu com o aumento do tempo de previsão, com queda na probabilidade de detecção (POD) e aumento na taxa de alarmes falsos (FAR). Para previsões de 30 minutos, houve boa correspondência entre os valores observados e previstos de tamanho e temperatura dos sistemas. Já para intervalos maiores, o método demonstrou tendência à subestimação, com redução progressiva do número de pixels detectados, impactando a confiabilidade das previsões para intervalos maiores.

Na Figura 2.2, é mostrada a representação esquemática de diferentes processos físicos possíveis durante a evolução do SCM. As setas indicam a direção de movimento do sistema, sendo essencial para prever o comportamento desses sistemas em intervalos de tempo curtos.



**Figura 2.2:** Representação esquemática de um SCM sobre St. Louis, Missouri, extraída de imagens infravermelho de satélite. Fonte: Vila *et al.* (2008).

Walker *et al.* (2012) também desenvolveram um algoritmo baseado em satélites geoestacionários para a previsão imediata de SCMs, para até 120 minutos, denominado SATCASTv2. Neste estudo, abordou-se a integração de dados de satélites GOES-13 com radar meteorológico e estações meteorológicas de superfície para melhorar a precisão das previsões, com especial atenção à identificação de novas células convectivas que evoluiriam para tempestades com refletividade de radar significativa ( $\geq 35$  dBZ). As previsões foram avaliadas em diferentes regiões dos Estados Unidos, mostrando que o método foi capaz de indicar com alguma antecedência a formação de muitas tempestades, embora ainda apresentasse taxas relativamente altas de falsos alarmes. Os autores concluíram que o uso combinado de imagens de satélite e dados de radar é promissor para a detecção precoce de tempestades de curto prazo que afetam a sociedade (chuvas intensas e tempestades severas em geral), mas destacaram a necessidade de ajustes adicionais para reduzir os alarmes falsos e melhorar o desempenho regional do sistema.

Com enfoque semelhante ao estudo anterior, Koilios e Feidas (2013) contribuíram para melhoria da previsão imediata, sobre a região mediterrânea. O trabalho se concentrou na aplicação de canais espectrais do satélite Meteosat Second Generation (MSG), como os do infravermelho térmico (10,8  $\mu\text{m}$ ) e o vapor d'água (6,2  $\mu\text{m}$ ), para identificar rapidamente a formação de nuvens convectivas, permitindo a detecção precoce de tempestades severas. Foi desenvolvido um método automático para rastrear e prever a evolução dos SCMs ao longo de seu ciclo de vida, maximizando a capacidade de detecção de pequenas mudanças na estrutura das nuvens convectivas. Concluiu-se que o uso de múltiplos canais espectrais não apenas aumenta a sensibilidade na identificação de tempestades iminentes, mas também melhora a capacidade de prever o desenvolvimento de eventos severos com maior antecedência.

Siqueira e Marques (2021) realizaram o rastreamento e a previsão imediata de SCMs nas escalas meso- $\beta$  e meso- $\alpha$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano Atlântico adjacente, no período de 2009 a 2017, utilizando imagens infravermelhas do canal 4 do satélite GOES-13, com resolução temporal de 30 minutos e espacial de 4 km, em conjunto com o método FORTRACC. Os autores aplicaram previsões de 30, 60, 90 e 120 minutos a partir da fase de maturação dos sistemas e avaliaram a qualidade das previsões por meio de índices estatísticos (como ACU, POD, BIAS e FAR) e das propriedades físicas dos SCMs. Os resultados mostraram que o desempenho do método é melhor para tempos mais curtos (até cerca de 60 minutos), com boa correspondência entre SCMs previstos e observados, enquanto para tempos mais longos (90–120 minutos) as previsões passam a superestimar a frequência ocorrência, a intensidade e o crescimento dos sistemas, além de posicioná-los mais ao norte e a leste em relação às observações. Esses resultados indicaram que, embora o FORTRACC seja útil para previsão imediata de curto prazo, há um aumento na perda da qualidade de previsão à medida que o tempo aumenta.

Os estudos de Vila *et al.* (2008), Walker *et al.* (2012), Koilios e Feidas (2013) e Siqueira e Marques (2021) são exemplos importantes da evolução contínua dos métodos de previsão imediata, com foco crescente na integração de dados de satélite com outras tecnologias, bem como no uso de métodos computacionais avançados para melhorar a precisão e a rapidez das previsões. Estes avanços são de extrema importância para a previsão de SCMs, que evoluem rapidamente e têm o potencial de causar danos significativos, principalmente em regiões tropicais e em áreas urbanas. A aplicação de satélites de alta resolução, algoritmos computacionais e conjuntos de dados de diferentes fontes permite que a previsão imediata de eventos extremos seja cada vez mais precisa, contribuindo diretamente para a segurança pública e a prevenção de desastres naturais. Embora ainda existam desafios a serem enfrentados, como a variabilidade espacial e temporal dos fenômenos convectivos, os avanços tecnológicos e metodológicos tem oferecido um horizonte promissor para aprimorar as previsões meteorológicas.

Anderson *et al.* (2024) desenvolveram um método probabilístico simples para previsão imediata de atividade convectiva no Sahel, com foco em sistemas convectivos de mesoescala responsáveis por chuvas intensas e inundações rápidas. Para isso, utilizaram dados de temperatura de topo de nuvem do canal infravermelho de 10,8  $\mu\text{m}$  do Meteosat Second Generation (MSG), com resolução temporal de 15 minutos, para os meses de junho a setembro, no período de 2004 a 2019, construindo um banco climatológico de ocorrências de convecção. A partir desse conjunto, os autores identificaram núcleos convectivos por meio de um método de wavelet em duas dimensões e calcularam probabilidades condicionais de ocorrência de convecção em diferentes janelas espaciais, gerando previsões probabilísticas de atividade convectiva até 6 horas à frente. Os resultados mostraram que o método é hábil em relação à climatologia, inclusive para capturar acumulados extremos de chuva diária na região de Dakar, com melhor desempenho à tarde e em escalas espaciais de dezenas a centenas de quilômetros, indicando que abordagens baseadas apenas em satélite podem ser úteis em sistemas operacionais de alerta em regiões com pouca disponibilidade de radares meteorológicos.

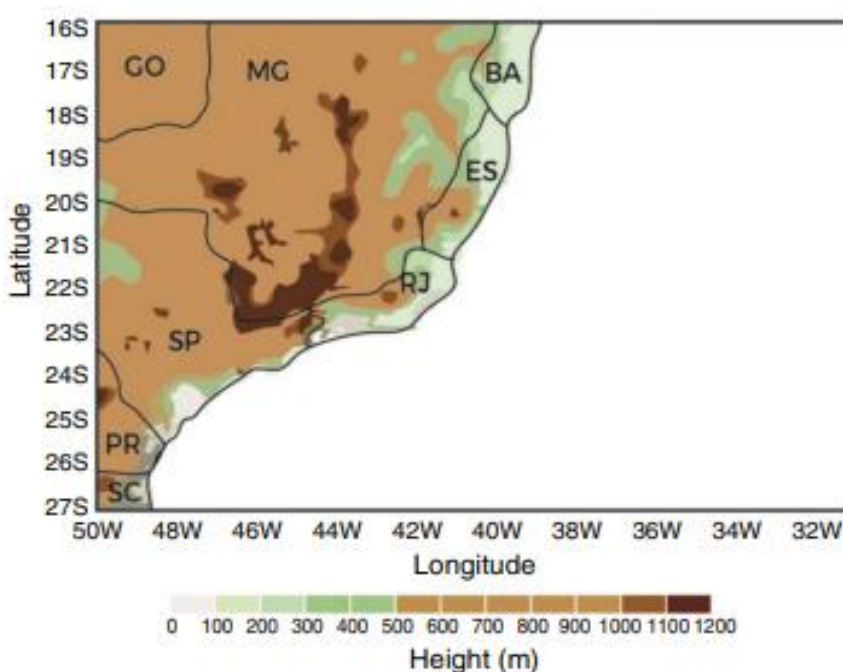
Feng *et al.* (2025) estudaram o desempenho de modelos globais de alta resolução (km-scale) na simulação de SCMs tropicais, com foco na frequência, precipitação e principais características desses sistemas nas simulações DYAMOND de verão e inverno. Para isso, os autores aplicaram 10 diferentes métodos de rastreamento de SCMs tanto em simulações globais quanto em observações de satélite, utilizando principalmente temperatura de brilho infravermelha e precipitação estimada por satélite para identificar e comparar os SCMs. Os resultados mostraram que, embora os modelos representem razoavelmente bem a frequência média dos SCMs tropicais, a maioria subestima a quantidade de precipitação associada a esses sistemas e sua contribuição para a precipitação total, sobretudo sobre o oceano. Além disso, os modelos tendem a superestimar a intensidade da precipitação e a subestimar a contribuição da chuva estratiforme. Os autores concluíram que a comparação entre diferentes métodos de rastreamento é importante para avaliar a qualidade dos resultados e que as métricas desenvolvidas no estudo podem auxiliar no aperfeiçoamento futuro dos modelos atmosféricos.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os dados utilizados e a metodologia empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

#### 3.1 DADOS

A área de estudo deste trabalho abrange as regiões continentais, costeiras e oceânicas da região do Sudeste do Brasil, nas latitudes entre  $-27^{\circ}$  e  $-16^{\circ}$  S e longitudes entre  $-50^{\circ}$  e  $-30^{\circ}$  W, conforme mostrado na Figura 3.1.



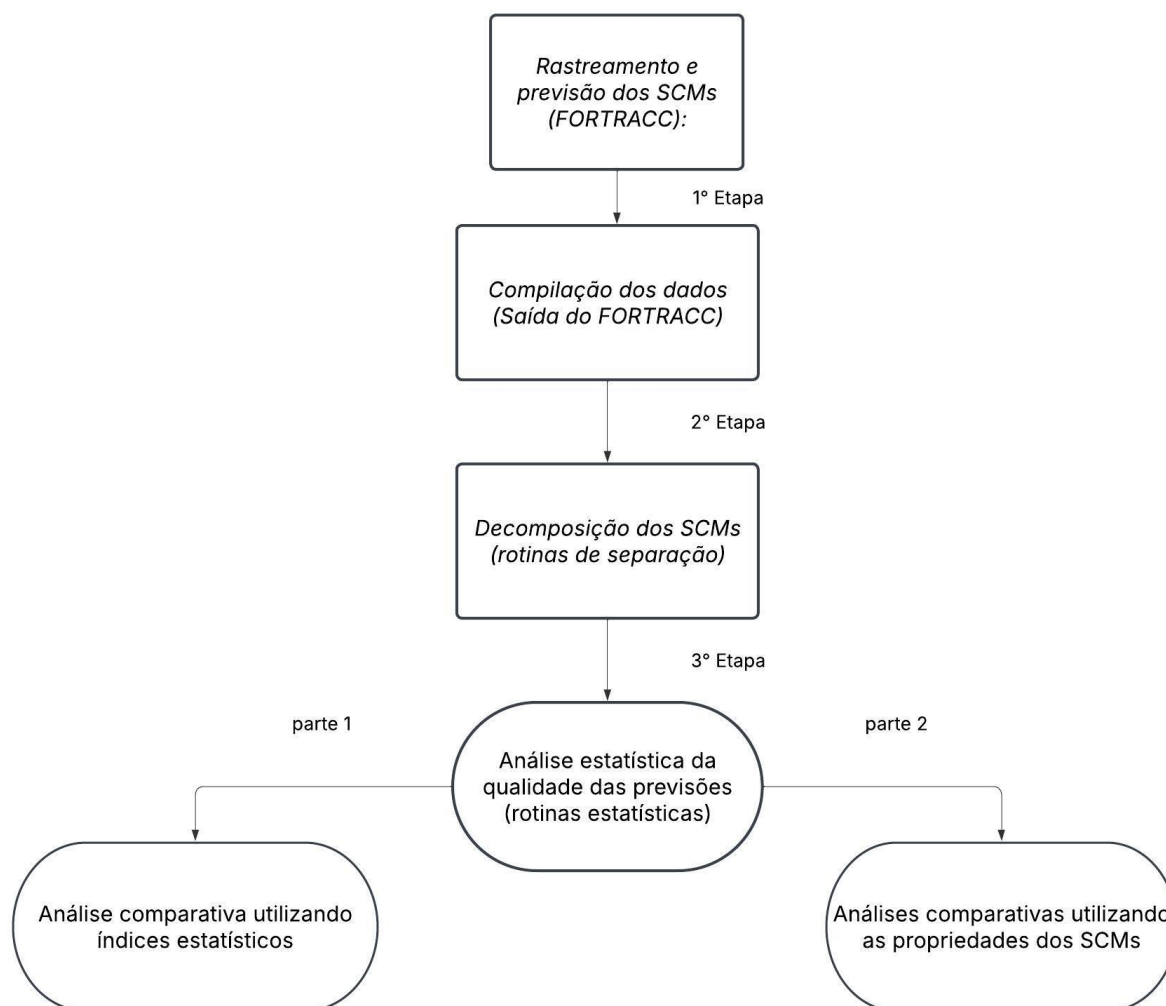
**Figura 3.1:** Mapas políticos e topográficos do Sudeste do Brasil e do Oceano Atlântico adjacente.

Fonte: Siqueira e Marques, 2021.

Os dados utilizados referem-se a imagens infravermelho termal do canal 4 ( $10,7 \mu\text{m}$ ) do satélite GOES-13, que fornece medições de temperatura de brilho com resolução espacial de 4 km e temporal de 30 minutos, em órbita geoestacionária a aproximadamente 35.800 km de altitude sobre o equador terrestre. O GOES-13 atuou como satélite operacional GOES-East entre abril de 2010 e dezembro de 2017. Os dados foram disponibilizados pelo Laboratório de Meteorologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LAMET/UENF).

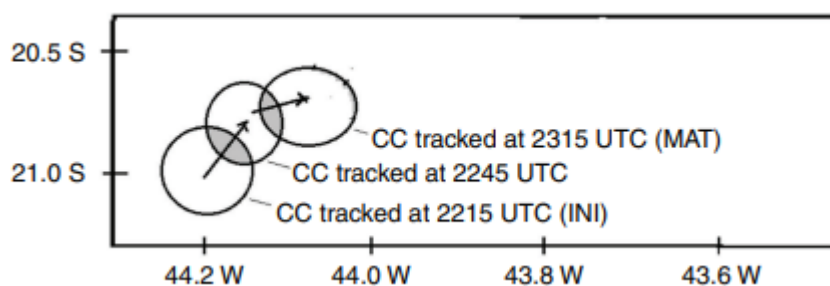
## 3.2 METODOLOGIA

A Figura 3.2 mostra as principais etapas que foram realizadas no presente trabalho.



**Figura 3.2:** Fluxograma da metodologia. Fonte: A autora.

Na primeira etapa do trabalho (Figura 3.2), foram selecionados todos os SCMs que foram rastreados e previstos por Siqueira e Marques (2021) na região do estudo utilizando o método FORTRACC. Este método utiliza imagens infravermelho de satélites geoestacionários, como o GOES-13, para rastrear e prever os SCMs. Para a identificação dos SCMs, o método utiliza um limiar de temperatura de brilho de 235K, enquanto valores iguais ou inferiores a 210 K são considerados para a detecção de núcleos convectivos mais intensos (Cbs). O método FORTRACC é estruturado em dois modos, sendo o primeiro para a identificação e rastreamento dos SCMs, e o segundo para previsão da evolução do seu ciclo de vida. O modo diagnóstico do FORTRACC permite detectar e acompanhar a trajetória desses sistemas ao longo de seu ciclo de vida com resolução temporal de 30 minutos. Esse modo baseia-se primeiramente na identificação de áreas de convecção profunda a partir de limiares de temperatura de brilho, estabelecendo critérios que delimitam a extensão e a intensidade dos sistemas rastreados. A partir dessa classificação, são gerados agrupamentos de pixels (clusters) que representam os sistemas, sendo posteriormente calculados parâmetros morfológicos, radiativos e de localização, como área, raio efetivo, temperaturas média e mínima e coordenadas do centro de massa do SCM. O método promove posteriormente a superposição entre imagens sucessivas para determinar a continuidade espacial e temporal do SCM ao longo do tempo, considerando diferentes situações de evolução, como continuidade, fusão e divisão, formando trajetórias coerentes que revelam o deslocamento dos SCMs, conforme ilustrado na Figura 3.3.

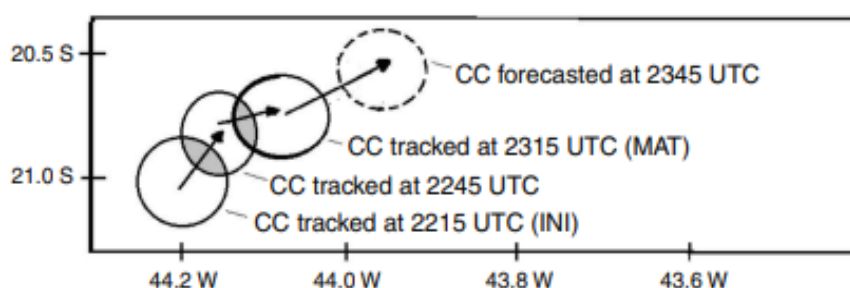


**Figura 3.3:** Representação esquemática do deslocamento do centro de massa do SCM. Os círculos representam o SCM seguido em cada imagem e como membro de uma “família”. As setas e a área sombreada representam sua evolução e a área de superposição entre duas imagens sucessivas. Fonte: Siqueira e Marques, 2021.

O segundo modo de funcionamento do FORTRACC é o modo prognóstico, no qual são feitas previsões de curtíssimo prazo (30, 60, 90 e 120 minutos) a partir da evolução observada dos SCMs. A estimativa do deslocamento dos sistemas é baseada no cálculo da velocidade e direção de propagação, obtidas a partir da variação da posição do centro de massa em imagens sucessivas. Além disso, o método incorpora a tendência de crescimento ou dissipação dos sistemas por meio da taxa de variação relativa da área, permitindo estimar a evolução do ciclo de vida dos SCMs. Em processos de fusão, divisão ou geração de SCMs, a velocidade é estimada a partir da média dos sistemas vizinhos, garantindo a continuidade do processo de previsão. Os dados de saída do FORTRACC são fornecidos em arquivos mensais, que foram compilados e processados para o cálculo desses índices. As previsões obtidas por essa abordagem são avaliadas a partir de métricas estatísticas que comparam as projeções geradas com os sistemas efetivamente observados nas imagens subsequentes, permitindo a análise do desempenho e da confiabilidade do método para diferentes intervalos de tempo.

Este procedimento utiliza a extrapolação linear do deslocamento e das propriedades físicas das nuvens para estimar sua posição e intensidade em tempos futuros. O método se baseia na continuidade das trajetórias previamente identificadas, assumindo-se que a tendência de deslocamento e desenvolvimento do SCM observada nas imagens anteriores. A estimativa de crescimento ou dissipação dos SCMs considera variações na taxa de expansão da área coberta pelas nuvens e nas mudanças na temperatura de brilho estimada na literatura, fornecendo indicativos da evolução esperada. Para maiores detalhes, sugere-se consultar os trabalhos de Vila *et al.* (2008) e Siqueira e Marques (2021). Esses autores indicaram que os processos de fusão e divisão representam uma limitação importante para a aplicação do método FORTRACC. Tais aspectos evidenciaram que a representação da evolução dos SCMs torna-se mais complexa nestes casos, o que impactar a qualidade das previsões.

Na Figura 3.4 apresenta-se uma representação esquemática do processo de previsão da posição futura do centro de massa de um SCM. O deslocamento do SCM é determinado com base em sucessivos instantes temporais, onde a posição futura do sistema é inferida a partir da variação de velocidade observada nos instantes anteriores. Para a realização dessa previsão, são necessárias três imagens sequenciais, permitindo a análise da trajetória e a projeção da evolução do sistema ao longo do tempo. A projeção do deslocamento é obtida somando a velocidade atual à variação de velocidade ao longo do tempo, permitindo uma estimativa da trajetória esperada.



**Figura 3.4:** Representação esquemática da previsão da deslocação para o mesmo evento de CC para um tempo de previsão de 30 minutos. Os círculos contínuos representam o CC monitorizado como membro de uma “família”, e o círculo tracejado representa o CC previsto. As setas e a área sombreada representam a evolução do CC e a área de sobreposição do CC. Fonte: Siqueira e Marques, 2021.

