



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

LEANDRO VALENTE JACINTO

SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE DO BRASIL

FORTALEZA
2021

LEANDRO VALENTE JACINTO

SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE DO BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre no programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.

Coorientadora: Dra. Meiry Sayuri Sakamoto.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará – IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V154s Valente Jacinto, Leandro.

SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE DO BRASIL / Leandro
Valente Jacinto. - 2021.

129 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e
Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.

Coorientação: Profa. Dra. Meiry Sayuri Sakamoto.

1. Sistemas Convectivos de Mesoescala. 2. Climatologia. 3. ForTraCC. 4.
Região Nordeste. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.007939/2021-31

Interessado: Waleska Martins Eloi

FOLHA DE APROVAÇÃO

LEANDRO VALENTE JACINTO

SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NO NORDESTE DO BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 24/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Waleska Martins Eloi, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 27/09/2021, às 10:41, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **AMANDA REHBEIN, Usuário Externo**, em 27/09/2021, às 10:53, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Meiry Sayuri Sakamoto, Usuário Externo**, em 27/09/2021, às 11:10, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **THALES VINÍCIUS DE ARAÚJO VIANA, Usuário Externo**, em 27/09/2021, às 17:48, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Teresa Raquel Lima Farias, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 29/09/2021, às 09:34, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **2975622** e o código CRC **B3D5B700**.

A todos que amam a ciência, em
especial as mulheres.

AGRADECIMENTOS

É com muita alegria que gostaria de agradecer a Professora Waleska Martins Eloi pela confiança, orientação, paciência e oportunidade.

A Dra. Meiry Sakamoto por todos os ensinamentos e treinamentos obtidos com o ForTraCC e demais ferramentas necessárias para a realização dessa pesquisa.

A Dra. Amanda Rehbein pela paciência e disposição em todos os ensinamentos e treinamentos obtidos com o pacote Percolator para a filtragem dos SCMs, bem como outras ferramentas que foram necessárias para a realização dessa pesquisa.

A minha família, por todos os incentivos e apoio dado durante todo o tempo que estou afastado. Em especial, a minha mãe (Gisselda Rosa Valente) e irmã (Tais Valente Jacinto) por toda a paciência, amor e compreensão.

Aos amigos e colegas de estudo, em especial aos que me acompanharam durante a pós-graduação e vivenciaram comigo os desafios, me ajudando a vencê-los. A todos agradeço o carinho, o apoio, o acolhimento e a paciência.

A todos os professores e pesquisadores que contribuíram, de alguma forma, com minha formação acadêmica e profissional.

A minha esposa, Antônia Eribânia da Silva, por toda a paciência, companheirismo e amor durante mais esse desafio.

Ao IFCE (Instituto Federal do Ceará – Campus Fortaleza) por todo o suporte, seja com o espaço dos laboratórios ou conhecimento obtido através de seus professores/pesquisadores.

A FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) e a todos os seus funcionários por terem proporcionado uma incrível experiência profissional durante os últimos anos. Em especial, a todos os meteorologistas que estão e estiveram comigo desde quando teve início (novembro/2012) a minha carreira.

“O importante é não parar de questionar”
(Albert Einstein).

RESUMO

JACINTO, L. V. **Sistemas convectivos de mesoescala no Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado, Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, Campus Fortaleza, Ceará, 2021.

As características meteorológicas de uma determinada região são de grande importância na manutenção das atividades humanas, fato que ressalta a importância do seu conhecimento. No Nordeste do Brasil (NEB), apesar da variabilidade interanual da precipitação ser bastante acentuada, é alta a frequência de eventos intensos de precipitação associados a Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), assim o conhecimento das principais características dos SCMs no NEB é de grande relevância para o melhor entendimento do tempo e clima da região. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi analisar as principais características dos SCMs, com diferentes ciclos de vida, os quais se formam/atuaem no NEB. Utilizando o algoritmo ForTraCC, características como o período de maior frequência, a velocidade, o tamanho, a distância percorrida, a direção de propagação e as áreas preferencias de ocorrência foram analisadas, bem como uma climatologia foi criada. Os resultados mostram que anualmente ocorrem, em média, 321 (± 137) SCMs no NEB e não há diferença significativa na ocorrência de sistemas de curta e longa duração, sendo o mês de março o que apresenta a maior frequência de SCMs e agosto a menor. A fase positiva do evento El Niño/Oscilação Sul (ENOS) impacta principalmente na ocorrência de SCMs de longa duração, os quais possuem melhor relação com a qualidade da estação chuvosa do NEB. O quadrimestre fevereiro, março, abril e maio (FMAM) é o período em que ocorre mais SCMs. No NEB, os SCMs se formam com uma frequência maior durante o dia, com frequência máxima às 14UTC, além de possuir um tempo médio de duração de 7 horas (± 5 horas). À noite (21 às 08UTC), os SCMs de longa duração são mais frequentes. Os SCMs de curta duração atingem o estágio de maturação após duas horas de sua gênese, enquanto os de longa duração após quatro horas. No estágio de maturação, os SCMs com ciclo de vida longo são 5 vezes maiores do que os sistemas com ciclo de vida curto. Foi observado que março foi o mês em que os SCMs de curta duração são maiores e em outubro os de longa duração são maiores. A densidade de gênese dos SCMs no NEB é maior sobre o continente do que sobre o oceano Atlântico Tropical e ocorre de forma desigual no território, além dos sistemas de longa duração se formarem em uma área mais ampla do que os de curta duração. A velocidade média anual dos SCMs é de 22,3km/h ($\pm 16,3$ km/h), não havendo diferenças nas velocidades entre sistemas com ciclo de vida distintos. O trimestre junho-julho-agosto (JJA) é o período em que as velocidades são maiores. A variabilidade na direção de propagação dos SCMs é alta, mas em todos os meses as propagações obedecem à circulação de grande escala que, no NEB, é de leste para oeste. A direção de propagação dos SCMs tende a ser mais organizada no norte do NEB, principalmente nos períodos de FMAM e JJA.

Palavras-chave: Sistemas Convectivos de Mesoescala. Climatologia. ForTraCC. Região Nordeste.

ABSTRACT

JACINTO, L. V. **Mesoscale convective systems in Northeast Brazil**. Master thesis, Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, Campus Fortaleza, Ceará, 2021.

The meteorological characteristics of a given region are of great importance in the maintenance of human activities which evidence the importance of their knowledge. In Northeast Brazil (NEB), although the interannual variability of precipitation is quite pronounced, the frequency of intense precipitation events associated with Mesoscale Convective Systems (MCSs) is high, so a good knowledge of the main characteristics of MCSs in the NEB is of great relevance for a better understanding of the region's weather and climate. In this context, the objective of this research was to analyze the main characteristics of MCSs, with different life cycles, which form/act in the NEB. Using ForTraCC algorithm, characteristics such as the period of highest frequency, speed, size, distance traveled, direction of propagation, and preferred areas of occurrence were analyzed, and a climatology was created. The results show that an average of 321 (± 137) MCSs occur annually in the NEB and there is no significant difference in the occurrence of short and long duration systems, with March having the highest frequency of MCSs and August the lowest. El Niño/Southern Oscillation (ENOS) events impact mainly on the occurrence of long-lasting MCSs, which have a better relationship with the quality of the rainy season in the NEB. The four-month period February, March, April and May (FMAM) is the period when more MCSs occur. In the NEB, MCSs form with a higher frequency during the day, with maximum frequency at 14UTC, and have an average duration time of 7 hours (± 5 hours). At night (21 and 08UTC), the long duration MCSs are more frequent. Short duration MCSs reach the maturity stage after two hours of their genesis, while long duration MCSs reach the maturity stage after four hours. At the maturity stage, long-lived MCSs are 5 times larger than short-lived systems. It was observed that March was the month in which the short duration MCSs are greater and in October the long duration ones are greater. The density of genesis of MCSs in the NEB is greater over the continent than over the Tropical Atlantic Ocean and occurs unevenly in the territory, besides the long duration systems form in a wider area than the short duration ones. The average annual speed of the MCSs is 22.3km/h (± 16.3 km/h), with no differences in speeds between systems with different life cycles. The June-July-August (JJA) trimester is the period when velocities are highest. The variability in the propagation direction of the MCSs is high, but in all months the propagations obey the largescale circulation that, in the NEB, is from east to west. The direction of propagation of MCSs tends to be more organized in the north of the NEB, especially in the periods of FMAM and JJA.

Keywords: Mesoscale Convective Systems. Climatology. ForTraCC. Northeast Region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais sistemas atmosféricos que atuam no Nordeste do Brasil com seus períodos e áreas de influência: Frentes Frias e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (NDJ); Zona de Convergência Intertropical (FMAM); Distúrbios Ondulatórios de Leste (JJA).....	25
Figura 2 - Estrutura do algoritmo Forecasting and Tracking the evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)	34
Figura 3 - Classificação do SCM de acordo com sua situação ao longo do ciclo de vida: (a) Continuidade; (b) Split; (c) Merge.....	35
Figura 4 - Área da América do Sul (caixa tracejada) na qual as Imagens de Satélites Globais foram recortadas para serem processadas pelo ForTraCC.....	38
Figura 5 - Curva da evolução temporal da área (pixels) de cobertura de um sistema convectivo cuja gênese foi as 19:30UTC do dia 22/02/2003 no Rio Grande do Norte e cujas fases madura e de dissipação ocorreram no Ceará (CE) no dia 23/02/2003 as 7 e 10UTC, respectivamente. As imagens de satélite são do canal infravermelho com temperatura de brilho (°C) para as fases: gênese, madura e de dissipação. Em cada imagem o círculo branco destaca o SCM.....	40
Figura 6 - (a) América do Sul; (b) Região Nordeste do Brasil (NEB) com seus respectivos estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA)	43
Figura 7 - Região Nordeste do Brasil (NEB) com seus respectivos estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA)	44
Figura 8 - Climatologia da frequência relativa (%) da ocorrência de SCMs em relação ao tempo de duração (Horas) na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016	46
Figura 9 - Número total de SCMs por ano rastreados pelo ForTraCC na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016	48

Figura 10 - Número total anual de SCMs de curta e longa duração rastreados pelo ForTraCC na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016	51
Figura 11 - Média mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB. As barras vermelhas representam o desvio padrão. Período utilizado: 2000 a 2016	53
Figura 12 - Média mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB separados por ciclo de vida: (a) Curta duração; (b) Longa duração. As barras vermelhas representam o desvio padrão. Período utilizado: 2000 a 2016.....	54
Figura 13 - Climatologia da frequência relativa (%) mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Acima das barras estão os valores percentuais (%) de cada mês. Período utilizado: 2000 a 2016.....	56
Figura 14 - Climatologia dos SCMs quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016	60
Figura 15 - Climatologia dos SCMs de curta duração quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016	62
Figura 16 - Climatologia dos SCMs de longa duração quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016	64
Figura 17 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de gênese: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016.....	72
Figura 18 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de maturação: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016.....	73
Figura 19 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de dissipação: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016.....	75
Figura 20 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016.....	80
Figura 21 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016.	81

Figura 22 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016.	82
Figura 23 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016.....	87
Figura 24 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016.....	88
Figura 25 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016.....	89
Figura 26 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016.....	90
Figura 27 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016.....	91
Figura 28 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016.....	92
Figura 29 - Climatologia mensal da distância (km) percorrida dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016	95
Figura 30 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016.....	103
Figura 31 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs de curta duração no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016	105
Figura 32 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs de longa duração no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios estabelecidos por Maddox (1980) para definir um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM).....	30
Tabela 2 - Principais parâmetros de saída do ForTraCC.....	36
Tabela 3 - Climatologia das áreas médias (km ²), com desvio padrão, dos SCMs do NEB de acordo com a fase e o ciclo de vida. Período utilizado: 2000 a 2016	68
Tabela 4 - Climatologia mensal da velocidade (km/h) dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016.....	98
Tabela 5 - Quantidade de SCMs resultantes após a aplicação dos filtros nas saídas do ForTraCC. Período utilizado: 2000 a 2016.....	126
Tabela 6 - Relação dos meses sem informação (S.I.) e meses em que o ForTraCC não rastreou sistemas (zero SCMs). Período utilizado: 2000 a 2016	127
Tabela 7 - Climatologia mensal da área média (km ²) dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016.....	128
Tabela 8 - Climatologia mensal da distância (km) percorrida dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016	129

LISTA DE SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
AL	Alagoas
AN	América do Norte
AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASAN	Alta Subtropical do Atlântico Norte
BO	Bolívia
BA	Bahia
CAN	Cavado de Altos Níveis
Cb	Cumulonimbus
CE	Ceará
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CCMs	Complexos Convectivos de Mesoescala
COL	Colômbia
CPC	Climate Prediction Center
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DCRS	Defesa Civil do Rio Grande do Sul
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DOLs	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS	El Niño/Oscilação Sul
EUA	Estados Unidos da América
ForTraCC	Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
JAN	Jato de Altos Níveis
JBN	Jato de Baixos Níveis

LI	Linha de Instabilidade
LIs	Linhas de Instabilidade
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GMS	Japanese Geostationary Satellite
GOAmazon2014/5	Green Ocean Amazon
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
MA	Maranhão
Meteosat	European Community Geostationary Satellite
MASCOTTE	Maximum Spatial Correlation Tracking Technique
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NEB	Nordeste do Brasil
NWS	National Weather Service
OMJ	Oscilação Madden Julian
OAS	Oceano Atlântico Sul
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PR	Paraná
RO	Rondônia
RS	Rio Grande do Sul
RN	Rio Grande do Norte
SALLJEX	South American Low Level Jet Experiment

SE	Sergipe
SC	Santa Catarina
SCs	Sistemas Convectivos
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SP	São Paulo
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UTC	Universal Time Coordinated
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
g	grama
CG/grau ²	Centro geométrico ou centro de massa por grau quadrado
hPa	hecto Pascal
K	graus Kelvin
kg	quilograma
km	quilômetro
km ²	quilômetro quadrado
m	metro
mm	milímetro
s	segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	23
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	Sistemas Atmosféricos que Atuam na Região Nordeste do Brasil	24
2.2	Sistemas Convectivos de Mesoescala Tropicais na América do Sul.	26
2.3	Rastreamento e o Acompanhamento dos Sistemas Convectivos de Mesoescala.....	30
2.4	Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)	33
3	DADOS E METODOLOGIA.....	37
3.1	Dados.....	37
3.2	Seleção dos Sistemas Convectivos de Mesoescala	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Climatologia da Ocorrência de SCMs na Região Nordeste do Brasil (NEB).....	46
4.2	Climatologia da Frequência Relativa Mensal dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)	55
4.3	Climatologia da Frequência Relativa Horária dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)	59
4.4	Climatologia do Tamanho Médio (km²) dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB).....	67
4.5	Climatologia da Densidade Média Mensal dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)	76
4.5.1	<i>Climatologia da Densidade Média Mensal dos SCMs de Curta e Longa Duração no Nordeste do Brasil (NEB)</i>	83
4.6	Climatologia Mensal da Distância (km) Percorrida e da Velocidade (km/h) Média dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)	93
4.7	Climatologia Mensal da Direção de Propagação dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB).....	99

5	CONCLUSÕES.....	109
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	112
	REFERÊNCIAS	114
	ANEXOS.....	121
	ANEXO A – RELAÇÃO DE ANOS NEUTRO, COM EL NIÑO E LA NIÑA.	122
	APÊNDICES.....	123
	APÊNDICE A – RELAÇÃO DE QUANTAS IMAGENS (POR ANO) FORAM PROCESSADAS PELO ALGORITIMO FORTRACC.	124
	APÊNDICE B – RELAÇÃO DA QUANTIDADE DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA QUE SOBRARAM APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS NAS SAIDAS DO FORTRACC.....	125
	APÊNDICE C – RELAÇÃO DOS MESES SEM INFORMAÇÃO (S.I.) E MESES EM QUE O FORTRACC NÃO RASTREOU (zero SCMs) SISTEMAS DE CURTA E LONGA DURAÇÃO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.	127
	APÊNDICE D – CLIMATOLOGIA MENSAL DA ÁREA MÉDIA (km²), COM OS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO, DOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCMs) NO NORDESTE DO BRASIL.	128
	APÊNDICE E – CLIMATOLOGIA MENSAL DA DISTÂNCIA (km) PERCORRIDA, COM OS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO, DOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCMs) NO NORDESTE DO BRASIL.	129

1 INTRODUÇÃO

As características meteorológicas de uma determinada região são de grande importância na manutenção das atividades humanas, pois afetam diversos segmentos que dependem de seu comportamento. O conhecimento dos principais fatores envolvidos no comportamento de eventos meteorológicos se torna cada dia mais relevante, uma vez que afetam a sociedade tanto de maneira positiva quanto negativa.

A região Nordeste do Brasil (NEB) ocupa uma área de aproximadamente 1.600.000km², o que equivale a 18% do território brasileiro, integrando a região nove estados (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe), onde cerca de 70% estão inseridos no semiárido (ROCHA et al., 2011). Destacam-se que algumas características do semiárido nordestino são marcantes como, por exemplo, a irregularidade pluviométrica, os períodos de seca e o elevado déficit hídrico. A variabilidade interanual da precipitação no NEB é bastante acentuada e entre os fatores climáticos que determinam essa variação das precipitações estão: relevo, posição geográfica, a natureza da sua superfície e os sistemas atmosféricos que atuam nesta região.

Entre os principais sistemas atmosféricos precipitantes no NEB estão os Sistemas Frontais (SF), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) (MOLION & BERNARDO, 2000). O sistema de brisas, marítima e terrestre, é outro fenômeno meteorológico que assume um importante papel, em termos de regularidade e intensidade de ocorrência, em determinadas áreas tropicais como, por exemplo, em grande parte do NEB (TEIXEIRA, 2008). Destaca-se ainda o fato de outros mecanismos físicos interagirem com os sistemas atmosféricos citados anteriormente impactando no regime de precipitação do NEB como, por exemplo, a Oscilação de Madden-Julian (OMJ) a qual consiste na propagação de uma onda atmosférica no sentido zonal (oeste para leste) ao longo do globo terrestre e em torno da linha do Equador (ALVES et al., 2018).

O clima do NEB é influenciado ainda pelos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical. De acordo com Ferreira e Mello (2005) a célula de Walker, que atua no sentido zonal, e a célula de Hadley, que opera no sentido meridional, são fortemente perturbadas em anos cujas anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

são positivas ou negativas, impactando na qualidade do período chuvoso da região. Dependendo da intensidade e do período do ano em que é observado o fenômeno El Niño (La Niña), aquecimento (resfriamento) do oceano Pacífico Equatorial, é responsável por afetar negativamente (positivamente) a convecção na região.

Este conjunto de diferentes sistemas atmosféricos que atuam no NEB, contribuem de forma significativa para a atividade convectiva e fazem com que outro importante tipo de sistema meteorológico, objeto desse estudo, seja observado: os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs).

Os SCMs são um conjunto de nuvens do tipo Cumulonimbus (Cb), com uma espessa cobertura de nuvens frias constituídas por topos e por bigornas e, geralmente, com tempo de duração superior ao de uma Cb individual. Segundo Machado e Rossow (1993), esse tipo de sistema possui, extensão entre 20 e 200km, mas em alguns casos podem atingir tamanhos que variam de 200 a 2000km de extensão.

Por se tratar de sistemas com desenvolvimento vertical extenso, podendo chegar a mais de 18km de altura (de sua base até o topo), os SCMs podem causar grande quantidade de chuva em pouco tempo, ocasionando sérios problemas nas atividades humanas e infraestrutura nos locais onde atuam. No norte do NEB, episódios extremos de precipitações associados à SCMs são frequentes, particularmente, entre os meses de fevereiro e maio, período chuvoso da região, como o caso estudado por Souza e Alves (1998), que em aproximadamente 8 horas, ocasionou cerca de 270 mm de precipitação na cidade de Fortaleza (CE).

Na América do Sul (AS) são poucas as pesquisas que dedicaram-se a estudar os SCMs tropicais e suas principais características, levando em consideração um período prolongado (superior a dez anos) de dados. Filho et al. (2015) estudaram a convecção na América do Sul, baseado em um produto derivado de satélite integrado com resolução espacial de 8km e temporal de uma hora. No entanto, o estudo utilizou um período de 6,5 anos de dados e cobriu uma área ampla (de 0° a 15°S) e não homogênea (Amazônia, NEB e Atlântico Tropical). Nesse caso, além dos autores utilizarem poucos anos de dados, não foi possível estudar as características dos SCMs que atuam apenas na região do NEB.

Recentemente, um dos estudos mais completos (com 14 anos de dados) sobre SCMs tropicais é o de Rehbein (2016), voltado para a Bacia Amazônica, em que foi utilizado o algoritmo de rastreamento de SCMs desenvolvido por Machado

et al. (1998). Para o NEB, destaca-se o estudo de Lyra et al. (2020) que utilizaram 10 anos de dados (2008 a 2017) para analisar as características dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs). Contudo, vale destacar que no estudo de Lyra et al. (2020) os autores focaram nas análises apenas de CCMs, caso particular de um SCM.

Embora os SCMs ocasionem eventos extremos de precipitação, tem um importante papel no ciclo hidrológico. Na Planície Central dos Estados Unidos da América (EUA), os sistemas convectivos têm uma contribuição que varia de 20% a 50% do total anual de precipitação, sendo que no período de junho a agosto, os CCMs dominam o regime de precipitação. No entanto, sistemas maiores e de longa duração como os CCMs, caso particular de um SCM, também estão associados a impactos negativos, em razão das condições meteorológicas extremas observadas como inundações, ventos intensos, granizo e, em alguns casos, até tornados (VELASCO & FRITSCH, 1987; SILVA DIAS, 1999).

Por serem considerados de baixa previsibilidade e estarem associados a eventos meteorológicos extremos, um estudo mais detalhado sobre os SCMs se torna relevante para a sociedade.

Diante do exposto e com base em uma ampla revisão realizada, destaca-se o caráter inédito desse estudo pois, não existe um estudo detalhado sobre os SCMs na região do NEB no qual se tenha utilizado uma série histórica longa (mais de dez anos) de imagens de satélite com alta resolução espacial e temporal, bem como estudado SCMs com tempo de duração menores (≥ 3 horas e < 6 horas) e sistemas mais duradouros (≥ 6 horas). Embora nos últimos anos alguns estudos tenham sido realizados, o conhecimento das principais características e as áreas preferencias de gênese, particularmente para a região do NEB, ainda é limitado, o que justifica a necessidade dessa pesquisa.

Nesse contexto, este estudo tem por objetivo analisar as principais características dos SCMs que se formam/atuam na região do NEB. Os principais parâmetros a serem analisados são: ciclo de vida, distribuição espacial, período de maior frequência, tamanho, velocidade, distância percorrida e direção de propagação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar as principais características dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no Nordeste do Brasil (NEB) no período de 2000 a 2016.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar quais as áreas preferenciais de gênese, maturação e dissipação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no Nordeste do Brasil (NEB);
- Analisar os SCMs quanto ao ciclo de vida: curta duração e longa duração;
- Identificar o período de maior frequência de ocorrência dos SCMs: frequência mensal e horária;
- Avaliar o tamanho, a velocidade, a distância percorrida e a direção de propagação dos SCMs.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Atmosféricos que Atuam na Região Nordeste do Brasil

A formação de SCMs no NEB está diretamente associada a forma como atuam os principais sistemas atmosféricos (sistemas frontais, VCAN, ZCIT e DOLs) precipitantes no NEB.

Na América do Sul os sistemas frontais são responsáveis pela incursão de ar frio e, conseqüentemente, por mudanças significativas nas condições de tempo ao deslocar-se das latitudes mais altas em direção a latitudes médias e baixas. Segundo Cavalcanti e Kousky (2003), os sistemas frontais atuam na América do Sul durante todas as estações do ano, afetando de forma mais significativa a parte sul do NEB a partir do mês de outubro, com atuação mais frequente no trimestre Novembro-Dezembro-Janeiro (NDJ).

Já os VCANs, de acordo com Kousky e Gan (1981), são definidos como sistemas de baixa pressão atmosférica e circulação horária que se formam, geralmente, sobre o oceano Atlântico Sul na alta troposfera (a aproximadamente 12km de altura), possivelmente, devido a intensificação da Alta da Bolívia (AB). Dean (1971), Aragão (1975), Kousky e Gan (1981), entre outros autores, realizaram os primeiros estudos observacionais sobre VCANs no oceano Atlântico Sul, e demonstraram a possível associação entre os VCANs com as precipitações no NEB no trimestre NDJ.

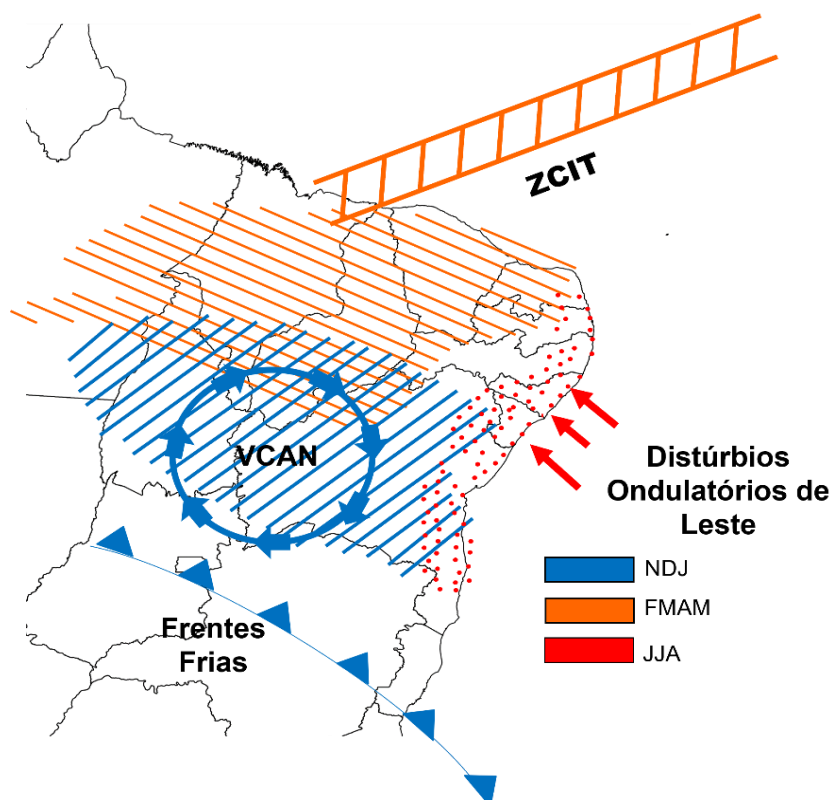
O NEB, com destaque para o setor norte da região, tem como principal sistema atmosférico indutor de precipitação, no quadrimestre Fevereiro-Março-Abril-Maio (FMAM), a ZCIT. Climatologicamente, esse sistema migra de sua posição mais ao norte, a aproximadamente 14°N, nos meses de agosto e setembro, para uma posição mais ao sul, a aproximadamente 4°S, nos meses de março e abril. De acordo com Ferreira e Mello (2005), a ZCIT caracteriza-se por ser uma banda de nebulosidade ao redor do globo terrestre formada pela confluência dos ventos alísios de nordeste do Hemisfério Norte (HN) com os ventos alísios de sudeste provenientes do Hemisfério Sul (HS), em baixos níveis. O choque entre os ventos alísios oriundos do Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) com os ventos alísios oriundos da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), na faixa equatorial, provoca forte convergência de ar quente e úmido na coluna troposférica o que contribui para

o surgimento de baixas pressões, elevadas temperaturas da superfície do mar e, consequentemente, intensa atividade convectiva.

Outro importante sistema para o NEB são os DOLs, cuja frequência é maior no trimestre Junho-Julho-Agosto (JJA). Os DOLs, são sistemas de escala sinótica que se formam na costa oeste da África, intensificam-se e se deslocam no oceano Atlântico Sul em direção a costa leste do NEB. Segundo Coutinho e Fisch (2007), essas perturbações nos ventos alísios apresentam oscilações tanto em sua periodicidade quanto em seu comprimento de onda, adquirindo intensidade na baixa troposfera ao associar-se a outros sistemas sinóticos como as Linhas de Instabilidade (LI), as quais podem se propagar para o interior da Amazônia (AM).

A Figura 1 ilustra as principais áreas em que os sistemas atmosféricos precipitantes tem influência no NEB e os seus respectivos períodos.

Figura 1 - Principais sistemas atmosféricos que atuam no Nordeste do Brasil com seus períodos e áreas de influência: Frentes Frias e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (NDJ); Zona de Convergência Intertropical (FMAM); Distúrbios Ondulatórios de Leste (JJA).



Fonte: Autor.

2.2 Sistemas Convectivos de Mesoescala Tropicais na América do Sul

Já os SCMs, objeto desse estudo, são definidos, de acordo com Zipser (1982), como um conjunto de nuvens Cbs, que possui uma espessa cobertura de nuvens frias constituídas por topos e bigornas e, geralmente, com tempo de duração superior ao de um Cb individual. As nuvens Cbs são conhecidas por apresentarem movimentos verticais ascendentes intensos na coluna troposférica e, conseqüentemente, possuir desenvolvimento vertical extenso, podendo chegar a mais de 18km de altura (de sua base até o topo). Esse tipo de nuvem possui 03 estágios bem definidos: cúmulos, maturação e dissipação (BYERS & BRAHAM, 1949).

A característica mais importante na fase inicial, cúmulos, são as correntes ascendentes de ar que prevalecem em toda a célula e contribuem para o desenvolvimento da nuvem, equilibradas por subsidência suave no ambiente, o que sugere uma temperatura mais elevada em seu interior do que no meio ambiente. Neste estágio, em geral, as correntes de ar variam de apenas alguns metros por segundo (m/s), em células pequenas, a quase 100 m.s^{-1} em células maiores e bem desenvolvidas verticalmente. Na fase madura da nuvem Cb, observa-se a presença tanto de correntes ascendentes quanto de correntes descendentes de ar. Essa fase da nuvem, devido as correntes descendentes, é caracterizada pela ocorrência de chuva forte na base da nuvem. Já o último estágio, fase de dissipação, caracteriza-se pelo predomínio de movimentos verticais subsidentes com temperaturas, no interior da nuvem, menores do que no meio ambiente (LIMA, 2005).

Estudos sobre as áreas preferenciais de formação dos complexos convectivos de mesoescala na América do Sul foram realizados por Velasco e Fritsch (1987) os quais puderam verificar uma quantidade maior de casos em latitudes médias e sobre a região da Colômbia (COL). Quanto ao tamanho, apesar de apresentarem maior extensão horizontal e maior duração do que os casos observados nos EUA os CCMs, um caso particular de SCM, sul-americanos apresentam características parecidas, tais como: maior frequência à noite, formação preferencialmente sobre o continente a sota-vento de uma cadeia de montanhas, além da presença do Jato de Baixos Níveis (JBN) e Jato de Altos Níveis (JAN) durante a formação do sistema.

Na América do Sul, esse tipo de sistema apresenta diferentes mecanismos de formação, tais como: (1) aquecimento diferencial entre o continente e o oceano, causador da brisa marítima (fenômeno de mesoescala) comum em regiões litorâneas; (2) passagem de sistemas frontais associado ao acoplamento do JBN com os JAN, desde o início até a maturação do SCM, com atividade convectiva intensa entre os dois jatos e o (3) aquecimento continental com influência de outras circulações atmosféricas. Além disso, são observados valores elevados de razão de mistura (18 g kg^{-1}) mostrando, portanto, que é necessário alto teor de umidade e um estado baroclínico da atmosfera para a evolução dos SCMs (LIMA, 2005).

A região do NEB, localizada na área tropical da América do Sul, possui diferentes sistemas atmosféricos os quais atuam como mecanismos para a disparo da atividade convectiva e, conseqüentemente, formação de SCMs profundos. Entre os principais sistemas atmosféricos estão: os VCANs e os sistemas frontais nos meses de novembro, dezembro e janeiro; a ZCIT, no período de fevereiro a maio; e os DOLs, que atuam com maior frequência nos meses de maio a julho (FERREIRA & MELLO, 2005). Esses sistemas, de mesoescala (sistemas frontais, ZCAS, VCANs e DOLs) e grande-escala (ZCIT), geram forte instabilidade na região e modificam substancialmente as condições dinâmicas e termodinâmicas na região do NEB (SOUZA, 2003), contribuindo significativamente para o desenvolvimento de SCMs profundos que, em alguns casos, podem ultrapassar os 15km de altura.

Alves et al. (2001) ao analisarem um intenso sistema convectivo que se formou no leste do NEB, mostraram que no período que antecedeu a formação do sistema, foi observado um intenso movimento ascendente de ar na sua região de formação, acompanhado de um aumento de umidade, convergência de massa e incidência de forte circulação ciclônica na baixa troposfera, a qual intensificou-se no horário de máxima expansão horizontal do sistema. Dinamicamente, a formação deste SCM esteve associada ao avanço de um sistema frontal do sul da América do Sul até a região centro-sul da Bahia, ocasionando forte instabilidade na região.