Na segunda etapa do trabalho, foram aplicadas rotinas de separação pré-desenvolvidas em Linguagem de Programação FORTRAN para decompor os SCMs em diferentes grupos, conforme mostra o Quadro 3.1. Após a identificação, os SCMs foram classificados em onze grupos.

Quadro 3.1: Critérios de classificação dos SCMs. Fonte: A autora.

<b>Grupo</b>	<b>Categoria</b>
1	Continentais
2	Oceânicos
3	Costeiros
4	Meso- $\beta$
5	Meso- $\alpha$
6	Continentais Meso- $\beta$
7	Continentais Meso- $\alpha$
8	Oceânicos Meso- $\beta$
9	Oceânicos Meso- $\alpha$
10	Costeiros Meso- $\beta$
11	Costeiros Meso- $\alpha$

Na terceira etapa, foram aplicadas rotinas estatísticas pré-desenvolvidas em Linguagem FORTRAN para estimar a qualidade das previsões. Esta etapa foi dividida em duas partes para a avaliação da qualidade das previsões. Na primeira parte, utilizou-se, para cada tempo de previsão, o quadro de verificação entre SCMs observados e previstos, conforme mostra o Quadro 3.3, a partir do qual foram calculados os índices de acurácia (ACU), viés (BIAS), probabilidade de detecção (POD) e taxa de alarmes falsos (FAR). A definição de cada índice de previsão é apresentada no Quadro 3.4. Na segunda parte, foram comparadas as propriedades físicas dos SCMs rastreados e previstos a partir da fase de maturação, descritas no Quadro 3.2, por meio das distribuições de frequência cumulativa das diferenças e dos valores de erro quadrático médio (RMSE) calculados para cada propriedade e tempo de previsão (equação 3.2). Para cada grupo foram analisadas propriedades como: latitude, longitude, velocidade, fração convectiva, raio efetivo, taxa de expansão de área, temperatura de brilho (temperatura do topo de nuvem), e taxa de precipitação estimada utilizando o método desenvolvido por Vicente *et al.* (1998). A duração do SCM é determinada pelo tempo necessário para que o sistema se propague após alcançar sua maturação, ou seja, desde o momento em que atinge

sua fase de desenvolvimento até o seu desaparecimento. O tempo de maturação é, portanto, o período que o sistema leva para se formar e atingir seu pico de intensidade, onde apresenta o máximo de atividade convectiva. A localização dos SCMs foi determinada pelas coordenadas geográficas, ou seja, pela latitude e longitude do ponto de origem do sistema, o que possibilitou a identificação de padrões regionais na formação desses eventos.

Quadro 3.2: Propriedades dos SCMs. Fonte: A autora.

<b>Propriedades</b>	<b>Descrição</b>
Tamanho	Número total de pixels do SCM
Temperatura de brilho média	Temperaturas de brilho na faixa infravermelho para identificar regiões convectivas profundas
Velocidade	Velocidade de propagação do sistema
Direção	Direção de propagação do sistema
Taxa de precipitação	Taxa estimada com base nos valores de temperatura média
Área total e área convectiva	Área total dos pixels que constituem o SCM e suas células convectivas
Fração Convectiva	Razão entre a área convectiva (pixels mais frios que um limiar de temperatura de brilho) e a área total do SCM.
Raio Efetivo	Raio do círculo equivalente cuja área é igual à área total do SCM
Latitude/ Longitude	Coordenadas geográficas do centro de massa do SCM
Taxa de variação de temperatura de brilho média	Taxa de variação da temperatura de brilho média do SCM
Taxa de expansão de área	Taxa relativa de variação da área do SCM entre duas imagens consecutivas, calculada a partir da mudança do tamanho do sistema no intervalo de tempo (equação 3.1).

$$taxa = \frac{1}{\text{área média do SCM}} \cdot \frac{\text{variação da área do SCM}}{\text{intervalo de tempo}} \quad (3.1)$$

Quadro 3.3: Quadro de verificação da previsão. Fonte: A autora.

SCM	Observado = sim	Observado = não
Previsto = sim	Acertos	Alarmes falsos
Previsto = não	Falhas	Negativas corretas

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - o_i)^2 / n} , \quad (3.2)$$

onde  $F_i$  é propriedade prevista,  $O_i$  é propriedade observada e  $n$  é o número total de SCMs.

Quadro 3.4: Índices de previsão. Fonte: A autora.

Índice	Descrição	Fórmula
Acurácia	Métrica que avalia o desempenho do método de previsão	(acertos + negativas corretas) / total de previsões
BIAS	Pontuação de viés	(acertos + alarmes falsos) / (acertos + falhas)
POD	Probabilidade de detecção	acertos / (acertos + falhas)
FAR	Taxa de alarmes falsos	alarmes falsos / (acertos + alarmes falsos)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do presente trabalho que foram obtidas utilizando a metodologia apresentada no capítulo anterior.

### 4.1 FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA DOS SCMS OBSERVADOS E PREVISTOS

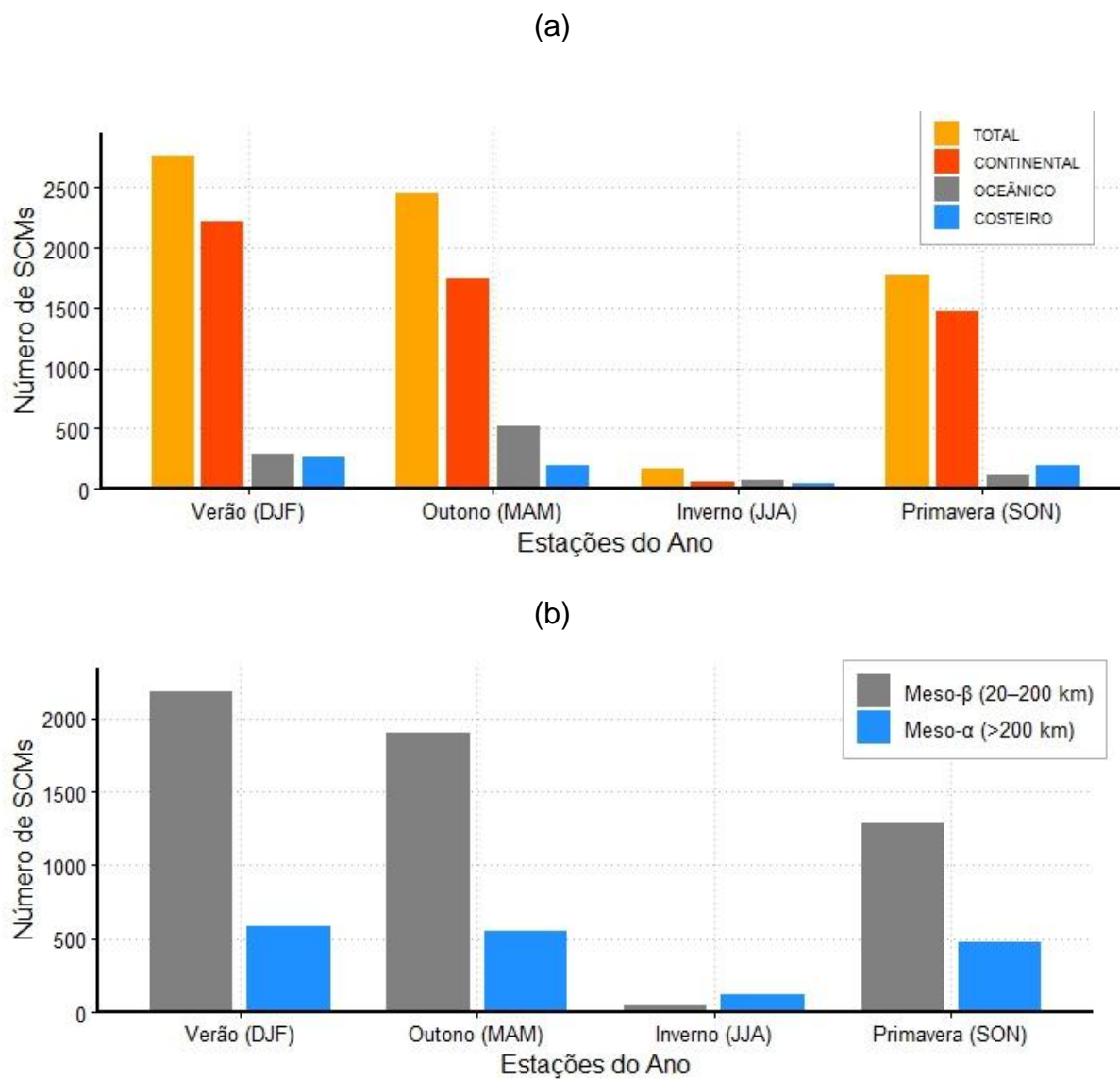
O Quadro 4.1 mostra a distribuição do número total de SCMs identificados na área do estudo. Foi identificado um total de 7139 SCMs, dos quais 5488 são continentais, 982 são oceânicos e 669 são costeiros, representando cerca de 76,8%, 13,7% e 9,3% do total, respectivamente. Os SCMs continentais, que foram maioria, foram favorecidos pelo contraste térmico entre a terra e o oceano, além da influência de montanhas e relevos. Em seguida, aparecem os SCMs oceânicos e costeiros. Quanto à escala, observa-se o predomínio dos SCMs meso- $\beta$  (75,8%), que foram mais frequentes por serem menores e se formarem com mais facilidade. Já os SCMs meso- $\alpha$ , que são maiores e organizados, ocorreram com menor frequência (24,1%). Quando se considera simultaneamente o tipo geográfico e a escala, verifica-se que os SCMs continentais meso- $\beta$  são o grupo mais frequente, com 4435 casos (62,1% do total), seguidos pelos SCMs continentais meso- $\alpha$ , com 1053 eventos (14,7%). Os SCMs oceânicos meso- $\beta$  totalizam 600 casos (8,4%) e os oceânicos meso- $\alpha$ , 382 casos (5,3%). Já os SCMs costeiros meso- $\beta$  e costeiros meso- $\alpha$  somam 382 (5,3%) e 287 (4,0%) eventos, respectivamente, mostrando que os grupos oceânicos e costeiros, em ambas as escalas, representam parcelas menores em comparação aos SCMs de origem continental.

Quadro 4.1 – Distribuição do número total de SCMs identificados na região sudeste do Brasil e região oceânica adjacente.

<b>Grupo</b>	<b>Categoria</b>	<b>Total de SCMs</b>
1	Continentais	5488 (76,8%)
2	Oceânicos	982 (13,7%)
3	Costeiros	669 (9,3%)
4	Meso- $\beta$	5417 (75,8%)
5	Meso- $\alpha$	1722 (24,1%)
6	Continentais Meso- $\beta$	4435 (62,1%)
7	Continentais Meso- $\alpha$	1053 (14,7%)
8	Oceânicos Meso- $\beta$	600 (8,4%)
9	Oceânicos Meso- $\alpha$	382 (5,3%)
10	Costeiros Meso- $\beta$	382 (5,3%)
11	Costeiros Meso- $\alpha$	287 (4,0%)

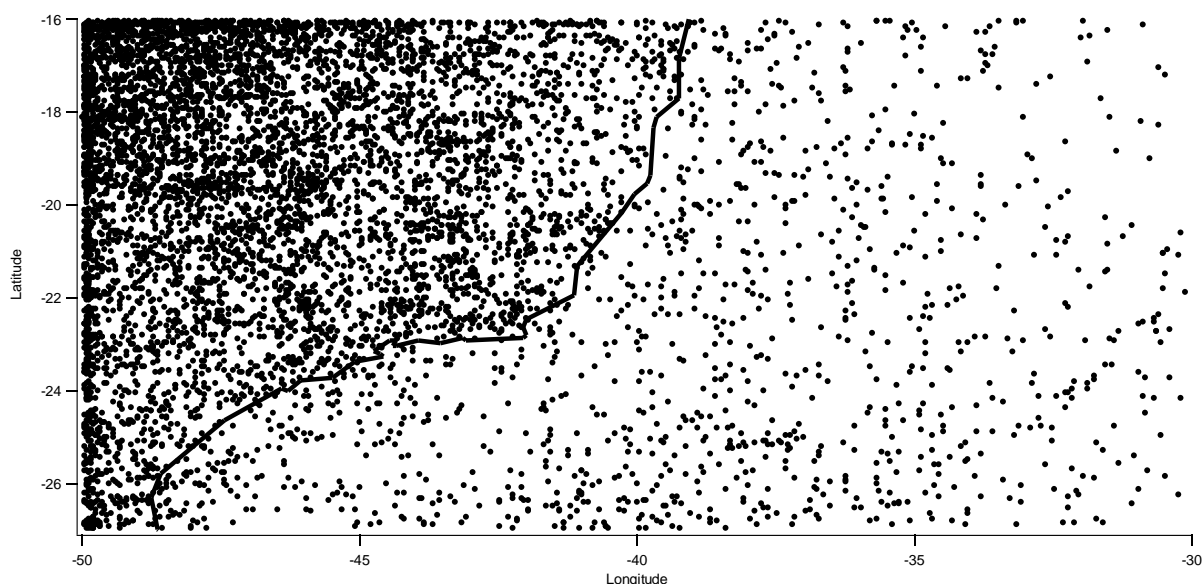
A Figura 4.1 apresenta a distribuição sazonal do número de SCMs na região Sudeste do Brasil e oceano adjacente. Observa-se um claro predomínio dos SCMs de origem continental na maior parte do ano, especialmente no verão (DJF) e no outono (MAM), que são períodos marcados por maior atividade convectiva. No verão, foram identificados 2760 SCMs, dos quais 2217 eram continentais. Embora em menor número, os SCMs costeiros foram máximos neste período, com 254 casos, já os SCMs oceânicos atingem seu máximo no outono, com 512 casos. No outono, nota-se uma redução no total de eventos, mas a quantidade de SCMs ainda é expressiva, mantendo-se a predominância dos sistemas continentais (Fig. 4.1). Durante o inverno (JJA), há uma queda acentuada na frequência de SCMs em todas as categorias, refletindo condições menos favoráveis à convecção profunda. Neste período, os SCMs costeiros foram raros, com apenas 41 ocorrências. Na primavera (SON), o número de SCMs foi inferior aos observados no verão e no outono, mas ainda com nítida predominância dos SCMs continentais em relação aos oceânicos e costeiros, que continuam a representar a menor fração dos eventos.

Analisando a distribuição sazonal dos tamanhos dos SCMs (Figura 4.1), observa-se o predomínio dos SCMs meso- $\beta$  no verão (DJF), outono (MAM) e primavera (SON), com destaque para o verão e o outono, em que os SCMs foram mais frequentes. No verão, foram registrados 2179 SCMs meso- $\beta$  e 581 meso- $\alpha$ , evidenciando que essa estação concentra tanto os SCMs menores, quanto os de maior extensão. Embora em menor número, os SCMs meso- $\alpha$  também foram numerosos no verão e no outono, mostrando que, nessas estações, as condições atmosféricas favorecem tanto a convecção localizada quanto o desenvolvimento de estruturas convectivas mais complexas neste período. Durante o inverno (JJA), observa-se uma redução expressiva na ocorrência dos dois tipos de SCMs, sendo um reflexo da menor instabilidade e da redução da atividade convectiva na região. Já na primavera (SON), há uma retomada gradual na ocorrência desses sistemas, ainda com predominância dos SCMs meso- $\beta$ , o que reforça sua tendência de formação mais frequente e fácil.



**Figura 4.1:** Distribuições sazonal do número de SCMs em função das: (a) suas regiões de ocorrência e (b) seus tamanhos. Fonte: A autora.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição espacial dos 7139 SCMs observados e previstos sobre o Sudeste do Brasil e oceânico Atlântico adjacente. Pode-se notar que embora a área continental seja menor que a oceânica, há um maior número de SCMs continentais devido ao aquecimento solar mais rápido na região continental durante o dia, o que aumenta a instabilidade atmosférica e favorece a formação de nuvens convectivas. Além disso, fatores como variações de relevo, vegetação e umidade do solo também estabelecem condições propícias para o surgimento de SCMs (diferentemente do oceano, onde o ambiente é mais estável e a superfície se aquece mais lentamente). Este aspecto também foi destacado em Siqueira e Marques (2021).



**Figura 4.2:** Distribuição espacial dos 7139 SCMs identificados sobre o Sudeste do Brasil e oceânico Atlântico adjacente na sua fase inicial, e que também foram previstos no estudo.

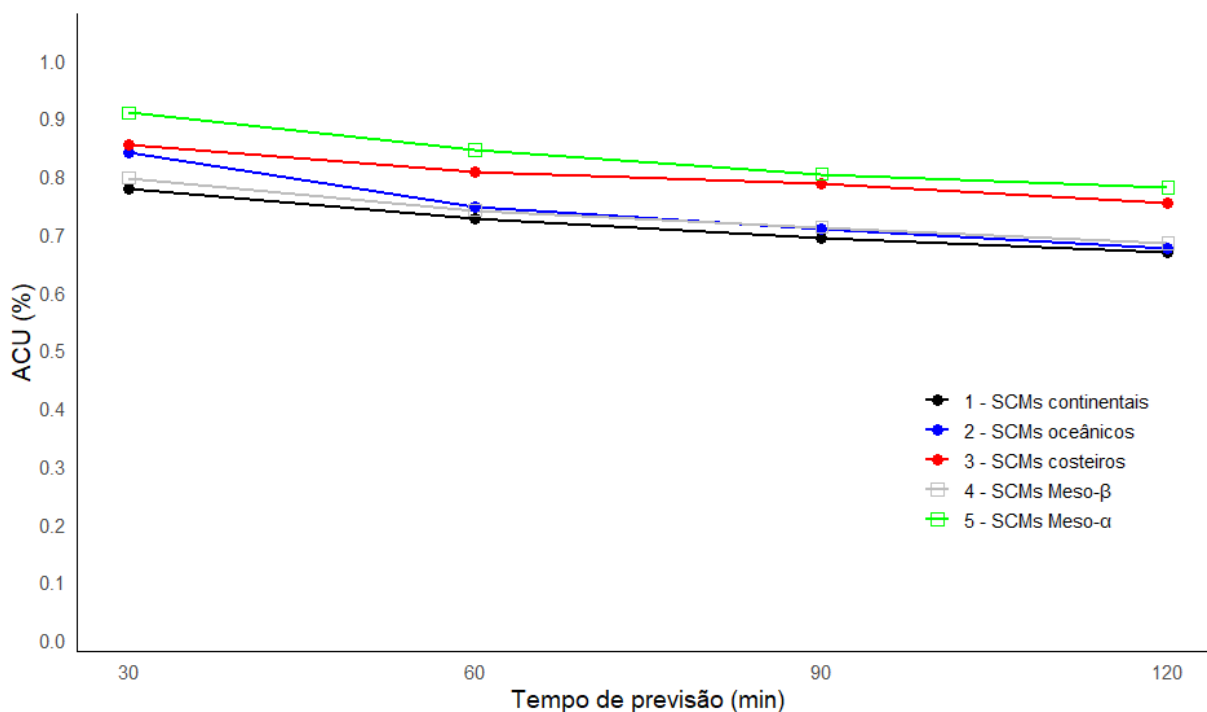
## 4.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DAS PREVISÕES DOS SCMS UTILIZANDO ÍNDICES DE PREVISÃO

A Figura 4.3 apresenta a variação do índice ACU ao longo do tempo de previsão para os cinco primeiros grupos de SCMs estudados. Para os SCMs continentais, nota-se que o ACU mantém-se acima de 0,74 até os 90 minutos, indicando um bom desempenho da previsão com respeito a este índice até este tempo de previsão. No entanto, aos 120 minutos, observa-se uma redução de 13,25%, o que caracteriza uma variação significativa a partir deste tempo, e conseqüentemente uma perda de qualidade da previsão (Figura 4.3). Para os SCMs oceânicos, a ACU permaneceu estável (0,78 até os 60 minutos), mostrando um bom desempenho na previsão. A partir dos 90 minutos, observa-se uma queda de 18,73% no ACU, indicando uma perda de qualidade da previsão ainda maior que a anterior. Para os SCMs costeiros, a ACU manteve-se elevada, acima de 0,81 até os 90 minutos, com variações inferiores a 5%. Nota-se também que houve queda significativa e piora da qualidade das previsões aos 120 minutos, com desvio percentual de 11,36%.

Comparando o índice ACU dos SCMs continentais, oceânicos e costeiros (Figura. 4.3), nota-se que todos os ACUs decaíram significativamente a partir dos 90 ou 120 minutos de previsão. Os SCMs costeiros apresentaram ACUs maiores e com menor decaimento que os SCMs continentais e oceânicos (desvio de 11,36%), indicando um melhor desempenho das previsões para estes sistemas. Por sua vez, os SCMs continentais e oceânicos tiveram desempenho semelhante das previsões para 60 minutos em diante. Contudo, os SCMs oceânicos tiveram desempenho melhor para 30 minutos (18,73%)

Analisando o índice ACU dos SCMs meso- $\beta$  e meso- $\alpha$ , nota-se para os SCMs meso- $\beta$  uma queda de 0,81 (para 30 minutos) para 0,73 (para 90 min), representando uma queda significativa de 10,98% a partir dos 90 minutos. Já para os SCMs meso- $\alpha$  (G5), nota-se uma queda significativa de 0,91 (para 30 minutos) para 0,81 (para 90 minutos), resultando em um desvio percentual de 11,96%. Embora o índice ACU para ambos os grupos tenha tido decaimento semelhante, os SCMs meso- $\alpha$  tiveram ACUs bem superiores às dos SCMs meso- $\beta$  para todos os tempos de previsão (12,86%), resultando em um melhor desempenho das previsões

para os sistemas maiores. Isto pode estar associado à estrutura mais estável dos SCMs de escalas maiores, que proporciona um melhor desempenho das previsões para tempos mais longos.

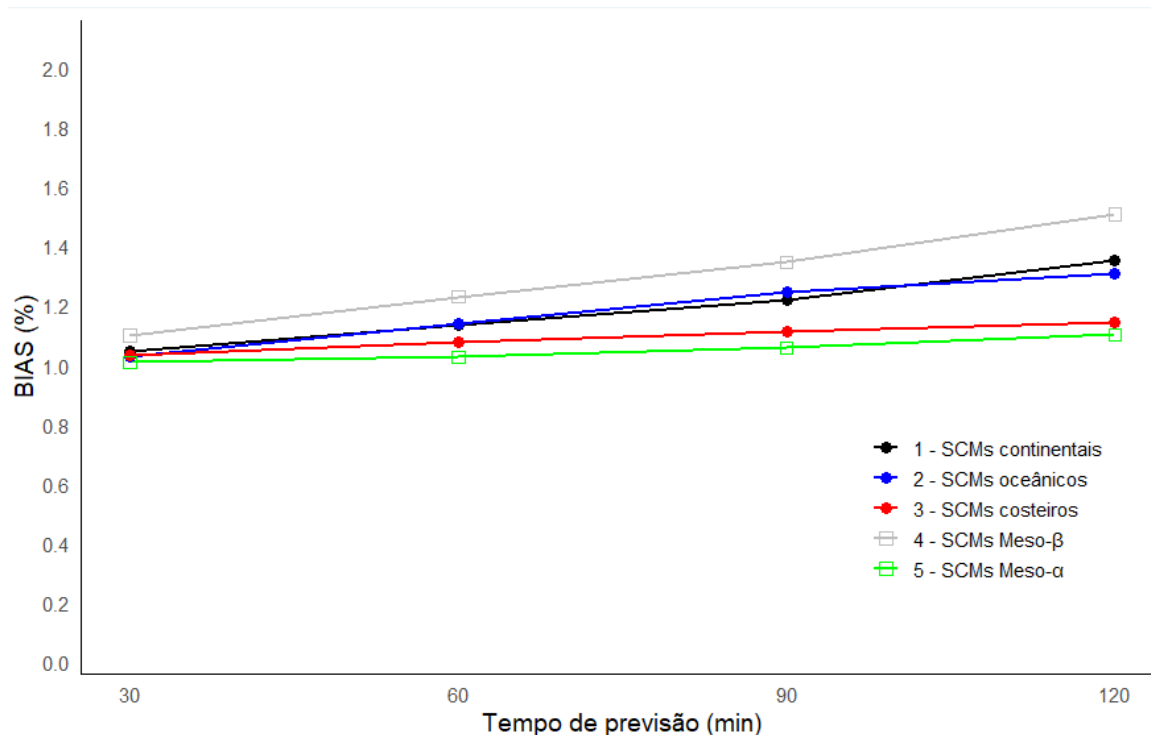


**Figura 4.3:** Variação do índice ACU dos SCMs ao longo dos tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Fonte: A autora.

A Figura 4.4 apresenta a evolução do índice BIAS ao longo do tempo de previsão para os cinco primeiros grupos de SCMs. Para os SCMs continentais, observa-se que o índice se mantém relativamente estável até os 90 minutos, com valores próximos de 1,10, indicando uma leve superestimação dos SCMs. A partir dos 90 minutos, verifica-se aumento mais expressivo do índice, alcançando 1,40 aos 120 minutos, com desvio percentual de 27,91%, caracterizando superestimação significativa nas previsões mais longas (Figura 4.4). O BIAS para os SCMs oceânicos apresentou comportamento semelhante. O índice manteve-se estável até os 90 minutos, variando em torno de 1,28. No entanto, a partir dos 120 minutos, observa-se aumento para 1,35, indicando superestimação acentuada, com desvio percentual de 25,95%. A tendência de superestimação pode estar associada à menor interferência de fatores locais no oceano. Já o BIAS para os SCMs costeiros apresentou valores mais próximos de 1 em todos os tempos, com variações mais

suaves. Até os 90 minutos, o índice varia em torno de 1,06 a 1,14, sinalizando previsões mais precisas. No entanto, aos 120 minutos, nota-se um leve aumento para 1,17, representando uma variação de 10,38%. Apesar da presença de superestimação, esta ocorre de forma mais moderada em comparação aos demais grupos.

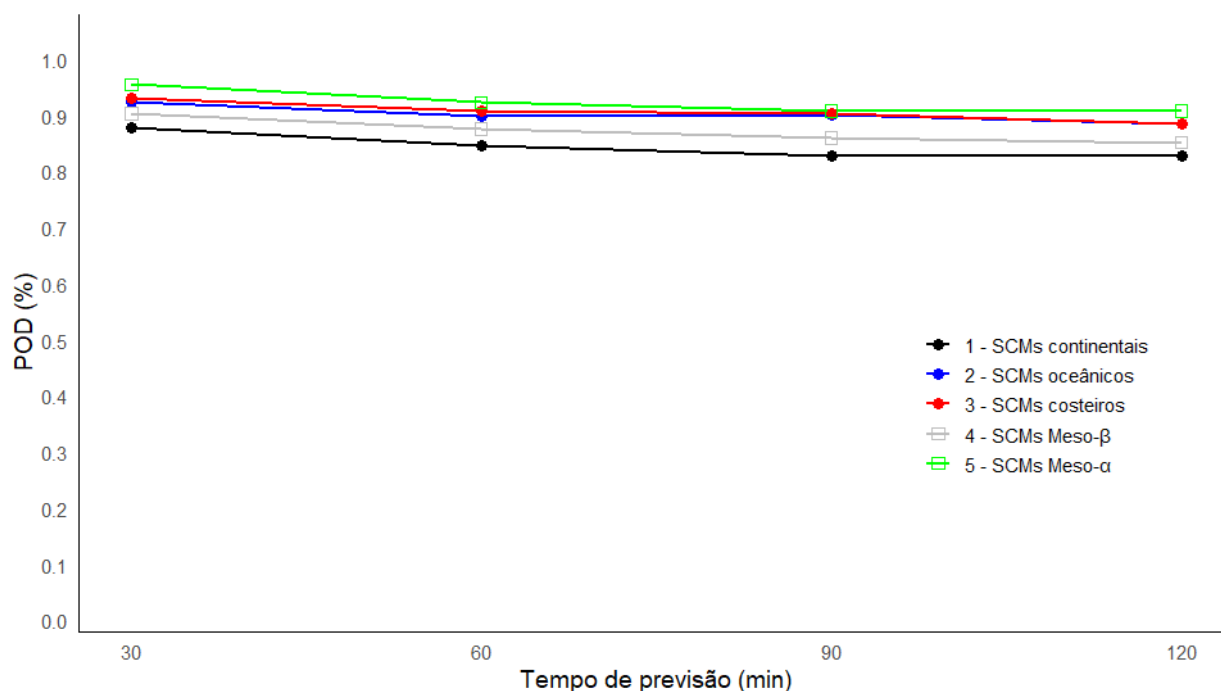
Comparando os índices entre os três tipos de SCMs, nota-se que os sistemas costeiros são os mais bem previstos com respeito ao BIAS, mantendo-se próximos de 1 durante quase toda a previsão. Já os SCMs continentais e oceânicos apresentam tendência crescente de superestimação ao longo do tempo, com variações mais significativas a partir dos 90 minutos. A diferença mais acentuada entre os grupos ocorre aos 120 minutos, quando os SCMs costeiros mantêm valores mais estáveis, enquanto os continentais e oceânicos superestimam de forma mais intensa.



**Figura 4.4:** Variação do índice de BIAS dos SCMs ao longo dos tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Fonte: A autora.

A Figura 4.5 apresenta a evolução do índice de previsão POD ao longo do tempo, que permite avaliar a capacidade do método em identificar corretamente os SCMs dos diferentes grupos analisados. De modo geral, constata-se que os valores de POD permanecem elevados em todos os grupos, com destaque para os sistemas de maior escala e para aqueles localizados em ambientes oceânicos e costeiros. Apesar da tendência de ligeira redução observada com o aumento do tempo de previsão, as variações se mantêm, em sua maioria, dentro da margem considerada estável (inferiores a 5%). Para os SCMs continentais, os valores de POD são os menores entre os grupos geográficos e apresentam uma queda percentual de 5,37% entre 30 e 120 minutos, ligeiramente acima do limite adotado como estável, indicando redução mais marcada da capacidade de detecção ao longo do tempo. Nos SCMs oceânicos, o POD permanece mais estável, com variação de 3,96% entre 30 e 120 minutos. Os SCMs costeiros também apresentam valores elevados de POD, com queda de 4,86% no mesmo intervalo, o que mantém esses dois grupos dentro da faixa de variação considerada estável (Fig. 4.5).

Em relação à escala horizontal, os SCMs meso- $\alpha$  apresentam os maiores valores de POD durante todo o período analisado, com queda percentual de 4,85% entre 30 e 120 minutos, permanecendo dentro da margem de estabilidade adotada. Por outro lado, os SCMs meso- $\beta$  exibem os menores valores de POD entre os grupos de escala e a maior queda percentual (5,63%), indicando maior sensibilidade do índice ao aumento do tempo de previsão para esses sistemas. Em síntese, o índice POD confirma que o método apresenta boa capacidade de detecção dos SCMs, especialmente para os sistemas de maior escala (meso- $\alpha$ ) e para aqueles situados sobre ambientes oceânicos e costeiros. O desempenho é ligeiramente inferior para os SCMs de menor escala (meso- $\beta$ ) e para os localizados em áreas continentais, para os quais as reduções de POD entre 30 e 120 minutos ultrapassam o limiar de 5% adotado como indicativo de queda significativa.



**Figura 4.5:** Índice de probabilidade de detecção (POD) dos SCMs em função do tempo de previsão.

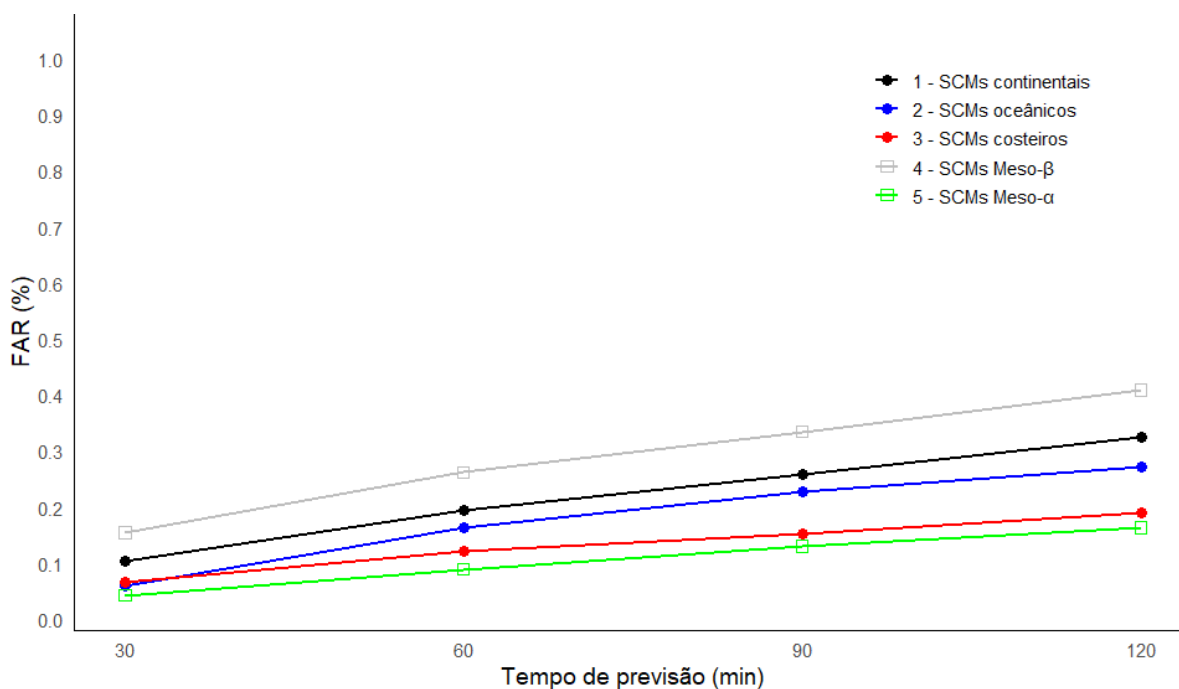
Fonte: A autora.

A Figura 4.6 apresenta a variação do índice FAR ao longo do tempo de previsão para os cinco primeiros grupos de SCMs estudados. Para os SCMs continentais, observa-se que o índice FAR se mantém relativamente baixo até os 60 minutos, com valores inferiores a 0,25. A partir desse tempo, nota-se um aumento mais expressivo, atingindo 0,37 aos 120 minutos, o que representa uma variação percentual de 38,12%, caracterizando um crescimento significativo da taxa de falsos alarmes em horizontes mais longos. Os SCMs oceânicos (G2), por sua vez, iniciam com valores baixos (0,09 aos 30 minutos), mas apresentam o maior desvio percentual entre os grupos geográficos: 66,99%, atingindo 0,31 aos 120 minutos. Essa elevação acentuada evidencia uma perda de qualidade mais precoce e intensa da previsão com respeito à emissão de alertas falsos para esse tipo de sistema.

Já os SCMs costeiros apresentam os melhores resultados, com valores absolutos de FAR mais baixos e menor oscilação ao longo do tempo. O índice varia de 0,09 (30 minutos) para 0,22 (120 minutos), com a menor variação percentual entre os grupos (24,06%), o que indica maior estabilidade e menor propensão a falsos alarmes. Os SCMs meso-β apresentam os maiores valores de FAR desde o início

da previsão (0,17 aos 30 minutos, alcançando 0,43 aos 120 minutos), o que corresponde a um aumento de 23,13%. Apesar de os valores absolutos serem altos, a variação percentual é inferior a 25%, indicando uma elevação contínua, mas relativamente estável. Isto sugere que, embora os sistemas de menor escala apresentem maiores taxas de falsos alarmes, a variação do índice é previsível. Em contraste, os SCMs meso- $\alpha$  proporcionaram os menores valores de FAR para todos os tempos de previsão, (iniciando com 0,05 aos 30 minutos e atingindo 0,17 aos 120 minutos), com desvio percentual de 34,15%. Apesar do aumento percentual ser expressivo, os baixos valores indicam um melhor desempenho do método na redução de falsos alarmes para os sistemas de maior escala.

De modo geral, o índice FAR mostrou que os SCMs costeiros e os SCMs meso- $\alpha$  apresentaram o melhor desempenho das previsões com relação à estabilidade e a baixa emissão de falsos alarmes. Em contrapartida, os SCMs continentais e os SCMs meso- $\beta$  concentram as maiores taxas de falsos alarmes em todos os tempos de previsão, indicando maior dificuldade do método em evitar alertas falsos para esses sistemas.



**Figura 4.6:** Taxa de alarmes falsos (FAR) dos SCMs em função do tempo de previsão. Fonte: A autora.

De forma geral, os índices de previsão obtidos neste trabalho apresentam comportamento semelhante ao descrito por Siqueira e Marques (2021), com ACU e POD mais altos para 30 minutos e valores menores nos tempos de previsão seguintes, enquanto BIAS e FAR aumentam com o tempo. Ao separar os SCMs por tipo de ambiente (continentais, oceânicos e costeiros) e por escala horizontal (meso- $\beta$  e meso- $\alpha$ ), verificou-se que os SCMs meso- $\alpha$  e costeiros tendem a apresentar ACU e POD mais elevados e FAR mais baixos, indicando desempenho relativamente melhor do método para esses grupos. Por outro lado, os SCMs continentais e meso- $\beta$  concentram os maiores valores de BIAS e FAR, sugerindo maior ocorrência de superestimação e de falsos alarmes nesses casos. Em ambos os estudos, observa-se que as previsões se tornam menos confiáveis nos tempos de 90 e, principalmente, 120 minutos, o que indica limitação do método para tempos de previsão mais longos. Esse comportamento está associado ao fato de que o método utilizado baseia-se na extrapolação das condições atuais dos sistemas, de modo que, com o aumento do tempo de previsão, os SCMs se afastam progressivamente de suas condições reais de evolução. Além disso, processos internos como crescimento, dissipação, fusão e divisão dos sistemas, bem como a influência de fatores ambientais, tornam-se mais relevantes em horizontes maiores, aumentando a dispersão dos erros e aumentando a diferença entre os valores previstos e observados.

### 4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DAS PREVISÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SCMS

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam as distribuições de frequência cumulativa dos SCMs continentais em função das diferenças entre as suas propriedades previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs. Para as latitudes dos SCMs, observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 4% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1,2^\circ$  a  $0^\circ$ ) entre, 68% apresentaram diferenças nulas, e 28% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $0,6^\circ$ ). Isto indica que a maioria dos SCMs foi bem prevista quanto a sua posição meridional. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo (acima de 10%) na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais ao norte. Este resultado mostra que a previsão da latitude dos SCMs a partir dos 90 minutos aumenta a perda de qualidade. O RMSE correspondente foi de aproximadamente  $0,27^\circ$  (aproximadamente 27 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,43^\circ$ , mostrando que os sistemas foram previstos mais distantes das suas posições reais.

Para as longitudes dos SCMs (Fig. 4.7), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que aproximadamente 4% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1,2^\circ$  e  $0^\circ$ ), 60% apresentaram diferenças nulas, e 36% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $1,2^\circ$ ), indicando que esses SCMs foram previstos mais ao leste. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas. Este resultado mostra que a previsão da longitude dos SCMs começa a perder qualidade a partir dos 90 minutos de previsão. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,35^\circ$  (aproximadamente 35 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,55^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos ainda mais afastados das suas posições reais.