Ainda foi observado por Alves et al. (2001) no estágio de formação e de maturação do sistema uma onda curta deslocando-se de leste para oeste abaixo da linha do equador, evoluindo para um ciclone fechado em 700 hPa. Outros fatores como jatos meridionais (zonais) na baixa (alta) troposfera, bem como efeitos locais de instabilidade na camada limite planetária junto à superfície do oceano Atlântico Tropical, também contribuíram para a intensificação do SCM.

Embora o aquecimento continental represente um dos fatores importantes no processo de formação e de intensificação dos SCMs, os mecanismos dinâmicos parecem ser os principais responsáveis para a manutenção e, conseqüentemente, duração destes sistemas.

Vitorino et al. (1997) realizaram um dos primeiros estudos para classificar os SCMs no setor norte do NEB durante o período chuvoso principal (fevereiro - maio) dos anos de 1993 e 1994. Os autores verificaram, com dados de baixa resolução espacial, que a região noroeste do Ceará, região serrana com altitude de aproximadamente 900 metros, apresentou um maior número de episódios com desenvolvimento nas primeiras horas da tarde. Outras regiões do Ceará como o Cariri, a Chapada do Apodi e a faixa litorânea também apresentaram frequências relativamente altas de ocorrência de SCMs. Os resultados mostraram que a formação dos SCMs ocorre com maior frequência no início da madrugada, devendo estar relacionada com a circulação vale-montanha enquanto no período da tarde, provavelmente, esteja associada com o máximo de atividade convectiva do ciclo diurno no continente.

Nas últimas décadas, o avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de técnicas objetivas de rastreamento de sistemas convectivos, as quais utilizam-se de imagens de satélite de alta resolução como, por exemplo, o *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)*, desenvolvida por Machado et al. (1998).

Utilizando o ForTraCC Sakamoto (2009) verificou que, na região subtropical da América do Sul, os sistemas convectivos continentais são mais numerosos que os oceânicos e, em ambas as regiões, os SCMs com maior duração apresentam taxas de expansão maiores nas primeiras horas do seu ciclo de vida.

Sakamoto (2012) relata que no norte do NEB, a formação da maior parte dos sistemas convectivos pode estar relacionada com a atuação da ZCIT, por causa do grande número de sistemas detectados durante o período da estação chuvosa. Já na porção sul do NEB, o avanço de sistemas frontais, que contribuem para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e a atuação de VCANs, se destacam pelo disparo na atividade convectiva.

Rehbein (2016) analisou, utilizando o ForTraCC, as principais características dos SCMs, com origens continentais e oceânicas, na Bacia Amazônica no período compreendido entre 2000 e 2013. A climatologia gerada nesse estudo para a área

mostrou que, anualmente, ocorrem 7053 SCMs continentais dos quais, 64% possuem curto ciclo de vida (entre 3 horas e 5 horas e 30 minutos) e 36% possuem longo ciclo de vida (acima de 6 horas). Outro aspecto importante diz respeito ao tempo de duração média encontrado para os sistemas continentais que, segundo a autora, foi de 6 horas.

Um estudo recente de Lyra et al. (2020) voltado para a região do NEB, utilizando um algoritmo de rastreamento de CCMs, verificou que esses sistemas se formam com maior frequência no período da noite, com um pico de formação compreendido entre as 19UTC até as 03UTC. Além disso, o tempo total de duração é entre 6 e 8 horas, mas alguns eventos de CCMs podem persistir por um tempo de até 15 horas ou mais.

2.3 Rastreamento e o Acompanhamento dos Sistemas Convectivos de Mesoescala

Os primeiros estudos sobre os SCMs utilizando imagens de satélite foram feitos em meados da década de 70, com o advento do lançamento de satélites geoestacionários para o monitoramento ambiental do planeta Terra. Essa tecnologia, possibilitou aos pesquisadores da época obter um conhecimento maior a respeito das condições de tempo em localidades distantes dos Centros de Meteorologia.

Maddox (1980) foi um dos primeiros a usar em seus trabalhos imagens de satélite, no canal infravermelho, para estudar núcleos convectivos. Em seu estudo, para a porção central do EUA, o autor analisou algumas características desse tipo de sistema como, por exemplo, o ciclo de vida, o período de maior frequência e a duração. Com isso, estabeleceu critérios (Tabela 1) para determinar um CCM, caso particular de um SCM.

Tabela 1 - Critérios estabelecidos por Maddox (1980) para definir um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM)

Características Físicas	
Tamanho	A – Temperatura no topo da nuvem no canal infravermelho tem que ser $\leq -32^{\circ}\text{C}$ e com área $\geq 100.000\text{km}^2$. B – Na parte interna da nuvem regiões com temperatura $\leq -52^{\circ}\text{C}$ e com área $\geq 50.000\text{km}^2$.
Início	Quando o tamanho A e B são satisfeitos.
Duração	Quando os tamanhos A e B continuam por um período ≥ 6 horas.
Máxima Extensão	Quando a camada de nuvens contínuas com temperatura $\leq -32^{\circ}\text{C}$ atingem o maior tamanho.
Forma	No momento de máxima extensão a excentricidade (eixo menor / eixo maior) é $\geq 0,7$.
Término	Ocorre quando as definições A e B não são mais satisfeitas.

Fonte: Adaptada de Maddox (1980).

Em função da baixa capacidade computacional na época, as primeiras análises sobre os sistemas convectivos foram realizadas utilizando-se de visualização manual da sequência de várias imagens de satélite como, por exemplo, o estudo de Velasco e Fritsch (1987). Com o passar dos anos, novas metodologias automatizadas de identificação e acompanhamento de SCMs foram desenvolvidas, por diferentes pesquisadores, com a finalidade de estudar os diferentes aspectos que envolvem estes sistemas (WILLIAMS & HOUZE, 1987; ARNAUD et al., 1992; FEIDAS & CARTALIS, 2001; CARVALHO & JONES, 2001; VILA et al., 2008; JUNIOR, 2016).

Na América do Sul, mais recentemente, três técnicas foram desenvolvidas para identificar e acompanhar os SCMs utilizando imagens de satélite no canal infravermelho: Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE); Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC), e outra desenvolvida por Junior (2016), para análise automática dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).

A metodologia desenvolvida por Carvalho e Jones (2001), denominada Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE), fornece as propriedades estruturais dos seguintes parâmetros dos SCMs: média e variância de temperatura de brilho, área horizontal, perímetro, temperatura mínima de brilho, zona convectiva fracionária, centro de gravidade e fragmentação. Nessa metodologia o parâmetro de fragmentação tem potencial para monitorar a evolução do SCM e é proposta uma nova maneira de estimar a orientação e excentricidade do sistema, baseada na análise da função ortogonal empírica do SCM (coordenadas em pixel). O método inclui uma detecção precisa de divisão e de fusão de sistemas convectivos, que é um passo crítico na determinação do ciclo de vida. Com base nas magnitudes da correlação espacial entre imagens de satélite consecutivas e, nas mudanças das áreas horizontais do SCM, a metodologia MASCOTTE fornece uma técnica simples e hábil para acompanhar a evolução dos ciclos de vida dos sistemas.

Recentemente, utilizando a linguagem de programação de alto nível GNU/Octave, Junior (2016) desenvolveu uma ferramenta para análise automática de CCMs. O algoritmo desenvolvido pelo autor utiliza os critérios propostos por Augustine e Howard (1988) para detecção de CCM, usando somente a área interna do sistema cujo tamanho mínimo é de 50.000km² e temperaturas no topo da nuvem

inferiores a -52°C . Para processar e analisar os CCMs, Junior (2016), usou as imagens do satélite METEOSAT com dados de temperatura realçada do topo da nuvem, provenientes do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

Já Machado et al. (1998) desenvolveram o *Forecasting and Tracking the evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)*. O ForTraCC trata-se de um algoritmo que permite o acompanhamento das propriedades morfológicas e radiativas dos SCMs, além de prever a evolução dessas propriedades físicas (baseado na temperatura do topo da nuvem) até 120 minutos, por meio da sobreposição de imagens de satélite no canal infravermelho. Essa técnica é utilizada, operacionalmente, pelo CPTEC para o rastreamento, acompanhamento e previsão de núcleos convectivos na América do Sul. Além disso, outros autores utilizaram-se dessa metodologia para analisar as características morfológicas dos SCMs observados na América do Sul (NICOLINI et al., 2002; SIQUEIRA et al., 2005; SAKAMOTO et al., 2008; SAKAMOTO, 2009).

Destaca-se no contexto, que o ForTraCC é uma técnica validada e amplamente utilizada pela Meteorologia Operacional no Brasil para identificar os SCMs, pois se trata de uma ferramenta eficaz no acompanhamento e prognóstico da evolução deste tipo de sistema, e por isso será utilizada nesse estudo.

2.4 Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)

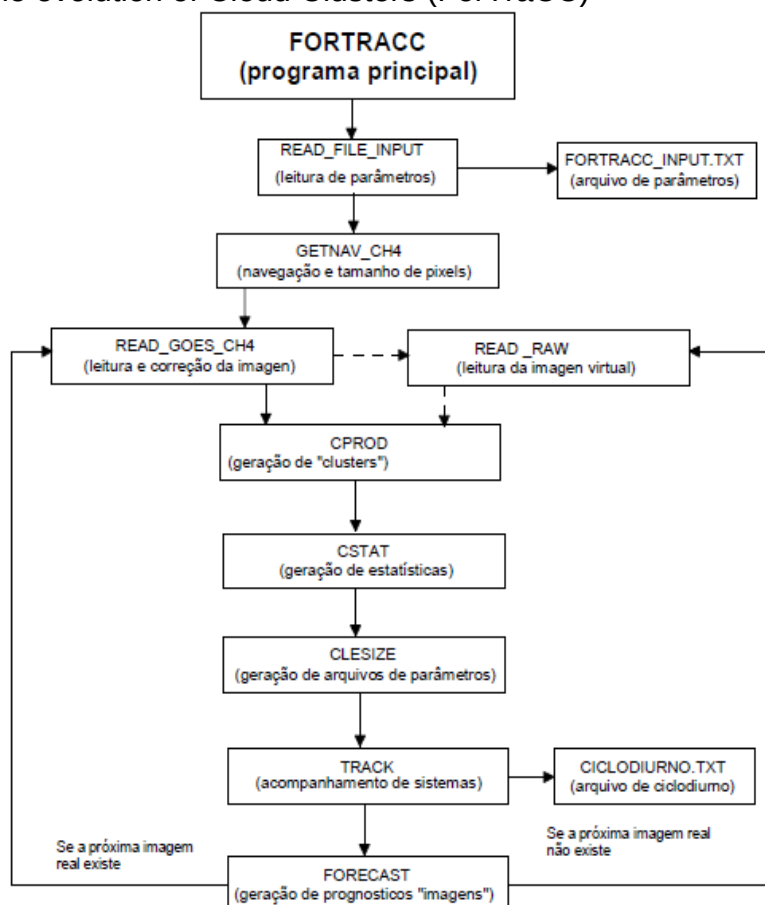
A técnica de rastreamento de núcleos convectivos *ForTraCC* (*Forecasting and Tracking the evolution of Cloud Clusters*), proposta por Machado et al. (1998), foi desenvolvida em linguagem Fortran. O programa possui duas versões: uma operacional destinada a fazer o rastreamento dos SCMs e prognósticos da evolução destes para até 120 minutos; e outra não operacional, que opera em modo diagnóstico, utilizando-se de imagens de satélite no canal infravermelho. No ForTraCC, o método de identificação de um mesmo sistema convectivo no tempo “t” e nas imagens sucessivas no tempo “t + Δt ”, é baseado no critério de máxima superposição da área do sistema convectivo em imagens sucessivas, sendo adotado um número mínimo de pixels para um $\Delta t = 30$ minutos. Se a superposição for menor, os sistemas não são considerados como sendo o mesmo sistema no tempo anterior.

As principais etapas para o acompanhamento dos SCMs através do ForTraCC são descritas a seguir:

- Detecção de um conjunto de nuvens com base em um limiar de temperatura e de tamanho;
- Um módulo estatístico para identificar os parâmetros morfológicos e radiativos dos SCMs;
- Uma técnica de acompanhamento baseado na área do SCM em conjunto com sucessivas imagens sobrepostas;
- Um módulo de previsão com base na evolução dos SCMs em intervalo de tempo anteriores.

Na Figura 2, é apresentada a estrutura do algoritmo:

Figura 2 - Estrutura do algoritmo Forecasting and Tracking the evolution of Cloud Clusters (ForTraCC)



Fonte: Adaptada de Macedo et al. (2004).

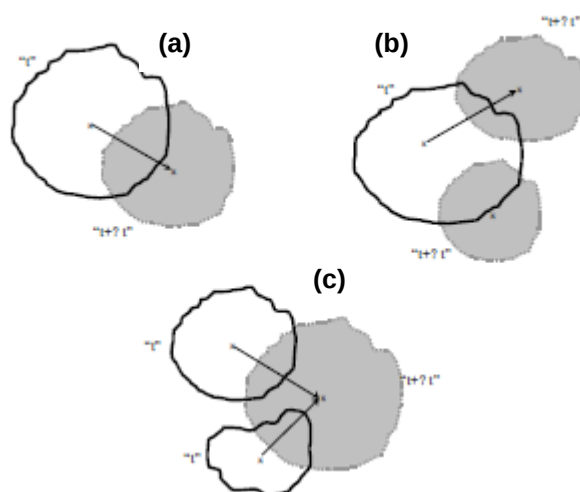
Neste algoritmo de acompanhamento de sistemas convectivos, quatro tipos de situações são consideradas:

- i. **Sistema novo ou de geração espontânea (N):** é aquele sistema convectivo que é identificado em uma imagem e não está presente na imagem anterior, além de não cumprir o critério de mínima superposição dos SCMs;
- ii. **Continuidade (C):** é aquele sistema convectivo que é identificado numa imagem e está presente na imagem anterior, cumprindo com o critério de mínima superposição dos SCMs (Figura 3a);
- iii. **Split (S):** no tempo "t" existe um sistema que cumpre com o critério de mínima superposição dos sistemas convectivos com dois ou mais sistemas no tempo "t + Δt ", é considerado um processo de *split*. Neste caso, o maior

sistema no tempo " $t + \Delta t$ " é considerado como a continuidade do sistema convectivo no tempo " t " (Figura 3b).

- iv. **Merge (M):** quando no tempo " t " existem dois ou mais sistemas que cumprem com o critério de mínima superposição com só um sistema no tempo " $t + \Delta t$ ", é considerado um processo de *merge*. Neste caso, cada um dos sistemas convectivos no tempo " t " é considerado como a continuidade de diferentes famílias de sistemas (Figura 3c).

Figura 3 - Classificação do SCM de acordo com sua situação ao longo do ciclo de vida: (a) Continuidade; (b) Split; (c) Merge



Fonte: Adaptada de Macedo et al. (2004).

Um estudo recente de Rehbein et al. (2019), utilizou o ForTraCC para analisar os SCMs sobre a Bacia Amazônica, região tropical da América do Sul, em 2014-2015 e verificou, durante o programa GoAmazon2014/5, que o número de sistemas convectivos e a precipitação na bacia foi cerca de 50% menor, quando comparado com a climatologia elaborada pelos autores, referente ao período de 2000-2013. Segundo os autores desse estudo, os 2 anos correspondentes ao GoAmazon2014/5 exibiram a menor frequência de ocorrência de SCMs na Bacia Amazônica, em uma avaliação feita do ano 2000 até meados do ano de 2015.

Utilizando o ForTraCC, Eichholz (2011) estudou as características físicas dos SCMs que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008, e mostrou que 64,7% dos sistemas que afetaram o estado apresentaram um tempo de vida entre 6 e 12h, o que parece ser uma característica intrínseca dos SCMs dessa região.

Já Costa et al. (2019) ao avaliar as características dos SCMs ocorridos no NEB nos anos de 2010 e 2011, verificou uma maior frequência nos trimestres outubro-novembro-dezembro (OND) e janeiro-fevereiro-março (JFM).

Destaca-se que, por meio dessa técnica, é possível obter diferentes parâmetros os quais possibilitam o acompanhamento dos SCMs ao longo do seu ciclo de vida, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais parâmetros de saída do ForTraCC

SYS	Número de identificação do sistema convectivo (SCM)
XLAT	Latitude do centro de massa do sistema convectivo
XLON	Longitude do centro de massa do sistema convectivo
TIME	Intervalo de tempo em relação ao horário da imagem
SIZE	Tamanho do sistema convectivo em pixels
DSIZE	Taxa de expansão do sistema convectivo
TMED	Temperatura média do sistema convectivo
DTMED	Taxa da variação de temperatura média do sistema convectivo
TMIN	Temperatura mínima do sistema convectivo
DTMIN	Taxa da variação de temperatura mínima do sistema convectivo
TMIN9	Média do kernel de 9 pixels (análise da vizinhança)
DTMIN9	Taxa de variação da temperatura mínima
CBNUM	Quantidade de topos frios
CBMED	Tamanho médio dos topos frios
VEL	Velocidade do centro de massa do sistema convectivo em relação ao seu posicionamento na imagem anterior
DIR	Direção de deslocamento do centro de massa do sistema convectivo
INCLI	Inclinação do sistema convectivo
ECCE	Excentricidade do sistema convectivo
CLA	Classificação do sistema convectivo
SYS_ANT	Identifica qual o sistema convectivo anterior que originou o atual

Fonte: Adaptada de Macedo et al. (2004).

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Dados

Para detecção, rastreamento e obtenção de parâmetros morfológicos dos SCMs foram utilizadas imagens de satélites geoestacionários na banda do infravermelho (aproximadamente 10,8 μ m) aplicadas ao Forecasting and Tracking the evolution of Cloud Clusters (ForTraCC). As imagens possuem resolução temporal de 30 minutos e espacial (pixel) de 4km x 4km, cobertura global e, no período analisado nesse estudo, resultaram da combinação das imagens dos satélites americanos *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES – 8, 10, 11, 12, 13 e 15), do satélite europeu *Meteorological Satellite* (METEOSAT 5, 7 e 10) e do satélite japonês *Geostationary Meteorological Satellite* (GMS e MTSAT-1R) (JANOWIAK et al., 2001). No período desse estudo (2000 a 2016), alguns satélites deixaram de fornecer dados enquanto outros ficaram ativos e fornecendo informações. Para saber mais detalhes sobre os satélites utilizados e os períodos em que estiveram ativos (inativos), acessar <https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/CPC-4kmIR-Sats.pdf>. As imagens usadas nesse estudo estão disponíveis para download em https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opensap/MERGED_IR/GPM_MERGIR.1/.

O processamento das imagens de satélites aplicada ao ForTraCC bem como outras análises foram realizadas na sala de Meteorologia da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e nos laboratórios de pesquisa do Instituto Federal do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza.

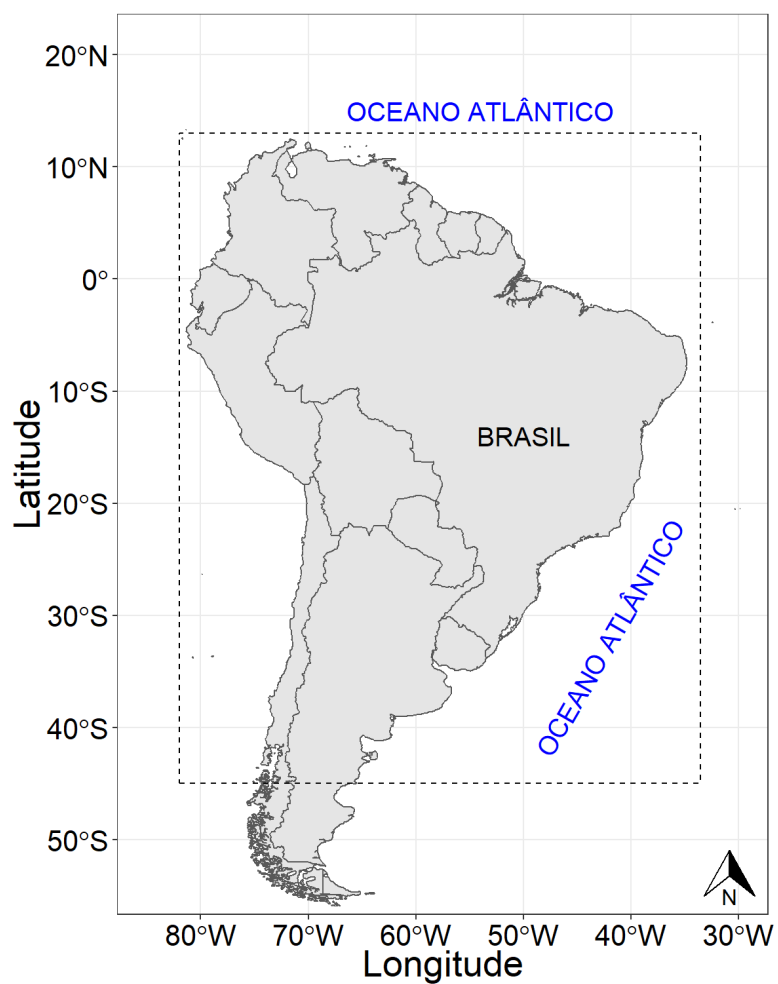
Para identificar os anos que as precipitações ficaram acima, abaixo ou dentro da média histórica na região Nordeste do Brasil (NEB), foi utilizado o banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis no endereço eletrônico <https://clima.inmet.gov.br/prec>.

Já para identificar os anos em que foram observados eventos de ENOS (El Niño/Oscilação Sul) no oceano Pacífico Equatorial, foi utilizado o Oceanic Niño Index (ONI), fornecido pelo Climate Prediction Center (CPC).

As imagens de satélite utilizadas nesse estudo são globais, e assim como em Sakamoto (2009), Rehbein (2016) e Rehbein (2021), para analisar apenas os SCMs que em algum momento do seu ciclo de vida tiveram sua trajetória sobre o

NEB, foram recortadas para a região da América do Sul abrangendo as latitudes de 13°N a 45°S e longitudes de 82°W a 33°W, conforme visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Área da América do Sul (caixa tracejada) na qual as Imagens de Satélites Globais foram recortadas para serem processadas pelo ForTraCC



Fonte: Autor.

3.2 Seleção dos Sistemas Convectivos de Mesoescala

A seleção dos sistemas convectivos foi realizada com base no conceito de que convecção profunda alcança altos níveis da troposfera superior e, conseqüentemente, possuem temperaturas baixas no topo da nuvem. Assim, na primeira etapa, foram identificadas, utilizando-se imagens de satélite no canal infravermelho, todas as nuvens que possuem topos bem desenvolvidos (entre 9 e 12km de altura) e um padrão característico de SCM, ou seja, com fases de crescimento, máxima expansão e decaimento da área de cobertura.

Alguns estudos mostram que diferentes limiares de temperatura podem ser observados em nuvens associadas à atividade convectiva (MADDOX, 1980; VELASCO & FRITISH, 1987). No entanto, para esse estudo, foi adotado o limiar de temperatura atualmente utilizado pelo Centro de Previsão do Tempo e Pesquisas Espaciais/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e validado por Vila et al. (2008), de 235K para definir um SCM.

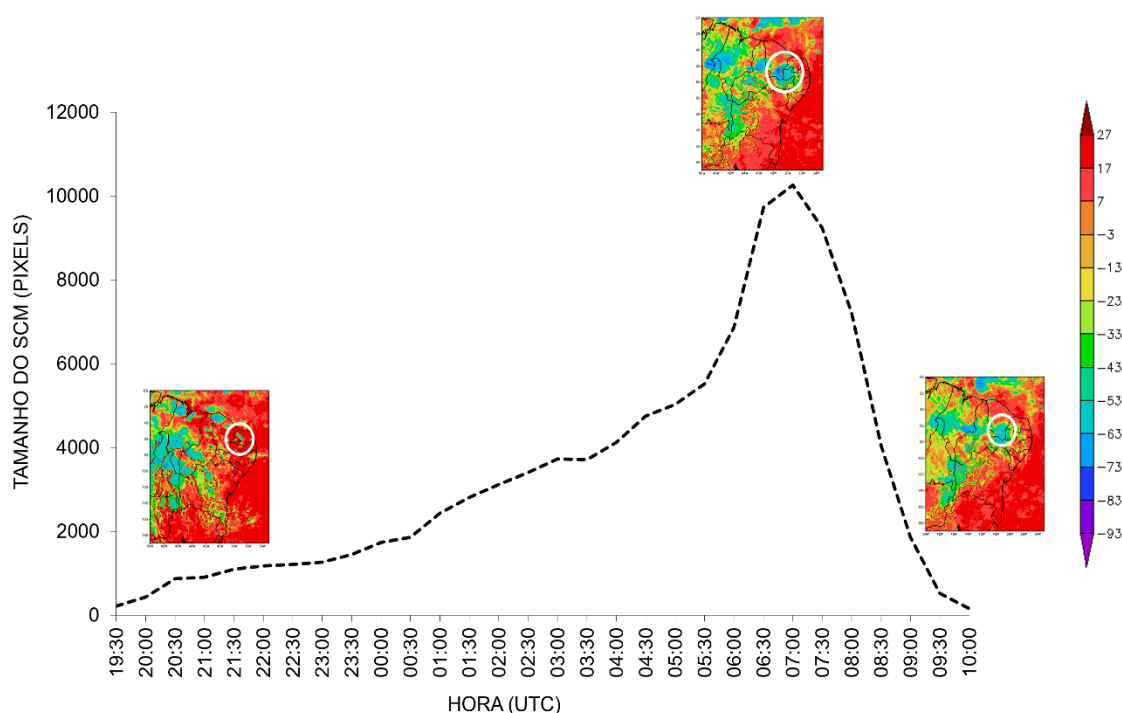
Assim como em Sakamoto (2009), Rehbein (2016) e Rehbein (2021) nesse estudo considerou-se apenas sistemas novos, ou seja, que tiveram gênese espontânea (não resultaram da divisão ou junção de outros sistemas) garantindo assim, que todos os SCMs estudados tivessem um único início e fim.

Os sistemas convectivos selecionados durante o período de estudo (8 de fevereiro do ano 2000 a 31 de agosto de 2016) possuem um padrão característico de crescimento, máxima expansão e decaimento da área de cobertura. Ressalta-se que no mês de janeiro e nos primeiros sete dias de fevereiro do ano de 2000, bem como o período de setembro a dezembro de 2016, não foi possível realizar o processamento das imagens, em razão da falta de imagens (no caso do ano 2000) e também por conta de mudanças (no caso do ano de 2016) no formato das imagens de satélite. Os meses faltantes (sem informação) assim como os meses em que o ForTraCC não detectou sistemas (zero SCMs) no NEB, foram considerados para a elaboração da climatologia.

A Figura 5 exemplifica como se analisou o comportamento de área de cobertura, durante o ciclo de vida dos SCMs selecionados para esse estudo. Na figura, além da curva de evolução temporal da área de um SCM, são mostradas as imagens de satélite para a área onde o sistema teve gênese às 19:30UTC do dia 22/02/2003, atingiu a fase madura às 7UTC, e entrou na fase de decaimento e

finalmente dissipação as 10UTC do dia 23/02/2003. Considerando o limiar de 235K (-38°C), na fase inicial o sistema apresentava um tamanho de 222 pixels (3.552km²), enquanto nas fases madura e de dissipação o SCM apresentava um tamanho de 10.263 pixels (164.208km²) e 154 pixels (2.464km²), respectivamente. Segundo os dados de precipitação acumulada, das 7 horas da manhã do dia 22/02/2003 as 7 horas da manhã do dia 23/02/2003, provenientes da rede pluviométrica convencional da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), o município de Caririaçu, na macrorregião do Cariri, registrou a maior precipitação (113,0mm) em decorrência da atuação do SCM. Nesse estudo, para o cálculo das distâncias (km) percorridas e da direção de propagação dos SCMs, utilizou-se as coordenadas (latitude e longitude) iniciais e finais fornecidas pelo ForTraCC. A velocidade (km/h) média fornecida pelo ForTraCC é obtida através das distâncias (km) percorridas e o tempo total de duração dos SCM.

Figura 5 - Curva da evolução temporal da área (pixels) de cobertura de um sistema convectivo cuja gênese foi as 19:30UTC do dia 22/02/2003 no Rio Grande do Norte e cujas fases madura e de dissipação ocorreram no Ceará (CE) no dia 23/02/2003 as 7 e 10UTC, respectivamente. As imagens de satélite são do canal infravermelho com temperatura de brilho (°C) para as fases: gênese, madura e de dissipação. Em cada imagem o círculo branco destaca o SCM



Fonte: Autor.

Levando-se em consideração a região tropical no qual o NEB está inserido e para fins de comparação com pesquisas realizadas em outras áreas do Brasil como, por exemplo, a Bacia Amazônica, nessa pesquisa, optou-se por estudar todos os SCMs com duração mínima de 3 horas. Os sistemas convectivos foram agrupados em sistemas de curta duração (≥ 3 e < 6 horas) e de longa duração (≥ 6 horas). Nesse estudo, os termos “ciclo de vida” e “preferenciais” são utilizados para fazer referência ao tempo de duração dos SCMs (curta duração e longa duração) e identificar valores máximos, respectivamente.

Destaca-se que para garantir a melhor caracterização dos SCMs que atuam na região do NEB bem como para fins de comparação com resultados de outros estudos os quais usaram o ForTraCC, como Sakamoto (2009) e Eichholz (2011) para a região subtropical, bem como para outras regiões tropicais da América do Sul como a Bacia Amazônica (REHBEIN, 2016; REHBEIN et al., 2017; REHBEIN et al., 2019; REHBEIN, 2021), foram utilizados outros filtros, os quais relaciona-se a seguir:

- Temperatura mínima igual ou inferior a 221K (-52°C) em pelo menos uma fase do ciclo de vida;
- Temperatura de 235K (-38°C) durante todo o seu ciclo de vida;
- Com padrão característico de crescimento, máxima expansão e decaimento (aqui chamado de **pré-filtro**).
- SCMs considerados novos, ou seja, de origem espontânea (aqui chamado de **pré-filtro**).
- Ciclo de vida igual ou superior a 3 horas e classifica os SCMs em curta ou longa duração (aqui chamado de **filtro_a**);
- Todos os SCMs, em pelo menos um momento do seu ciclo de vida, tiveram sua trajetória sobre a região do NEB (**filtro_b**);
- SCMs cujos deslocamentos, entre um passo de tempo e outro, foram menores do que 300km, para evitar ligações inexistentes entre SCMs diferentes (**filtro_d**). Esse filtro foi necessário pois, durante as análises, identificou-se SCMs sem qualquer relação uns com os outros pelo ForTraCC e identificados como um mesmo sistema.

- Para garantir que todos os SCMs estudados tiveram uma área mínima, na fase de gênese, de 150 pixels ou 2.400km² (**filtro_d**). Durante as análises alguns SCMs rastreados pelo ForTraCC apresentaram tamanho mínimo inferior a 150 pixels.

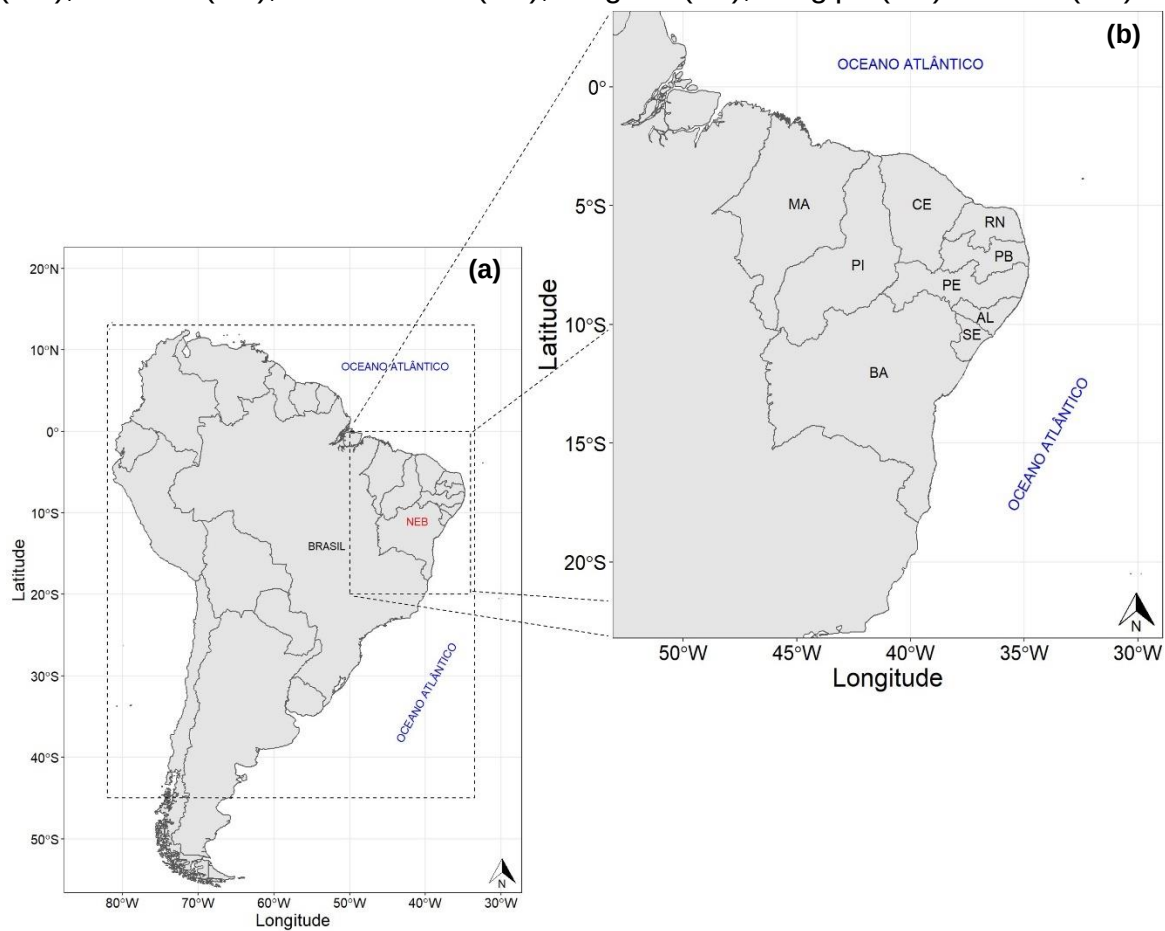
Nos critérios citados, os resultados do *pré-filtro* e do *filtro_a*, abrangem a América do Sul, em uma grade compreendida entre as latitudes de 13°N a 45°S, e longitudes de 82°W a 33°W. Já os resultados do *filtro_b* e do *filtro_d* correspondem aos SCMs que se formaram/atuaram sobre o NEB.