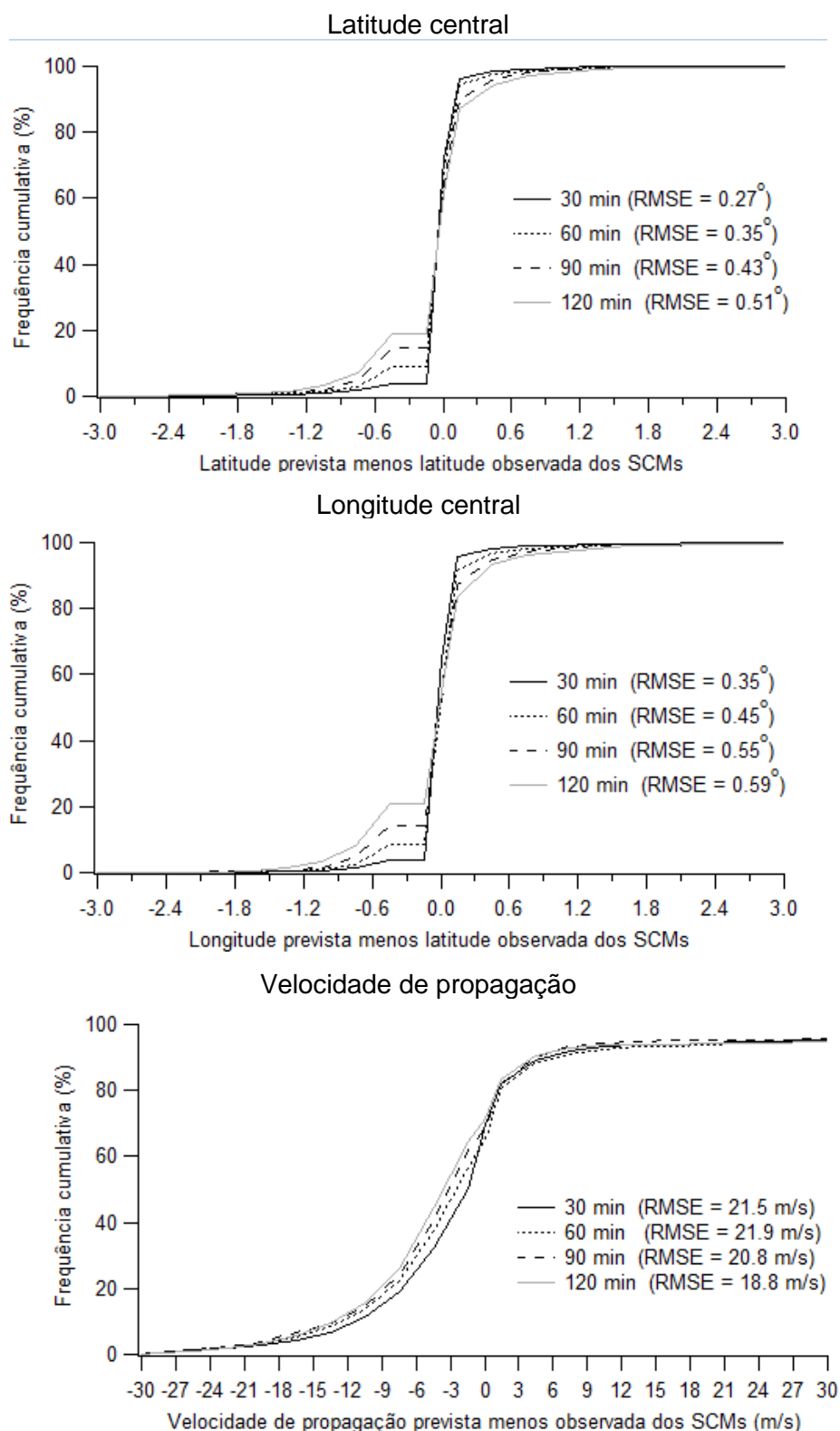


Figura 4.7 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs continentais sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades cinemáticas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

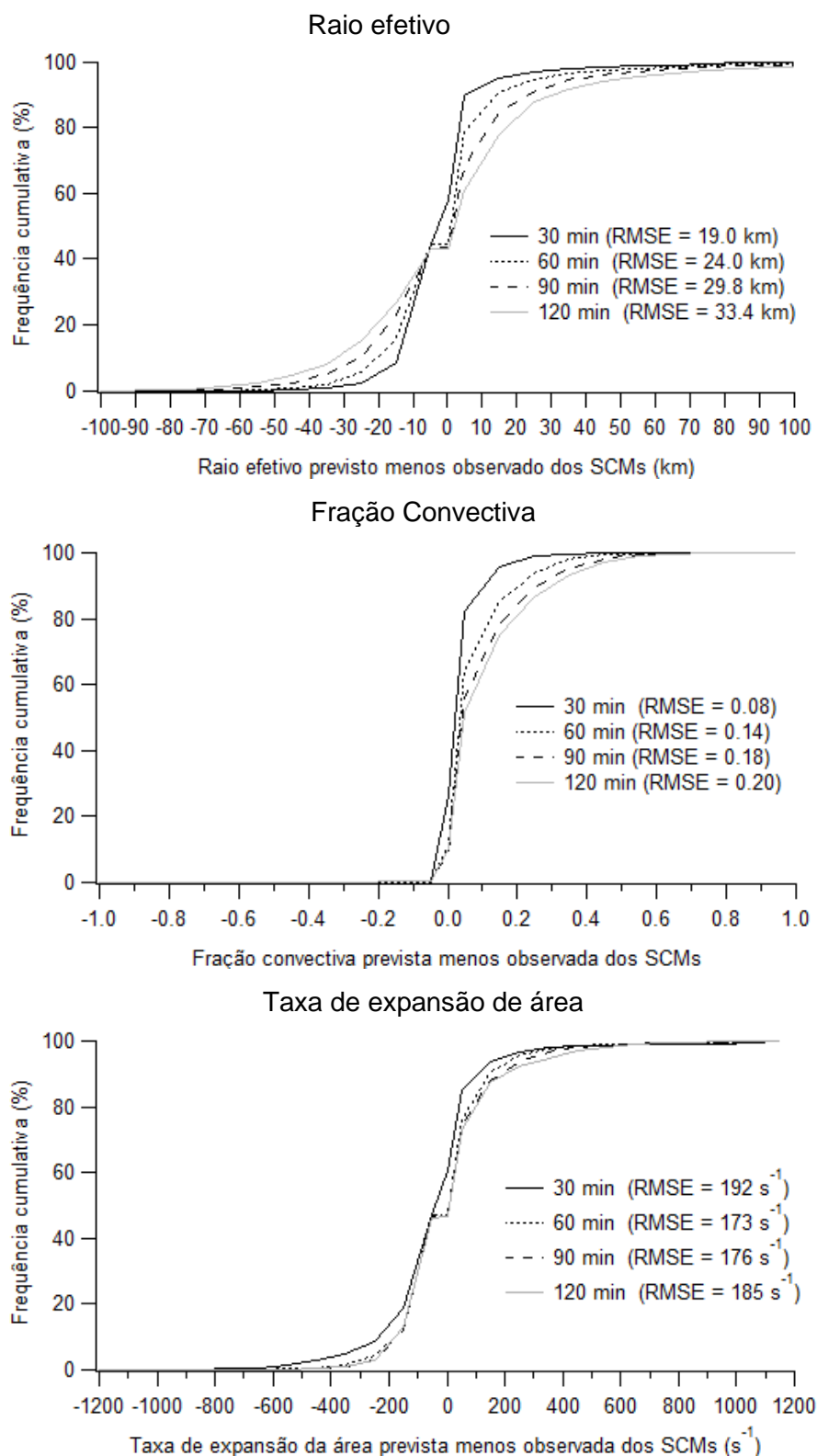


Figura 4.8 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs continentais sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades morfológicas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

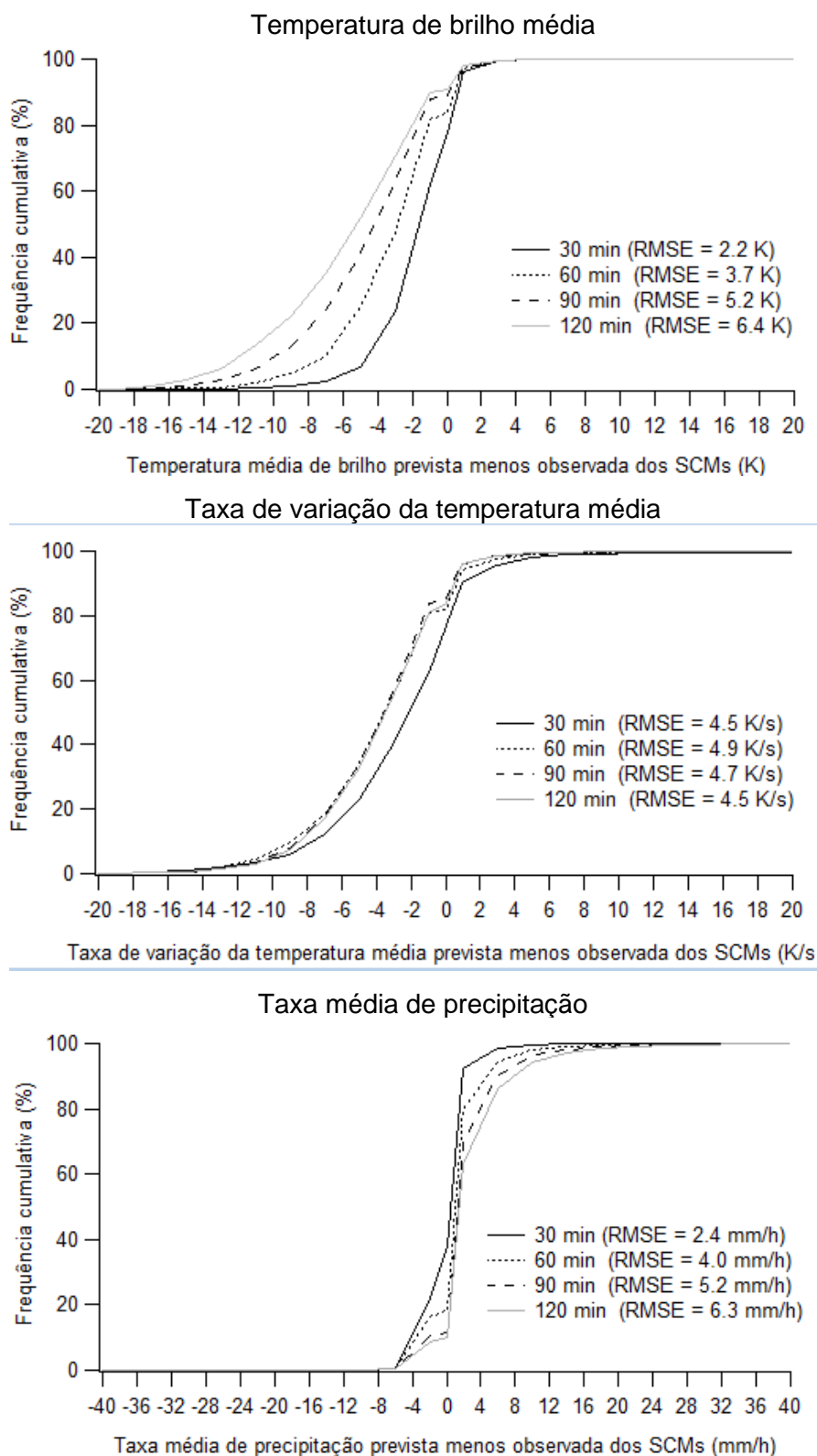


Figura 4.9 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs continentais sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades radiativas e de precipitação previstas e observadas a partir da maturação dos SCMs, para tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

Para a velocidade de propagação dos SCMs (Fig. 4.7), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 50% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-30 a 0 km/h), 20% apresentaram diferenças nulas, e 30% apresentaram diferenças positivas (0 a 30 km/h). As diferenças negativas observadas indicam que os SCMs foram previstos com velocidades mais lentas do que o observado, havendo uma subestimação das velocidades. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais lentos.

Analisando os raios efetivos dos SCM (Fig. 4.8), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 44% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-50 a 0 km), 14% apresentaram diferenças nulas, e 42% apresentaram diferenças positivas (0 a 75 km), indicando que a maioria dos SCMs foram previstos com tamanhos diferentes, sem tendência de superestimar ou subestimar (<10% de diferença). O RMSE correspondente é de aproximadamente 19 km para 30 minutos. A partir de 90 minutos, há um aumento significativo de aproximadamente 30 km, indicando um aumento progressivo do erro de acordo com o tempo de previsão.

Para as frações convectivas dos SCMs (Fig. 4.8), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de apenas 0,3% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-0,2 a 0), 26% apresentaram diferenças nulas e 74% apresentaram diferenças positivas (0 a 0,7), indicando que a maioria dos SCMs foram previstos com áreas maiores, superestimando as suas áreas convectivas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 0,08° para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,18, confirmando uma superestimativa da área dos SCMs.

Para as taxas de expansão de área (Fig. 4.8), verificam-se para os 30 minutos de previsão, diferenças negativas para 47% dos SCMs (-600 a 0 s<sup>-1</sup>), 13% nulas e 40% positivas (0 a 750 s<sup>-1</sup>), indicando que não houve tendência de subestimação ou superestimação. O RMSE correspondente é de aproximadamente 192 s<sup>-1</sup> para 30 minutos, reduzindo ligeiramente para 173 s<sup>-1</sup> em 60 minutos. Para previsões a partir

dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $185 \text{ s}^{-1}$ , indicando um aumento do erro de acordo com o tempo de previsão.

Analisando as temperaturas de brilho médias dos SCMs (Fig. 4.9), observam-se diferenças negativas para 62% dos SCMs (-12 a 0 K), 16% nulas e 22% positivas (0 a 7 K), indicando que a maioria dos SCMs foi prevista com topos de nuvens mais altos e com atividade convectiva mais intensa, resultando em uma superestimação na intensidade destes sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 2,2 K, mostrando uma tendência das previsões subestimarem as temperaturas médias do topo das nuvens do SCMs. Para previsões de 60, 90 e 120 minutos, esta tendência se manteve e a diferença entre o tempo das previsões aumentou consideravelmente a partir de 90 minutos, resultando em um RMSE de 5,2 K.

Analisando as taxas de variação da temperatura média dos SCMs (Fig 4.9), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 62% dos SCMs apresentaram diferenças negativas (-18 a 0 K/s), 14% nulas e 24% positivas (0 a 9 K/s), indicando que o crescimento da maioria dos SCMs foi previsto de forma mais rápida com relação a intensificação convectiva. O RMSE correspondente atingiu 4,5 K/s, não havendo uma variação significativa para os tempos de previsão posteriores.

Para as taxas médias de precipitação (Fig. 4.9), nota-se que 22% dos SCMs exibiram diferenças negativas (-6 a 0 mm/h), 16% nulas e 62% positivas (0 a 10 mm/h), indicando que maioria dos SCMs foram previstos com maior taxa de chuva, havendo uma superestimação de precipitação. Este resultado é consistente com as temperaturas mais frias previstas pelo método. O RMSE correspondente foi de 2,4mm/h para 30 minutos. A partir de 90 há um aumento significativo, resultando em um RMSE de 5,2 mm/h.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as distribuições de frequência cumulativa dos SCMs oceânicos em função das diferenças entre as suas propriedades previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs. Para as latitudes dos SCMs, observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 4% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1,2^\circ$  e  $0^\circ$ ), 62% apresentaram diferenças nulas, e 34% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  e  $0,7^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs foi bem prevista quanto a sua posição meridional. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais ao norte. Este resultado mostra que a previsão da latitude dos SCMs a partir dos 90 minutos começa a perder qualidade. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,27^\circ$  (aproximadamente 27 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,43^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais distantes de sua posição real.

Para as longitudes dos SCMs (Fig. 4.10), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 7% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-2,4^\circ$  a  $0^\circ$ ), 63% apresentaram diferenças nulas, e 30% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $1,6^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs foi bem prevista, e também mais a leste. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas. Este resultado mostra que a previsão da longitude dos SCMs começa a perder qualidade a partir dos 90 minutos de previsão. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,49^\circ$  (aproximadamente 49 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,66^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais afastados de sua posição real.

Para a velocidade de propagação dos SCMs (Fig. 4.10), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 48% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-30 a 0 km/h), 19% apresentaram diferenças nulas, e 33% apresentaram diferenças positivas (0 a 30 km/h), indicando que maioria dos SCMs foram previstas mais lentas, havendo uma subestimação das suas velocidades.

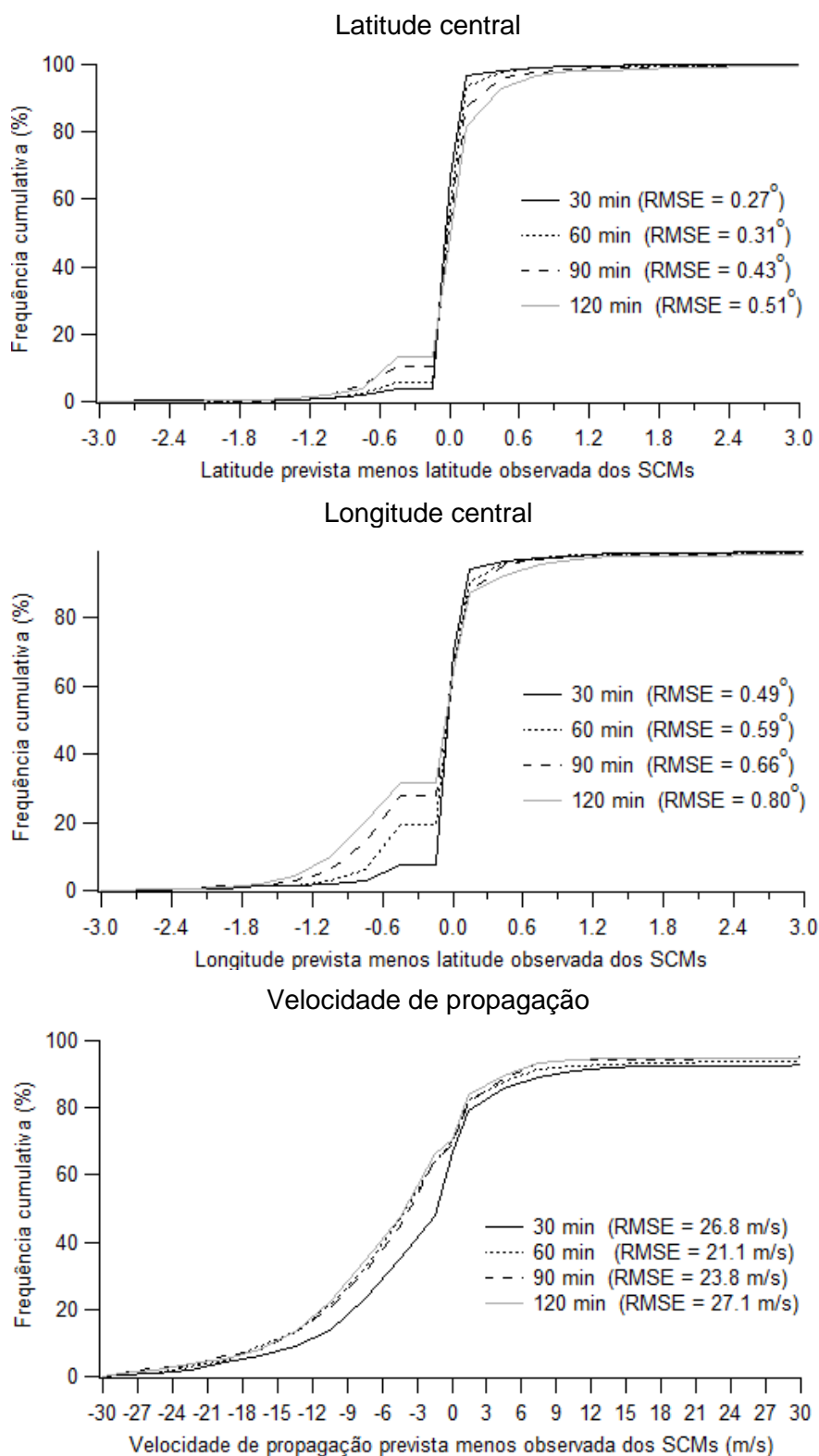


Figura 4.10 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs oceânicos sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades cinemáticas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