Vale destacar, que a metodologia adotada para o cálculo da densidade média é a mesma aplicada por Rehbein (2021) no estudo dos SCMs amazônicos. Consiste na elaboração de mapas de densidade por Kernel (mapas de calor) em que, para cada centro geométrico de SCM, é calculada uma função de densidade de probabilidade (VENABLES & RIPLEY, 2002), fornecendo assim uma medida estatística das áreas preferenciais (com maior densidade) de gênese, maturação e dissipação dos sistemas. A unidade utilizada é CG/grau², pois o centro geométrico (centro de massa do SCM) trata-se de uma de área circular.

Como o volume de saídas do ForTraCC é relativamente elevado (17 anos de dados), bem como para atender a todos os critérios anteriormente citados, foram feitas filtragens de todas as famílias de SCMs rastreadas. Para fazer a filtragem foi utilizado um pacote (desenvolvido por REHBEIN, 2021) na linguagem de programação R (R Core Team, 2020) denominado Percolator (versão 0.4.4), que está disponível para download em <https://github.com/salvati rehbein/percolator/>. O pacote visa facilitar e organizar as tarefas e inclui sub-rotinas em Fortran90 para ler e processar as saídas do ForTraCC, podendo ser usado em qualquer sistema operacional.

A utilização do pacote Percolator permitiu a obtenção de informações sobre a classificação de acordo com o tempo de vida desejado (curta e longa duração), sobre a hora e local (latitude e longitude) onde ocorreram as fases de gênese (início), de maturação (máxima expansão horizontal) e de dissipação (último momento em que se observam os limiares mínimos de tamanho e intensidade), além de outros parâmetros os quais foram úteis para estudar os SCMs na região do NEB. Por se tratar de critérios já validados e confiáveis, serão utilizados para estudar os SCMs na região do NEB, conforme a Figura 6.

Figura 6 - (a) América do Sul; (b) Região Nordeste do Brasil (NEB) com seus respectivos estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA)



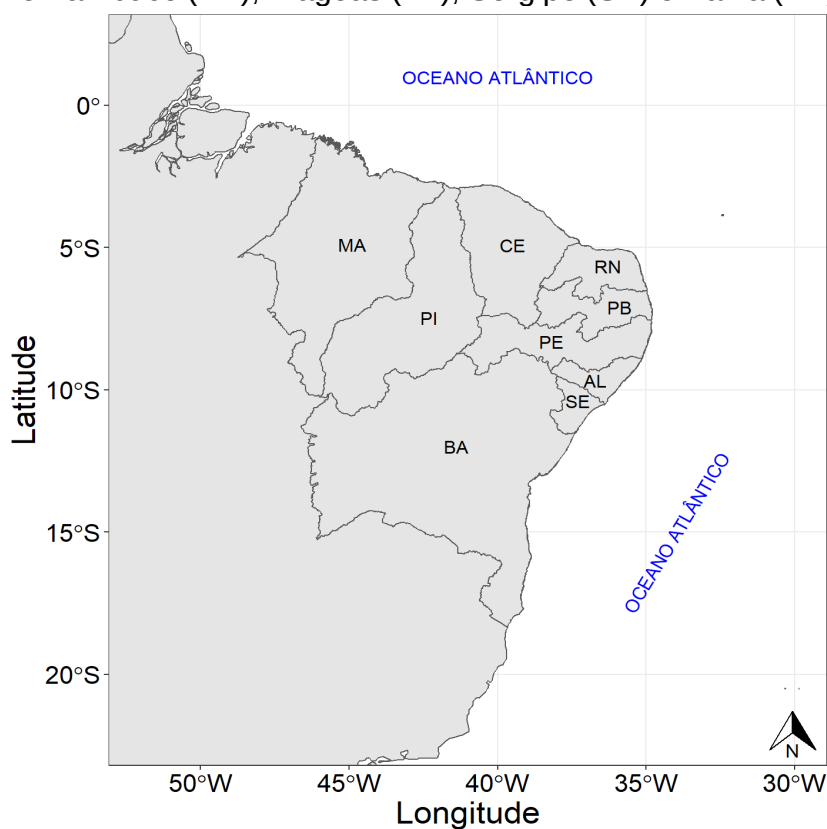
Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todo o período, o total de imagens de satélite processadas, utilizando o ForTraCC, foi de 290.400 (duzentos e noventa mil e quatrocentas). Informações a respeito da quantidade de imagens processadas a cada ano podem ser encontradas no Quadro 2 (APÊNDICE A).

O longo período de processamento permitiu criar uma climatologia do número de SCMs e da frequência relativa de SCMs que se formam sobre a região do NEB. Vale ressaltar que todos os SCMs considerados nesse estudo e rastreados pelo ForTraCC passaram, em algum momento do seu ciclo de vida, na região do NEB (Figura 7). É importante destacar que os resultados apresentados não fazem distinção entre sistemas cuja gênese foram sobre o oceano (oceânicos) ou sobre o continente (continentais).

Figura 7 - Região Nordeste do Brasil (NEB) com seus respectivos estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA)



Fonte: Autor.

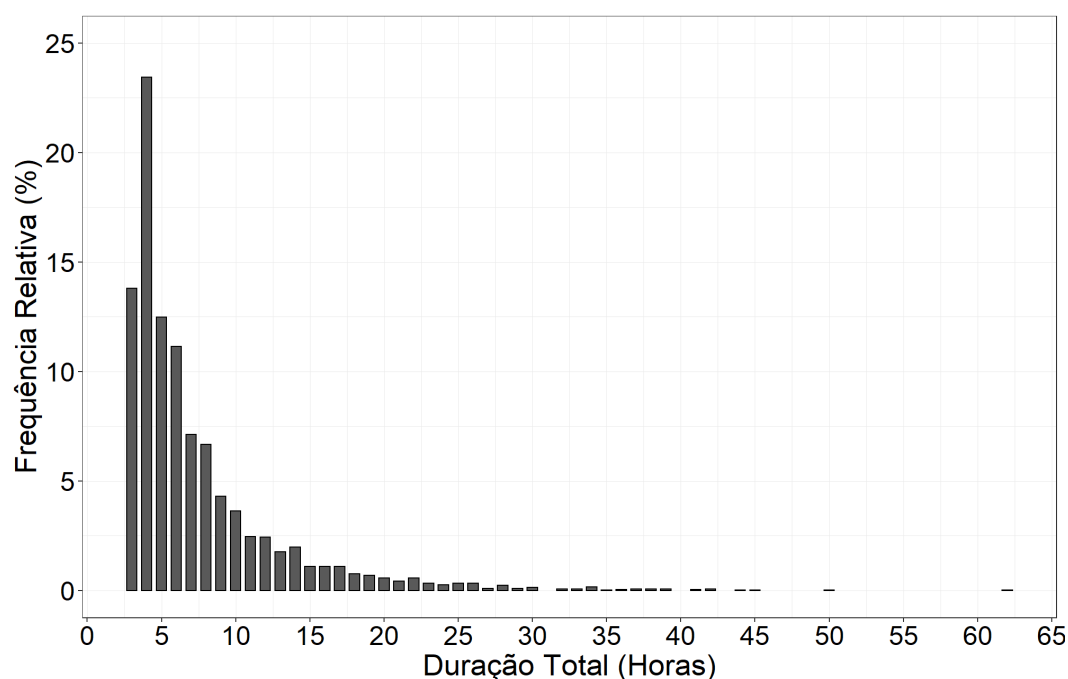
Assim, após essas considerações, na Tabela 5 (APÊNDICE B) é apresentada a quantidade de sistemas que ficaram após a aplicação dos filtros na seguinte ordem: pré-filtro; filtro_a; filtro_b; filtro_d. Os resultados do estudo são baseados no número de SCMs que resultaram com a aplicação do último filtro (filtro_d). Cabe destacar também a Tabela 6 (APÊNDICE C), a qual contém os meses sem informação (S.I.) e que, conseqüentemente, foram preenchidos com o valor NA (not a number), bem como os meses em que o ForTraCC não detectou sistemas convectivos (zero SCMs) sobre a região do NEB.

4.1 Climatologia da Ocorrência de SCMs na Região Nordeste do Brasil (NEB)

Nas últimas décadas, alguns estudos sobre SCMs na região tropical da América do Sul mostraram que grande parte desses sistemas possuem um tempo de duração menor do que 6 horas (VELASCO & FRITSCH, 1987; LAURENT et al., 2002; SALIO et al., 2007; REHBEIN, 2016).

Para o NEB, no entanto, os resultados mostram que, em média, há pouca diferença entre o número total de sistemas de curta e de longa duração. O total de SCMs detectados em todo o período de estudo foi de 5.329, sendo os sistemas de curta duração ligeiramente mais frequentes, com 50,5% (2.689), do que os sistemas com tempo de duração maior ou igual a 6 horas (longa duração), com 49,5% (2.640), conforme a Figura 8. Destaca-se os SCMs de curta duração com ciclo de vida de 4 horas, pois representam o maior percentual de ocorrência no NEB, com frequência relativa de 23%. Já os sistemas convectivos com tempo de duração maior ou igual a 12 horas representam um total de 19% de todos os SCMs que se formam na região.

Figura 8 - Climatologia da frequência relativa (%) da ocorrência de SCMs em relação ao tempo de duração (Horas) na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

O tempo médio de duração encontrado para os SCMs no NEB é de 7 horas (± 5 horas). A duração média dos SCMs com ciclo de vida menor (curta duração) é de 4 horas (± 1 hora), enquanto os sistemas com ciclo de vida maior (longa duração) possuem um tempo médio de 11 horas (± 5 horas).

Em seu estudo, Sakamoto (2009) verificou que os SCMs subtropicais cuja gênese se deram sobre o continente e oceano, tiveram tempo de vida médio de 12,3 horas e 12,1 horas, respectivamente. Já Velasco e Fritsch (1987) e Machado et al. (1998) também verificaram que os sistemas convectivos que se formam na Amazônia, região tropical, possuem tempo de vida menor, em torno de 1 a 3 horas, do que quando comparados a sistemas cuja gênese ocorrem em médias latitudes.

O tempo médio de duração dos SCMs obtidos está de acordo com os resultados encontrados por outros autores em regiões tropicais. Salio et al. (2007) encontraram durações entre 6 e 9 horas, enquanto Rehbein (2016) encontrou um tempo médio de 6 horas para SCMs com gêneses sobre o continente. Já Lyra et al. (2020), ao estudar os CCs (SCMs de longa duração) no NEB, encontraram um tempo de duração médio de 8 horas.

Ainda que a média anual de ocorrência de SCMs seja diferente, a frequência maior (menor) de sistemas de curta duração (longa duração) também foi encontrada por Rehbein (2016) ao estudar a região tropical da Bacia Amazônica, com 64% (36%).

A frequência maior de sistemas convectivos de curta duração e o baixo percentual de sistemas de longa duração, segundo Ferreira et al. (2003) e Salio et al. (2007), pode estar diretamente associada às características meteorológicas de uma determinada região. A atuação de sistemas meteorológicos de mesoescala e grande escala oferecem suporte à manutenção prolongada dos SCMs como, por exemplo, em regiões subtropicais onde há advecção de ar quente e úmido e, consequentemente, convergência de massa em baixos níveis da troposfera.

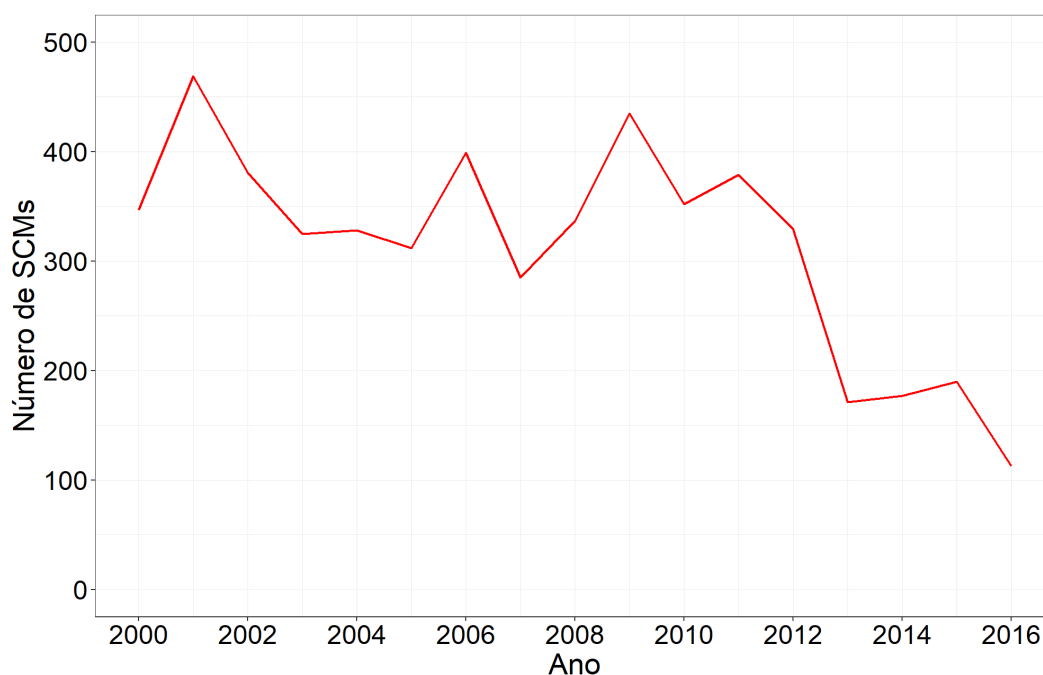
Na região do NEB, os principais sistemas que podem dar suporte para a manutenção mais prolongada dos SCMs atuam, com maior regularidade, nos meses de novembro a janeiro (VCANs e os sistemas frontais); no período de fevereiro a maio (ZCIT); e nos meses de maio a julho (DOLs). Destaca-se, contudo, que, mesmo tendo um período chuvoso bem definido, historicamente os anos com precipitações acima da média no NEB são mais raros, o que pode ocasionar uma maior irregularidade temporal e espacial da atuação dos principais sistemas de

mesoescala e de grande escala, os quais podem oferecer suporte a formação e a manutenção mais prolongada aos SCMs.

A climatologia gerada nesse estudo mostra que a média anual de ocorrência é de 321 SCMs na região do NEB, com um desvio padrão de 137, considerando todos os sistemas. Desse total, a média anual de sistemas convectivos de curta duração corresponde a 162 (± 60), enquanto a média anual de SCMs com ciclo de vida maior ou igual a 6 horas (longa duração) é um pouco menor, de 159 (± 95) sistemas.

A Figura 9 apresenta o número total de SCMs por ano rastreados pelo ForTraCC na região do NEB em todo o período de estudo. Os anos em que verificou-se mais episódios (acima da média) de SCMs no NEB foram os anos de 2001, 2002, 2006, 2009 e 2011 com 469 (+46%), 381 (+19%), 399 (+24%), 435 (+35%) e 2011 (+18%), respectivamente. As análises mostram que os anos de 2013, 2014, 2015 e 2016 se destacam pelo baixo número (abaixo da média) de SCMs na região do NEB, com 171 (-46%), 177 (-45%), 190 (-41%) e 113 (-65%), respectivamente.

Figura 9 - Número total de SCMs por ano rastreados pelo ForTraCC na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

De acordo com a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponíveis no endereço eletrônico <https://clima.inmet.gov.br/prec>, considerando a climatologia de 1981-2010, o ano de 2001 apresentou precipitações abaixo da média, enquanto os anos de 2002 e 2006 em torno da média, e nos anos de 2009 e 2011 as precipitações foram acima da média histórica.

É possível que a maior quantidade de SCMs nos anos de 2002, 2006, 2009 e 2011, esteja relacionada com a presença do fenômeno La Niña (Quadro 1) no oceano Pacífico Tropical e, conseqüentemente, com a atuação mais frequente dos sistemas atmosféricos, os quais contribuem com o disparo da atividade convectiva no NEB, principalmente no período em que a ZCIT exerce um papel importante no regime pluviométrico da região (MARENGO et al., 2011), de fevereiro a maio.

No ano de 2001, embora as precipitações tenham ficado abaixo da média histórica da região, é importante destacar que no início da estação chuvosa principal do NEB (fevereiro-maio), segundo os dados do Climate Prediction Center (CPC) (Quadro 1 - Anexo – A), foi observado no oceano Pacífico Tropical um episódio de La Niña com intensidade de fraca a moderada, o que explica o elevado número (acima da média anual) de SCMs.

O posicionamento da ZCIT no oceano Atlântico Tropical é outro fator que pode ter contribuído significativamente para a maior ocorrência de SCMs. Segundo Cardoso (2019), o posicionamento médio da ZCIT no trimestre MAM dos anos de 2001, 2002, 2006 e 2011 foi em torno de 3°S de latitude, com destaque para o ano de 2009 cujo posicionamento médio chegou a atingir 6°S de latitude, justificando a quantidade maior de SCMs nesses anos e também a maior precipitação, em especial no ano de 2009.

Destaca-se que de acordo com Molion e Bernardo (2000), o setor norte do NEB é a área mais influenciada pela atividade convectiva da ZCIT que, quando muito ativa, aumenta o gradiente de pressão entre a região equatorial e a subtropical, permitindo que uma maior quantidade de sistemas frontais se desloque até a região e, conseqüentemente, um número maior de episódios de ZCAS ocorra, o que facilita o processo de formação de SCMs na região. Veber et al. (2020) avaliaram o desenvolvimento dos processos convectivos influenciados pela presença dos sistemas frontais no NEB, no período de 2000 a 2009, e identificaram os anos de 2002 e 2007 como sendo os que mais apresentaram episódios de frentes frias na região, com um número total de 14 e 13 episódios, respectivamente.

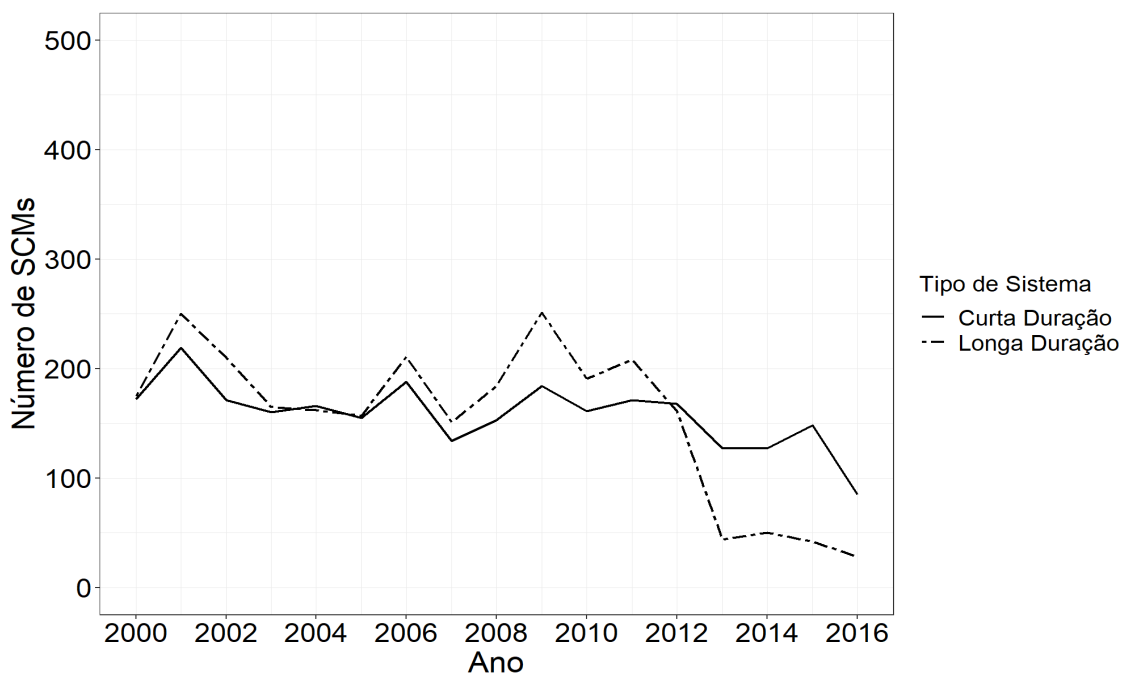
A partir do ano de 2013 até o ano de 2016 (Figura 9) os resultados mostram que há uma queda no número de SCMs observados no NEB. Nesse período, a região enfrentou uma das secas plurianuais mais prolongadas, desde que o fenômeno começou a ser monitorado no século 19. A partir de 2010, segundo Martins et al. (2017), os índices pluviométricos em boa parte dos estados do NEB ficaram abaixo da média histórica, com exceção do ano de 2011, no qual as precipitações foram consideradas em torno da média.

O decaimento na quantidade de SCMs verificado a partir do ano de 2013 sugere que, em anos considerados secos, a irregularidade da atuação da ZCIT e demais sistemas sinóticos que atuam na região (Sistemas Frontais, ZCAS, VCANs e DOLs), contribui para a redução no número de sistemas convectivos no NEB e, consequentemente, prejudica a qualidade da estação chuvosa da região.

Em anos de El Niño, no Pacífico Tropical, com intensidade de moderada a forte, como em 2015 e 2016 (Anexo - A), a redução pode ser ainda mais acentuada pois, segundo Gonzales et al. (2013), esse fenômeno altera o posicionamento da Célula de Walker (célula de circulação zonal), e o ar quente e úmido que ascende sobre a região do Pacífico Equatorial ao atingir a alta troposfera se resfria e desce, originando um ramo subsidente sobre o norte da América do Sul, inibindo a formação de nuvens verticalmente bem desenvolvidas no Norte e no Nordeste brasileiro e, consequentemente, prejudicando a formação de SCMs.

A Figura 10 mostra o número de SCMs, separados por ciclo de vida, de curta e longa duração rastreados pelo ForTraCC do ano 2000 até o ano de 2016. As análises mostram que a partir do ano de 2013 houve um decréscimo na quantidade de SCMs tanto de curta quanto de longa duração. Para os SCMs de curta duração, cuja média anual é 162 (± 60), os anos de 2001, 2006 e 2009 se destacam por terem ficado acima da média com percentuais de +35% (219 SCMs), +16% (188 SCMs) e +13% (184 SCMs), enquanto os anos em que ocorreram os menores percentuais (abaixo da média) de casos foram os anos de 2007 (-17%), 2013 (-21%), 2014 (-21%), 2015 (-73%) e 2016 (-47%).

Figura 10 - Número total anual de SCMs de curta e longa duração rastreados pelo ForTraCC na região do NEB. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Os SCMs de longa duração, cuja média anual é de 159 (± 95), apresentam resultados em que os maiores percentuais (acima da média) foram nos anos de 2001, 2002, 2006, 2009 e 2011 com +57% (250), +32% (210), 33% (211), +58% (251) e +31% (208), respectivamente.

Ao comparar a quantidade de SCMs de diferentes ciclos de vida, no período em que se observou na região do NEB uma das secas plurianuais mais prolongadas já registradas, as análises apontam que houve um decréscimo significativo na quantidade de sistemas com tempo de duração maior ou igual a 6 horas (longa duração), cujos valores foram de -72% (2013), -68% (2014), -73% (2015) e -82% (2016). A quantidade menor de SCMs observada nos anos de 2015 e 2016 no NEB, concorda com um estudo recente de Rehbein (2016), que analisou os SCMs sobre a Bacia Amazônica em 2014-2015 e verificou, durante o programa GoAmazon2014/5, que o número de sistemas convectivos e a precipitação na bacia, foi cerca de 50% menor quando comparado com a climatologia, elaborada pela autora, referente ao período de 2000-2013.

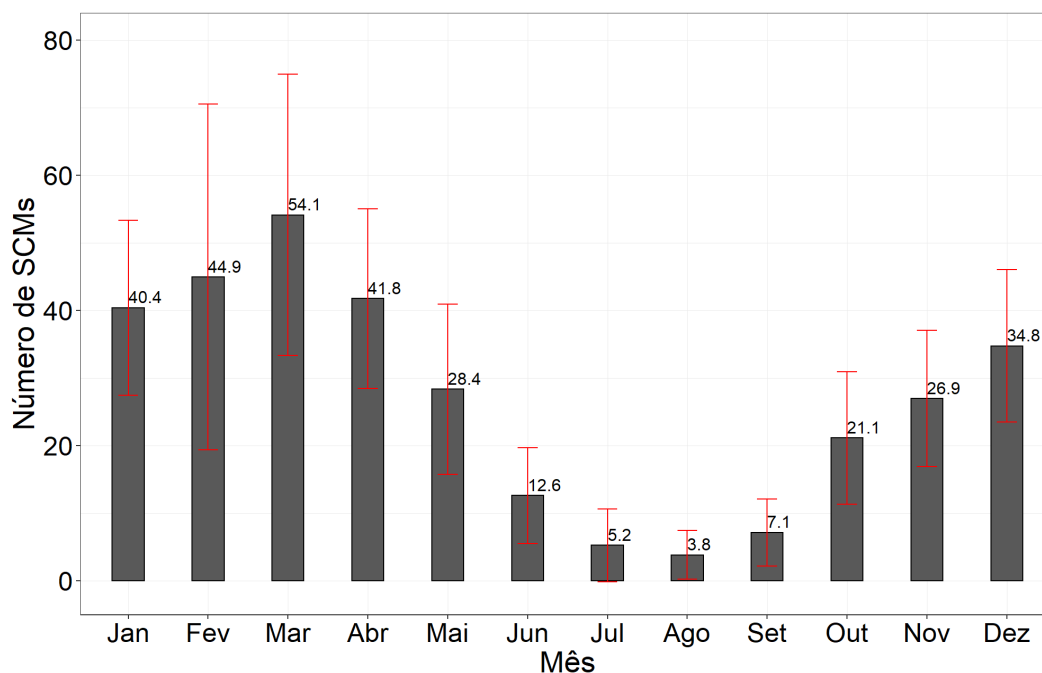
Nota-se que, mesmo em anos considerados secos (2013 a 2016), não há um decaimento significativo na quantidade de SCMs de curta duração o que, em parte, pode ser explicado como resultado sobretudo do ciclo de aquecimento diurno (SALIO et al., 2007), que também é um dos fatores condicionantes para o disparo da convecção e formação de aglomerados convectivos.

O decréscimo na quantidade de SCMs de longa duração de 2013 a 2016, mostra que a qualidade da estação chuvosa do NEB pode estar relacionada com a maior frequência de sistemas convectivos mais duradouros, ou seja, quanto mais SCMs de longa duração se formar sobre a região, melhor pode ser a qualidade da estação chuvosa. Segundo Vila et al. (2006), SCMs de longa duração crescem rápido nas primeiras 4 horas e mantêm-se no estágio maduro, em média, até as 6 primeiras horas de vida, quando começam a entrar na fase de decaimento, levando um tempo consideravelmente maior para diminuir de tamanho e, conseqüentemente, tendem a precipitar mais. No Rio Grande do Sul, região subtropical, as precipitações associadas a SCMs com ciclo de vida superior a 6 horas, entre outubro e dezembro de 2003, contribuíram para aproximadamente dois terços de toda a chuva observada no período de análise (VIANA et al., 2009).

A climatologia da distribuição mensal e o desvio padrão da ocorrência de SCMs na região do NEB é apresentada na Figura 11 para todos os SCMs, na Figura 12(a) para os sistemas de curta duração e na Figura 12(b) para os sistemas de longa duração.

Os resultados encontrados mostram, na Figura 11, que o número médio de casos de SCMs no NEB começa a aumentar a partir do mês de outubro, com 21 SCMs (± 10), atinge um máximo no mês de março, com 54 SCMs (± 21), e a partir do mês de abril com 42 (± 13) SCMs começa a decair, apresentando um mínimo no mês de agosto, com 4 SCMs (± 3). Ainda conforme a Figura 11, os maiores valores de desvio padrão foram encontrados nos meses de fevereiro (± 25) e de março (± 21), enquanto os menores valores de desvio padrão foram encontrados nos meses de agosto (± 3) e setembro (± 5).

Figura 11 - Média mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB. As barras vermelhas representam o desvio padrão. Período utilizado: 2000 a 2016



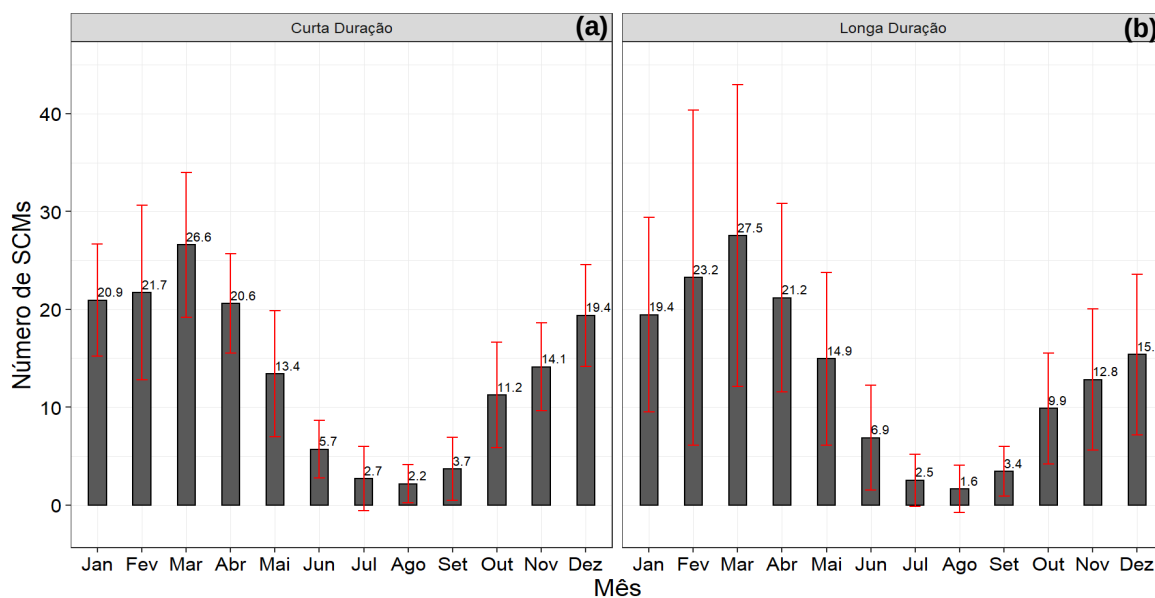
Fonte: Autor.

Analisando a quantidade média de casos mensais de SCMs de curta e longa duração (Figura 12) observa-se que, de janeiro a novembro, não há diferença significativa no número de ocorrências. No entanto, para o mês de dezembro fica evidente uma maior (menor) quantidade de SCMs de curta duração (longa duração), com 19 (± 15) sistemas em média e desvio padrão de 5 (± 8). Tanto para SCMs de curta duração quanto para os sistemas com tempo de duração maior ou igual a 6 horas (longa duração), outubro se caracteriza como o mês em que o número de sistemas convectivos começa a aumentar; março é o mês onde há um máximo na quantidade de sistemas; abril se caracteriza como o mês em que começa a haver um decaimento; e agosto é o mês em que há um mínimo na quantidade de sistemas convectivos no NEB.

Apesar da ocorrência mensal do número de SCMs ser similar para sistemas de curta e longa duração, conforme a Figura 12, observa-se que os desvios mensais encontrados para os sistemas de longa duração (Figura 12.b), com exceção do trimestre julho-agosto-setembro (JAS), são maiores quando comparados com os desvios dos SCMs de curta duração (Figura 12.a), indicando que há uma maior

variância em suas ocorrências, principalmente no período de novembro a julho, período chuvoso do NEB.