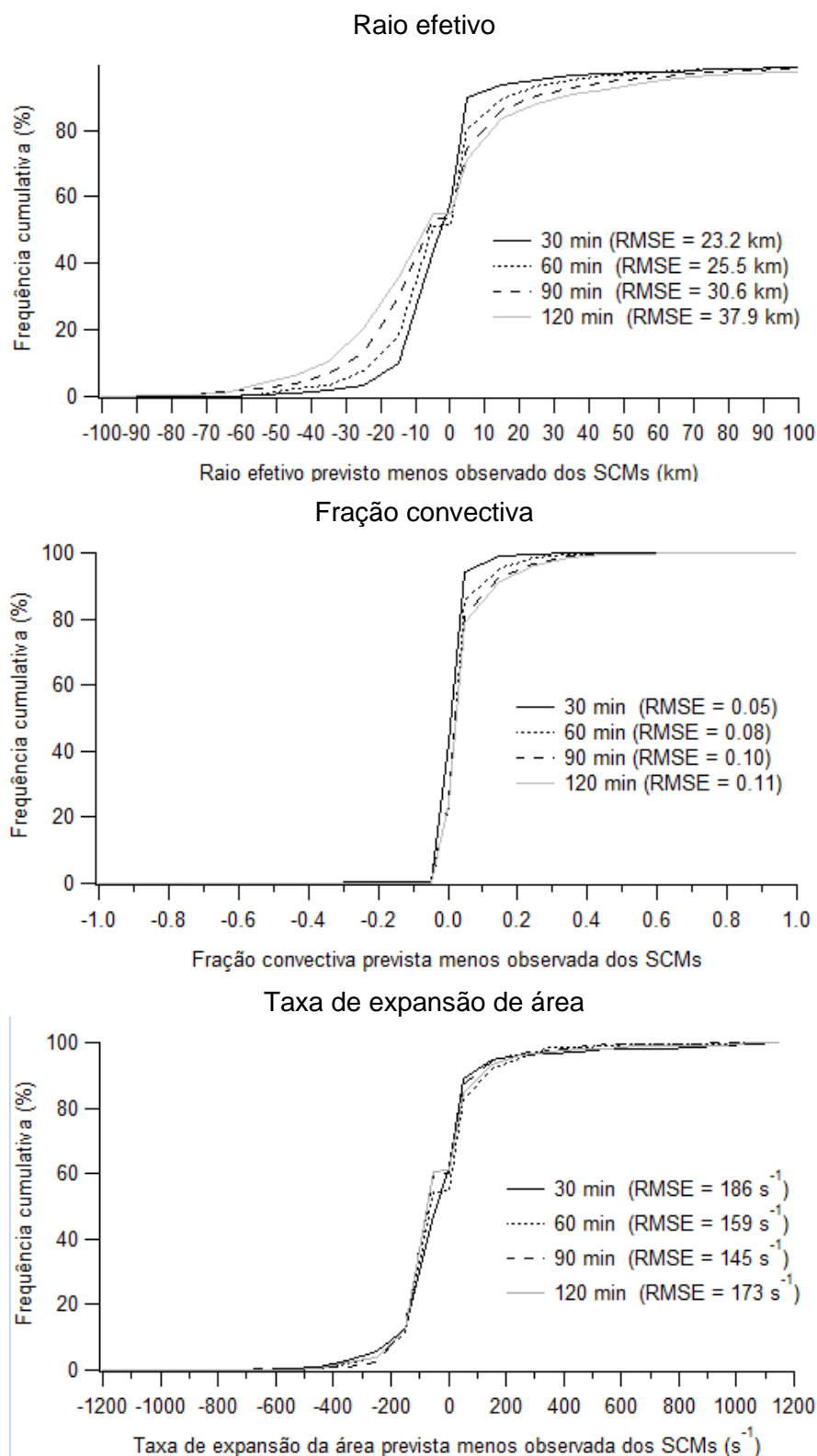


Figura 4.11 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs oceânicos sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades morfológicas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

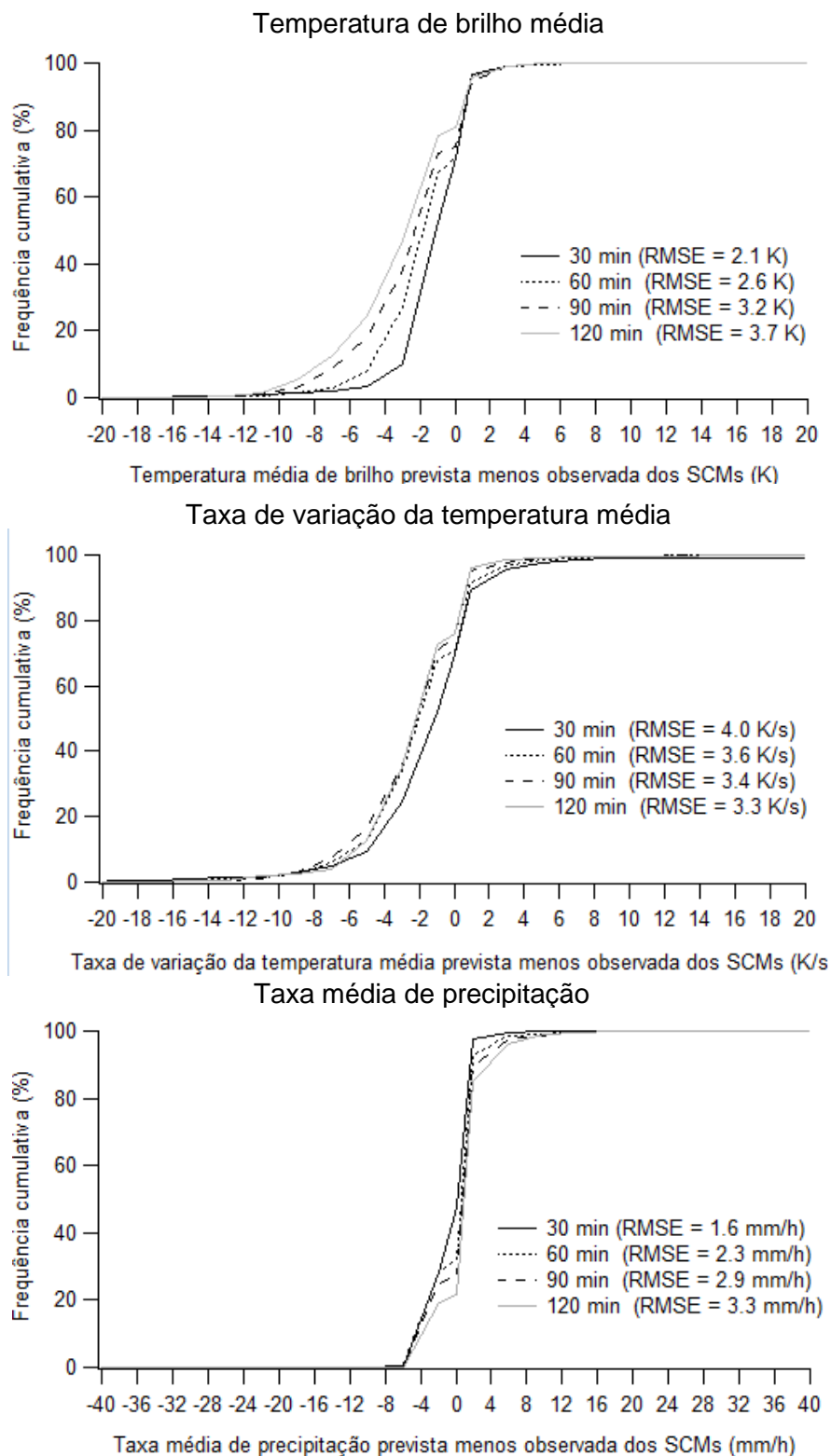


Figura 4.12 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs oceânicos sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades radiativas e de precipitação previstas e observadas a partir da maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

Para o raio efetivo dos SCMs (Fig. 4.11), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 44% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-60 a 0 km), 15% apresentaram diferenças nulas, e 41% apresentaram diferenças positivas (0 a 70 km), indicando que não houve tendência. O RMSE correspondente foi de aproximadamente 23,2 km, para previsão de 30 minutos. A partir de 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 30,6 km, indicando um aumento significativo do erro de acordo com o tempo de previsão.

Analisando as frações convectivas dos SCMs (Fig. 4.11) nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 0,4% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-0,1 a 0 km), 42% nulas e 58% positivas (0 a 0,5), indicando que maioria dos SCMs foram previstos com áreas convectivas maiores, superestimando a intensidade da convecção. O RMSE correspondente é de aproximadamente 0,05 para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,10. Esta elevação constante do erro sugere que as previsões tendem a representar regiões convectivas mais extensas do que as observadas.

Para as taxas de expansão de áreas dos SCMs (Fig. 4.11) observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 47% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-600 a 0 s<sup>-1</sup>), 15% nulas e 38% positivas (0 a 650 s<sup>-1</sup>), indicando que maioria dos SCMs foram previstos com expansão mais lenta do que o observado. O RMSE correspondente é de aproximadamente 186 s<sup>-1</sup> para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se uma redução do erro para cerca de 145 s<sup>-1</sup>, voltando a aumentar para cerca de 173 s<sup>-1</sup> aos 120 minutos, sugerindo que, embora haja melhora até 90 minutos, há perda de precisão nas previsões mais longas.

Para as temperaturas média de brilho (Fig. 4.12), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 52% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-16 a 0 K), 19% nulas e 29% positivas (0 a 5 K), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com topos mais frios, correspondendo a sistemas mais intensos. O RMSE correspondente é de aproximadamente 2,1 K para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos (3,2 K), observa-se um aumento do erro, alcançando cerca de 3,7 K aos 120 minutos. Este aumento significativo revela uma tendência de

superestimar a intensidade de convecção, sugerindo que os sistemas foram previstos com topos de nuvens mais altos e frios.

Analisando a taxa de variação da temperatura média (Fig. 4.12), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 52% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-16 a 0 K/s), 17% nulas e 31% positivas (0 a 7 K/s), indicando que maioria dos SCMs foi superestimada em relação à intensificação convectiva. O RMSE correspondente é de aproximadamente 4,0 K/s para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se uma redução do erro, alcançando cerca de 3,3 K/s aos 120 minutos. Essa redução sugere que os sistemas foram previstos com intensidade convectiva ligeiramente mais rápida, mas com pequena perda de precisão ao longo do tempo de previsão.

Para a taxa média de precipitação (Fig. 4.12), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 28% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-6 a 0 mm/h), 19% nulas e 53% positivas (0 a 6 mm/h), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com maior taxa de chuva, havendo superestimação das taxas de precipitação. O RMSE correspondente é de aproximadamente 1,6 mm/h para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 2,9 mm/h, alcançando aproximadamente 3,3 mm/h aos 120 minutos. Esse aumento gradual mostra que o método tende a superestimar a intensidade da precipitação, sugerindo que os sistemas foram previstos mais intensos, indicando perda de precisão na representação das taxas de precipitação a partir de 90 minutos de previsão.

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam as distribuições de frequência cumulativa dos SCMs costeiros em função das diferenças entre as suas propriedades previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs. Para as latitudes dos SCMs, observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 5% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1.2^\circ$  a  $0$ ), 63% apresentaram diferenças nulas, e 32% apresentaram diferenças positivas ( $0$  a  $1.6^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs indicando boa correspondência entre previsões e observações, com leve predominância de sistemas previstos mais ao norte. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo (acima de 10%) na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais ao norte. Este resultado mostra que a previsão da latitude dos SCMs a partir dos 90 minutos há um aumento da perda de qualidade. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,51^\circ$  (aproximadamente 57 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,53^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais afastados de sua posição real, indicando uma perda gradual de precisão espacial.

Para as longitudes dos SCMs (Fig. 4.13), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 8% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1,8^\circ$  a  $0^\circ$ ), 60% apresentaram diferenças nulas, e 32% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $2^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs foi prevista mais ao leste. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças negativas. Este resultado mostra que a previsão da longitude dos SCMs perde a qualidade a partir dos 90 minutos de previsão. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,68^\circ$  (aproximadamente 68 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se uma redução do erro para cerca de  $0,64^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais próximos de sua posição real.

Para a velocidade de propagação dos SCMs (Fig. 4.13), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 51% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-28$  a  $0$  km/h), 17% apresentaram diferenças nulas, e 32% apresentaram diferenças positivas ( $0$  a  $40$  km/h), indicando que maioria dos SCMs foram previstas mais lentas, havendo uma subestimação em sua velocidade.

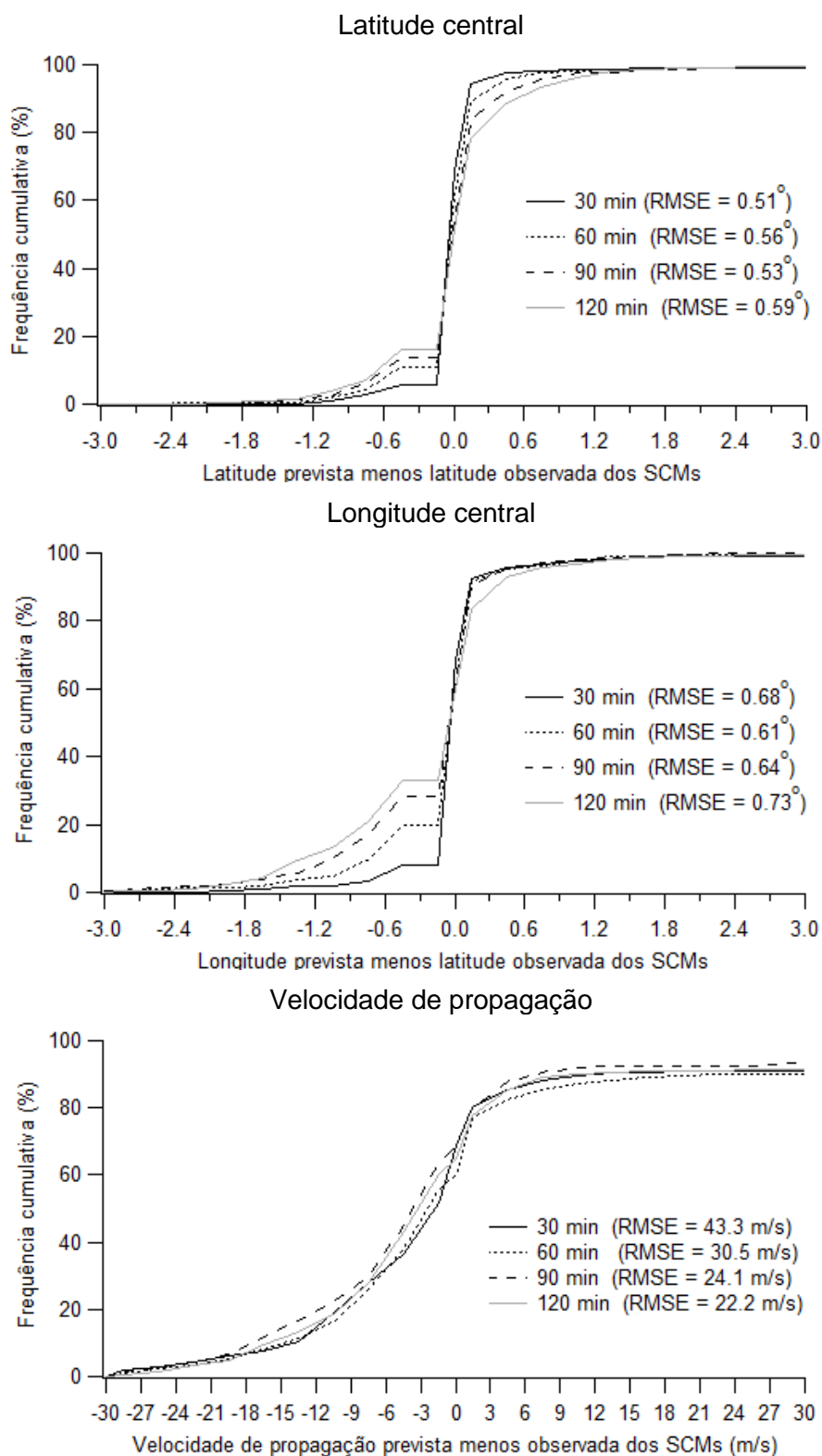


Figura 4.13 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs costeiros sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades cinemáticas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

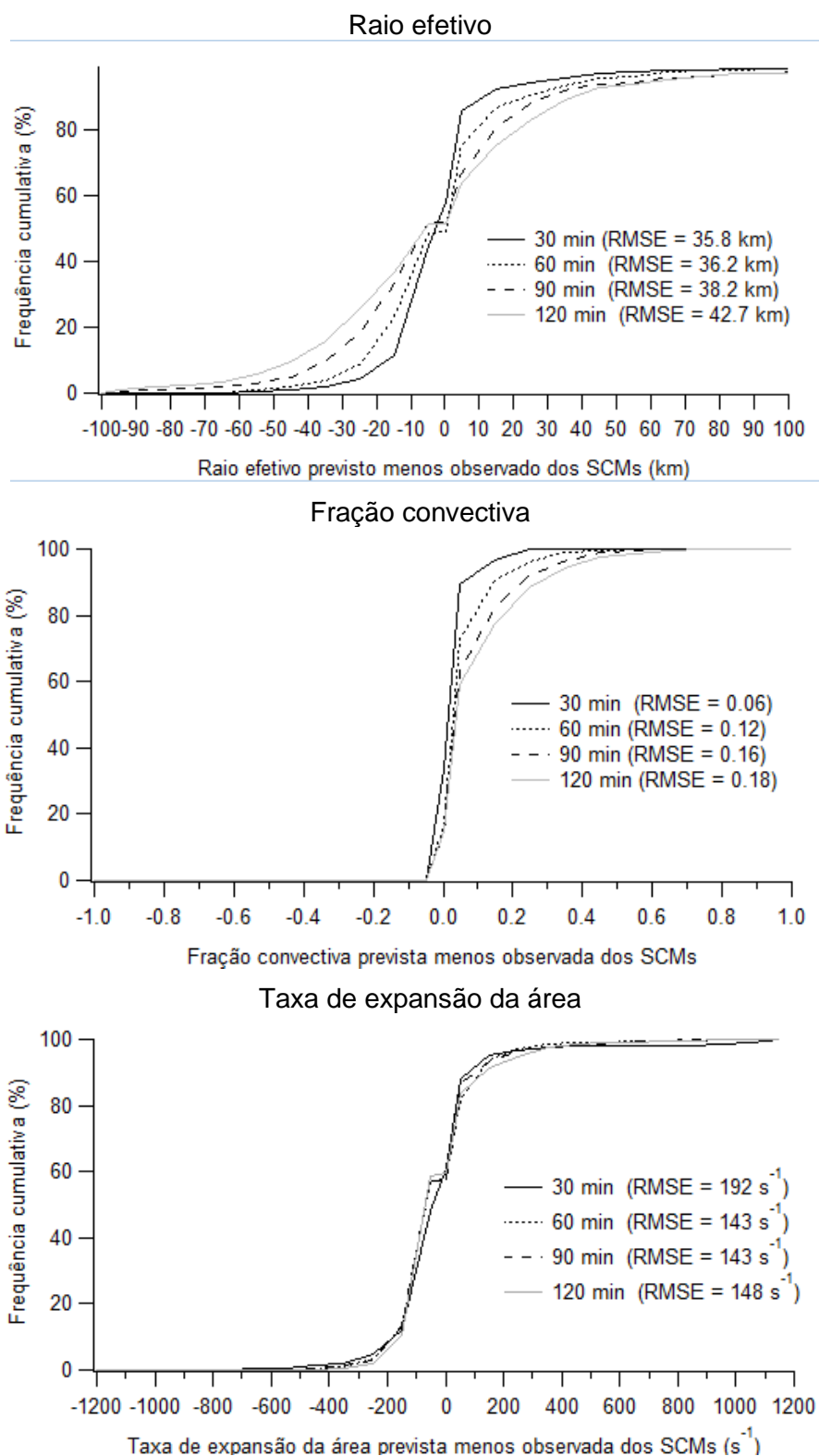


Figura 4.14 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs costeiros sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades morfológicas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

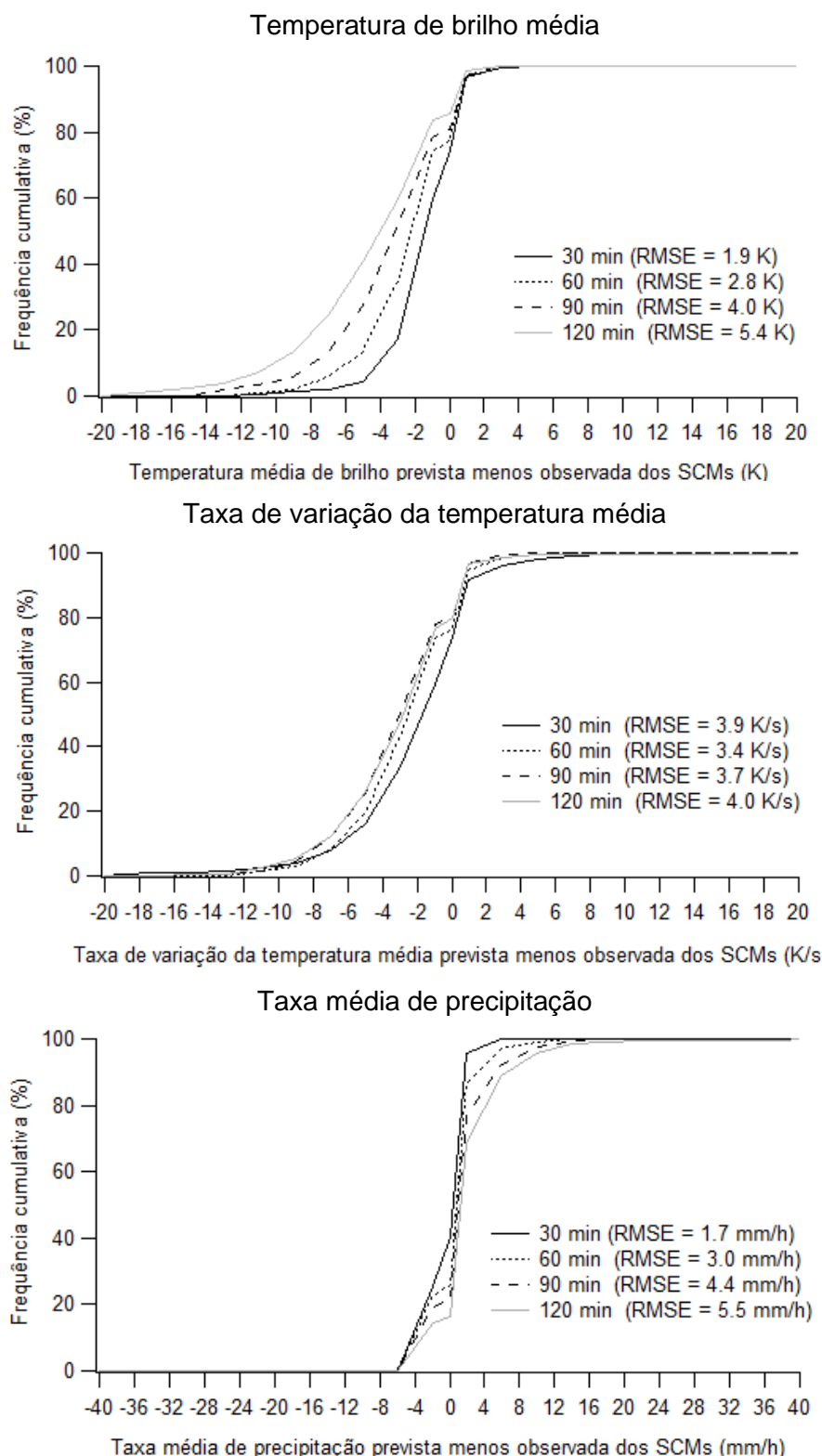


Figura 4.15 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs costeiros sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades radiativas e de precipitação previstas e observadas a partir da maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados são mostrados.