Figura 12 - Média mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB separados por ciclo de vida: (a) Curta duração; (b) Longa duração. As barras vermelhas representam o desvio padrão. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Nota-se que em anos nos quais a precipitação no NEB ficou de normal a acima da normal climatológica (como 2002, 2006, 2009 e 2011) a quantidade de SCMs de longa duração ficou acima da média anual de sistemas com tempo de vida maior ou igual a 6 horas, que nesse estudo é de 159 (± 95).

Os resultados sugerem que em anos normais ou chuvosos no NEB, a presença mais frequente dos sistemas sinóticos (sistemas frontais, ZCAS, VCANs, ZCIT e DOLs) pode colaborar para uma quantidade maior de SCMs de longa duração se formar e, conseqüentemente, contribuir para uma melhor qualidade na estação chuvosa do NEB. Quanto aos maiores desvios na ocorrência de SCMs com tempo de vida maior ou igual a 6 horas (longa duração), a hipótese mais provável é a variabilidade interanual da precipitação no NEB, considerada bastante acentuada e conhecida por alternar entre anos chuvosos, normais e secos.

4.2 Climatologia da Frequência Relativa Mensal dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

A Figura 13, apresenta a climatologia da frequência relativa (%) mensal da ocorrência de SCMs para: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração.

Na Figura 13(a), bem como na Figura 13(b) e na Figura 13(c), os resultados evidenciam outubro como sendo o período em que a frequência dos SCMs começa a aumentar no NEB, e março se configura como sendo o mês em que há uma máxima frequência. Ainda que o mês de abril possua uma frequência elevada, é o período em que começa a haver o decaimento da ocorrência de SCMs no NEB, enquanto agosto é o mês no qual a frequência é mínima.

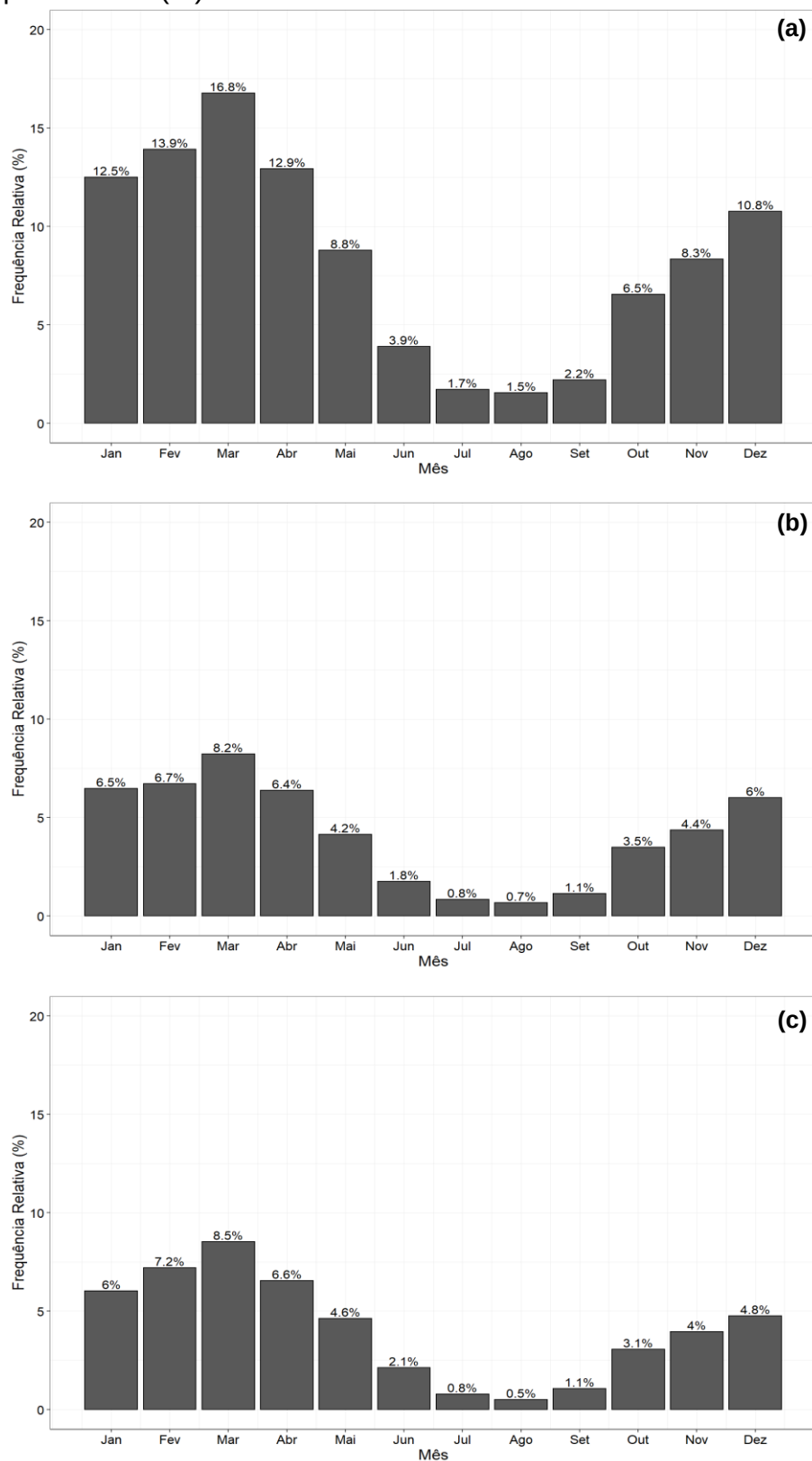
Considerando todos os sistemas, na Figura 13(a), 31,6% dos SCMs que ocorrem na região se concentram no trimestre de novembro-dezembro-janeiro, período em que os principais sistemas sinóticos indutores de convecção no NEB são os sistemas frontais, ZCAS e VCANs, com destaque para o mês de janeiro com 12,5%, enquanto os meses de novembro e dezembro possuem uma frequência de 8,3% e 10,8%, na devida ordem.

Em relação ao total de SCMs observados no NEB a maior frequência, com 52,4% de todos os sistemas convectivos, ocorre no quadrimestre fevereiro (13,9%), março (16,8%), abril (12,9%) e maio (8,8%), período em que o principal sistema que contribui para o disparo da atividade convectiva na região é a ZCIT.

Os meses de junho, julho e agosto, cujo principal sistema atmosférico atuante no NEB são os DOLs, totalizam 7,1% de todos os SCMs que ocorrem, com destaque para o mês de junho com 2,1%.

Ressalta-se que o mês de maio é o último da estação chuvosa principal no NEB e, nesse período, sistemas sinóticos como sistemas frontais, ZCAS e VCANs atuam de forma mais restrita, o que diminui de forma significativa a atividade convectiva na região. Nesse período, a ZCIT começa a retornar para a sua posição climatológica em torno da linha do equador, porém ainda contribui para o disparo da convecção em algumas áreas do norte da região.

Figura 13 - Climatologia da frequência relativa (%) mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Acima das barras estão os valores percentuais (%) de cada mês. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Avaliando-se os resultados para SCMs com diferentes ciclos de vida, curta e longa duração, conforme a Figura 13(a) e Figura 13(b), as análises revelam que há pouca diferença na frequência de ocorrência em todos os meses do ano. No entanto, no trimestre novembro-dezembro-janeiro (NDJ), a frequência de SCMs de curta duração (longa duração) é maior (menor), com 16,9% (14,8%).

Na estação chuvosa principal, no quadrimestre fevereiro-março-abril-maio (FMAM) ocorre o inverso, a frequência dos sistemas convectivos de longa duração (curta duração) é maior (menor), com 26,9% (25,5%). O trimestre junho-julho-agosto (JJA) é o período em que a frequência de SCMs de curta e longa duração é praticamente igual, com 3,3% e 3,4%, respectivamente. Em uma análise da distribuição anual da ocorrência de CCMS na América do Sul, Conforte (1997), mostrou que a maior frequência ocorreu nos meses de primavera, seguidos pelo outono, verão e inverno, com 39%, 27%, 22% e 12%, respectivamente.

A frequência maior dos SCMs de curta duração no trimestre NDJ permite inferir que os sistemas sinóticos atuantes nesse período (sistemas frontais, ZCAS e VCANs), estão melhor correlacionados com a formação de sistemas convectivos de curta duração.

Embora sejam importantes para o disparo da convecção, esses sistemas se caracterizam por permanecer pouco tempo na região onde atuam e, por isso, oferecem suporte dinâmico e termodinâmico por um tempo menor, quando comparado com sistemas de grande escala, como a ZCIT. O ciclo médio de vida de um VCAN varia de 4 a 10 dias podendo, em alguns casos, chegar a 15 dias de duração (CALBETE et al., 1996). Segundo Chamis (2015), o período em que a ZCAS ocorre com maior frequência é de outubro a março, porém o número de casos por período é baixo, com uma média de 4,5 episódios e um tempo de duração médio de 5 dias.

Nota-se o importante papel que a ZCIT exerce na gênese de sistemas convectivos mais duradouros no NEB pelo fato de, no quadrimestre FMAM, haver uma frequência maior dos SCMs de longa duração. Segundo Uvo e Nobre (1989a), flutuações na nebulosidade associada a ZCIT tem uma escala temporal da ordem de 10 a 20 dias e podem, inclusive, estar relacionada a propagação de DOLs.

O comportamento observado no mês de março e de fevereiro, pode ser explicado pela presença da ZCIT sobre o NEB e sua interação com outros sistemas de mesoescala (VCANs, DOLs etc.), a qual gera intensa instabilidade e convergência de massa em baixos níveis da troposfera quando está posicionada próxima ou sobre a região, o que pode fazer com que os SCMs, após a sua formação, tenham um suporte dinâmico e termodinâmico mais prolongado, contribuindo para terem um ciclo de vida mais longo (superior a 6 horas).

Destaca-se que Lyra et al. (2020) estudaram 65 eventos de CCMs ocorridos do ano de 2008 a 2017 no NEB, e constataram que 39,2% dos casos se formaram no mês de março, seguido do mês de fevereiro com 15,4% dos casos, comportamento semelhante ao observado nesse estudo.

4.3 Climatologia da Frequência Relativa Horária dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

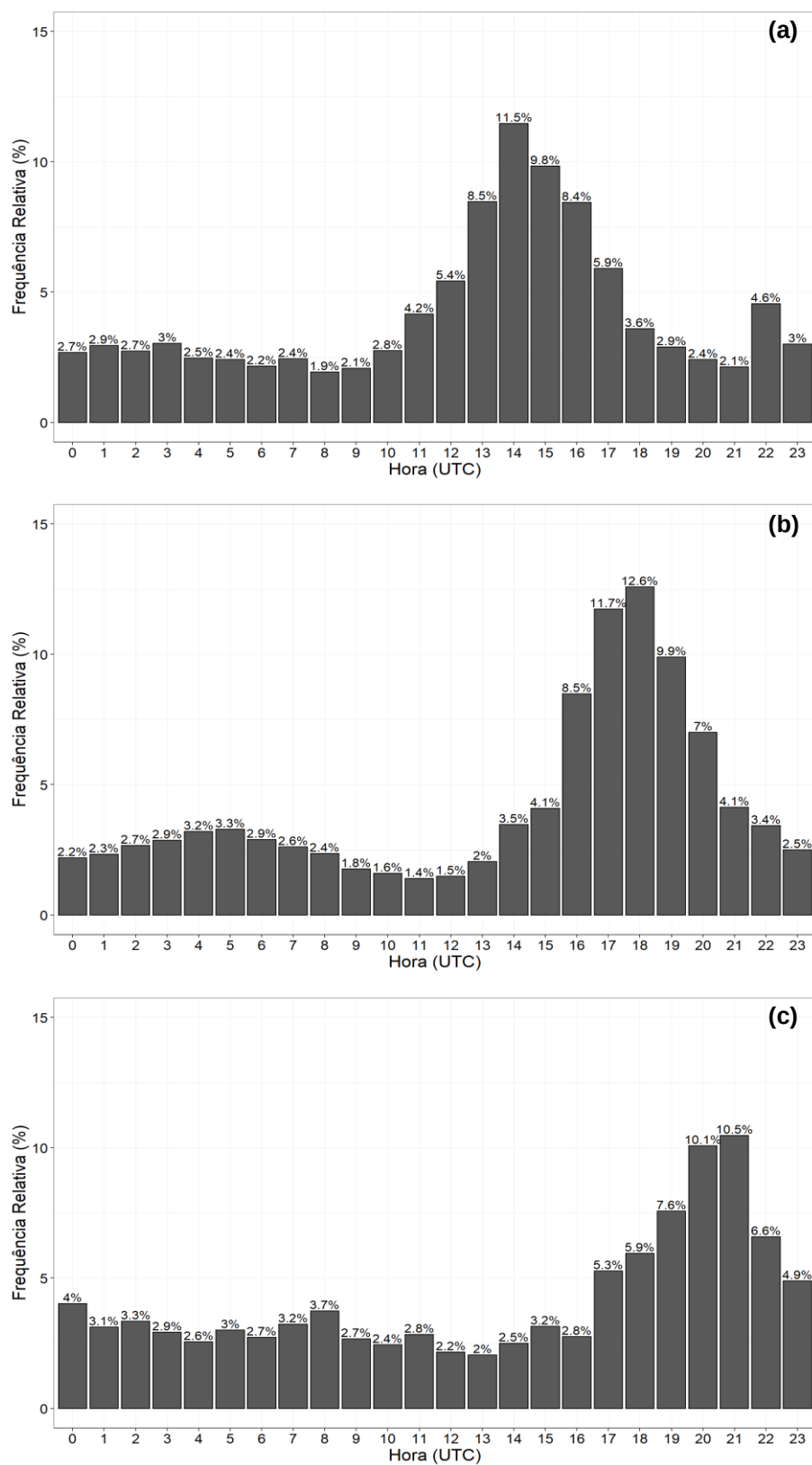
A Figura 14 apresenta os horários preferenciais dos SCMs quanto às três fases distintas: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Da mesma maneira a Figura 15 e a Figura 16 mostram os horários preferenciais nas três fases (gênese, maturação e dissipação) dos SCMs de curta e de longa duração, respectivamente. Nos gráficos a hora está em UTC (Universal Time Coordinated), sendo necessário subtrair 3 horas para deixar se de acordo com a hora local do NEB.

A Figura 14(a) mostra que há ocorrência de SCMs em todos os períodos, mas a maior parte dos sistemas no NEB ocorre entre o período da manhã e tarde, pois o período preferencial de gênese ocorre das 13 às 16UTC, concentrando 38,2% de todos os sistemas convectivos que se formam na região, com uma frequência máxima às 14UTC. Apesar do horário das 15UTC ter uma frequência elevada, se caracteriza por ser o horário em que começa a haver o decaimento na quantidade de SCMs até o período noturno às 22UTC, onde ocorre outro pico. A partir das 23UTC a frequência dos SCMs diminui bastante até às 8UTC, horário em que a quantidade é mínima, e voltando a aumentar a partir das 11UTC.

Conforme a Figura 14(b), o horário de maturação dos SCMs no NEB ocorre, em média, de 3 a 4 horas após a sua gênese, principalmente no período das 16 às 19UTC, sendo às 18UTC o horário em que a frequência é máxima. A partir das 19UTC, há um gradativo decaimento até às 5UTC, onde há outro pico na frequência de SCMs atingindo o estágio maduro, e a partir desse horário decresce novamente até às 11UTC onde a frequência é mínima, voltando a aumentar a partir das 14UTC.

O período preferencial de dissipação dos sistemas convectivos no NEB, conforme a Figura 14(c), fica compreendido das 19 às 22UTC, com uma máxima frequência às 21UTC. Às 22UTC, embora tenha uma frequência elevada, a quantidade de SCMs se dissipando apresenta declínio e se torna estável, até o horário em que atinge a frequência mínima às 13UTC, e volta a aumentar a partir das 17UTC.

Figura 14 - Climatologia dos SCMs quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Ao considerar todos os SCMs, quanto ao horário de gênese os resultados encontrados para o NEB são ligeiramente diferentes dos sistemas convectivos amazônicos, continentais e oceânicos, os quais se formam a maior parte no período das 17 às 19UTC, REHBEIN (2016).

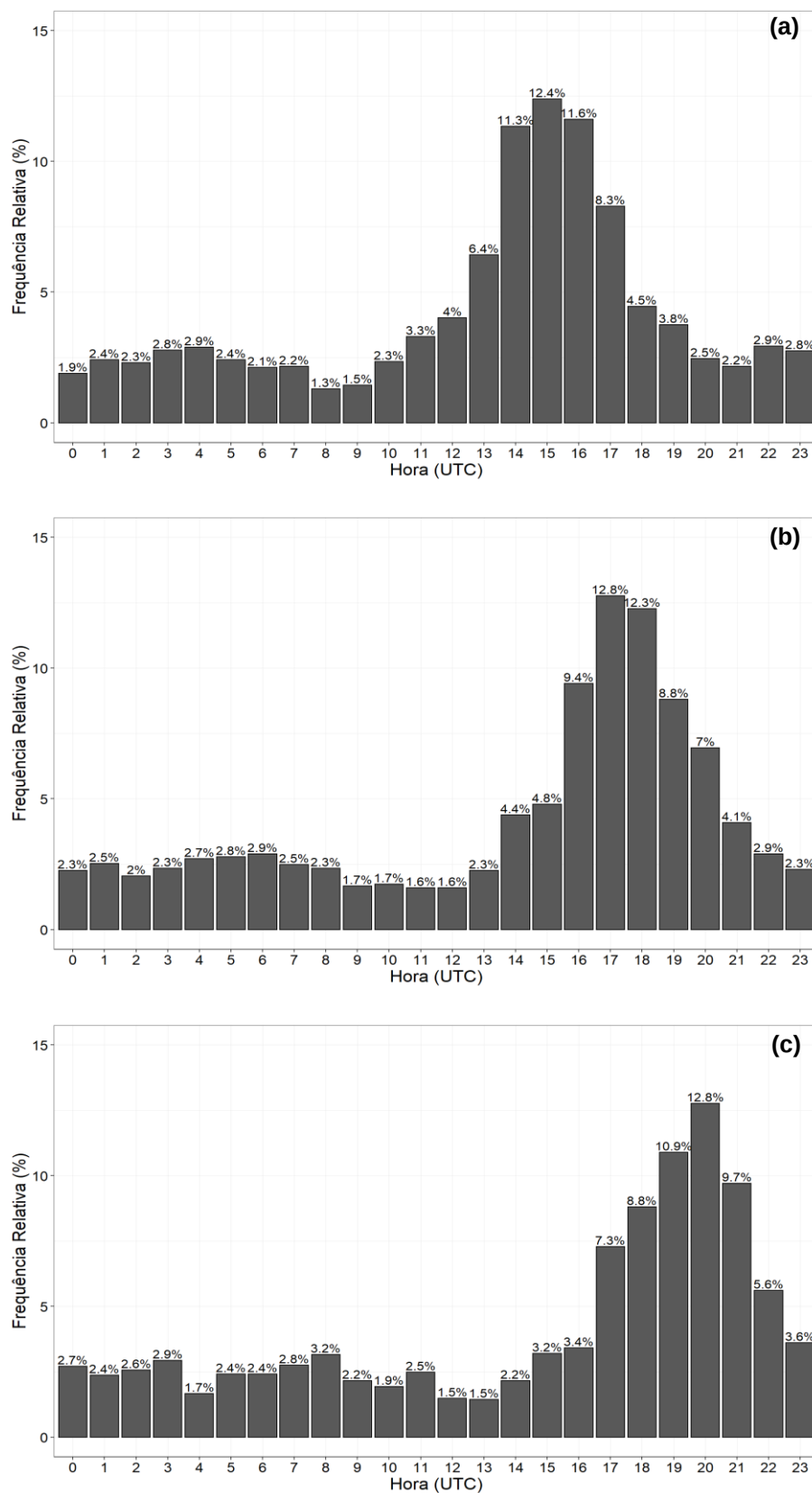
Os horários preferenciais de maturação e dissipação, acerca dos sistemas convectivos amazônicos, também são diferentes, pois os SCMs da Bacia Amazônica estão compreendidos no período das 20 às 22UTC e das 22 às 00UTC, respectivamente, REHBEIN (2016). Diferentes horários preferenciais de gênese (03UTC), maturação (06UTC) e dissipação (12UTC) também foram encontrados por Segalin (2012) para a região centro-oeste do Brasil, considerada de clima tropical. Esses resultados também são ligeiramente diferentes dos encontrados por Sakamoto (2009) na região subtropical, cujos horários preferenciais de gênese, maturação e dissipação para os SCMs continentais (oceânicos) são das 18 às 21UTC (03 às 06UTC), das 21 às 00UTC (06 às 09UTC) e das 00 às 03UTC (09 a 12UTC), respectivamente.

Embora as três fases (gênese, maturação e dissipação) dos SCMs do NEB ocorram em horários distintos de outras regiões tropicais, como na Bacia Amazônica e no centro-oeste do Brasil, o tempo de duração que os sistemas convectivos do NEB levam para atingir o estágio de maturação é bastante similar a outros estudos (SEGALIN, 2012; REHBEIN, 2016) pois ocorrem em média, de 2 a 3 horas após a sua fase inicial. Vale ressaltar ainda que, assim como para outras regiões estudadas, os SCMs no NEB têm, em sua maioria, gênese entre o período da manhã e da tarde, por causa do máximo aquecimento da superfície.

Em relação a gênese, no NEB, os SCMs de curta e de longa duração possuem horários de máxima ocorrência bastante similares, com uma diferença de uma a duas horas mais cedo para os sistemas com ciclo de vida maior ou igual a 6 horas. A máxima ocorrência de gênese dos SCMs de curta duração (longa duração) ocorre das 14 às 17UTC (12 às 15UTC), concentrando a maior parte dos sistemas que se formam na região, com 43,6% (36,2%).

Às 15UTC é o horário em que ocorre a máxima frequência de gênese de sistemas com ciclo de vida curto (Figura 15.a). A partir das 16UTC começa a haver um decaimento na frequência dos SCMs de curta duração, até chegar no horário em que a quantidade de sistemas é mínima, às 08UTC, e volta a aumentar a partir das 12UTC.

Figura 15 - Climatologia dos SCMs de curta duração quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

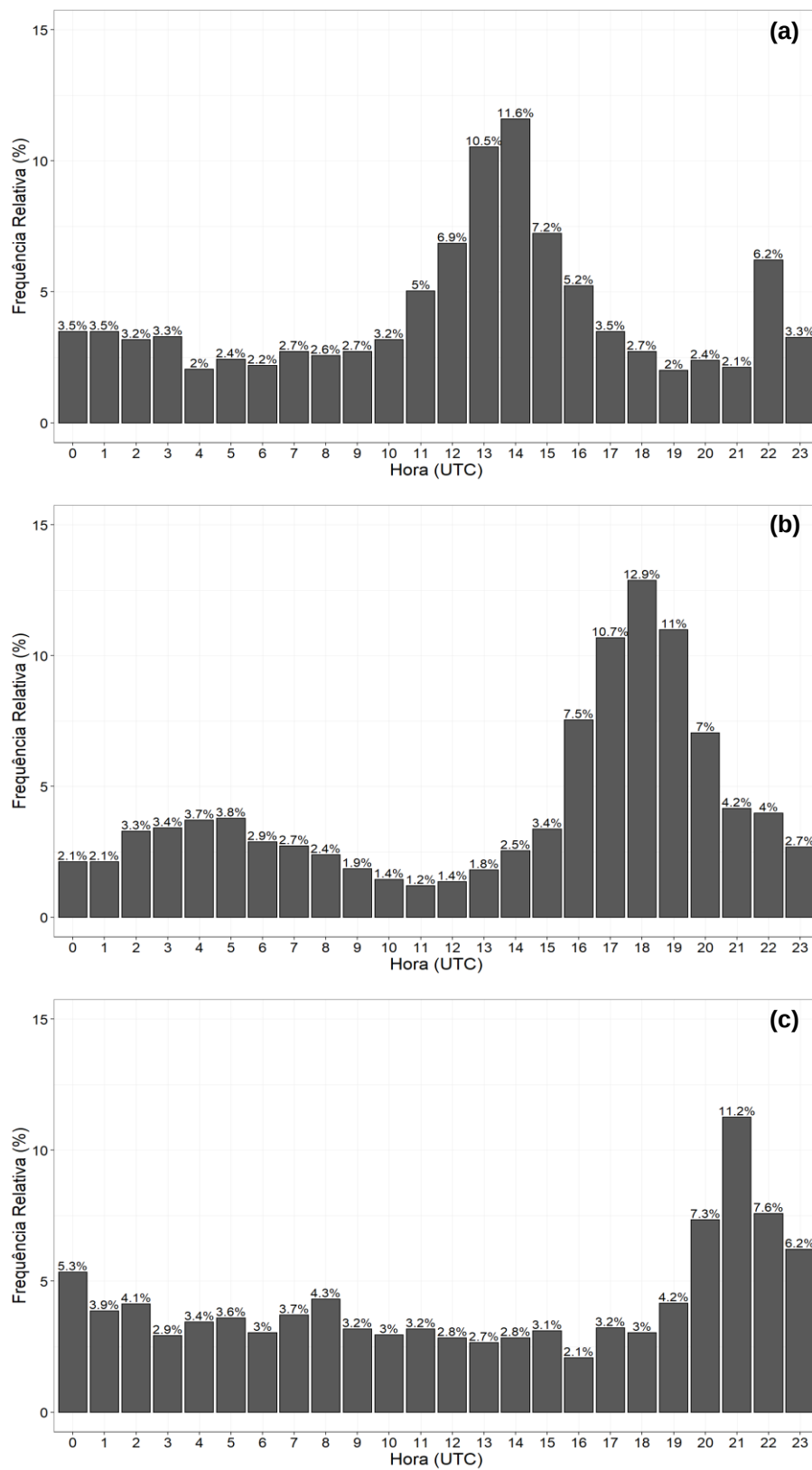
Para os sistemas de longa duração a frequência de gênese é máxima às 14UTC (Figura 16.a) e começa a decrescer gradativamente a partir das 15UTC, até chegar às 22UTC, quando há outro máximo. Após, a quantidade de sistemas volta a diminuir, até chegar no horário em que a quantidade de SCMs é mínima, às 04UTC.

O pico de gênese de SCMs encontrado a noite (às 22UTC), também foi observado por outros autores que estudaram SCMs com ciclo de vida mais longos em regiões tropicais (LYRA et al., 2020; REHBEIN, 2016; SEGALIN, 2012), o que evidencia que SCMs mais duradouros também ocorrem com relevante frequência no período noturno na região do NEB.

Embora necessite de mais investigações, a explicação mais provável para um segundo pico na ocorrência de SCM as 22UTC, pode estar relacionada a máxima atividade convectiva sobre os oceanos tropicais e subtropicais, inclusive em algumas áreas continentais, a qual, segundo Gray e Jacobson (1977), ocorre no período noturno. Ainda, segundo os autores, esse comportamento também pode resultar da variação diurna e noturna do resfriamento radiativo entre áreas com e sem cobertura de nuvens.

Os horários preferenciais para a fase de maturação são praticamente iguais para os SCMs de curta duração (Figura 15.b) e longa duração (Figura 16.b). No entanto, o tempo médio no qual um SCM leva para atingir o estágio maduro diferem, sendo de 2 horas (4 horas) para os sistemas de curta duração (longa duração). A fase de dissipação de SCMs de curta duração (Figura 15.c) e longa duração (Figura 16.c) também apresenta horários preferenciais diferentes. No NEB os sistemas convectivos de curta duração (longa duração) dissipam-se com mais frequência no período das 18 às 21UTC (20 as 23UTC), apresentando um máximo no período das 20UTC (21UTC).

Figura 16 - Climatologia dos SCMs de longa duração quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Embora uma quantidade relativamente elevada de SCMs de curta duração (longa duração) tenham gênese no período noturno, Figura 15.a (Figura 16.a), o fato de 62,3% (49,6%) de todos os sistemas se formarem entre as 12 e às 19UTC, deixa evidente que o aquecimento diurno é uma forçante que tem um papel fundamental na formação de aglomerados convectivos no NEB, independente do tempo total de duração dos SCMs. A elevada frequência de SCMs de curta duração no período da manhã a tarde, segundo Velasco e Fritsch (1987), pode ser reflexo do forte aquecimento radioativo no qual o NEB está submetido uma vez que está localizado em uma área tropical. Já os sistemas mais longos, de acordo com Sakamoto (2009), além do aquecimento radiativo necessitam também de uma forçante sinótica e de mesoescala mais bem definida para a sua gênese, bem como para a sua manutenção.

Observa-se que o horário em que os sistemas de curta duração (longa duração) tem frequência máxima de gênese, às 15UTC (14UTC). É possível que esse comportamento também esteja associado ao forte aquecimento radioativo, pois esse acarreta um aquecimento diferencial entre o continente e o oceano adjacente, ocasionando a brisa marítima no início da tarde. As maiores (menores) temperaturas sobre a superfície do continente (oceano) no início da tarde, faz com que a pressão fique menor (maior) na baixa troposfera, fazendo com que o ar se desloque do oceano para o continente, induzindo a convergência de massa nos baixos níveis sobre a superfície continental.

De acordo com Teixeira (2008), a atuação da brisa marítima, cujo deslocamento pode chegar a mais de 300km de distância, em conjunto com outros sistemas sinóticos nos meses mais chuvosos da região, contribui para um maior desenvolvimento das nuvens. Contudo, apesar de o aquecimento da superfície demonstrar ser um fator importante no processo de gênese dos SCMs, vale observar que os mecanismos dinâmicos são os principais responsáveis por sua manutenção (BARBOSA & CORREIA, 2005).

Outro ponto importante a ser destacado é que, ao comparar a frequência de sistemas de curta e de longa duração no período da noite, os SCMs de longa duração (curta duração) possuem uma frequência maior (menor) de gênese, com 37% (28,2%), considerando o período das 21 às 08UTC. Um estudo recente de Lyra et al. (2020) sobre os CCMs no NEB, demonstrou uma maior frequência no período noturno, as 00UTC, mas também com formações em outros horários.

Embora os SCMs noturnos tenham como forçante principal fatores dinâmicos, tanto para a sua formação como para a sua manutenção, esses sistemas também podem atingir tamanhos consideráveis, no tempo e no espaço, e ocasionar eventos extremos de precipitação, como o caso de CCM que ocasionou 270 mm de precipitação na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará (SOUZA & ALVES, 1998).

4.4 Climatologia do Tamanho Médio (km²) dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

A Tabela 3 mostra a climatologia das áreas médias (km²), com os respectivos desvios padrão, dos SCMs quanto as diferentes fases (gênese, maturação e dissipação) e quanto ao ciclo de vida (todos, curta duração e longa duração).

Em geral, a área média encontrada na fase de gênese dos SCMs no NEB foram de 5.796km², enquanto nas fases de maturação e dissipação os sistemas apresentam tamanho médio de 50.020km² e 13.391km², respectivamente. Esses resultados estão de acordo com um estudo de Sakamoto (2012) sobre os SCMs no Ceará e vizinhança, no qual mostrou que os sistemas continentais (oceânicos) possuem, em média, 60.000km² (63.000km²). Destaca-se o fato dos SCMs tropicais no NEB possuírem tamanho médio menor, na fase de maturação, quando comparado aos sistemas subtropicais cujos tamanhos são de 160.000km² para os continentais, e 98.000km² para os oceânicos, segundo Sakamoto (2009).

Os SCMs de curta duração, na fase inicial, possuem uma área quase duas vezes menor do que os sistemas com ciclo de vida longo. A fase de maturação é a que apresenta a diferença mais significativa, pois ao comparar os sistemas levando em consideração o seu ciclo de vida, quando atingem o seu tamanho máximo em área, os SCMs de curta duração (longa duração) são, em média, 5 vezes menores (maiores).

O maior tamanho dos SCMs de longa duração, tanto na fase inicial quanto na fase de maturação, deixa evidente a existência de uma relação entre o tamanho de um sistema e o tempo de duração. Machado et al. (1998) e Vila et al. (2006) mostraram que o tamanho dos SCMs está diretamente relacionado ao ciclo de vida, ou seja, quanto maior o tempo de duração do sistema, maior tende a ser a sua área. Na literatura, outros trabalhos mostram a relação existente entre a duração de um SCM e o seu tamanho (VILA, 2004; MACHADO & LAURENT, 2004; EICHHOLZ, 2011; EICHHOLZ & CAMPOS, 2014).

Os SCMs com ciclo de vida longo, apresentaram resultados ligeiramente diferentes (menores) de um estudo recente de Lyra et al. (2020) para o NEB bem como ao de Blamey e Reason (2012) para a África do Sul, cujos valores médios encontrados da área foram de 120.000km² e 121.000km², respectivamente.

Um estudo de Conforte (1997) mostrou que na América do Sul os CCMS possuem em média uma área de 190.000km², mas em alguns casos o tamanho pode ser, inclusive, superior. Em relação a América do Norte (AN), Velasco e Fritsch (1987) verificaram similaridades entre os sistemas com ciclo de vida longo, com exceção do tamanho, pois, segundo os autores, os sistemas convectivos da América do Sul são, em média, 60% maiores.