Para o raio efetivo dos SCMs (Fig. 4.14), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 45% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-85 a 0 km), 13% apresentaram diferenças nulas, e 42% apresentaram diferenças positivas (0 a 75 km), indicando que não houve tendência definida de super ou subestimação da área dos sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 35,8 km para 30 minutos. A partir de 90 minutos, nota-se uma leve variação (38,2 km), o que indica diferença pequena na área de expansão de acordo com o tempo de previsão.

Analisando a fração convectiva (Fig. 4.14) nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 0% dos sistemas apresentaram diferenças negativas, 34% nulas e 66% positivas (0 a 0,4), indicando que a maioria dos SCMs foi prevista com áreas maiores, superestimando a intensidade da convecção e representando áreas convectivas mais extensas do que as observadas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 0,06 para 30 minutos. Para previsões a partir dos 60 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,12.

Para a taxa de expansão da área (Fig. 4.14), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 48% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-750$  a  $0 \text{ s}^{-1}$ ), 13% nulas e 39% positivas ( $0$  a  $550 \text{ s}^{-1}$ ), indicando que maioria dos SCMs foram previstos com expansão mais lenta. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $192 \text{ s}^{-1}$  para 30 minutos, reduzindo-se para cerca de  $143 \text{ s}^{-1}$  aos 60 minutos e mantendo-se em torno de  $143 \text{ s}^{-1}$  aos 90 minutos, indicando estabilização do erro entre 60 e 90 minutos e melhora em relação ao início da previsão.

Analisando a temperatura média de brilho (Fig. 4.15) observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 59% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-11$  a  $0 \text{ K}$ ), 15% nulas e 26% positivas ( $0$  a  $3 \text{ K}$ ), indicando que maioria dos SCMs foi prevista mais fria, com topos de nuvens mais altos e convecção mais intensa, caracterizando superestimação das intensidades desses sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 1,9 K para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento significativo do erro para cerca de 4,0 K, indicando perda gradual de precisão.

Para a taxa de variação da temperatura média (Fig. 4.15), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 59% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-19 a 0 K/s), 15% nulas e 26% positivas (0 a 7 K/s), indicando que maioria dos SCMs foi superestimada em relação à intensificação convectiva. O RMSE correspondente é de aproximadamente 3,9 K/s para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 3,7 K/s, após redução para cerca de 3,4 K/s aos 60 minutos.

Para a taxa média de precipitação (Fig. 4.15), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 25% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-2 a 0 mm/h), 15% nulas e 60% positivas (0 a 6 mm/h), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com maior taxa de chuva, havendo superestimação pluviométrica. O RMSE correspondente é de aproximadamente 1,7 mm/h para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 4,4 mm/h.

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram as distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$  em função das diferenças entre as suas propriedades previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs. Para as latitudes dos SCMs, observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 2% dos sistemas apresentaram diferenças positivas (-1.2° a 0°), 71% apresentaram diferenças nulas, e 27% apresentaram diferenças positivas (0° a 0.7°), indicando que a maioria dos SCMs teve uma boa correspondência entre posições previstas e observadas, embora haja um leve deslocamento para latitudes mais ao norte. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais ao norte. Este resultado mostra que a previsão da latitude dos SCMs a partir dos 90 minutos começa a perder qualidade. O RMSE correspondente é de aproximadamente 0,14° (aproximadamente 14 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,27°, sugerindo que os sistemas foram previstos mais afastados de sua posição real.

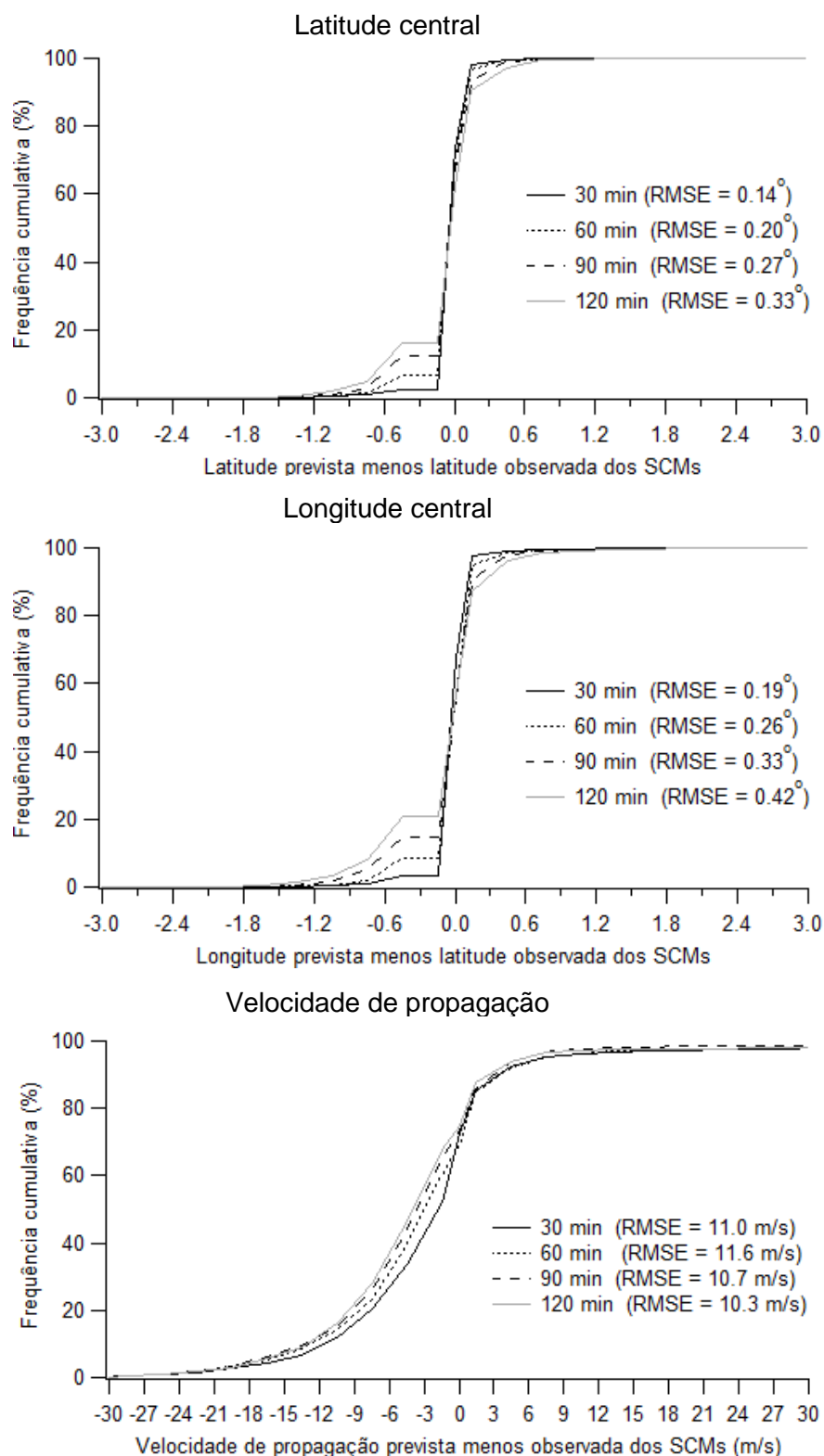


Figura 4.16 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades cinemáticas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

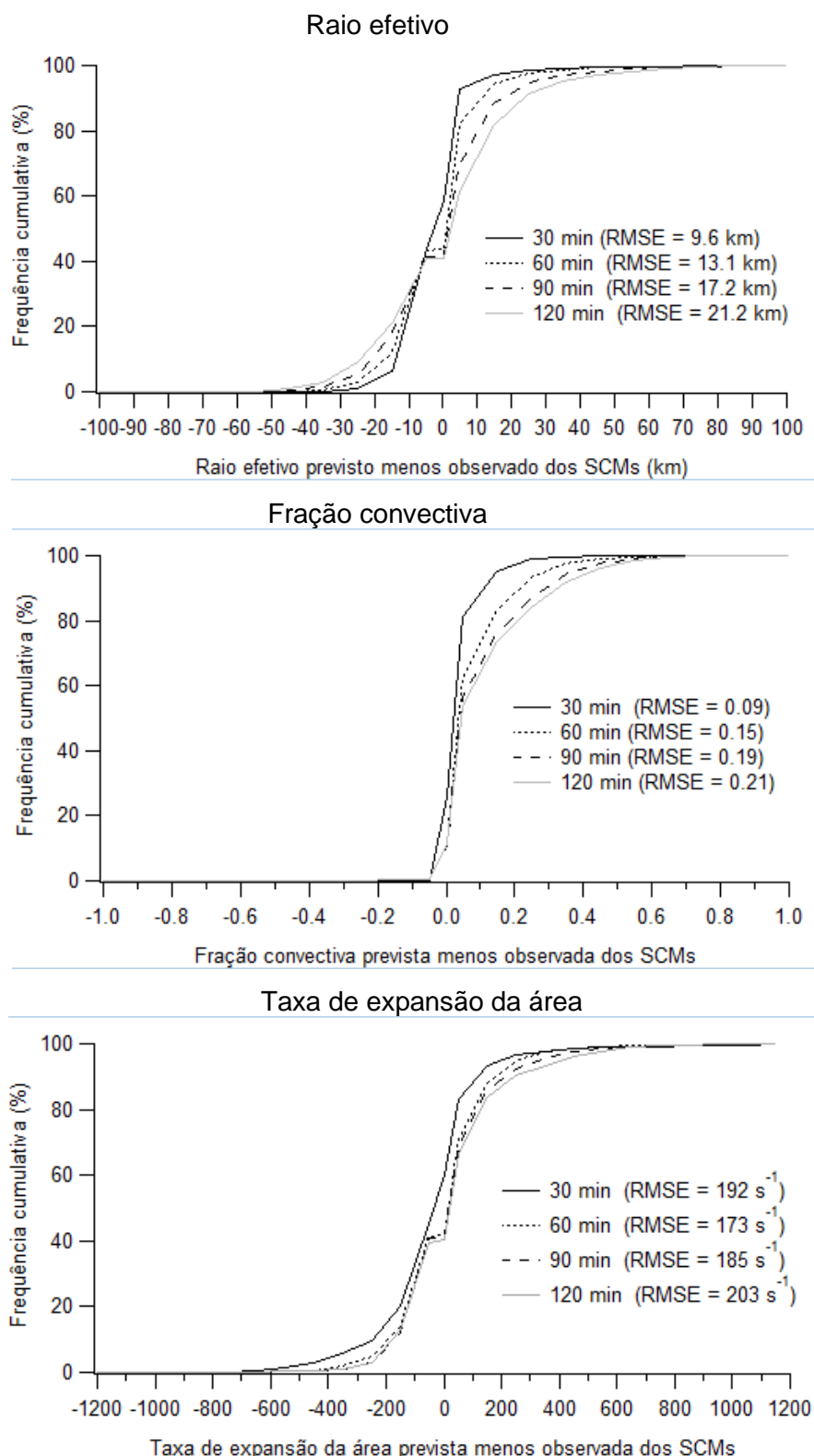


Figura 4.17 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades morfológicas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

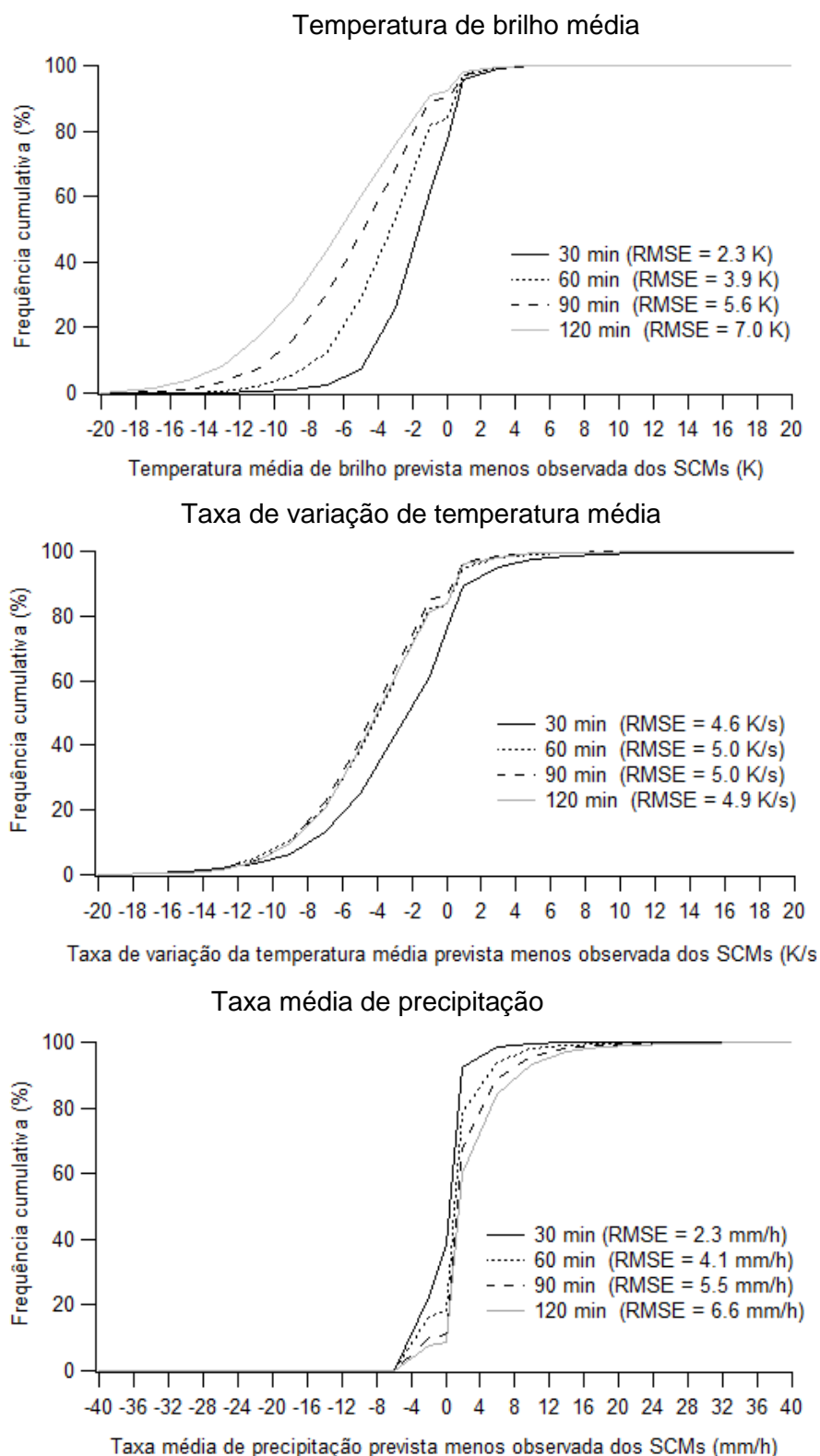


Figura 4.18 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\beta$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades radiativas e de precipitação previstas e observadas a partir da maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados são mostrados.

Para as longitudes dos SCMs (Fig. 4.16), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 3% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-1,6^\circ$  a  $0^\circ$ ), 64% apresentaram diferenças nulas, e 33% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $0,4^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs foi bem prevista, mas um número significativo dos SCMs foi previsto mais ao leste (a maioria foi bem prevista, embora 33% apresente deslocamento das previsões para longitudes mais a leste. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas. Este resultado mostra que a previsão da longitude dos SCMs começa a perder qualidade a partir dos 90 minutos de previsão. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,19^\circ$  (aproximadamente 19 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,33^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais distantes de sua posição real.

Para a velocidade de propagação dos SCMs (Fig. 4.16), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 52% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-30 a 0 km/h), 20% apresentaram diferenças nulas, e 28% apresentaram diferenças positivas (0 a 30 km/h), indicando que maioria dos SCMs foram previstas mais lentas, havendo uma subestimação em sua velocidade.

Para o raio efetivo dos SCMs (Fig. 4.17), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 44% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-45 a 0 km), 14% apresentaram diferenças nulas, e 42% apresentaram diferenças positivas (0 a 35 km), indicando que não há tendência definida de superestimação ou subestimação da área. O RMSE correspondente é de aproximadamente 9,6 km para 30 minutos. A partir de 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 17,2 km, indicando um aumento progressivo do erro de acordo com o tempo de previsão.

Analisando a fração convectiva (Fig. 4.17), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 0.2% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-0,25 a 0), 26%, nulas e 74% positivas (0 a 0,25), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com áreas maiores, superestimando as áreas convectivas. O RMSE

correspondente foi de aproximadamente 0,09 para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,19.

Para a taxa de expansão da área (Fig. 4.17), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 45% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-1050 a 0 s<sup>-1</sup>), 15% nulas e 40% positivas (0 a 450 s<sup>-1</sup>). Como a diferença entre negativas e positivas não excede 10%, não há tendência definida na representação da expansão dos sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 192 s<sup>-1</sup> para 30 minutos, reduzindo-se para cerca de 173 s<sup>-1</sup> aos 60 minutos e voltando a aumentar para cerca de 185 s<sup>-1</sup> aos 90 minutos, sugerindo estabilização seguida de leve perda de precisão para previsões mais longas.

Para a temperatura de brilho média (Fig. 4.18), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 61% negativas (-19 a 0 K), 16% nulas e 23% positivas (0 a 3 K), indicando que maioria dos SCMs foi prevista mais fria, com topos de nuvens mais altos e convecção mais intensa, caracterizando superestimação desses sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 2,3 K para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 5,6 K, sugerindo perda acentuada de precisão térmica em prazos mais longos.

Para a taxa de variação da temperatura média dos SCMs (Fig. 4.18), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 61% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-19 a 0 K), 15% nulas e 24% positivas (0 a 7 K), indicando que maioria dos SCMs foi superestimada em relação à intensificação convectiva. O RMSE correspondente é de aproximadamente 4,6 K/s para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 5,0 K/s, após elevação já aos 60 minutos.

Para a taxa média de precipitação (Fig. 4.18), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 23% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-6 a 0 mm/h), 15% nulas e 62% positivas (0 a 6 mm/h), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com maior taxa de chuva, havendo superestimação pluviométrica. O RMSE correspondente é de aproximadamente 2,3 mm/h para 30 minutos. Para

previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 5,5 mm/h.

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam as distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$  em função das diferenças entre as suas propriedades previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs. Para as latitudes dos SCMs, observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que cerca de 8% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-2$  a  $0^\circ$ ), 56% apresentaram diferenças nulas, e 36% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $1,2^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs teve uma boa correspondência com relação a sua posição meridional, mas houve um leve deslocamento das previsões para latitudes mais ao norte. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas, indicando que os sistemas foram previstos mais ao norte. Este resultado mostra que a previsão da latitude dos SCMs a partir dos 90 minutos começa a perder qualidade. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,50^\circ$  (aproximadamente 50 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,64^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais afastados de sua posição real, indicando uma perda gradual de precisão espacial.

Para as longitudes dos SCMs (Fig. 4.19), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 9% dos sistemas apresentaram diferenças negativas ( $-2^\circ$  a  $0^\circ$ ), 54% apresentaram diferenças nulas, e 37% apresentaram diferenças positivas ( $0^\circ$  a  $1,6^\circ$ ), indicando que a maioria dos SCMs foi prevista bem, mas 37% dos sistemas foram previstos mais a leste. Observa-se a partir de 90 minutos de previsão um aumento significativo na porcentagem de SCMs com diferenças positivas. Este resultado mostra que a previsão da longitude dos SCMs começa a perder qualidade a partir dos 90 minutos de previsão. O RMSE correspondente é de aproximadamente  $0,70^\circ$  (aproximadamente 70 km) para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de  $0,84^\circ$ , sugerindo que os sistemas foram previstos mais a leste de sua posição real.

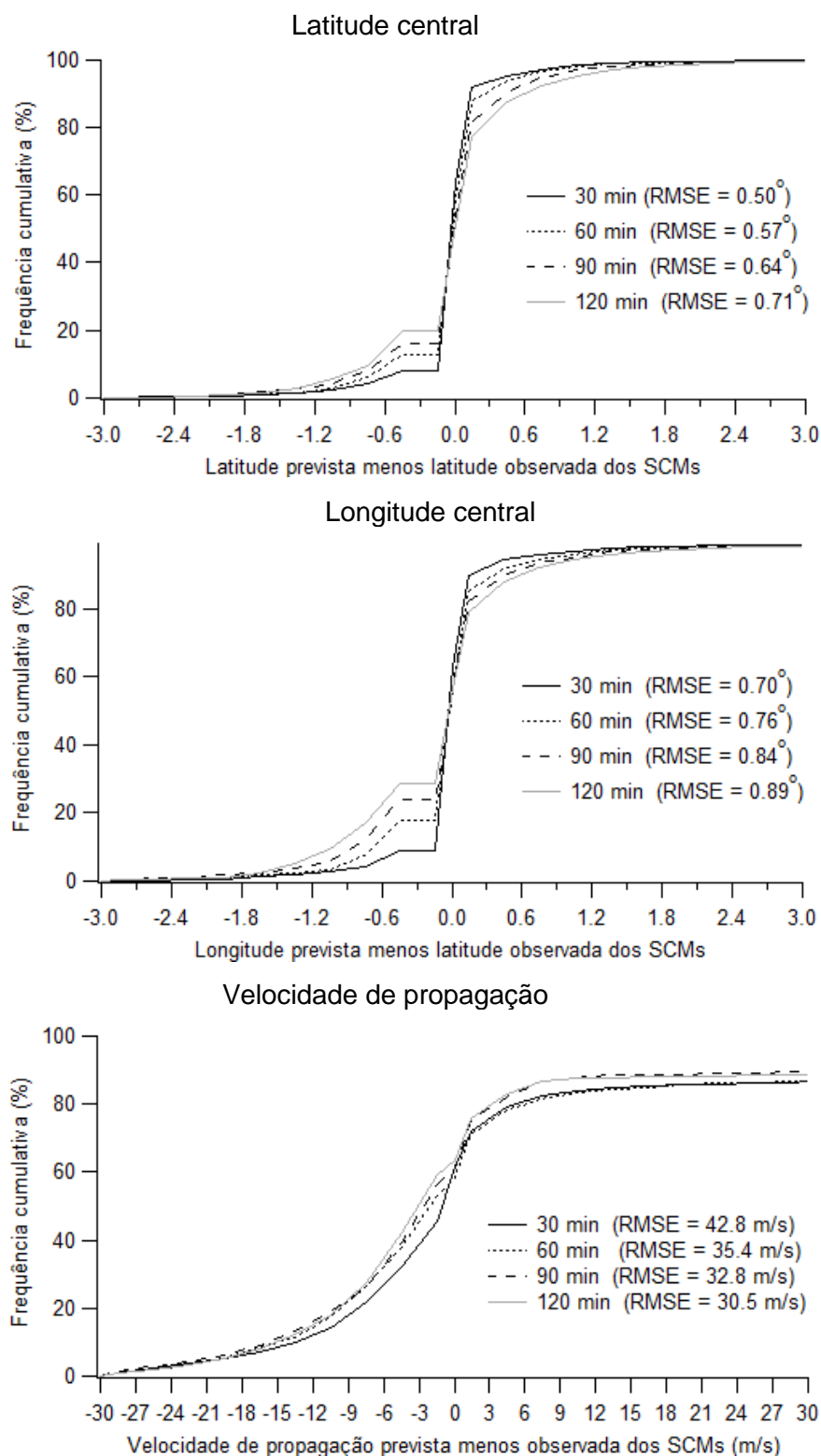


Figura 4.19 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades cinemáticas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

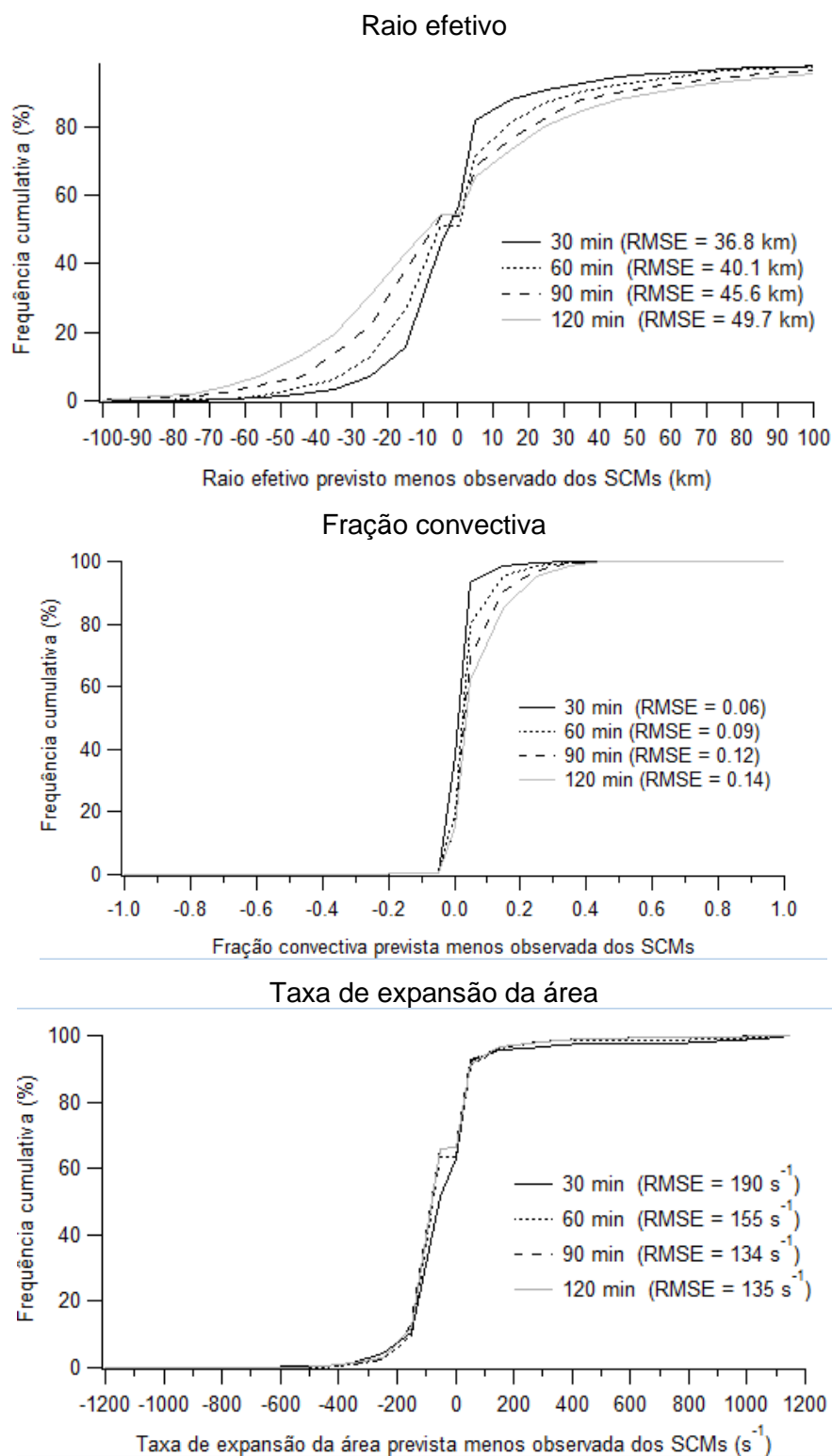


Figura 4.20 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades morfológicas previstas e observadas a partir da fase de maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados também são mostrados.

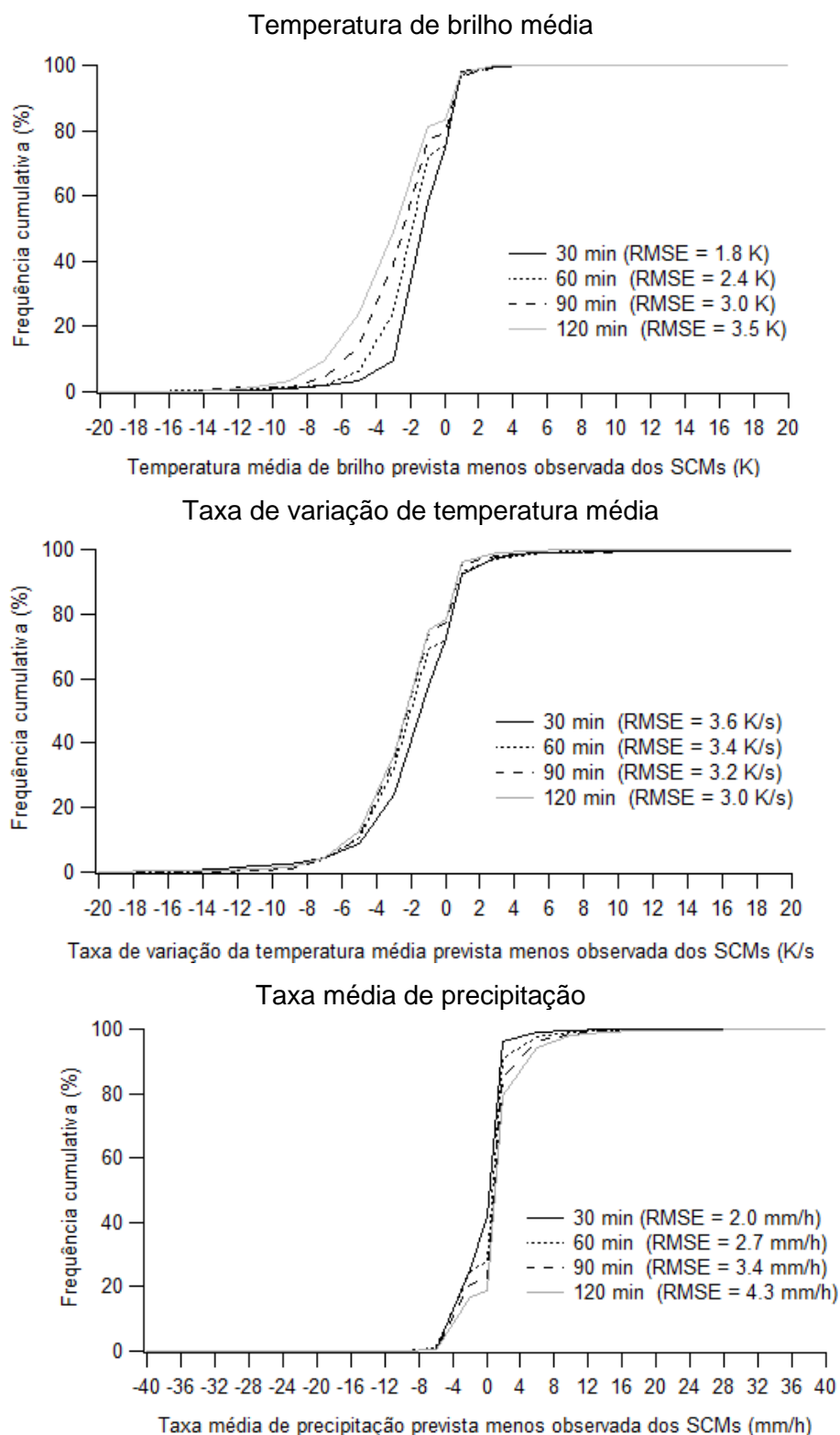


Figura 4.21 – Distribuições de frequência cumulativa dos números de SCMs meso- $\alpha$  sobre o Sudeste do Brasil e o oceano atlântico adjacente em função das diferenças entre as propriedades radiativas e de precipitação previstas e observadas a partir da maturação dos SCMs, para os tempos de previsão de 30, 60, 90 e 120 minutos. Os RMSEs estimados com respeito as propriedades dos SCMs observados são mostrados.

Para a velocidade de propagação dos SCMs (Fig. 4.19), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 45% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-28 a 0 km/h), 16% apresentaram diferenças nulas, e 39% apresentaram diferenças positivas (0 a 30 km/h), indicando que não houve tendência clara de superestimação ou subestimação da velocidade. Os valores indicam dispersão relativamente equilibrada entre previsões mais rápidas e mais lentas, sem viés dominante.

Para o raio efetivo dos SCMs (Fig. 4.20), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 46% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-85 a 0 km), 11% apresentaram diferenças nulas, e 43% apresentaram diferenças positivas (0 a 90 km), indicando que não houve tendência definida de superestimação ou subestimação das áreas dos sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 36,8 km para 30 minutos. A partir de 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 45,6 km, indicando um aumento progressivo do erro de acordo com o tempo de previsão.

Analisando a fração convectiva (Fig. 4.20) nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 0,4% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-0,25 a 0), 38% nulas e 62% positivas (0 a 0,5), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com áreas maiores, superestimando a intensidade da convecção e representando áreas convectivas mais extensas do que as observadas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 0,06 para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 0,12.

Para a taxa de expansão da área (Fig. 4.20), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 10% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-950 a 0 s<sup>-1</sup>), 53% nulas e 37% positivas (0 a 850 s<sup>-1</sup>), indicando que maioria dos SCMs foram bem, mas 37% indicou tendência de superestimação da expansão horizontal dos SCMs. O RMSE correspondente é de aproximadamente 190 s<sup>-1</sup> para 30 minutos, reduzindo-se para cerca de 155 s<sup>-1</sup> aos 60 minutos e para cerca de 134 s<sup>-1</sup> aos 90 minutos. Aos 120 minutos o RMSE é de 135 s<sup>-1</sup>, mostrando que a qualidade da previsão se manteve.

Para a temperatura média de brilho (Fig. 4.21) observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 58% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-19 a 0 K), 16% nulas e 26% positivas (0 a 3 K), indicando que maioria dos SCMs foi prevista mais fria, com topos de nuvens mais altos e convecção mais intensa, caracterizando superestimação desses sistemas. O RMSE correspondente é de aproximadamente 1,8 K para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento significativo do erro para cerca de 3,0 K, indicando perda de precisão térmica com o avanço do tempo de previsão.

Para a taxa de variação da temperatura média (Fig. 4.21), nota-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 58% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-19 a 0 K/s), 14% nulas e 28% positivas (0 a 5 K/s), indicando que maioria dos SCMs foi superestimada em relação à intensificação convectiva. O RMSE correspondente é de aproximadamente 3,6 K/s para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se uma redução do erro para cerca de 3,2 K/s, após diminuição já aos 60 minutos.

Para a taxa média de precipitação (Fig. 4.21), observa-se para o tempo de previsão de 30 minutos que 25% dos sistemas apresentaram diferenças negativas (-14 a 0 mm/h), 17% nulas e 58% positivas (0 a 10 mm/h), indicando que maioria dos SCMs foi prevista com maior taxa de chuva, havendo superestimação pluviométrica. O RMSE correspondente é de aproximadamente 2,0 mm/h para 30 minutos. Para previsões a partir dos 90 minutos, observa-se um aumento do erro para cerca de 3,4 mm/h, alcançando aproximadamente 4,3 mm/h aos 120 minutos.

### Análise comparativa entre os grupos de SCMs estudados

O Quadro 4.2 mostra os RMSEs estimados entre as propriedades previstas e observadas dos cinco grupos de SCMs estudados e do trabalho de Siqueira e Marques (2021). Para as latitudes dos SCMs, observa-se um erro considerável das previsões para os SCMs continentais e oceânicos em relação aos SCMs costeiros para 30 minutos de previsão. Para 120 minutos de previsão, nota-se que este erro aumenta, mas a diferença de erros entre os grupos diminuiu. Já os SCMs meso- $\alpha$  apresentaram erro consideravelmente maior que os SCMs meso- $\beta$  para ambos os tempos de previsão. Com base nestes resultados, observa-se que o método mostra dificuldade em prever as latitudes dos SCMs costeiros e dos maiores.

Analisando os RMSEs para as longitudes dos SCMs (Quadro 4.2), nota-se também um erro considerável para os SCMs costeiros e um erro menor para os SCMs continentais, com uma diferença significativa com relação aos SCMs oceânicos para 30 minutos de previsão. Para 120 minutos de previsão, nota-se que este erro aumenta consideravelmente para todos os grupos, mas os SCMs oceânicos apresentaram maior erro, seguido dos SCMs costeiros. Já os SCMs meso- $\alpha$  também apresentaram erro consideravelmente maior com relação aos SCMs meso- $\beta$  para ambos os tempos de previsão. Desta forma, nota-se também que o método possui dificuldade em prever as longitudes dos SCMs oceânicos e costeiros, e dos SCMs maiores.

Para o RMSEs dos raios efetivos dos SCMs (Quadro 4.2), verifica-se um erro consideravelmente maior das previsões para os SCMs costeiros, e um erro menor para os SCMs continentais para 30 minutos de previsão. Para 120 minutos de previsão, os erros observados foram ainda maiores. Os SCMs meso- $\alpha$  apresentaram erro significativamente maior que os SCMs meso- $\beta$  para ambos os tempos de previsão. Consequentemente, observa-se neste caso que o método possui uma dificuldade maior em prever os tamanhos dos SCMs costeiros e dos SCMs maiores.

Analisando os RMSEs das frações convectivas dos SCMs (Quadro 4.2), observa-se um maior erro das previsões para os SCMs continentais e um menor erro

para os SCMs oceânicos para 30 minutos de previsão. Para 120 minutos de previsão, constatam-se resultados semelhantes; porém, apresentando erros maiores. Já os SCMs meso- $\beta$  apresentaram erro consideravelmente maior que os SCMs meso- $\alpha$  para ambos os tempos de previsão, especialmente para o tempo de 120 minutos. Com base nestes resultados, observa-se uma maior dificuldade do método mostra em prever as frações convectivas dos SCMs continentais e dos SCMs menores. Isto aparentemente é devido ao contraste do aquecimento continente-oceano e a orografia, o que dificulta a previsão das células convectivas dos SCMs. Por outro lado, as células convectivas dos SCMs menores são mais difíceis de serem previstas devido à maior instabilidade destes sistemas.