Tabela 3 - Climatologia das áreas médias (km²), com desvio padrão, dos SCMs do NEB de acordo com a fase e o ciclo de vida. Período utilizado: 2000 a 2016

Fase dos SCMs	Ciclo de Vida	Área Média (km²) (Desvio Padrão)
Gênese	Todos	5.796 (±21.803)
	Curta Duração	4.228 (±6.990)
	Longa Duração	7.392 (±30.082)
Maturação	Todos	50.020 (±86.453)
	Curta Duração	16.816 (±19.049)
	Longa Duração	83.839 (±111.592)
Dissipação	Todos	13.391(±32.976)
	Curta Duração	7.925 (±14.395)
	Longa Duração	18.959 (±43.851)
Todo o Ciclo de Vida	Todos	23.585 (±14.831)
	Curta Duração	10.127 (±4.731)
	Longa Duração	37.293 (±25.118)

Fonte: Autor.

Na fase de dissipação também fica evidente uma diferença na área média dos SCMs de curta e longa duração, sendo os sistemas convectivos com ciclo de vida longo (ciclo de vida curto) duas vezes maiores (menores).

Ao comparar o tamanho dos SCMs de curta e longa duração nas fases inicial e final, verifica-se que na fase de gênese os sistemas possuem um tamanho menor do que na fase de dissipação. Porém, cabe destacar que o fato do tamanho dos

SCMs na fase de dissipação serem maiores do que na fase de gênese, está relacionado com o critério de temperatura no topo da nuvem, pré-estabelecido para o ForTraCC deixar de rastrear o sistema convectivo independente do seu tamanho.

Considerando todo o ciclo de vida, em média, os SCMs de curta duração são menores no mês de julho com um tamanho de 8.384km^2 ($\pm 7.364\text{km}^2$), e o mês de março é o período em que atingem o maior tamanho, com 11.888km^2 ($\pm 16.479\text{km}^2$). Para os SCMs de longa duração o mês de julho também é o período no qual o tamanho médio é menor com 24.768km^2 ($\pm 28.112\text{km}^2$), porém o mês de outubro ficou caracterizado como sendo o mês em que obtêm um tamanho maior, com 69.329km^2 ($\pm 125.248\text{km}^2$). Contudo, é necessário destacar a presença de valores de desvios superiores à média, também encontrados por Rehbein (2021) para os SCMs amazônicos em alguns casos, os quais podem estar relacionados a alta variabilidade nos tamanhos dos sistemas, uma vez que a dispersão dos dados em relação à média é alta.

Uma possível explicação para o menor tamanho dos SCMs, de curta e longa duração, no mês de julho é a ausência de sistemas sinóticos como os sistemas frontais, ZCAS, VCANs e ZCIT, o que pode ocasionar uma redução no tempo de duração dos sistemas convectivos e consequentemente no tamanho.

No mês de julho, o principal sistema que induz a convecção no NEB são os DOLs e, embora esse sistema por si só não tenha uma grande contribuição no regime de precipitação da região, é necessário ressaltar que possui importância fundamental na modulação e no disparo da convecção (CAVALCANTI et al. 2009), especialmente, nos estados do setor leste. Isso porque, após iniciado o processo de formação de nuvens convectivas, caso a convecção seja intensificada por alguma forçante de escala sinótica, como um DOL, a perturbação convectiva tende a ganhar grande extensão horizontal, adentrando pelo continente e se propagando na forma de linhas de instabilidade (BARBOSA et al., 2006), as quais contribuem para a formação de SCMs.

Em março e outubro, o tamanho maior dos SCMs de curta e longa duração pode ser explicado pela presença dos principais sistemas indutores de precipitação no NEB. O mês de março, além de se caracterizar como sendo o mês em que a ZCIT está mais ao sul de sua posição climatológica, trata-se de um período em que a presença de outros importantes sistemas atmosféricos atuam para o disparo da

convecção, permitindo assim a formação de SCMs mais duradouros e, consequentemente, maiores.

Destaca-se que, apesar do mês de outubro apresentar, climatologicamente, os SCMs de longa duração com os maiores tamanhos, é o mês em que começa a haver um aumento na frequência dos SCMs, conforme a Figura 13, no NEB e, por isso, esse comportamento deve estar associado, principalmente, ao aumento na incursão de sistemas frontais e episódios de ZCAS, típicos dessa época do ano na região. De acordo com Oliveira (1986), nos meses de primavera e verão do Hemisfério Sul, os sistemas frontais apresentam ampla penetração continental entre as latitudes de 15°S e 20°S, reforçando a atividade convectiva da ZCAS e contribuindo, portanto, para a formação de SCMs maiores no NEB, principalmente na porção mais ao sul da região. Os resultados apresentados sobre o tamanho dos SCMs no NEB são valores médios de ocorrência, mas em todo o período de análise vários casos de SCMs com tamanho superior a $300 \times 10^3 \text{ km}^2$, na fase de maturação, e com tempo de duração superior a 10 horas foram rastreados pelo ForTraCC. Mais informações a respeito da área média (km^2) mensal e desvio padrão dos SCMs, podem ser encontradas na Tabela 7 (APÊNDICE D).

As Figura 17, Figura 18 e Figura 19 mostram o comportamento mensal da área média (10^3 km^2) dos SCMs nas fases de gênese, maturação e dissipação, respectivamente, e quanto ao seu ciclo de vida: (a) Todos; (b) Curta Duração; (c) Longa Duração. Para facilitar a apresentação dos resultados graficamente, os tamanhos foram divididos por 10^3 .

Nas fases de gênese e dissipação, constata-se que não há uma sazonalidade bem definida quanto ao tamanho dos SCMs, pois nessas fases os tamanhos são bastante similares em todos os meses, tanto para sistemas com ciclo de vida curto quanto para ciclo de vida longo. Contudo, ao comparar o tamanho dos SCMs de curta e longa duração nas fases de gênese e dissipação, verifica-se diferenças nos tamanhos em praticamente todos os meses do ano.

Na fase de gênese (Figura 17.a), com exceção de cinco meses (junho, agosto, setembro, novembro e dezembro), verifica-se que 75% de todos os sistemas que se formam no NEB, possuem tamanho inferior a $4 \times 10^3 \text{ km}^2$, sendo os sistemas de longa duração ligeiramente maiores, com exceção do mês de maio, cujo tamanho superam $4 \times 10^3 \text{ km}^2$. A exceção dos meses de maio e julho, em todos os meses do ano há presença de SCMs de ciclo de vida longo cujo tamanho, na

fase de gênese (Figura 18.c), é superior a $6 \times 10^3 \text{km}^2$, principalmente no mês de março, onde os sistemas na fase inicial podem chegar a quase $8 \times 10^3 \text{km}^2$.

Já os sistemas com ciclo de vida mais curto (Figura 18.b) apresentam tamanho superior a $6 \times 10^3 \text{km}^2$ nos meses de junho, setembro, outubro e dezembro. Vale reforçar que o tamanho mínimo encontrado para ambos os ciclos de vida é igual em todos os meses, mas esse fato está relacionado com o critério de tamanho mínimo para o rastreamento dos SCMs com o ForTraCC, pré-estabelecido na metodologia, cujo valor é de $2,4 \times 10^3 \text{km}^2$.

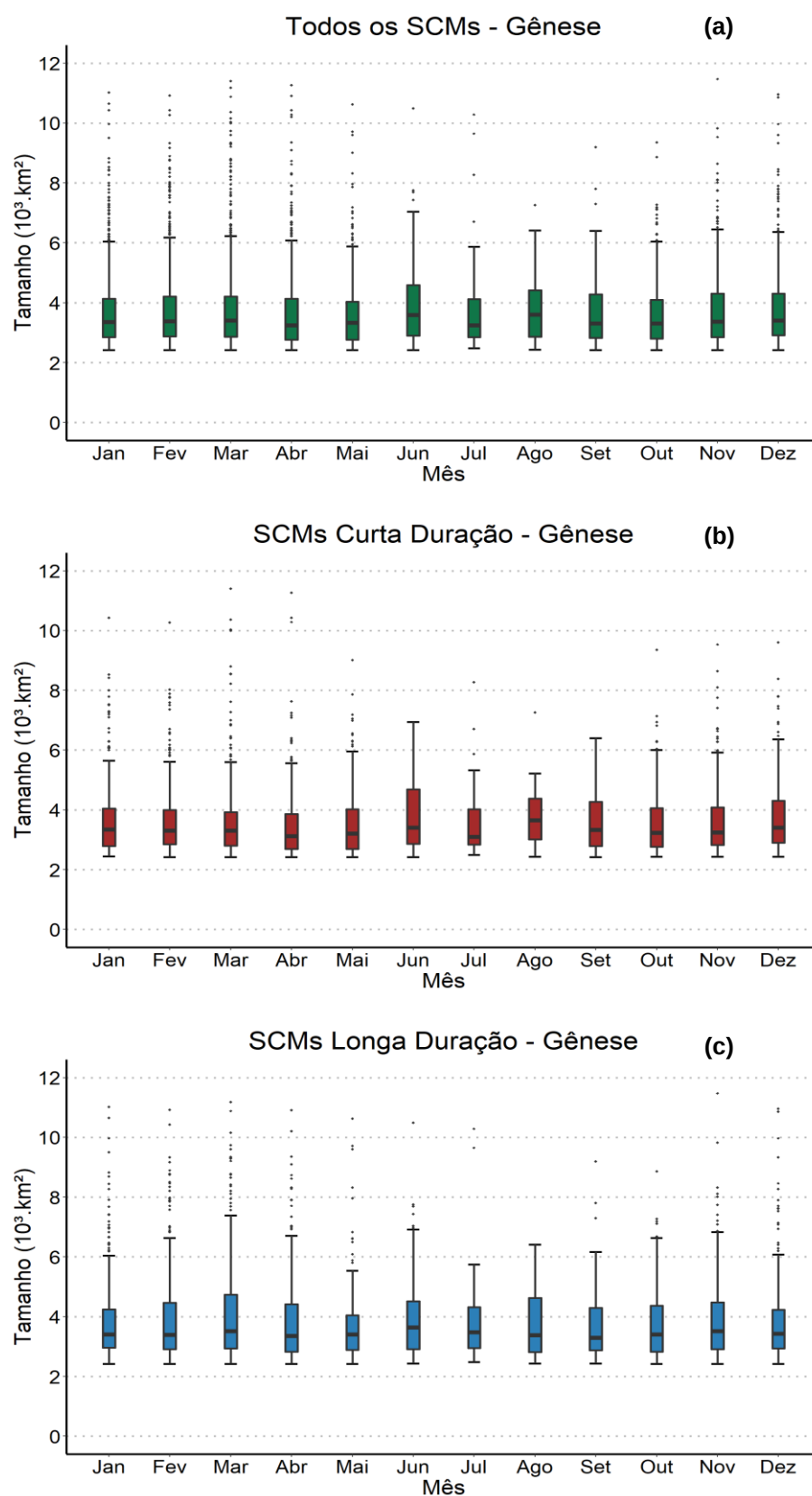
No estágio de maturação dos SCMs (Figura 18), fase em que atingem seu tamanho máximo em área, é onde ocorre as maiores diferenças entre os sistemas com ciclo de vida distintos e verifica-se, inclusive, uma sazonalidade bem definida quanto ao tamanho máximo dos sistemas de longa duração.

Em todos os meses do ano 75%, em alguns meses o percentual é maior, dos eventos de SCMs de curta duração (Figura 18.b) que ocorrem no NEB apresentam tamanho máximo inferior a $20 \times 10^3 \text{km}^2$, com destaque para o mês de janeiro, período em que alguns eventos podem atingir aproximadamente $40 \times 10^3 \text{km}^2$ na fase madura.

Nos SCMs de longa duração (Figura 18.c) ocorre o inverso, pois, com exceção de maio e junho, no restante dos meses 75% dos eventos de SCMs possuem tamanho superior a $20 \times 10^3 \text{km}^2$ na fase madura. Destaca-se o período de dezembro a março, pois nesses meses 25% de todos os SCMs com ciclo de vida longo atingem tamanhos máximos superiores a $80 \times 10^3 \text{km}^2$, com ênfase para os meses de janeiro, fevereiro e março, cujos percentuais são ainda maiores.

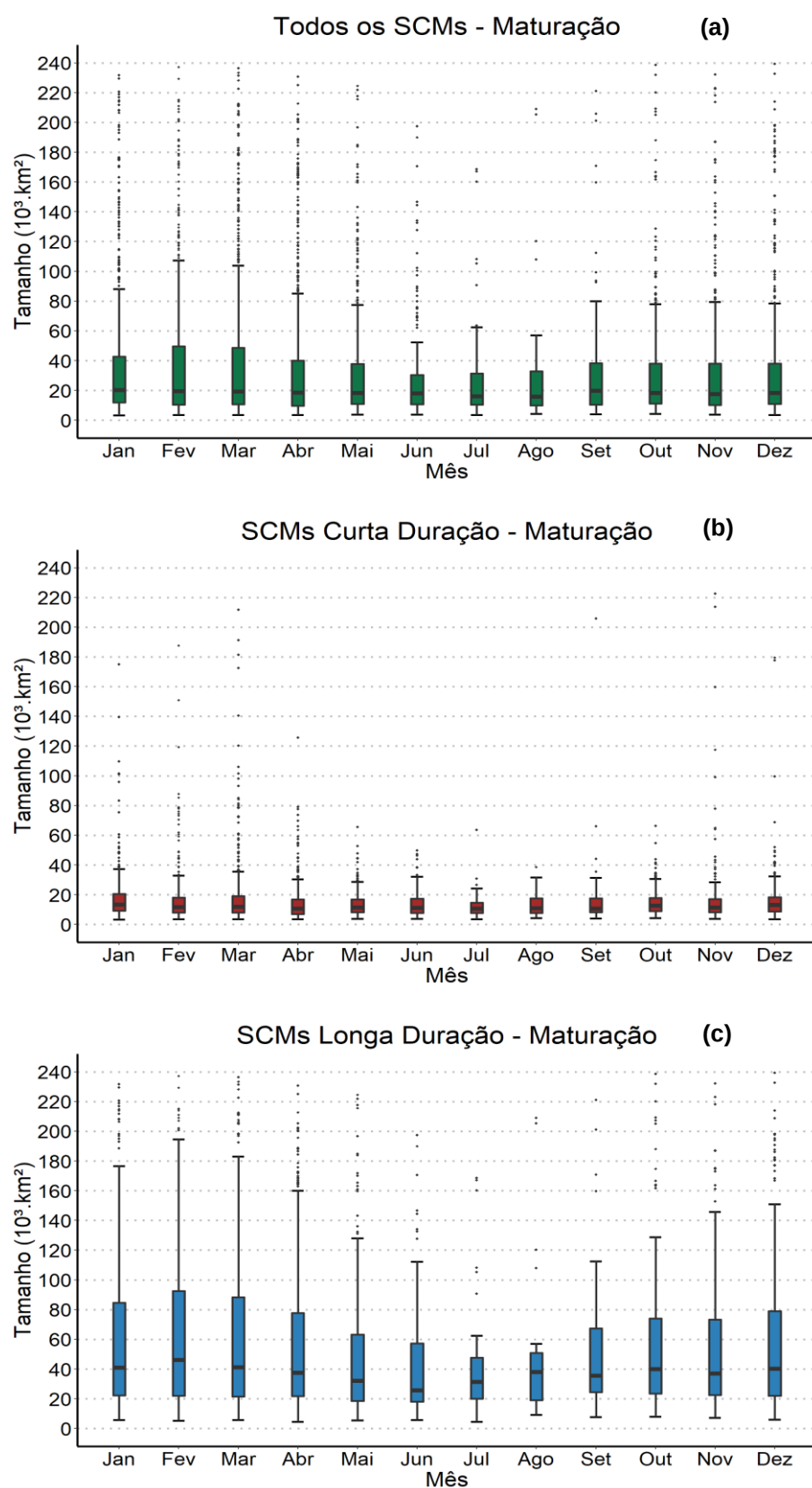
Se por um lado no período de dezembro a abril o tamanho dos SCMs de longa duração na fase de maturação (Figura 18.c) é maior, observa-se que de maio a novembro mais de 75% dos SCMs possuem tamanho máximo inferior a $80 \times 10^3 \text{km}^2$, com destaque para o mês agosto, período em que 100% dos casos o tamanho máximo é inferior a $60 \times 10^3 \text{km}^2$.

Figura 17 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de gênese: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Figura 18 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de maturação: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016



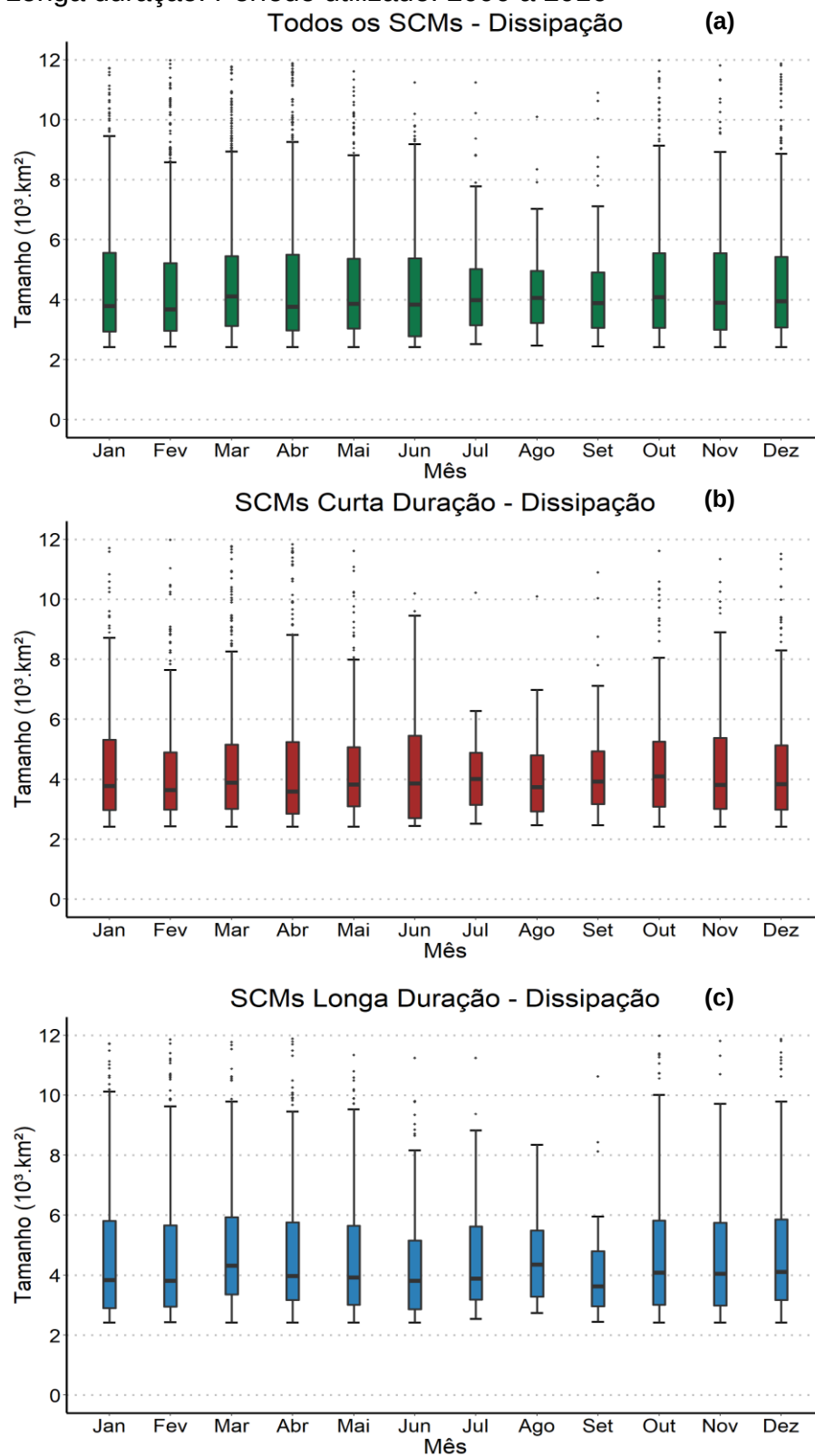
Fonte: Autor.

A sazonalidade verificada para os SCMs de longa duração, na fase de maturação (Figura 18.c), com um máximo no período de janeiro a abril, mínimo de junho a setembro e voltando a aumentar a partir de outubro, é bastante similar ao comportamento temporal da precipitação da região, e reforça a teoria de que os SCMs de longa duração tem uma contribuição significativa para a qualidade da estação chuvosa do NEB.

Um estudo de Costa et al. (2019) acerca de eventos extremos de precipitação associados a SCMs no NEB (com duração superior a 6 horas) nos anos de 2010 e 2011, demonstrou que os núcleos convectivos maiores foram mais frequentes no período de outubro a março. Embora representem apenas 5% de todos os SCMs que ocorrem em regiões tropicais, sistemas convectivos com ciclo de vida longo são responsáveis por 40% dos dias com mais de 250 mm de precipitação no globo terrestre (ROCA & FIOLEAU, 2020), ou seja, sistemas de longa duração além de contribuir para qualidade do período chuvoso de uma determinada região, pois atuam por um tempo maior, também pode ocasionar eventos extremos de precipitação em uma área mais ampla, como no Rio Grande do Sul onde, em média, a cada 4 eventos de CCMS, três produzem algum tipo de desastre (VIANA et al., 2009).

Na fase de dissipação (Figura 19), assim como na fase de gênese (Figura 17), não é possível identificar grandes diferenças. No entanto, em todos os meses a maior parte (mais de 75%) dos SCMs de curta e de longa duração dissipam-se com tamanho inferior a $6 \times 10^3 \text{ km}^2$. Vale destacar ainda que, excetuando-se o mês de setembro para os SCMs de longa duração (Figura 19.c), e o mês de julho para os de curta duração (Figura 19.b), no restante dos meses há SCMs cujo tamanho na fase de dissipação é superior a $7 \times 10^3 \text{ km}^2$.

Figura 19 - Climatologia mensal da área média (10^3km^2) dos SCMs na fase de dissipação: (a) Todos; (b) Curta duração; (c) Longa duração. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

4.5 Climatologia da Densidade Média Mensal dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

Nesse tópico é apresentada a climatologia mensal da distribuição espacial dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB para as três fases (gênese, maturação e dissipação) e em relação ao ciclo de vida (todos, curta e longa duração). Cabe reforçar que os resultados apresentados aqui dizem respeito a uma média de todo o período e, por isso, algumas áreas do NEB podem aparentar não haver gênese de SCMs, quando na realidade os valores de densidade média podem ser menores.

Nesse estudo, os resultados mostram que a área do NEB a qual possui as maiores densidades (valores superiores a $0.5\text{CG}/\text{grau}^2$) de gênese dos SCMs está compreendida em uma área retangular cujas coordenadas são aproximadamente $3^\circ\text{S}/46^\circ\text{W}$ a $3^\circ\text{S}/38^\circ\text{W}$ e $11^\circ\text{S}/46^\circ\text{W}$ a $11^\circ\text{S}/38^\circ\text{W}$. As áreas preferenciais de gênese são as seguintes: sul, sudeste, leste e nordeste do Maranhão; todo o território do Piauí; todo o território do Ceará, excetuando-se o nordeste na divisa com Rio Grande do Norte; oeste da Paraíba; centro-oeste de Pernambuco; norte e noroeste da Bahia. Na Figura 20 pode ser visualizada mais detalhes de quais áreas ocorrem gênese de SCMs.

A Figura 20 mostra que em todos os meses do ano a densidade de gênese dos SCMs é amplamente maior sobre o continente quando comparada com a densidade dos sistemas cuja gênese ocorrem no oceano Atlântico Tropical, sendo o estado do Piauí uma das áreas do NEB onde, em média, mais se formam sistemas, com valores superiores a $1.5\text{CG}/\text{grau}^2$ no período de outubro a junho.

A explicação física para a densidade de gênese dos SCMs ser maior sobre a região continental do NEB, em relação ao oceano adjacente, pode estar associada a baixa capacidade térmica do solo quando comparada a capacidade da água. Segundo Doswell e Bosart (2001), ao incidir sobre essas superfícies uma determinada quantidade de radiação, a temperatura se eleva mais rapidamente sobre o continente do que sobre o oceano, e o resultado desse aquecimento diferencial é que a superfície continental desenvolve uma maior instabilidade potencial do que a oceânica o que, inclusive, se acentua caso haja valores elevados de umidade em baixos níveis da troposfera bem como a presença de sistemas atmosféricos de meso e grande escala.

Outro aspecto importante sobre a região continental é que se trata de superfície não uniforme, ou seja, a irregularidade da topografia pode ser outro fator de contribuição para a maior densidade de gênese sobre o continente. Ainda que as densidades dos centros geométricos sejam menores, o leste do NEB e o oceano Atlântico, próximo ao norte da região, também são áreas preferenciais de formação de SCMs em alguns meses do ano, em particular no período chuvoso principal da região (fevereiro a maio).

Na Figura 20, além da distribuição espacial também é possível observar o comportamento temporal dos SCMs em relação aos meses em que os principais sistemas indutores de convecção e precipitação atuam no NEB.

Constata-se, que a densidade média de SCMs acompanha o ciclo anual da convecção, pois começa a aumentar na porção sul da região do NEB no mês de outubro, e nos meses de novembro e dezembro há um aumento da atividade convectiva em direção ao norte do NEB. A possível, e mais provável, explicação é que a partir do mês de outubro, primavera no HS, os sistemas frontais apresentam frequência maior de penetração em latitudes baixas da América do Sul, o que contribui para um reforço na atividade convectiva na região de atuação da ZCAS e, conseqüentemente, para a formação de SCMs nessa área do NEB.

A permanência de sistemas frontais ou eventos de ZCAS bem configuradas sobre uma determinada região, pode gerar uma atmosfera instável o suficiente para a formação de sistemas convectivos (GAN, 1992; SELUCHI et al., 2001). Ainda, a partir do mês de novembro o posicionamento médio e a intensificação da Alta da Bolívia (AB), na alta troposfera, na porção oeste da América do Sul começa a dar origem a um cavado em altos níveis sobre o NEB, gerando convergência de massa em baixos níveis e, como efeito, uma atmosfera mais favorável para a formação de SCMs. Nos meses de dezembro e janeiro a AB se intensifica, e a crista corrente abaixo na região sudeste do Brasil se amplifica, dando origem aos VCANs. Segundo Cavalcanti (2009), quando há uma interação de sistemas frontais (ou ZCAS) com um VCAN, a atividade convectiva fica mais intensa, e no caso do NEB esse cenário ocorre com mais frequência nos meses de dezembro e janeiro.

De fevereiro a abril, a densidade de SCMs sobre o NEB aumenta consideravelmente, principalmente no mês de março, período em que a ZCIT está mais ao sul da sua posição climatológica. De acordo com Rao e Marques (1984), Moura e Shukla (1981) e Uvo (1989) a área central e o norte do Maranhão, o centro e o norte do Piauí, os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, além dos sertões dos estados da Paraíba e de Pernambuco, são as áreas do NEB as quais a ZCIT mais exerce influência nesse período, o que pode explicar a maior densidade de gênese durante esses meses nessas áreas.

A partir do mês de maio começa a haver um decréscimo na densidade de gênese (Figura 20) dos SCMs na porção sul do NEB, com valores inferiores a $1\text{CG}/\text{grau}^2$, possivelmente em consequência da redução na quantidade de sistemas frontais, ZCAS e VCANs nesse período do ano, enquanto no norte da região a densidade média ainda é elevada, podendo ser reflexo do posicionamento da ZCIT a qual nesse mês começa a se afastar, mas ainda pode exercer influência no disparo da convecção. É importante destacar que, no período de fevereiro a maio, é comum haver uma interação entre a ZCIT e outros sistemas sinóticos, o que pode colaborar ainda mais para a formação de SCMs sobretudo os de longa duração, os quais geralmente são responsáveis por eventos extremos de precipitação.

Verifica-se ainda os meses de fevereiro, março e abril como sendo o período no qual há uma maior densidade de gênese (Figura 20) dos SCMs sobre o oceano Atlântico Tropical, os quais penetram no NEB, em uma região do oceano aproximadamente compreendida entre $2^{\circ}\text{S}/38^{\circ}\text{W}$ e $2^{\circ}\text{S}/44^{\circ}\text{W}$, porém com valores bem inferiores a área continental. Esses resultados estão de acordo com um estudo de Liebmann e Smith (1996) sobre o deslocamento latitudinal da convecção na região equatorial do Atlântico Tropical. Segundo esses autores, nos meses de verão e outono do HS, a atividade convectiva da ZCIT fica mais próxima da costa do Brasil, e o mês de março se destaca por apresentar o máximo de convecção próximo as áreas litorâneas do Norte e do NEB.

Outra possível explicação para a maior densidade de gênese (Figura 20) sobre o oceano Atlântico Tropical de fevereiro a abril, é o fato de haver águas superficiais anormalmente mais quentes nessa época do ano. Segundo Doswell e Bosart (2001), águas mais quentes podem agir como fontes de calor sensível e latente para a formação dos SCMs, pois aumentam o transporte de calor do oceano para a atmosfera, o que amplifica a instabilidade em baixos níveis da troposfera.

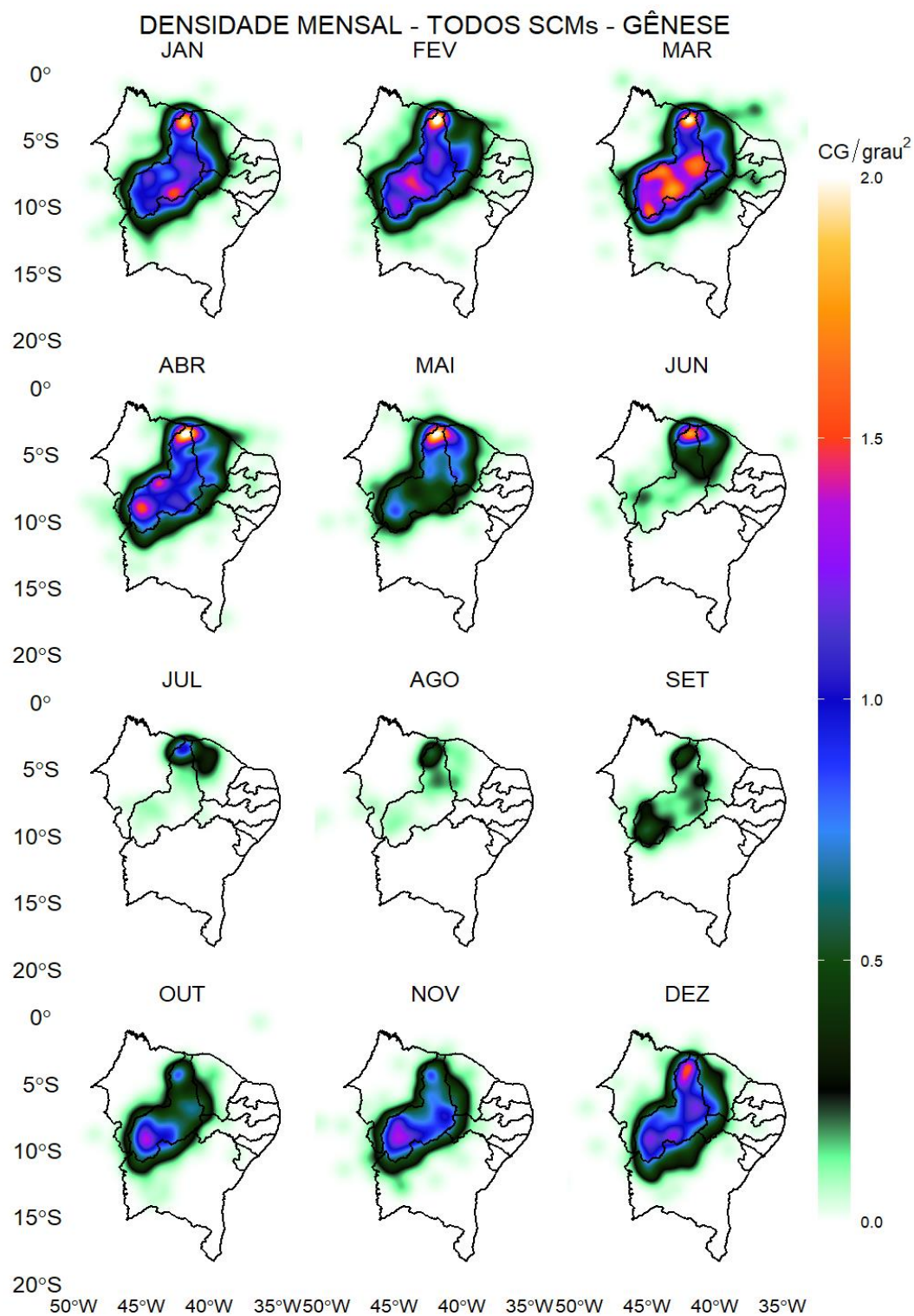
A partir do mês de junho, até o mês de agosto, há uma significativa redução na gênese (Figura 20) de SCMs na porção sul do NEB, sendo verificada uma densidade maior no norte da região, com notoriedade para o nordeste do estado do Maranhão, norte do Piauí e nas áreas noroeste e oeste do Ceará. Nesse trimestre, climatologicamente, os DOLs são os principais sistemas indutores de precipitação na região, especialmente no leste do NEB onde, nesse período, a densidade de gênese verificada é mínima.

As áreas preferenciais dos SCMs nas fases de maturação (Figura 21), e dissipação (Figura 22), é bastante similar a fase de gênese. Contudo, observa-se que, em relação a fase inicial (Figura 20), nos estágios maduro e final dos SCMs há um deslocamento da convecção em direção ao oeste do NEB e o estado do Maranhão assim como o Piauí, onde é observado os valores máximos, também acaba se destacando como sendo uma das áreas nas quais os sistemas convectivos mais atingem o estágio de maturação, bem como dissipam-se.

A explicação mais provável para esse comportamento descrito anteriormente, segundo Fritsch e Forbes (2001), é que os SCMs tendem a se deslocar para regiões em que há suprimento elevado de umidade e calor os quais, na região do NEB, podem ainda ter uma contribuição da confluência dos ventos alísios de nordeste a partir do mês de janeiro, mas principalmente no período de fevereiro a maio, ou mesmo por outros fatores nos demais meses do ano. Sakamoto (2012) mostrou que os SCMs nos quais tem gênese sobre o Ceará e vizinhança, tem seu deslocamento predominantemente para oeste, assim como os SCMs observados na Colômbia, Sakamoto et al. (2011). Na fase de dissipação verifica-se ainda, valores elevados de densidade dos SCMs junto a costa do norte do NEB nos meses de janeiro, fevereiro e março.

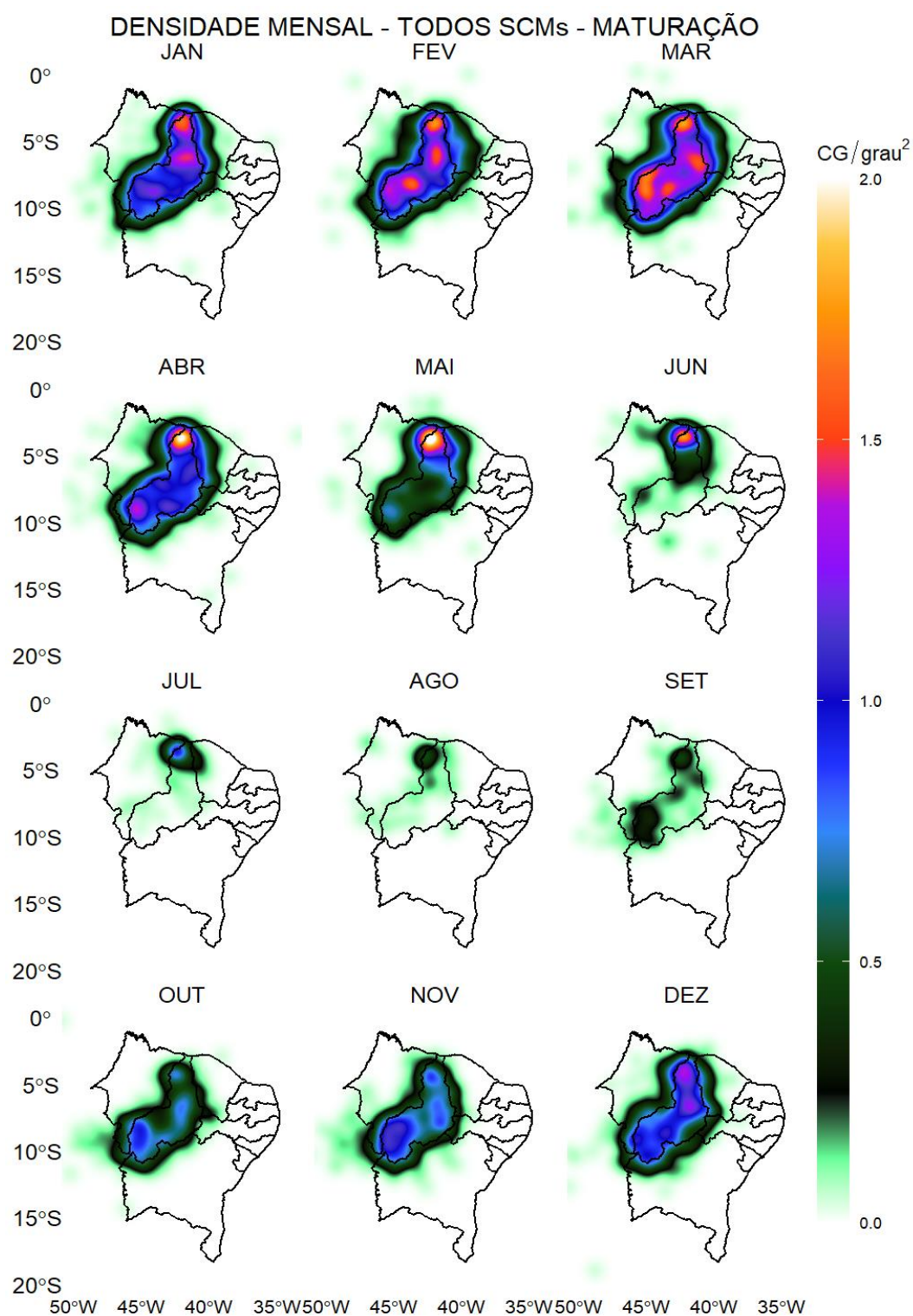
Adotando como referência os valores baixos de densidade na fase de gênese sobre o Atlântico Tropical próximo ao norte do NEB, pode-se inferir que se somam, aqueles cuja gênese ocorrem sobre o oceano e se dissipam na costa do setor norte do NEB, os SCMs cuja gênese ocorrem sobre o continente e se deslocam em direção ao litoral, o que pode explicar a densidade mais elevada na fase de dissipação próximo a costa do setor norte da região.

Figura 20 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016



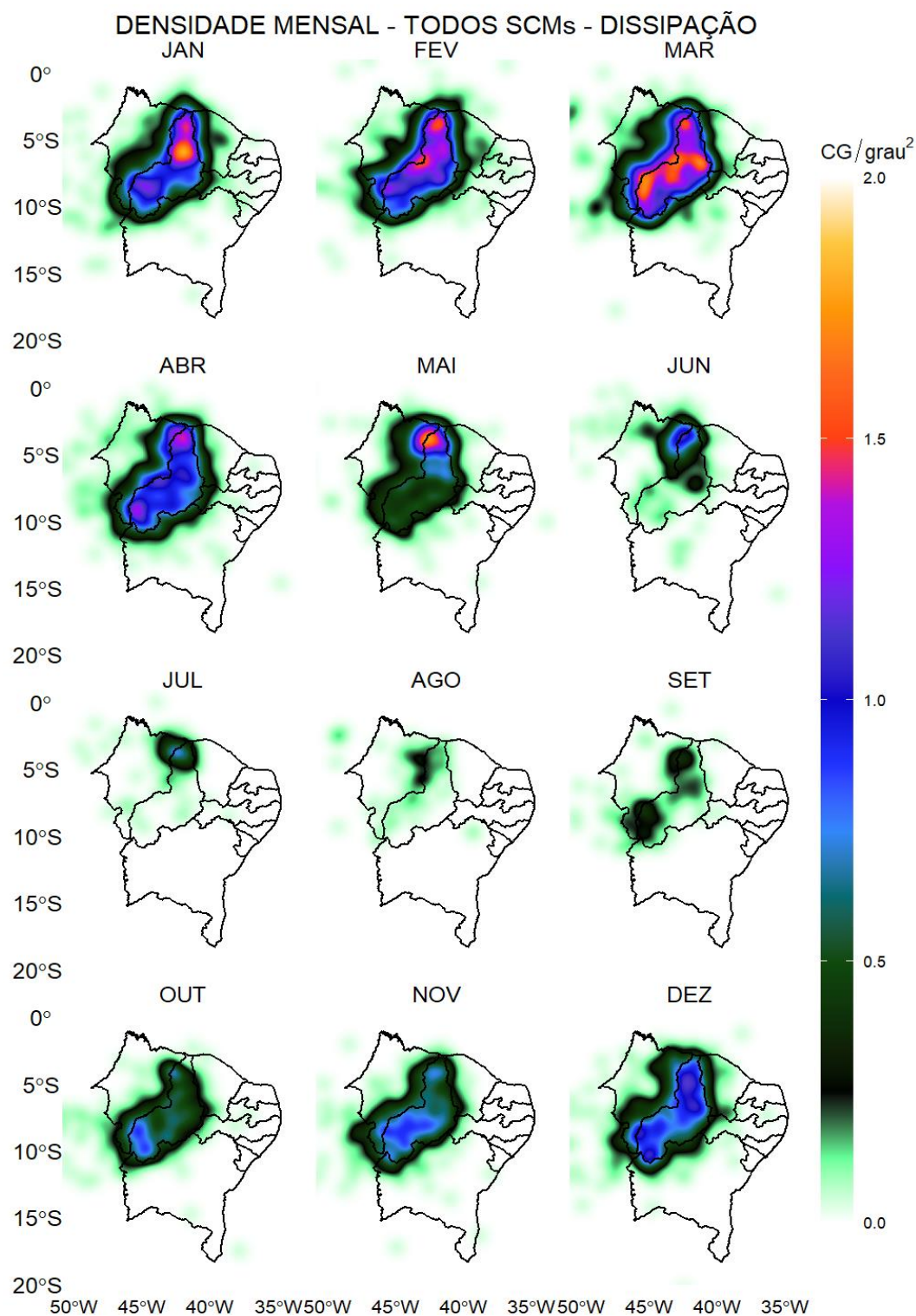
Fonte: Autor.

Figura 21 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Figura 22 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

4.5.1 Climatologia da Densidade Média Mensal dos SCMs de Curta e Longa Duração no Nordeste do Brasil (NEB)

Na Figura 23 e na Figura 26 apresentam-se as distribuições espaciais e temporais na fase de gênese dos SCMs de curta e longa duração, respectivamente.

De um modo geral, os resultados mostram que a área do NEB a qual possui as maiores densidades (valores superiores a 0.5CG/grau²) de gênese de SCMs de curta duração está compreendida em uma área retangular cujas coordenadas são aproximadamente 3°S/46°W a 3°S/40°W e 11°S/46°W a 11°S/40°W. As áreas preferenciais de gênese dos SCMs são as seguintes: sul, sudeste, leste e nordeste do Maranhão; todo o território do Piauí; noroeste, oeste, sudoeste e sul do Ceará; oeste de Pernambuco; norte e noroeste da Bahia.

Em relação aos SCMs com ciclo de vida longo as áreas preferenciais de formação estão inseridas em área retangular maior, quando comparada com a área dos sistemas de curta duração, cujas coordenadas são aproximadamente 3°S/46°W a 3°S/38°W e 11°S/46°W a 11°S/38°W. As áreas preferenciais de gênese dos SCMs são: sul, sudeste, leste e nordeste do Maranhão; todo o território do Piauí; todo o território do Ceará, excetuando-se o nordeste do estado na divisa com Rio Grande do Norte; oeste da Paraíba; centro-oeste de Pernambuco; norte e noroeste da Bahia.

Ao comparar os resultados nota-se que a sazonalidade (distribuição temporal) na fase de gênese é bastante similar para os sistemas com ciclo de vida curto e longo, ou seja, o mês de outubro fica caracterizado como o mês no qual a densidade média começa a aumentar, e nos meses de novembro e dezembro há um aumento na densidade em direção ao norte do NEB. Já para os meses de janeiro a maio observa-se um espalhamento da convecção para toda a região, enquanto nos meses de junho a setembro caracteriza-se como o período em que a densidade média de SCMs é mínima em praticamente toda a região, excetuando-se o nordeste do Maranhão, norte do Piauí e o norte do Ceará. A distribuição espacial e temporal dos SCMs no NEB é bastante similar a encontrada por Rehbein (2016) em relação aos sistemas tropicais amazônicos de curta e longa duração, tanto para o período de máxima convecção quanto para o período de mínima atividade convectiva, e está bem correlacionada com o ciclo anual de precipitação da região.

No período chuvoso principal (fevereiro a maio) do NEB outras áreas preferenciais de gênese de SCMs de longa duração são identificadas, porém com valores menores de densidade média (abaixo de 0.5CG/grau²), são elas: litoral norte e leste de Rio Grande do Norte; porção central e leste da Paraíba; porção central e litoral de Pernambuco; litoral e oeste de Alagoas; oeste de Sergipe; oeste, centro, sul e nordeste (divisa com Sergipe) da Bahia.

Destaca-se ainda, o fato de em todos os meses do ano os SCMs de curta duração possuírem gênese (Figura 23) majoritariamente sobre o continente, enquanto os sistemas de longa duração possuem gênese (Figura 26) predominantemente sobre o continente, mas também com formações sobre o oceano Atlântico Tropical no período de janeiro a maio, com destaque para o mês de março. No NEB, um estudo recente de Lyra et al. (2020) mostrou que a maior frequência dos CCMS ocorre durante os meses de outono e verão, bem como 83% dos casos identificados, no período de 2008 a 2017, tiveram gênese sobre o continente, inclusive, com um número elevado de formações sobre o Piauí e o leste do Maranhão. Na América do Norte, SCMs com ciclo de vida longo, além de hábitos noturnos, também possuem predomínio de formação sobre o continente (VELASCO & FRITSCH, 1987).

Em relação aos meses, nota-se algumas diferenças na fase de gênese dos SCMs de curta (Figura 23) e longa duração (Figura 26). Nos meses de novembro, dezembro e janeiro, embora a distribuição espacial seja bastante similar para ambos os ciclos de vida, excetuando-se para o Ceará, verifica-se uma densidade maior (menor) de SCMs de curta duração (longa duração), os quais estão concentrados principalmente no estado do Piauí.

A partir do mês de dezembro até o mês de abril é notória a densidade maior dos SCMs de curta duração frente aos sistemas com ciclo de vida longo, mas percebe-se que no período de janeiro a abril, a densidade de gênese dos SCMs de longa duração (curta duração) é maior (menor) nos estados do Ceará, oeste da Paraíba, oeste de Pernambuco e na Bahia (norte e noroeste).

Apesar de os SCMs de longa duração de distribuírem de maneira mais espalhada (em uma área maior) no NEB, os valores de densidade encontrados são mais homogêneos e menores, quando comparados aos valores de densidade dos sistemas convectivos com ciclo de vida curto. No trimestre Junho-Julho-Agosto (JJA), período de pós-estação chuvosa no NEB e no qual a climatologia dos SCMs é menor em relação a estação chuvosa principal, o destaque fica para o mês de junho, pois apresenta uma densidade maior (menor) de gênese para os sistemas de longa duração (curta duração) em uma área que abrange o nordeste do Maranhão, norte do Piauí e o norte do Ceará.

Os resultados evidenciam a influência no qual os sistemas frontais, ZCAS e VCANs exercem no disparo da convecção e na gênese de SCMs no início da estação chuvosa do NEB, sobretudo para os sistemas de longa duração no mês de outubro, entre o sul do Piauí e o noroeste da Bahia, pois a densidade média nesse mês é maior para os sistemas com ciclo de vida longo do que para os sistemas com ciclo de vida curto. Da mesma forma, é possível inferir que a ZCIT possui um papel fundamental na gênese de SCMs de longa duração no norte do NEB no período de fevereiro a maio, ficando mais perceptível sua relevância para o estado do Ceará, oeste da Paraíba, oeste de Pernambuco e na Bahia (norte e noroeste), bem como para o oceano Atlântico Tropical, próximo a costa do norte da região, no mês de março.

Nota-se que, tanto os SCMs de curta quanto os SCMs de longa duração possuem um deslocamento para oeste nas fases de maturação e dissipação. Conforme mencionado no tópico 4.5, segundo Fritsch e Forbes (2001), isso ocorre porque os SCMs tendem a se deslocar para regiões em que há suprimento elevado de umidade e calor os quais, na região do NEB, podem ainda ter uma contribuição da confluência dos ventos alísios de nordeste a partir do mês de janeiro, mas principalmente no período de fevereiro a maio.

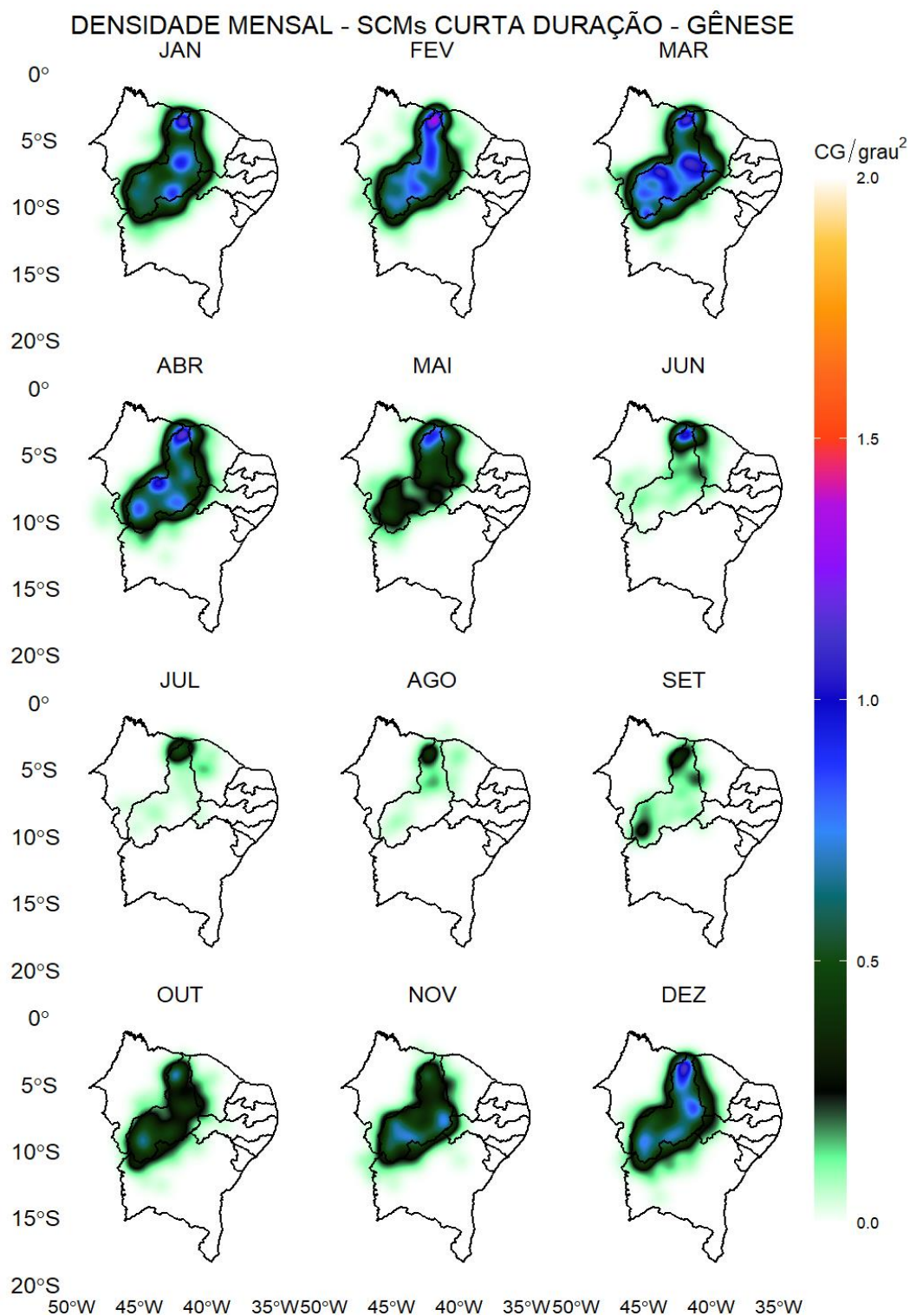
Observa-se que em relação a fase de gênese, as áreas preferenciais da fase de maturação (Figura 24) e dissipação (Figura 25) para os sistemas de curta duração não mudam muito. Já os SCMs de longa duração tem sua fase de maturação (Figura 27) e dissipação (Figura 28) deslocada para oeste do NEB verificando-se, inclusive, valores relevantes de densidade de dissipação em estados vizinhos (Pará; Tocantins; norte de Goiás), bem como sobre o oceano Atlântico

Tropical, evidenciando que sistemas cuja gênese acontecem sobre a região podem se deslocar e influenciar as condições de tempo em regiões próximas.

Uma possível explicação para esse comportamento pode estar ligada ao tamanho (km^2) no qual os SCMs de longa duração atingem, pois tanto na fase de gênese quanto na fase de dissipação são amplamente superiores aos sistemas convectivos de curta duração e, como o cálculo da densidade está ligado ao tamanho do centro geométrico (centro de massa) dos SCMs, os sistemas com ciclo de vida longo tendem a apresentar um espalhamento maior sobre o NEB.

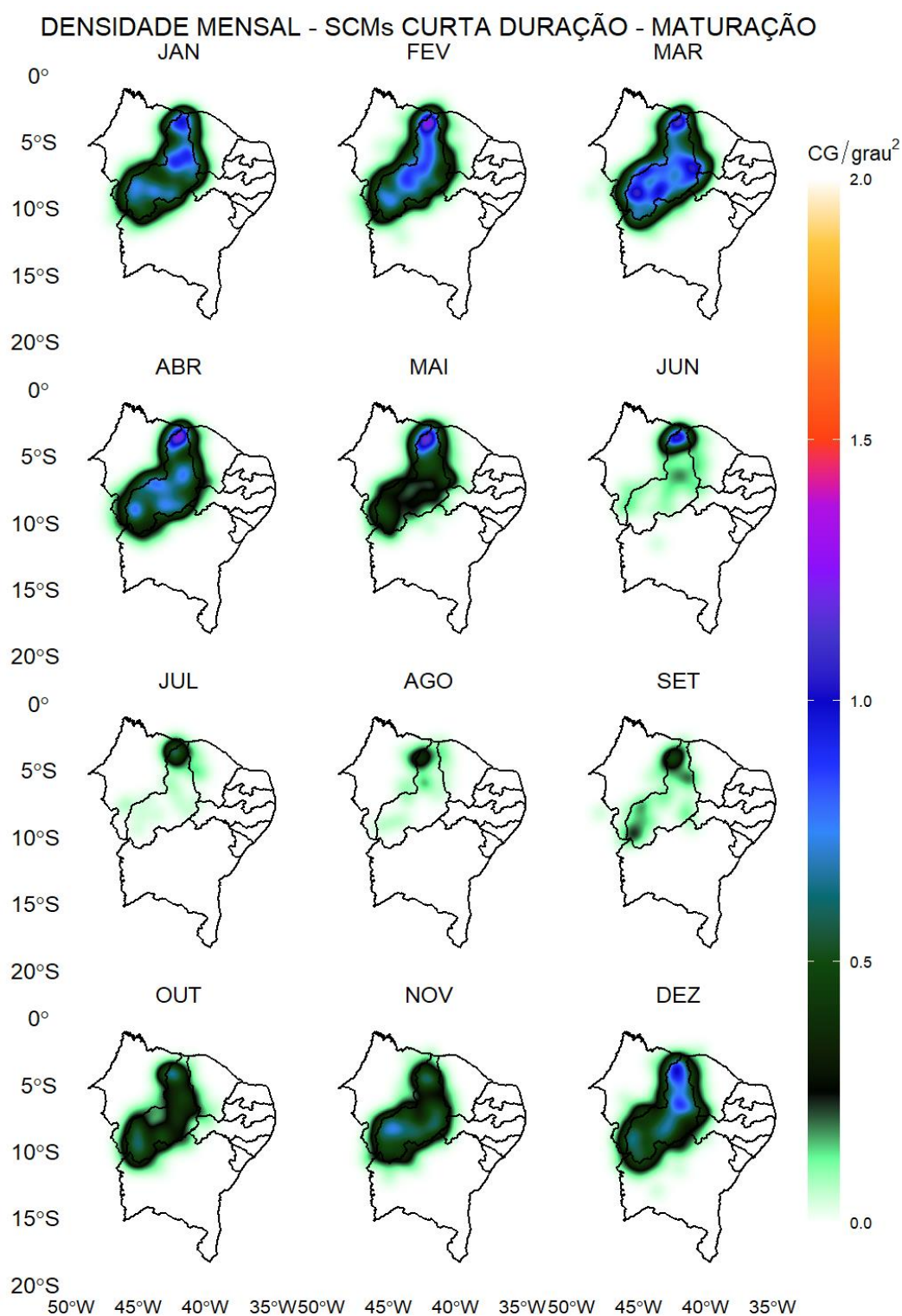
Outra possível hipótese, é a distância (km) percorrida pelos sistemas de longa duração, pois, uma vez que o tempo de duração é maior, dependendo das condições dinâmicas e termodinâmicas, estes podem também percorrer distâncias mais longas, principalmente se tiverem embebidos na circulação de sistemas cuja escala é maior como, por exemplo, a ZCIT. As distâncias percorridas dos SCMs de curta e longa duração é apresentada no tópico 4.6.

Figura 23 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016



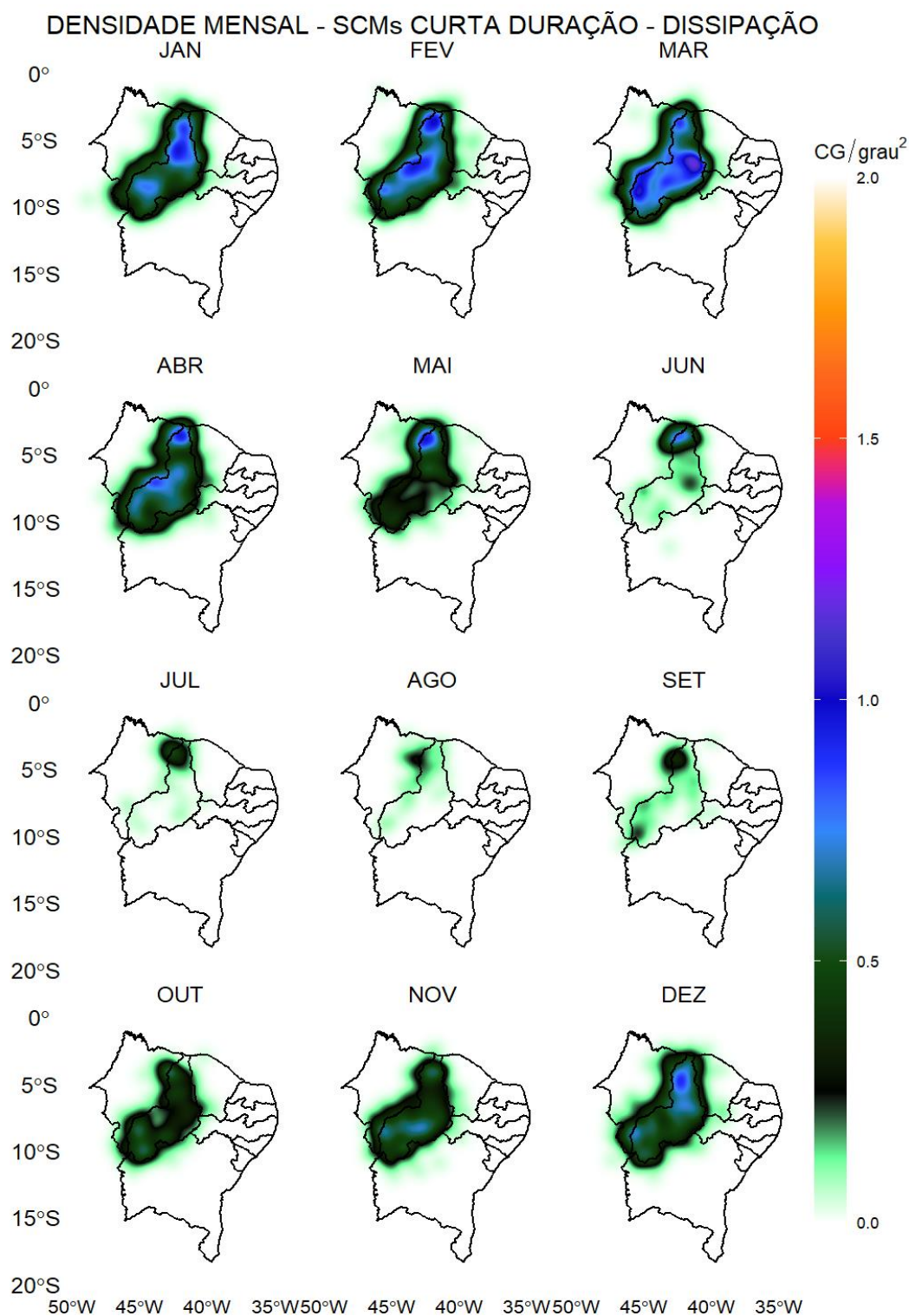
Fonte: Autor.

Figura 24 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016



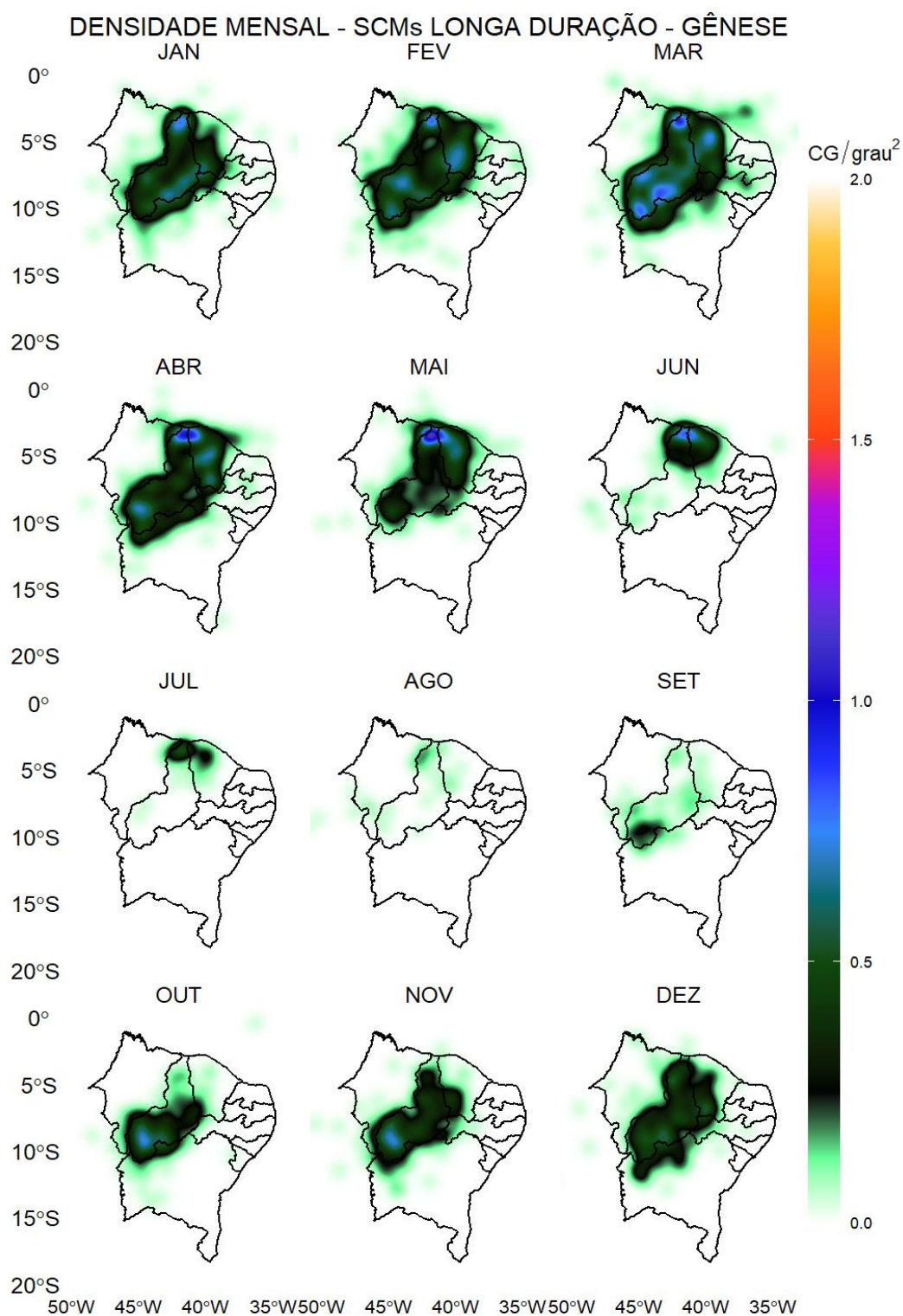
Fonte: Autor.