Analisando os RMSEs das temperaturas de brilho médias dos SCMs (Quadro 4.2), notam-se erros relativamente semelhantes das previsões para os SCMs continentais, oceânicos e costeiros para 30 minutos de previsão. Para 120 minutos de previsão, nota-se que os SCMs continentais apresentam erro consideravelmente maior, e os SCMs oceânicos apresentam erro menor, embora também elevado. Já os SCMs meso- $\alpha$  apresentaram erro significativamente maior que os SCMs meso- $\beta$  para 30 minutos de previsão. Entretanto, observa-se para 120 minutos que os SCMs meso- $\beta$  apresentaram erro consideravelmente maior que os SCMs meso- $\alpha$ . Neste sentido, observa-se que o método mostra dificuldade em prever os SCMs continentais e menores. Isto também é aparentemente devido ao contraste do aquecimento continente-oceano e a orografia, o que dificulta a previsão da temperatura do topo da nuvem deste SCMs, isto é, da sua extensão vertical. Para os RMSEs das taxas de precipitação médias dos SCMs (Quadro 4.2), verificam-se que os erros maiores também para os SCMs continentais e meso- $\beta$ , de modo que o método tem dificuldade em prever as taxas de precipitação produzidas por esses sistemas devido aos mesmos mecanismos físicos citados anteriormente.

Quadro 4.2 – RMSEs estimados entre as propriedades previstas e observadas para os cinco grupos de SCMs estudados e para população total de SCMs estudada por Siqueira e Marques (2021), para os tempos de previsão de: a) 30 minutos, b) 60 minutos, c) 90 minutos e d) 120 minutos.

## 30 min

Propriedade	RMSE					
	SCMs continentais	SCMs oceânicos	SCMs costeiros	SCMs meso- $\beta$	SCMs meso- $\alpha$	Total (Siqueira e Marques, 2021)
Latitude	0,27°	0,27°	0,51°	0,14°	0,50°	0,30°
Longitude	0,35°	0,49°	0,68°	0,19°	0,70°	0,44°
Raio efetivo	19,00 km	23,21 km	35,81 km	9,66 km	36,87 km	24,6 km
Fração Convectiva	0,08	0,05	0,06	0,09	0,06	0,08
Temperatura de brilho média	2,26 K	2,10 K	1,99 K	2,33 K	3,69 K	2,3 K
Taxa média de precipitação	2,46 mm/h	1,65 mm/h	1,75 mm/h	2,38 mm/h	2,04 mm/h	2,2 mm/h

## 60 min

Propriedade	RMSE					
	SCMs continentais	SCMs oceânicos	SCMs costeiros	SCMs meso- $\beta$	SCMs meso- $\alpha$	Total (Siqueira e Marques, 2021)
Latitude	0,35°	0,31°	0,56°	0,20°	0,57°	0,39°
Longitude	0,45°	0,59°	0,61°	0,26°	0,76°	0,51°
Raio efetivo	24,08 km	25,50 km	36,21 km	13,12 km	40,13 km	28,1 km
Fração Convectiva	0,14	0,08	0,12	0,15	0,09	0,13
Temperatura de brilho média	3,72 K	2,62 K	2,84 K	3,92 K	3,45 K	3,5 K
Taxa média de precipitação	4,04 mm/h	2,38 mm/h	3,01 mm/h	4,12 mm/h	2,76 mm/h	3,5 mm/h

## 90 min

Propriedade	RMSE					
	SCMs continentais	SCMs oceânicos	SCMs costeiros	SCMs meso- $\beta$	SCMs meso- $\alpha$	Total (Siqueira e Marques, 2021)
Latitude	0,43°	0,43°	0,53°	0,27°	0,64°	0,46°
Longitude	0,55°	0,66°	0,64°	0,33°	0,84°	0,62°
Raio efetivo	29,80 km	30,63 km	38,22 km	17,25 km	45,67 km	33,5 km
Fração Convectiva	0,18	0,10	0,16	0,19	0,12	0,17
Temperatura de brilho média	5,23 K	3,29 K	4,08 K	5,63 K	3,28 K	4,8 K
Taxa média de precipitação	5,28 mm/h	2,92 mm/h	4,42 mm/h	5,51 mm/h	3,49 mm/h	4,7 mm/h

## 120 min

Propriedade	RMSE					
	SCMs continentais	SCMs oceânicos	SCMs costeiros	SCMs meso- $\beta$	SCMs meso- $\alpha$	Total (Siqueira e Marques, 2021)
Latitude	0,51°	0,51°	0,59°	0,33°	0,71°	0,53°
Longitude	0,59°	0,80°	0,73°	0,42°	0,89°	0,70°
Raio efetivo	33,46 km	37,99 km	42,73 km	21,24 km	49,78 km	36,4 km
Fração Convectiva	0,20	0,11	0,18	0,21	0,14	0,19
Temperatura de brilho média	6,43 K	3,76 K	5,42 K	7,09 K	3,04 K	5,9 K
Taxa média de precipitação	6,31 mm/h	3,34 mm/h	5,53 mm/h	6,60 mm/h	4,34 mm/h	5,7 mm/h

## 5. PRODUTO TECNOLÓGICO

O produto técnico-tecnológico gerado a partir desta dissertação consiste em um conjunto de rotinas que pode ser aplicado para avaliar a qualidade das previsões realizadas pelo FORTRACC. Trata-se de um produto acadêmico, não automatizado e não operacional, desenvolvido na forma de software de rotinas voltado para fins de pesquisa científica.

Esse produto corresponde a uma metodologia documentada para a aplicação da previsão imediata de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs) sobre o Sudeste do Brasil e o oceano Atlântico adjacente, utilizando imagens infravermelhas do satélite GOES-13 (canal 4, resolução espacial de 4 km e temporal de 30 minutos) e o método FORTRACC. O mesmo enquadra-se nas categorias de “Metodologias e Processos de Gestão Documentados” e “Relatório Técnico Conclusivo”, conforme as diretrizes da CAPES, pois sistematiza um procedimento completo de seleção, classificação e avaliação do desempenho da previsão imediata. A estrutura central do produto é apresentada no fluxograma de processamento (Figura 5.1), que mostra a sequência de entrada/saída de arquivos e a função de cada rotina FORTRAN no encadeamento operacional. O fluxograma para previsão evidencia como o processo parte de arquivos mensais/diagnóstico, gera datas de previsão, prepara arquivos de entrada e executa os módulos principais do FORTRACC até a geração do arquivo final de “famílias” previstas.

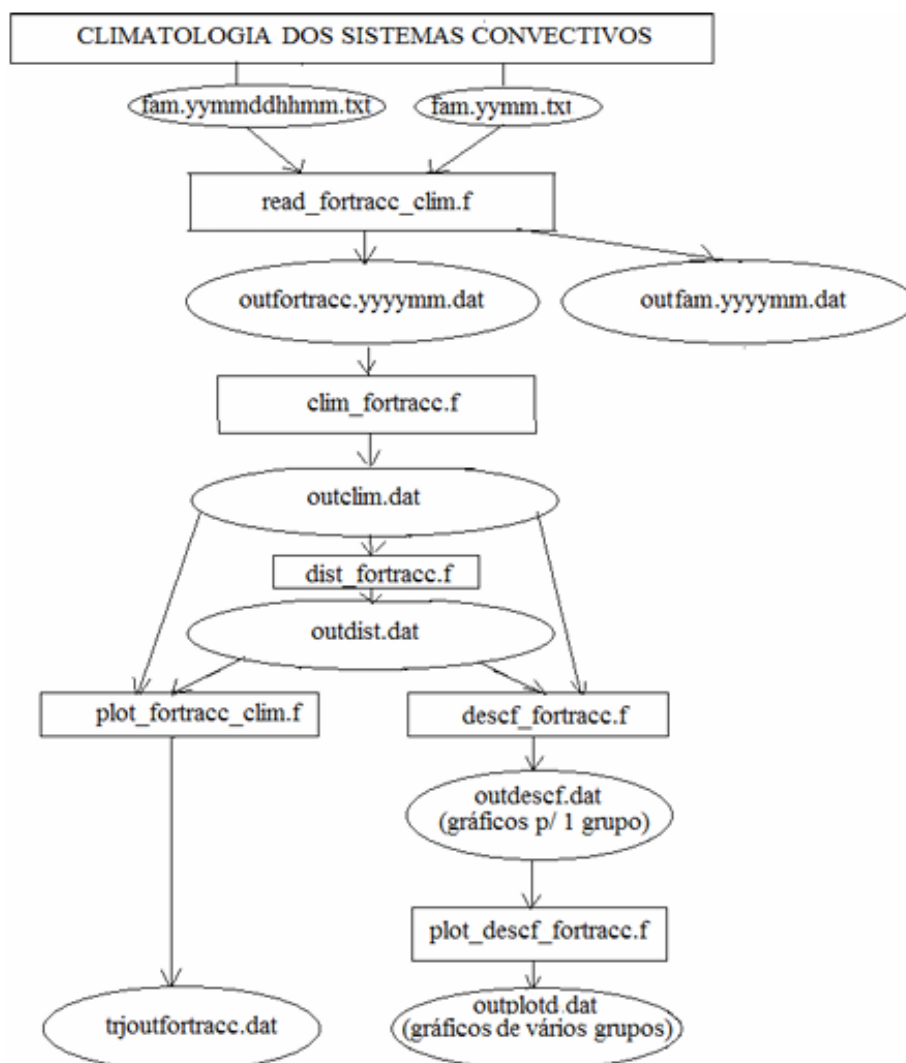


Figura 5.1: Esquema de processamento para várias datas (mesmas das tempestades rastreadas). Fonte: A autora.

### **Etapa 1 — Previsão imediata com FORTRACC (rastreamento e modo prognóstico)**

Conforme mostrado na Figura 5.1, o FORTRACC executa a identificação dos SCMs, o rastreamento de sua evolução e a geração das previsões de curtíssimo prazo, utilizando a evolução observada dos sistemas nas imagens subsequentes. A entrada principal é composta pelas imagens infravermelhas do GOES-13 (canal 4) e o conjunto de configurações do modo prognóstico. A saída desta etapa são arquivos mensais contendo os SCMs rastreados e previstos, que passam a ser o insumo para as etapas de seleção, decomposição e estatística descritas a seguir. A

disponibilidade do produto baseia-se no fato de que a metodologia utiliza diretamente os arquivos mensais de saída do FORTRACC produzidos para a área de estudo, permitindo replicação do fluxo em outros períodos e domínios mediante atualização do conjunto de imagens e parâmetros.

## **Etapa 2 — Leitura mensal, seleção, decomposição e estatística final**

Após a geração dos sistemas rastreados e previstos em arquivos mensais pelo FORTRACC, a metodologia executa um conjunto de rotinas em FORTRAN (Figura 5) para transformar as saídas brutas em bases consistentes e em estatísticas finais.

A rotina read\_fortracc\_clim.f realiza a leitura dos arquivos de famílias gerados pelo FORTRACC (rastreados e previstos), aplica a seleção do tipo de tempestade (tempestades e/ou tempestades severas), efetua correções em propriedades dos sistemas, calcula novas propriedades e imprime os resultados em saídas mensais padronizadas. Essa rotina deve ser executada mês a mês, cobrindo todo o período do estudo. Em seguida, a rotina clim\_fortracc.f lê os sistemas mensais gerados anteriormente e faz a seleção dos sistemas para climatologia, respeitando o período e a região definidos para o trabalho, consolidando a base que será usada na etapa de caracterização e avaliação. A rotina dist\_fortracc.f executa a decomposição dos sistemas selecionados em grupos, conforme suas propriedades, permitindo a separação por classes analisadas no estudo (por exemplo, grupos por ambiente e por escala).

Depois, a rotina descf\_fortracc.f realiza a descrição estatística das propriedades, produzindo distribuições de frequência, frequências cumulativas e estatísticas relacionadas, que fundamentam as análises apresentadas nos capítulos de resultados e discussão.

Por fim, as rotinas plot\_descf\_fortracc.f e plot\_fortracc\_clim.f organizam e viabilizam a visualização dos resultados: a primeira lê e imprime a descrição estatística de vários grupos para fins de plotagem, enquanto a segunda gera a plotagem das trajetórias dos sistemas rastreados selecionados para a previsão e dos sistemas previstos, ambos ao longo do tempo de previsão, do SCM inicial até o tempo final configurado.

Como entrega final, o produto disponibiliza um procedimento completo e documentado que parte de imagens GOES-13 e arquivos mensais do FORTRACC e chega a: (i) bases mensais consistentes de SCMs rastreados e previstos; (ii) seleção climatológica e decomposição em grupos; (iii) estatísticas finais (frequências e distribuições, incluindo frequências cumulativas); e (iv) visualizações padronizadas (trajetórias e gráficos de estatística). O fluxograma (Figura 5.1) constitui a representação central do produto por registrar, de forma operacional, as rotinas, arquivos de entrada/saída e a sequência de execução, permitindo aplicabilidade.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas as previsões imediatas dos SCMs que ocorreram sobre o sudeste do Brasil e oceano Atlântico adjacente no período de 2009 a 2017, utilizando dados do satélite GOES-13, o método FORTRACC e análises estatísticas. A análise foi feita para os SCMs continentais, oceânicos costeiros, meso- $\beta$  e meso- $\alpha$ .

A análise das frequências de ocorrência dos SCMs mostrou que a maior parte dos SCMs identificados ocorreu sobre o continente, mesmo com maior área oceânica na região de estudo. A maioria dos SCMs se encontra na escala meso- $\beta$ , mostrando que os sistemas menores se formam com maior facilidade. Em termos sazonais, a ocorrência de SCMs é maior no verão e no outono. No inverno há uma redução da frequência em todos os grupos, refletindo condições menos favoráveis à convecção.

A comparação das previsões dos SCMs utilizando índices estatísticos mostrou que o método FORTRACC possui uma perda de qualidade nas previsões com o aumento do tempo de previsão relativamente semelhante à observada por Siqueira e Marques (2021), apresentando melhor qualidade de previsão para os tempos de 30 e 60 minutos, e pior qualidade a partir de 90 minutos. O método previu melhor a ocorrência dos SCMs costeiros e meso- $\alpha$ , resultando em ACU maior e BIAS mais próximo de 1 para 30 minutos de previsão. Por outro lado, os SCMs continentais e meso- $\beta$  foram mais superestimados pelo método, especialmente para tempos de 120 minutos.

As análises das previsões das propriedades físicas utilizando distribuições de frequências cumulativas dos SCMs mostraram, de uma maneira geral, que os SCMs foram previstos mais ao norte e mais ao leste, com velocidade mais lenta. O raio efetivo dos SCMs não apresentou tendência de superestimação nem subestimação pelo método. A fração convectiva, a temperatura de brilho média e a taxa de precipitação foram superestimadas pelo método, mostrando que os SCMs foram previstos com áreas convectivas mais extensas, topos mais frios e chuva mais intensa do que o observado, com aumento dos erros a partir de 90 minutos de

previsão, sendo relativamente semelhante ao observado por Siqueira e Marques (2021).

As análises dos RMSEs das previsões revelaram que o método possui uma deficiência maior em prever as latitudes, longitudes e tamanhos dos SCMs costeiros e dos SCMs maiores (meso- $\alpha$ ). Para as frações convectivas, os maiores erros ocorreram para os SCMs continentais e os SCMs menores (meso- $\beta$ ), sendo aparentemente devido ao contraste do aquecimento continente-oceano e a orografia, o que dificulta a previsão da área convectiva dos SCMs. Por outro lado, as áreas convectivas dos SCMs menores foram mais difíceis de serem previstas devido à maior instabilidade destes sistemas. Isto também ocorreu para a previsão das temperaturas do topo de nuvem destes SCMs, isto é, da sua extensão vertical. Para as taxas de precipitação previstas para os SCMs, os resultados foram semelhantes aos anteriores, sendo justificados pelos mesmos mecanismos físicos citados anteriormente.

Os resultados deste trabalho contribuíram para evidenciar as condições em que os SCMs são melhor ou pior previstos. Observou-se que as previsões são mais favoráveis para sistemas mais organizados, estáveis e de maior escala (meso- $\alpha$ ), especialmente em ambientes costeiros, bem como para tempos de previsão mais curtos (até 60 minutos). Por outro lado, condições desfavoráveis estão associadas a sistemas de menor escala (meso- $\beta$ ) e localizados sobre o continente, que apresentam maior instabilidade e rápida evolução, resultando em maior degradação da qualidade das previsões, sobretudo para tempos mais longos (90–120 minutos) e para propriedades relacionadas à convecção e precipitação.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação da metodologia desenvolvida a dados de satélites mais modernos, como o GOES-19, que dispõe de maior resolução temporal e espacial e pode permitir uma caracterização mais detalhada da evolução dos SCMs em curtos intervalos de tempo. Sugere-se também a realização de estudos de caso de eventos extremos de precipitação associados a cada grupo de SCMs, bem como a integração com dados de radar meteorológico e redes de pluviômetros, de modo a refinar a avaliação das taxas de chuva previstas. Adicionalmente, recomenda-se a análise da previsibilidade

dos SCMs sob diferentes condições sinóticas, como frentes frias, ciclones extratropicais e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a fim de avaliar o desempenho do método em distintos cenários atmosféricos. Por fim, sugere-se analisar separadamente os SCMs que passam por processos de fusão e divisão, de modo a investigar a qualidade das previsões nesses casos e verificar se o método mantém desempenho adequado durante essas interações dinâmicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FENG, Z.; PREIN, A. F.; KUKULIES, J.; FIOLEAU, T.; JONES, W. K.; MAYBEE, B.; *et al.* **Mesoscale Convective Systems Tracking Method Intercomparison (MCSMIP): Application to DYAMOND Global km-scale Simulations.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 130, n. 8, e2024JD042204, 2025.

HOUZE, R. A. **Mesoscale convective systems.** *Rev. Geophys.* 42, 1–43. 2004.

JACINTO, Leandro Valente; ELOI, Waleska Martins; SAKAMOTO, Meiry Sayuri. **Características climatológicas dos sistemas convectivos de mesoescala no Nordeste do Brasil.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 1, p. 69-80, 2022.

KOLIOS, S., FEIDAS, H. **An automated nowcasting system of mesoscale convective systems for the Mediterranean basin using Meteosat imagery.** Part II: Verification statistics. *Meteor. Appl.* 20, 296–307. 2013.

MACHADO, Luiz Augusto Toledo; GUEDES, Roberto Lage; ALVES, Maria Aparecida Senaubar. **Características estruturais de sistemas convectivos e forçantes da convecção na América do Sul observados por satélites. Características estruturais de sistemas convectivos e forçantes da convecção na América do Sul observados por satélites.** *Climanalise, Edição Comemorativa de*, v. 10, p. 110-122, 1997.

MACHADO, L. A. T., ROSSOW, W. B. **Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters.** *Mon. Wea. Rev.* 121, 3234–3260. 1993.

MACHADO, L.A.T., ROSSOW, W.B., GUEDES, R.L. WALKER, A.W. **Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas.** *Mon. Wea. Rev.* 126, 1630–1654. 1998.

MADDOX, Robert A. **Mesoscale Convective Complexes.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 61, n. 11, p. 1374-1387, nov. 1980.

MADDOX, Robert A. **Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes.** *Mon. Wea. Rev.* 111, 1475–1493. 1983.

RIBEIRO, Reinaldo Matheus Reis. *et al.* **Análise sinóptica de um complexo convectivo de mesoescala sobre o setor sul da América do Sul em outubro de 2016.** *Revista Foco*, Curitiba (PR), v. 16, n. 9, e2917, p. 01-20, 2023.

SIQUEIRA, José Ricardo; MARQUES, Valdo da Silva. **Tracking and short-term forecasting of mesoscale convective cloud clusters over southeast Brazil using satellite infrared imagery.** *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, v. 71, n. 1, p. 1-16, 17 fev. 2021.

VELASCO, I., FRITSCH, J. M. **Mesoscale convective complexes in the Americas.** *J. Geophys. Res.* 92, 9591–9613. 1987.

VICENTE, G.A., Scofield, R.A., Menzel, P.A. **The operational GOES infrared rainfall estimation technique.** *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 79, pp. 1883-1898. 1998.

VILA, D. A., MACHADO, L. A.T., LAURENT, H., VELASCO, I. **Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (FORTRACC) using satellite infrared imagery: Methodology and validation.** *Wea. Forecasting* 23, 233–245. 2008.

WALKER, J. R., MACKENZIE, W.M., MECIKALSKI, J.R., JEWETT, C.P. **An enhanced geostationary satellite-based convective initiation algorithm for 0-2h nowcasting with object tracking.** *J. Appl. Meteor. Climatol.* 51, 1931–1949. 2012.