Figura 25 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de curta duração no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



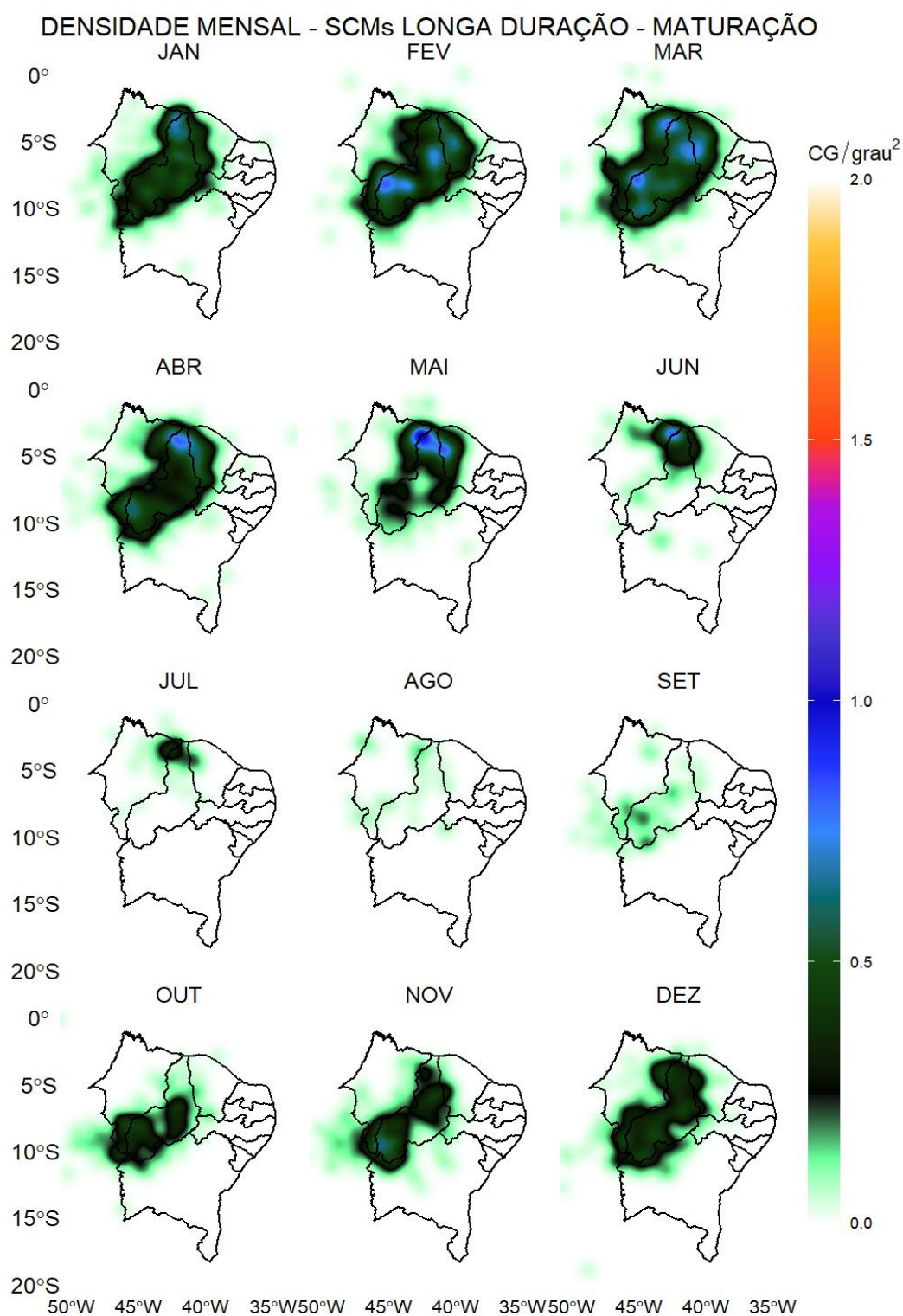
Fonte: Autor.

Figura 26 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de gênese. Período utilizado: 2000 a 2016



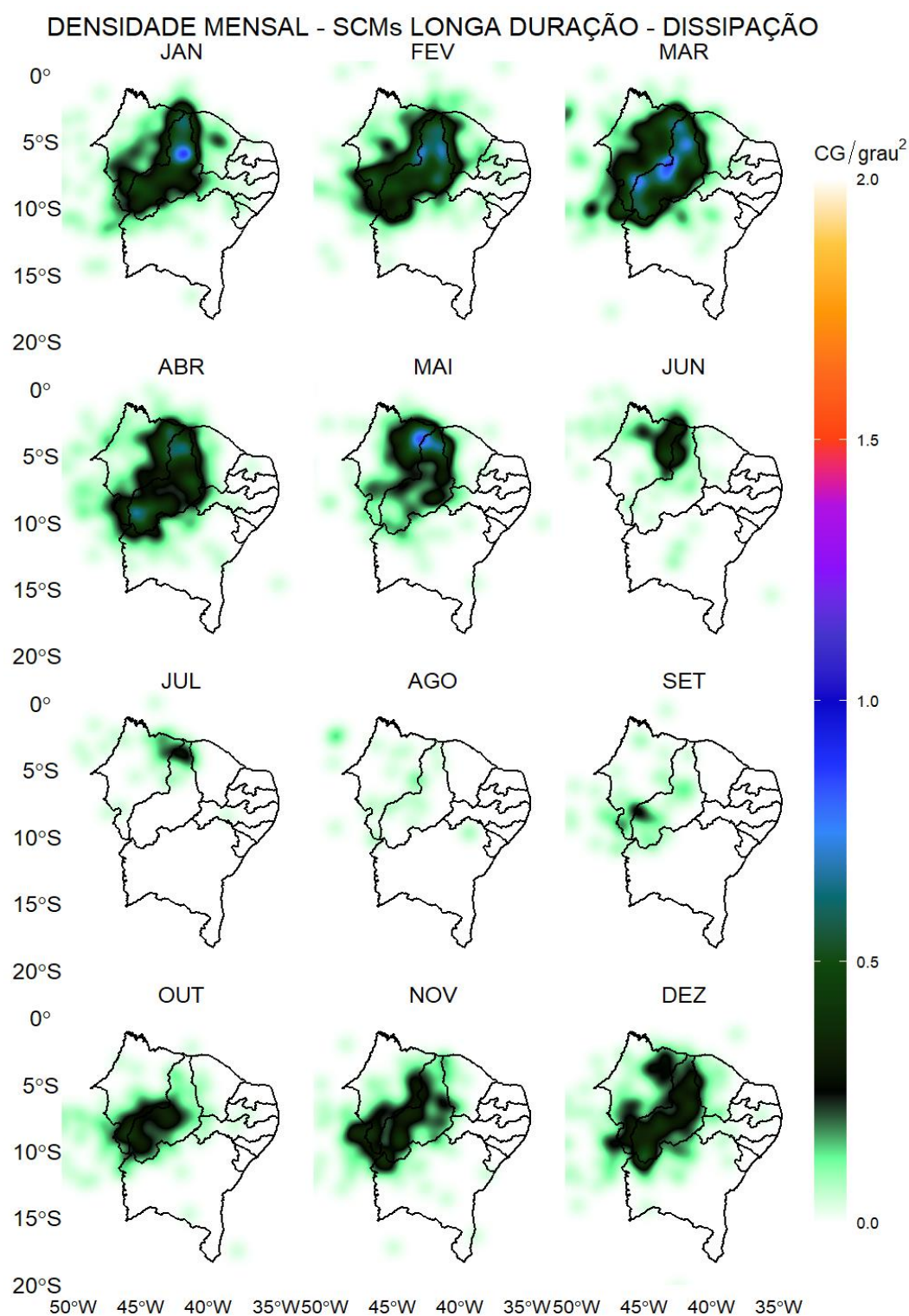
Fonte: Autor.

Figura 27 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de maturação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Figura 28 - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs de longa duração no NEB na fase de dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

4.6 Climatologia Mensal da Distância (km) Percorrida e da Velocidade (km/h) Média dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

A climatologia da distância (km) percorrida dos SCMs no NEB é apresentada na Figura 29 e na Tabela 8 (APÊNDICE E) para: (a) Todos os SCMs; (b) SCMs de Curta Duração; (c) SCMs de Longa Duração.

No NEB, a distância média percorrida pelos SCMs é de 352,2km ($\pm 355,5$ km), ficando evidente que os sistemas de longa duração além de percorrer distâncias maiores, com 458,4km, possuem uma variância maior em suas distâncias, pois o desvio encontrado é de $\pm 380,8$ km. Já os SCMs de curta duração percorrem distâncias menores (118,9km) e possuem uma variância menor, quando comparada com os SCMs de longa duração, pois o desvio encontrado foi de $\pm 65,4$ km.

A menor distância percorrida pelos SCMs é verificada no mês de julho com 297,4km ($\pm 269,2$ km), enquanto os meses de junho e outubro destacam-se por apresentarem as maiores distâncias, com 446,5km ($\pm 442,9$ km) e 404,9km ($\pm 429,0$ km), na devida ordem. Já nos demais meses do ano não se verifica diferenças significativas nas distâncias percorridas pelo SCMs. Para os SCMs com ciclo de vida curto (curta duração), o mês no qual apresenta a menor distância percorrida é setembro com 86,7km ($\pm 50,6$ km), enquanto os meses nos quais se verificam as maiores distâncias são dezembro e janeiro, com 129,4km ($\pm 63,8$ km) e 135,3km ($\pm 70,8$ km), respectivamente.

As menores distâncias percorridas pelos SCMs de ciclo de vida longo ocorrem no mês de maio com 387,9km ($\pm 364,9$ km), ao passo que as maiores ocorrem nos meses de junho e outubro, com 563,6km ($\pm 462,0$ km) e 540,5km ($\pm 456,8$ km), na devida ordem. Vale destacar, o fato de no mês setembro o desvio dos SCMs de longa duração ser maior do que a média, o que pode estar relacionado ao fato da quantidade média de SCMs em setembro ser baixa e uma vez que a distância dos sistemas de longa duração tem relação com o tempo de duração dos sistemas, esse período fica mais suscetível a uma variabilidade elevada.

Diferente dos resultados encontrados por Rehbein (2016) para os SCMs amazônicos (continentais e oceânicos) de curta e longa duração, onde as maiores (menores) distâncias foram encontradas para o inverno (verão), no NEB não há grandes variações em relação a época do ano, tanto para sistemas com ciclo de vida curto quanto para sistemas com ciclo de vida longo. Contudo, destaca-se o fato

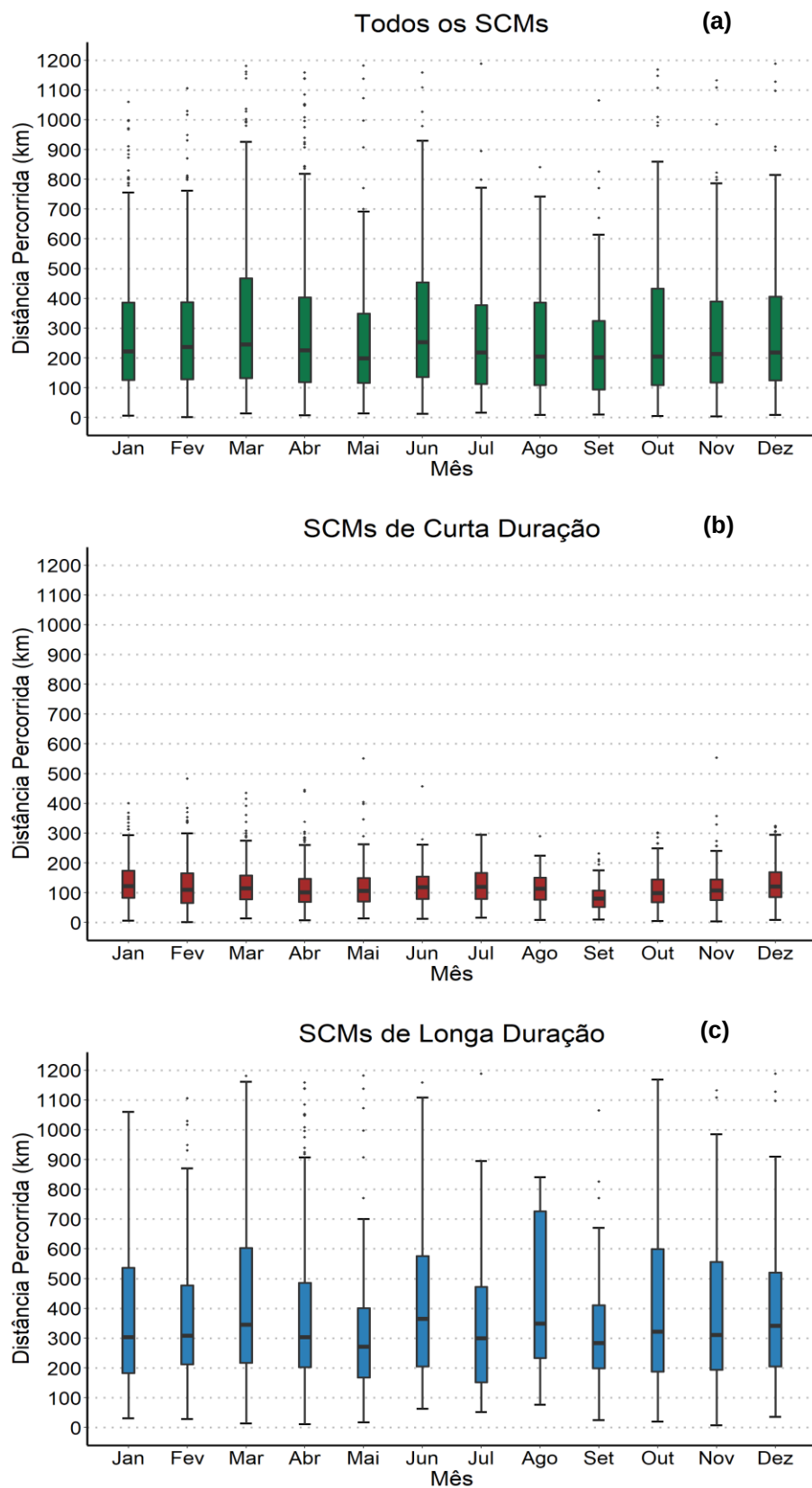
de os SCMs, amazônicos e do NEB, tropicais de longa duração (curta duração) percorrer uma distância maior (menor) da sua fase de gênese até a sua fase de dissipação, deixando mais evidente os impactos, em termos de precipitação, nos quais os SCMs com ciclo de vida longo podem ter no NEB, em razão de um único sistema ter a capacidade de ocasionar precipitações em uma área mais ampla.

Outro ponto importante a destacar é a evidente relação entre o ciclo de vida e a distância percorrida pelos SCMs. Os resultados mostram que os SCMs com ciclo de vida longo percorrem, em média, uma distância quase quatro vezes maior do que os sistemas com ciclo de vida curto. Para os SCMs subtropicais, Sakamoto (2009) mostrou que existe uma relação entre o ciclo de vida e a distância percorrida pelos sistemas com gênese continental e oceânica, ou seja, quanto maior o tempo de duração do SCM maior tende a ser a distância percorrida, embora a correlação encontrada para os SCMs oceânicos seja inferior à dos continentais, além de altamente variável.

As Figura 29(b) e Figura 29(c) mostram o comportamento da distância percorrida pelo SCMs de curta e longa duração, respectivamente, em relação aos meses do ano. Verifica-se que mais de 75% dos SCMs com ciclo de vida curto percorrem distâncias inferiores a 200km em todos os meses, bem como há pouca variabilidade em relação a época do ano, com destaque para o mês de setembro cujas distâncias são ainda menores.

Já os SCMs com ciclo de vida longo destacam-se por percorrer distâncias maiores, bem como por possuir uma variabilidade mais alta em relação aos de curta duração. De um modo geral verifica-se, com exceção de maio e julho, em todos os meses que aproximadamente 75% dos SCMs percorrem uma distância mínima de 200km, destacando-se os meses de janeiro, março, abril, junho, outubro, novembro e dezembro, onde alguns eventos de longa duração podem percorrer distâncias superiores a 900km.

Figura 29 - Climatologia mensal da distância (km) percorrida dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016



Fonte: Autor.

Em relação ao SCMs com ciclo de vida longo, verifica-se ainda os meses de março e outubro como sendo o período nos quais os sistemas convectivos percorrem distâncias maiores, de aproximadamente 1200km. Esses dois meses caracterizam-se por ter como principais sistemas indutores de precipitação os sistemas frontais e a ZCAS, no mês de outubro, e a ZCIT, no mês de março.

A possível explicação, e mais provável, é que a maior frequência de sistemas frontais e ZCAS bem como a da ZCIT no NEB, possam gerar condições de instabilidade necessárias para o maior deslocamento dos SCMs de longa duração. Isso porque tanto os sistemas frontais, como a ZCAS e a ZCIT, se caracterizam por gerar forte convergência (divergência) de umidade na baixa (alta) troposfera em uma área bastante extensa, gerando assim um ambiente atmosférico propício para os SCMs percorrerem distâncias maiores, uma vez que, segundo Fritsch e Forbes (2001), os sistemas convectivos tendem a se deslocar para regiões onde há suprimento elevado de calor e umidade.

No presente estudo, a velocidade média de propagação dos SCMs no NEB obtida com o ForTraCC é de 22,3km/h ($\pm 16,3$ km/h), e praticamente não se observa diferenças na velocidade média de propagação entre os SCMs de curta e longa duração, os quais apresentam velocidades médias de 22,2km/h ($\pm 15,7$ km/h) e 22,3km/h ($\pm 16,5$ km/h), respectivamente, conforme a Tabela 4.

Os resultados encontrados para os SCMs no NEB, são diferentes dos encontrados para os SCMs subtropicais da América do Sul os quais, segundo Sakamoto (2009), possuem velocidade média de 36km/h ($\pm 23,4$ km/h). No entanto, comparativamente aos SCMs que ocorrem na região tropical da Bacia Amazônica os resultados apresentados nesse estudo são similares, pois, segundo Rehbein (2016), a velocidade média de propagação dos sistemas convectivos amazônicos de curta duração é de 22,4km/h ($\pm 7,2$ km/h), enquanto os de longa duração possuem velocidade média de 21,8km/h ($\pm 6,5$ km/h).

Embora a região do NEB e a Bacia Amazônica sejam, em termos de precipitação e outros aspectos, climatologicamente diferentes, é possível que a similaridade nos valores de velocidade de propagação dos SCMs tenha relação com os principais sistemas indutores de convecção a que ambas as regiões estão submetidas (sistemas frontais, ZCAS, VCAN, ZCIT).

Nos meses de dezembro e janeiro, onde os principais sistemas indutores de precipitação são os sistemas frontais, ZCAS e VCANs, observa-se velocidades médias maiores (menores) para os sistemas com ciclo de vida curto (ciclo de vida longo). Em relação aos SCMs de curta duração, o mês de setembro é o que apresenta a menor velocidade de propagação, com 19,3km/h ($\pm 14,4$ km/h), e o mês de dezembro o qual apresenta a maior velocidade média, com 24,1km/h ($\pm 16,7$ km/h). Contudo, verifica-se diferenças nas velocidades média no período de junho a setembro, sendo os sistemas de longa duração os quais apresentam as maiores velocidades de propagação.

Sem fazer distinção quanto ao ciclo de vida dos SCMs, constata-se os meses de junho, julho e agosto como sendo o período no qual as velocidades médias são maiores, com 24,8km/h ($\pm 16,7$ km/h), 24,1km/h ($\pm 16,0$ km/h) e 24,9km/h ($\pm 16,1$ km/h), na devida ordem.

É possível, que a maior velocidade de propagação dos SCMs no trimestre junho-julho-agosto (JJA) esteja associada a maior velocidade, nesse período, de propagação do principal sistema indutor de precipitação no NEB, os DOLs. Chan (1990) e Ferreira et al. (1990), estudaram as principais características e estruturas ondulatórias dos DOLs sobre o oceano Atlântico Tropical Sul, junto a costa da América do Sul. Nesse estudo, os autores constataram a presença de DOLs em todas as épocas do ano, e o trimestre JJA (MAM) foi verificado como sendo o período no qual apresentaram as maiores (menores) velocidades, com 13m/s (10m/s).

Outros autores estudaram os SCMs sobre a América do Sul e encontraram valores de velocidade de propagação diferentes quando comparados ao NEB. Sobre as Américas, Machado et al. (1998) mostraram que, embora muito variável, a velocidade média de propagação é de 43,2km/h, enquanto Filho et al. (2015) ao estudar a convecção na Amazônia e vizinhança, encontrou valores de 42,5km/h para SCMs cujo deslocamento ocorreu para oeste e 47,5km/h para sistemas com direção de propagação para leste.

Embora haja diferença entre os valores médios de velocidade de propagação dos SCMs do NEB e outras áreas da América do Sul, os resultados apresentados nesse estudo estão de acordo com a literatura revisada. Cabe ressaltar ainda que nos 17 anos de análise dessa pesquisa foi observado casos em que a velocidade média de sistemas com ciclo de vida longo foi superior a 100km/h, assim como em Junior (2016).

Tabela 4 - Climatologia mensal da velocidade (km/h) dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016

Meses	Velocidade (km/h)		
	Todos	Curta Duração	Longa Duração
JANEIRO	22,0 ($\pm 16,8$)	23,0 ($\pm 16,5$)	21,5 ($\pm 16,9$)
FEVEREIRO	21,1 ($\pm 16,5$)	22,8 ($\pm 16,1$)	20,4 ($\pm 16,6$)
MARÇO	20,8 ($\pm 16,6$)	22,4 ($\pm 15,9$)	20,1 ($\pm 16,8$)
ABRIL	21,4 ($\pm 16,1$)	21,2 ($\pm 15,5$)	21,5 ($\pm 16,4$)
MAIO	21,7 ($\pm 15,8$)	21,5 ($\pm 15,8$)	21,8 ($\pm 15,9$)
JUNHO	24,8 ($\pm 16,7$)	22,4 ($\pm 16,6$)	25,7 ($\pm 16,6$)
JULHO	24,1 ($\pm 16,0$)	23,8 ($\pm 15,8$)	24,3 ($\pm 16,1$)
AGOSTO	24,9 ($\pm 16,1$)	22,9 ($\pm 15,2$)	26,0 ($\pm 16,5$)
SETEMBRO	21,8 ($\pm 15,9$)	19,3 ($\pm 14,4$)	23,0 ($\pm 16,5$)
OUTUBRO	21,0 ($\pm 16,2$)	21,8 ($\pm 15,3$)	20,6 ($\pm 16,6$)
NOVEMBRO	21,6 ($\pm 16,3$)	22,3 ($\pm 15,6$)	21,3 ($\pm 16,6$)
DEZEMBRO	22,4 ($\pm 16,9$)	24,1 ($\pm 16,7$)	21,5 ($\pm 16,9$)
TOTAL	22,3($\pm 16,3$)	22,2($\pm 15,7$)	22,3($\pm 16,5$)

Fonte: Autor.

4.7 Climatologia Mensal da Direção de Propagação dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

A direção média de propagação dos SCMs no NEB é apresentada na Figura 30, para todos os SCMs, na Figura 31, para os SCMs de curta duração, e na Figura 32, para os sistemas de longa duração. O comprimento dos vetores de direção de propagação é diretamente proporcional à distância percorrida pelos SCMs, a qual foi abordada com mais detalhes no tópico anterior (4.6).

A direção de propagação, assim como a distância percorrida, está relacionada ao acompanhamento da posição (latitude e longitude) do centro de massa dos SCMs nas fases de gênese (inicial) e de dissipação (final).

Para o NEB, de acordo com a Figura 30, os resultados mostram que nos meses de fevereiro, março, abril e maio, período chuvoso principal da região, a variabilidade é alta, ou seja, não é possível identificar uma direção preferencial de propagação.

Os SCMs cuja gênese ocorrem no sul do NEB se propagam para oeste, norte, noroeste e sul, mas sendo observada ainda propagações de oeste para leste. Já para os SCMs cujas formações ocorrem no centro e norte da região, verifica-se que a propagação tende a ser preferencialmente de leste para oeste, porém ocorrem propagações para noroeste e sudoeste. A propagação de leste para oeste também é observada no período de setembro a janeiro, tanto para SCMs nos quais se formam no sul do NEB, quanto para os sistemas cuja gênese ocorrem no centro e norte da região.

Nos meses de junho, julho e agosto, período de pouca atividade convectiva na região, constata-se uma direção preferencial de propagação, a qual ocorre de leste para oeste na região norte do NEB, área onde a atividade convectiva fica concentrada nesse período.

Verifica-se ainda que, no período de fevereiro a maio, as distâncias percorridas pelos SCMs cuja gênese acontecem no centro e norte do NEB são maiores quando comparadas as distâncias dos sistemas que se formam no sul da região, sendo esse comportamento também verificado no período de junho a agosto.

No período compreendido de setembro a dezembro, a distância dos SCMs cuja gênese ocorrem no sul do NEB são maiores quando comparadas as distâncias dos sistemas cuja gênese acontecem no norte da região. Já no mês de janeiro, o comportamento das distâncias percorridas pelos SCMs apresenta menor variação em toda a região, não havendo diferenças significativas entre os sistemas que se formam em áreas distintas do NEB (norte, centro e sul), conforme pode ser visualizado na Figura 30.

Ao analisar o comportamento para SCMs com diferentes ciclos de vida, os resultados evidenciam que no mês de outubro, a direção de propagação é bastante variável para os SCMs de curta duração (Figura 31). No entanto, no período compreendido de novembro a janeiro, a direção de propagação é de sul para norte, sendo constatada uma direção preferencial para noroeste. Observa-se ainda que nos meses de novembro, dezembro e janeiro, na área central e sul do NEB, as distâncias percorridas pelos SCMs de curta duração são maiores quando comparadas as do norte da região.

Ao se analisar o comportamento mensal da direção de propagação dos SCMs de curta duração dentro do período chuvoso principal da região (fevereiro a maio), é verificada algumas diferenças. No mês de fevereiro, constata-se que os SCMs cuja gênese se dá no sul do NEB se propagam para o norte, enquanto os sistemas cuja formação ocorrem no norte da região possuem a direção de propagação bastante variável.

Nos meses de março, abril e maio o comportamento é bastante similar em toda a região, sendo verificada uma propagação preferencial de leste para oeste, mas também com propagações para noroeste e sudoeste. Para os meses de junho, julho, agosto e setembro, observa-se uma direção preferencial de propagação de leste para oeste no norte do NEB, onde a atividade convectiva fica concentrada nesse período.

No período chuvoso principal, as maiores distâncias percorridas pelos SCMs com ciclo de vida curto no NEB são observadas no sul da região no mês de fevereiro, na área central e sul no mês de março, e nos meses de abril e maio no norte da região. De outubro até janeiro, as maiores distâncias são observadas nos SCMs cuja gênese ocorrem no sul do NEB, enquanto de junho a setembro no norte da região.

Para os SCMs de longa duração (Figura 32), evidencia-se uma propagação preferencial de leste para oeste nos meses de setembro e outubro, sendo observada ainda propagações para sudoeste e noroeste. No período de novembro a janeiro observa-se propagações principalmente para o leste, noroeste e sudoeste da região.

A direção de propagação dos SCMs de longa duração (Figura 32) no período chuvoso principal da região, assim como os sistemas com ciclo de vida curto, apresenta variabilidade ao comparar os meses.

Em fevereiro constata-se que os SCMs cuja gênese se dá no sul do NEB se propagam preferencialmente para o noroeste, enquanto os sistemas cuja formação ocorrem no centro e norte da região possuem uma direção de propagação predominantemente para leste, mas com propagações para noroeste e sudoeste. No mês de março, evidencia-se uma propagação principalmente de leste para oeste em toda a região.

Já nos meses de abril e maio o comportamento é bastante similar, pois os SCMs cuja gênese ocorrem no sul do NEB tendem a se deslocar para leste e sudoeste, enquanto os sistemas cuja gênese acontecem no centro e no norte possuem propagações preferencialmente de leste para oeste, mas também com propagações para sudoeste. Constata-se que nos meses de junho, julho, agosto e setembro, há uma direção preferencial de propagação de leste para oeste no norte do NEB, onde a atividade convectiva fica concentrada nesse período.

As maiores distâncias percorridas pelos SCMs com ciclo de vida longo no período chuvoso principal do NEB são observadas nas áreas do sul para o mês de fevereiro, na área central e sul para o mês de março, e no norte da região nos meses de abril e maio. Nos meses de junho, julho e agosto as maiores distâncias percorridas são observadas pelos SCMs cuja gênese ocorre no norte do NEB, onde a convecção é mais concentrada nesse período. Em setembro, outubro e novembro as maiores distâncias são verificadas para os SCMs cuja gênese acontecem na área central e sul da região. Já em dezembro e janeiro não se observa diferenças nas distâncias dos SCMs cuja gênese ocorrem em áreas distintas do NEB.

Embora tenha sido constatada uma alta variabilidade na direção de propagação dos SCMs, nota-se que em todos os meses as propagações, independente do ciclo de vida (curta ou longa duração), são similares a circulação

de grande escala, particularmente o fluxo em baixos níveis que, no NEB, é de leste para oeste.

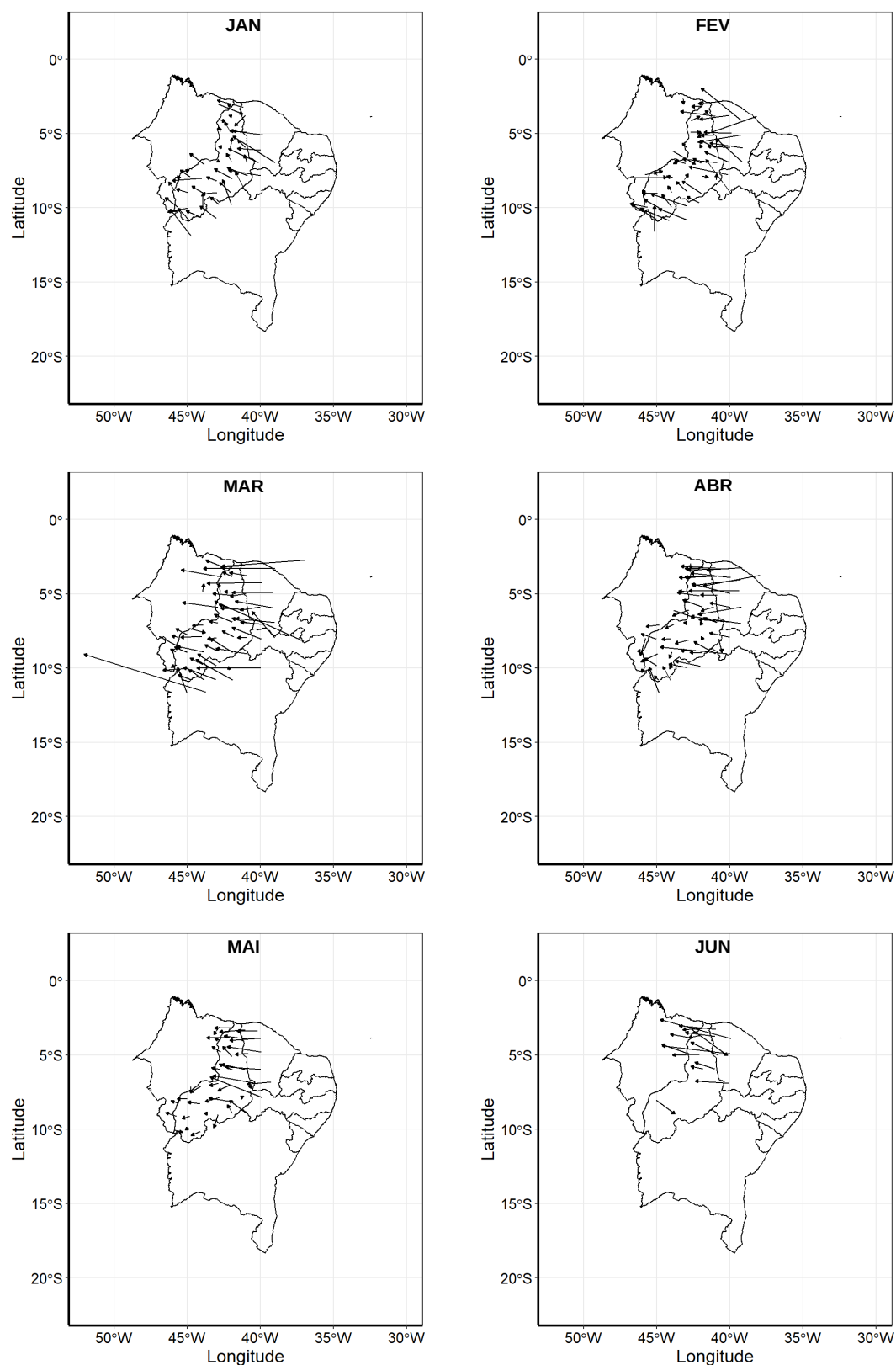
Apesar da região subtropical da América do Sul apresentar uma direção preferencial de propagação diferente, de oeste para leste, alguns estudos evidenciaram o importante papel da circulação de grande escala na trajetória dos SCMs (MACHADO et al., 1998; SAKAMOTO, 2009; ROMATSCHKE & HOUZE, 2010; EICHHOLZ et al., 2014).

Contudo, no período de fevereiro a maio e no período de junho a agosto, verifica-se que a direção de propagação dos SCMs, de curta e longa duração, tende a ser mais organizada no norte do NEB, quando comparada a área central e sul da região, pois as propagações ocorrem preferencialmente para o oeste e noroeste da região.

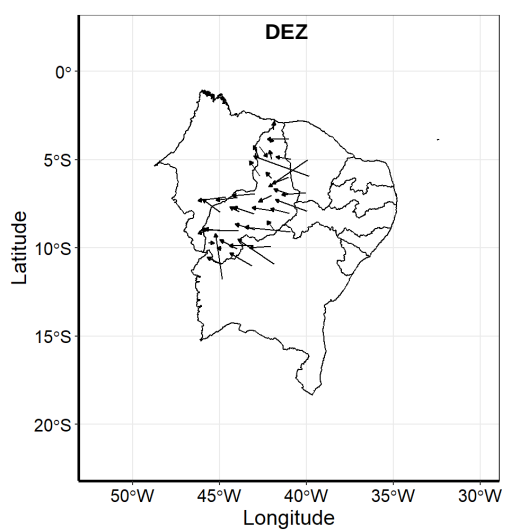
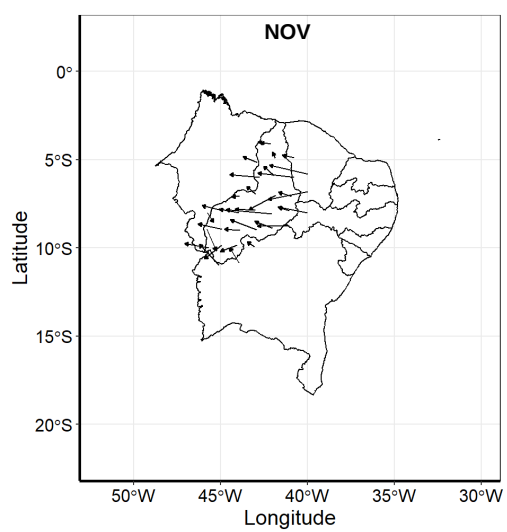
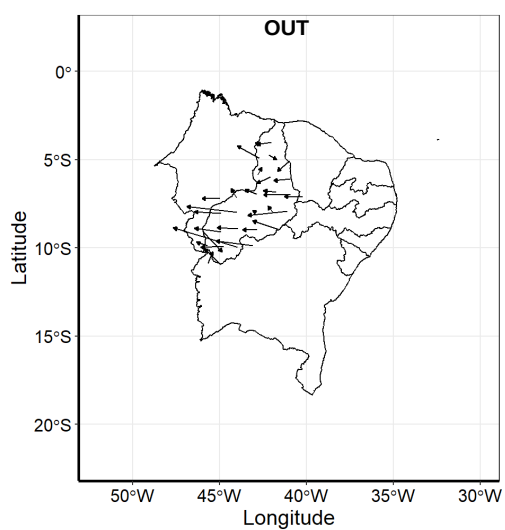
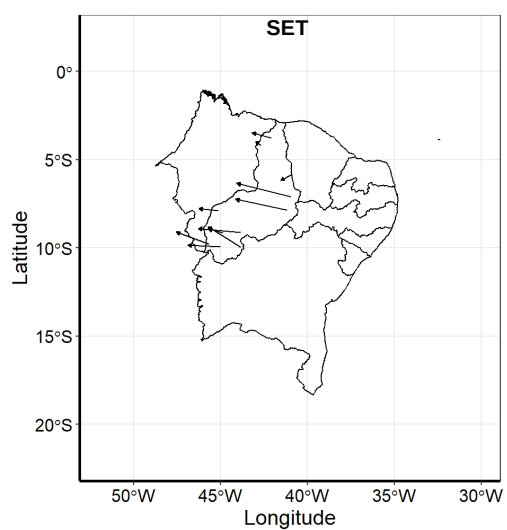
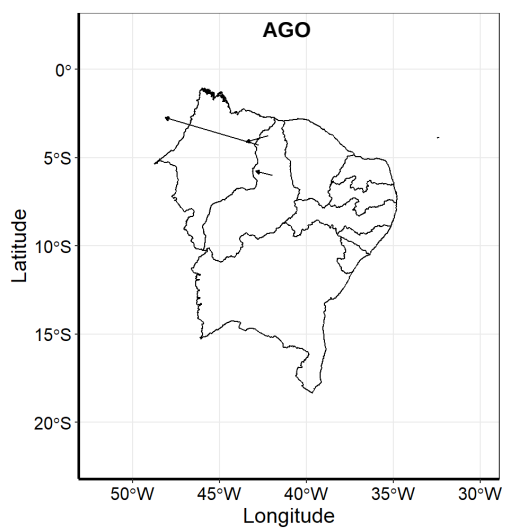
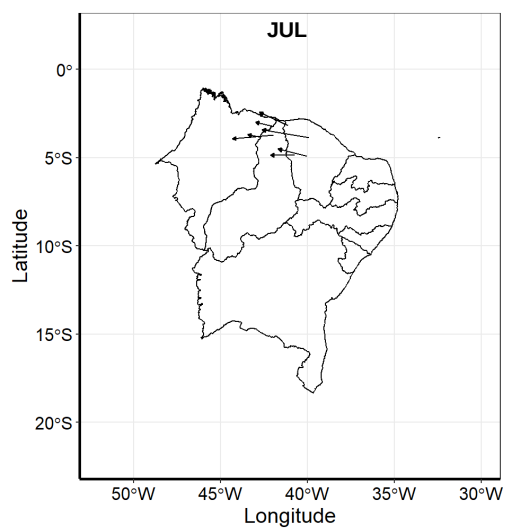
Uma possível explicação para esse comportamento no período de fevereiro a maio, pode estar relacionada aos ventos alísios no NEB, o qual se comporta de maneira mais zonal, ou seja, de leste para oeste. De acordo com Laurent et al. (2002), a direção de propagação dos SCMs no estado de Rondônia (RO), sul da Amazônia, é mais organizada quando o regime de vento é de leste, diferente do que acontece quando o regime do vento é de oeste, onde os SCMs apresentam maior variabilidade nas suas propagações. Esses resultados estão de acordo com um estudo de Sakamoto (2012) sobre os SCMs no Ceará e vizinhança, no qual mostrou que a direção preferencial de propagação é para oeste.

Nos outros meses também são verificadas propagações para o oeste da região, porém, de um modo geral, ocorre de maneira mais desorganizada, pois ocorrem propagações para outras direções. Isso ocorre porque, segundo Corfidi et al. (1996) e Fritsch e Forbes (2001), a trajetória dos SCMs em regiões tropicais, como o NEB, tende a acontecer em direção a fontes de calor e umidade, ou para regiões cujo conteúdo de vapor da água é elevado como, por exemplo, a Bacia Amazônica e o oceano Atlântico Tropical.

Figura 30 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016

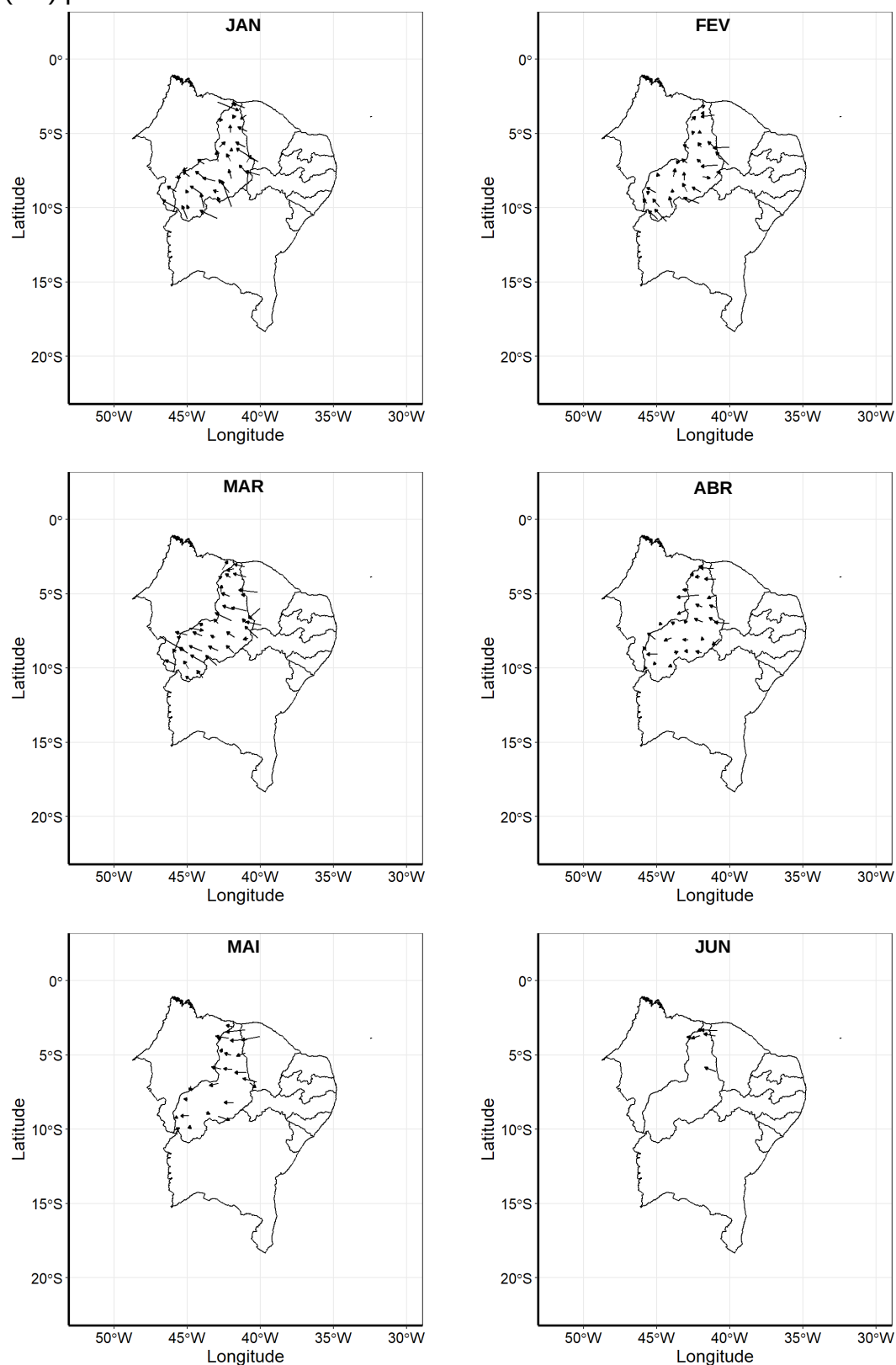


Continua na próxima página.

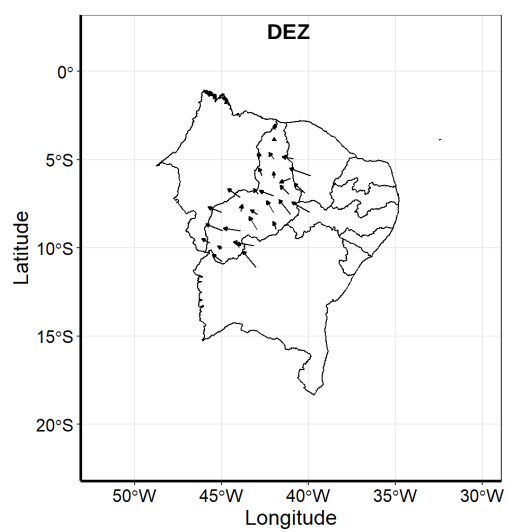
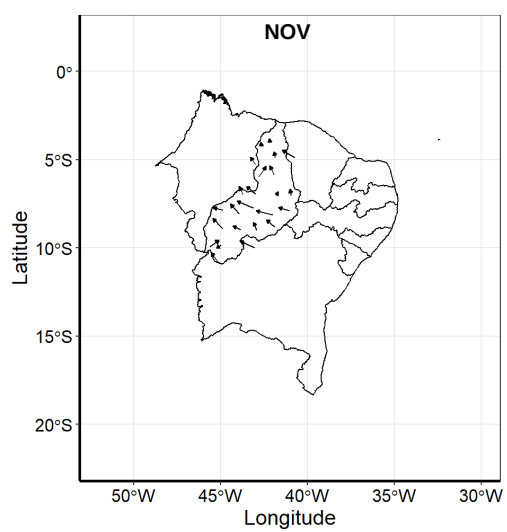
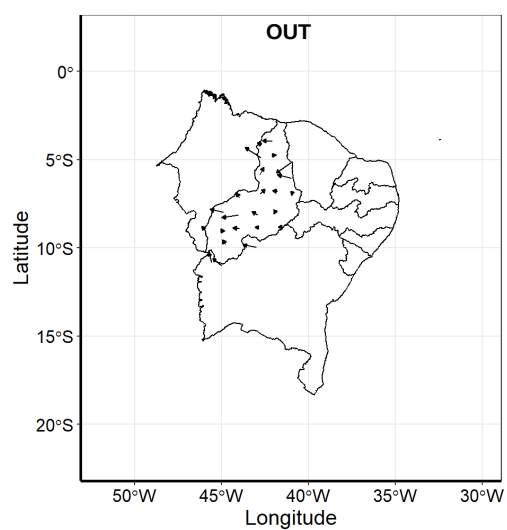
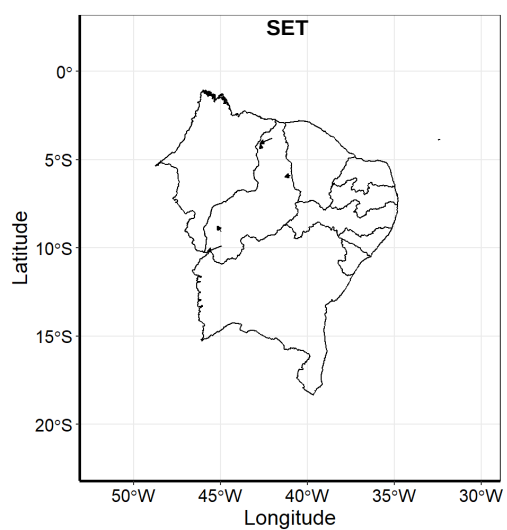
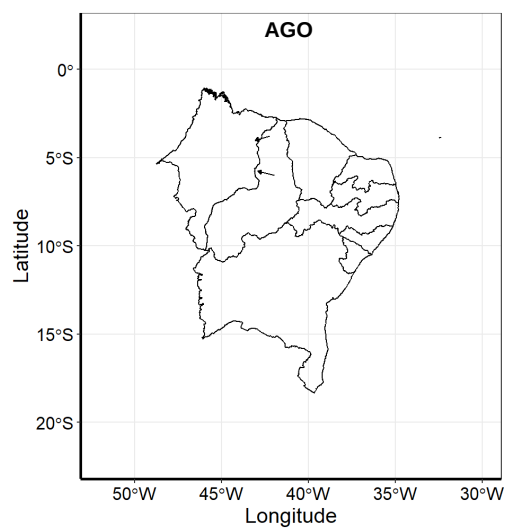
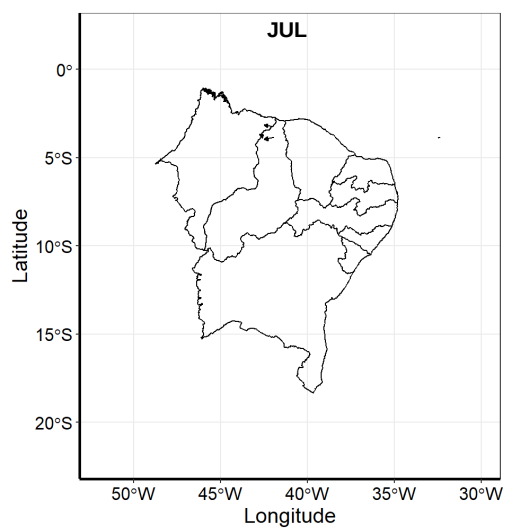


Fonte: Autor.

Figura 31 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs de curta duração no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016

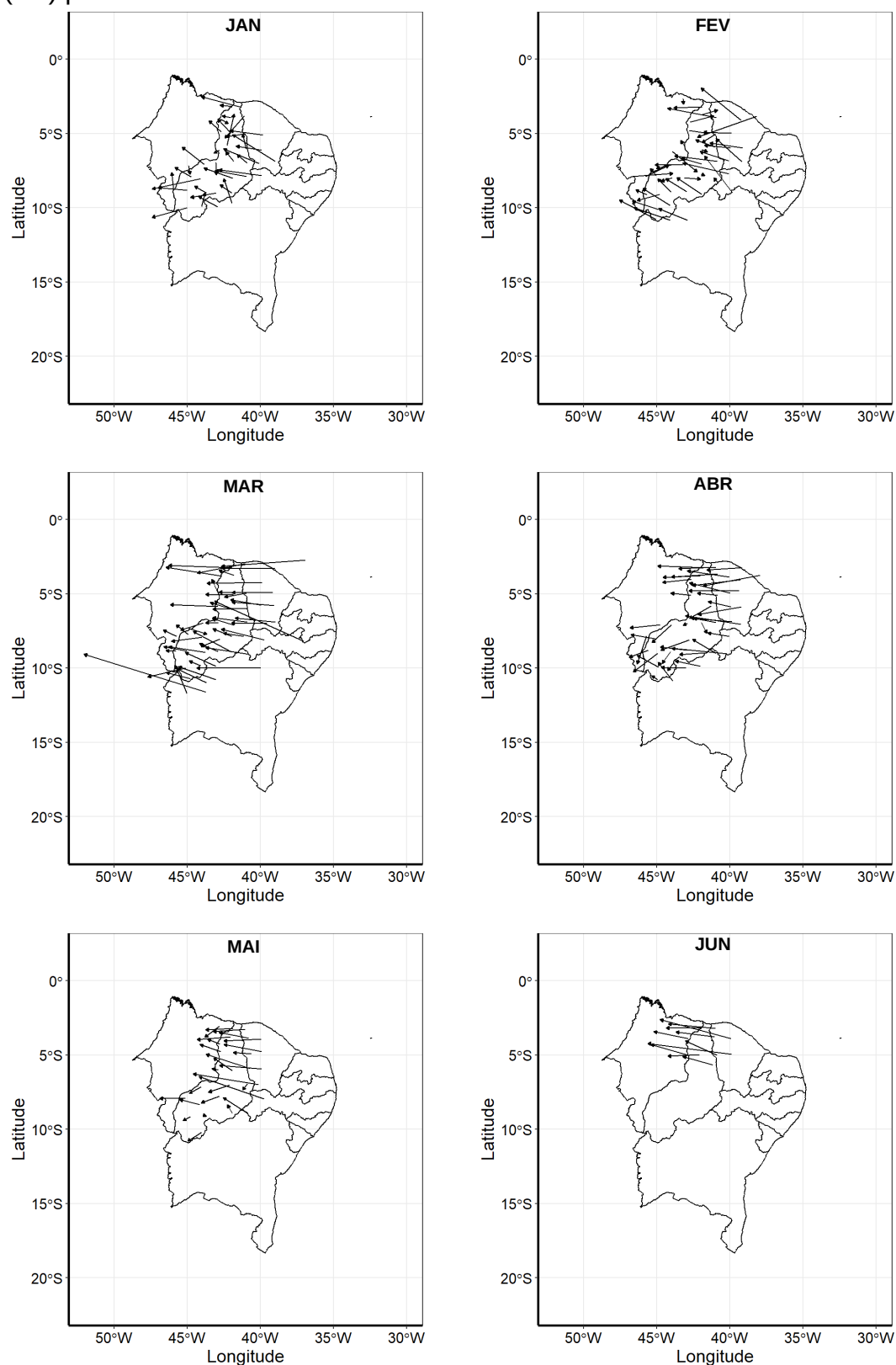


Continua na próxima página.

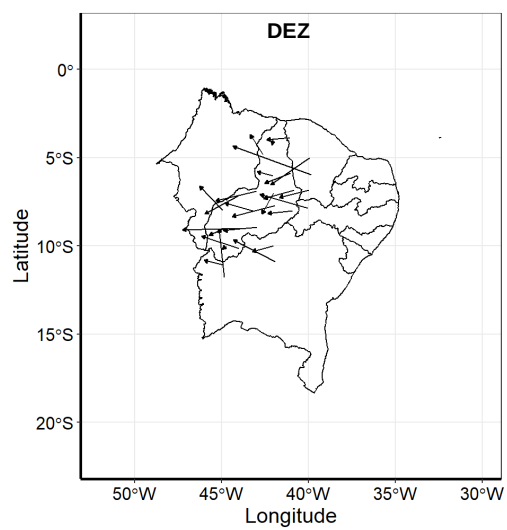
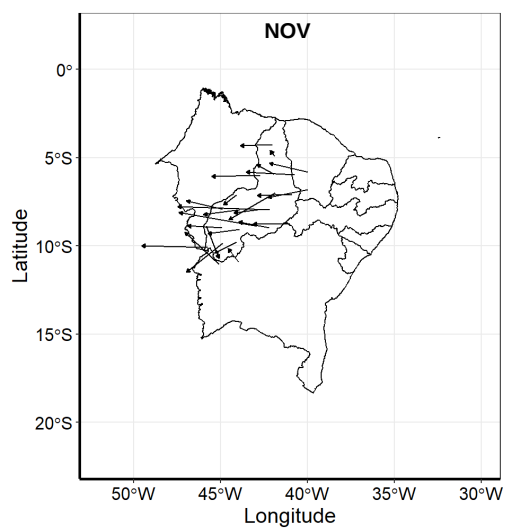
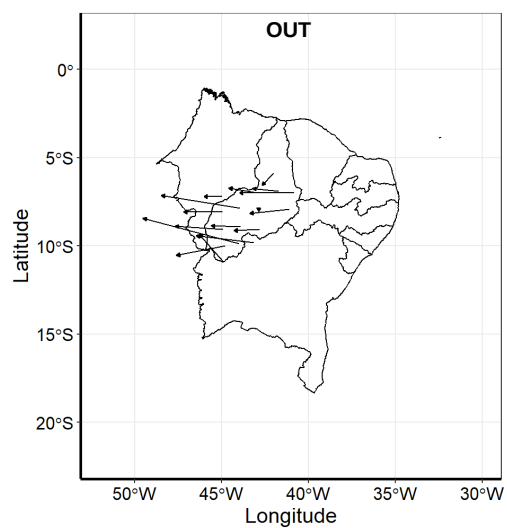
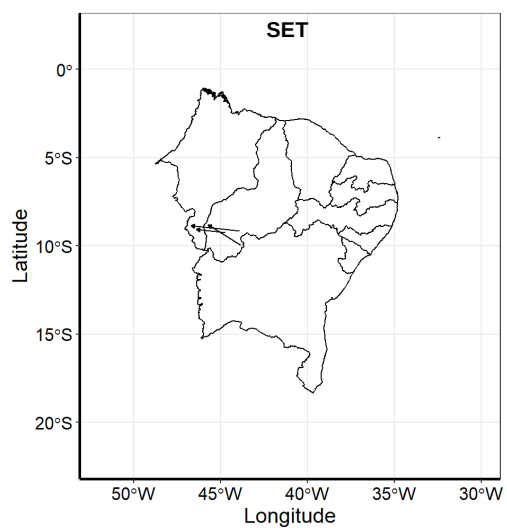
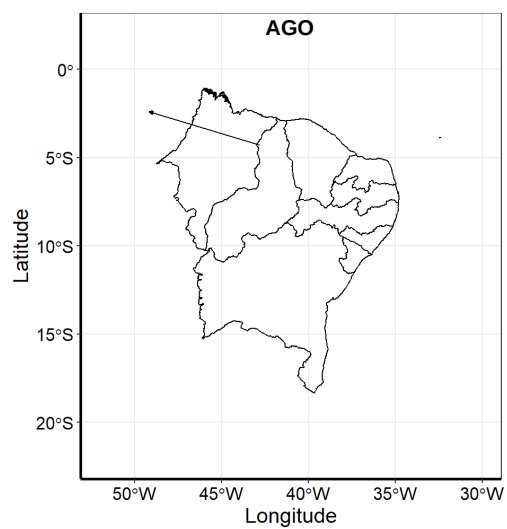
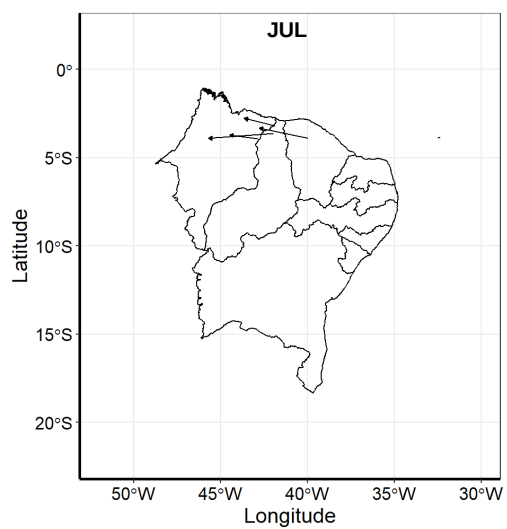


Fonte: Autor.

Figura 32 - Climatologia mensal da direção de propagação dos SCMs de longa duração no NEB. O comprimento do vetor está relacionado a distância (km) percorrida dos SCMs. Período utilizado: 2000 a 2016



Continua na próxima página.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

i. Para o NEB, não foi constatada diferença significativa na ocorrência de SCMs de curta e longa duração e o mês de março é o que apresenta a maior frequência de SCMs, enquanto agosto é o mês no qual os sistemas ocorrem com uma frequência menor.

ii. Em anos em que a quantidade de SCMs é menor, principalmente os de longa duração, a qualidade do período chuvoso principal (FMAM) é impactada negativamente, ou seja, tende a ser deficitária, conforme observado no período de 2013 a 2016. Além disso, a posição da ZCIT mais afastada do NEB no Atlântico Tropical e a presença de eventos de El Niño intensos no Pacífico Equatorial, durante o período FMAM, como o observado nos anos de 2015 e 2016, reduz de forma significativa a frequência de ocorrência dos SCMs, tanto de curta quanto de longa duração. Da mesma forma, a ZCIT mais próxima do NEB bem como eventos de La Niña podem contribuir para uma frequência maior de SCMs no NEB;

iii. O tempo médio de duração dos SCMs no NEB é de 7 horas (± 5 horas). Os SCMs de curta duração possuem tempo médio de 4 horas (± 1 hora), enquanto os sistemas de longa duração possuem tempo médio de 11 horas (± 5 horas).

iv. O período em que os SCMs ocorrem com a maior frequência é aquele no qual a ZCIT atua no NEB (FMAM), com 52,4% de todos os SCMs os quais se formam anualmente. O trimestre de novembro-dezembro-janeiro (NDJ) concentra 31,6% dos SCMs, enquanto o trimestre junho-julho-agosto (JJA) concentra 7,1% de todos os sistemas que ocorrem anualmente. No período FMAM, os SCMs de longa duração são mais frequentes do que os sistemas de curta duração. No trimestre NDJ a frequência dos sistemas convectivos de curta duração é maior do que os sistemas com ciclo de vida longo, e não há diferenças nas frequências de ocorrência dos SCMs de curta e longa duração no trimestre JJA;

v. Os SCMs no NEB se formam com maior frequência durante o dia, com uma frequência máxima às 14UTC. No início da manhã, às 8UTC, é o horário em que a frequência de gênese é mínima. À tarde, às 18UTC, é o horário em que os SCMs no NEB mais atingem o estágio de maturação, enquanto a fase de dissipação ocorre com maior frequência à noite, às 21UTC. Os SCMs de longa duração apresentam frequência máxima de gênese uma hora mais cedo (14UTC) do que os sistemas com ciclo de vida curto (15UTC). Os SCMs de longa duração possuem

dois períodos preferenciais de formação, as 14UTC e as 22UTC. Para atingir o estágio maduro os SCMs de curta duração levam um tempo médio menor, duas (2) horas, enquanto os SCMs com ciclo de vida longo levam, em média, quatro (4) horas. Durante a noite (21 as 08UTC), os SCMs de longa duração são mais frequentes do que os sistemas de curta duração;

vi. O tamanho médio dos SCMs no NEB é de 23.585km^2 ($\pm 14.831\text{km}^2$). Os SCMs de curta duração possuem tamanho médio menor do que os sistemas de longa duração, com 10.127km^2 ($\pm 4.731\text{km}^2$) e 37.293km^2 ($\pm 25.118\text{km}^2$), respectivamente. Na fase de maturação os SCMs de curta duração em relação aos de longa duração são, em média, 5 vezes menores (maiores). Julho é o mês em que o tamanho médio dos SCMs de curta e longa duração são menores. Os SCMs de curta e longa duração diferem quanto ao mês em que são maiores, sendo verificado o mês de março para os sistemas com ciclo de vida curto e outubro para os sistemas com ciclo de vida longo;

vii. A densidade de gênese dos SCMs no NEB é maior sobre o continente do que sobre o oceano Atlântico Tropical em todos os meses do ano, tanto para sistemas com ciclo de vida curto quanto para sistemas com ciclo de vida longo, com destaque para o mês de março. As áreas preferencias de gênese dos SCMs são: sul, sudeste, leste e nordeste do Maranhão; todo o território do Piauí; todo o território do Ceará, excetuando-se o nordeste na divisa com Rio Grande do Norte; oeste da Paraíba; centro-oeste de Pernambuco; norte e noroeste da Bahia. As áreas na fase de maturação não diferem muito das áreas em que ocorrem a gênese dos SCMs, mas constatou-se diferenças nas áreas em que os sistemas se dissipam pois, ocorrem mais a oeste do NEB. Além disso, os SCMs de longa duração possuem gênese em uma área mais ampla do NEB, comparativamente aos sistemas de curta duração;

viii. A distância média anual percorrida pelos SCMs é de $352,2\text{km}$ ($\pm 355,5\text{km}$), sendo que os sistemas de longa duração percorrem distâncias maiores do que os sistemas de curta duração, com $458,4\text{km}$ ($\pm 380,8\text{km}$) e $118,9\text{km}$ ($\pm 65,4\text{km}$), respectivamente. Julho é o mês em que os SCMs percorrem as menores distâncias, enquanto junho e outubro são os meses em que os sistemas percorrem as maiores. Para os SCMs com ciclo de vida curto, o mês de setembro é o que apresenta as menores distâncias e os meses de dezembro e janeiro as maiores. Já

os sistemas de longa duração percorrem as menores distâncias no mês maio, e as maiores nos meses de junho e outubro;

ix. A velocidade média anual dos SCMs no NEB é de 22,3km/h ($\pm 16,3$ km/h), e não há diferenças na velocidade média anual de sistemas com diferentes ciclo de vida (curta e longa duração). O trimestre junho-julho-agosto (JJA), no qual os DOLs são os principais sistemas indutores de convecção no NEB, é o período em que as velocidades médias dos SCMs são maiores;

x. A variabilidade na direção de propagação dos SCMs é alta, mas nota-se que em todos os meses as propagações obedecem a circulação de grande escala que, no NEB, é de leste para oeste. Nos meses em que a ZCIT (FMAM) e os DOLs (JJA) atuam com maior frequência no NEB, a direção de propagação dos SCMs tende a ser mais organizada no norte da região, quando comparada com as áreas central e sul da região, pois as propagações ocorrem preferencialmente para o oeste da região. No período de outubro a janeiro a direção de propagação é mais desorganizada, principalmente dos SCMs cuja formação ocorrem no sul do NEB.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base na literatura revisada e nos resultados encontrados nessa pesquisa, a seguir são feitas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Por serem considerados sistemas de baixa previsibilidade e estarem associados a eventos meteorológicos extremos, uma das sugestões de trabalho futuro é o de selecionar eventos de SCMs, de curta e longa duração, que tenham ocasionado chuvas intensas no NEB e testar a habilidade dos modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT), utilizados na meteorologia operacional, em reproduzir o ambiente meteorológico no qual os sistemas tiveram gênese.

Nesse trabalho, as análises não fizeram distinção entre os SCMs cuja gênese ocorreram sobre o continente e no oceano Atlântico Tropical, e uma vez que foi constatado que os sistemas oceânicos adentram a região continental do NEB, realizar as análises fazendo a distinção entre sistemas oceânicos e continentais se torna relevante.

Conforme foi citado anteriormente, uma das principais características dos SCMs é a de provocar chuvas intensas nos locais onde atuam. Por essa razão, é necessária uma análise a respeito da taxa de precipitação associada aos SCMs no NEB, de curta e longa duração, com alguns aspectos principais a serem abordados:

- Quais os tipos de SCMs que ocasionam as maiores taxas de precipitação sobre o NEB: os oceânicos ou os continentais? SCMs de curta ou longa duração?
- Qual a taxa de precipitação dos SCMs que atuam no NEB quando atingem o seu tamanho máximo (fase madura)? E nas outras fases (gênese e dissipação), qual a taxa de precipitação?

Outra importante questão a ser respondida diz respeito aos desastres naturais. Para o NEB, os principais desastres naturais ocasionados por SCMs bem como qual o tipo de sistema (curta ou longa duração; oceânicos ou continentais) causam mais prejuízos e, conseqüentemente, decretos de Situação de Emergência (SE) pela Defesa Civil (DC), ainda não são conhecidos.

Assim como em outros trabalhos, nesse estudo um segundo pico de horário preferencial de gênese foi encontrado. É possível que esteja associado a SCMs com ciclo de vida longo que, normalmente, estão relacionados a eventos intensos de precipitação e, por essa razão é necessária uma investigação mais detalhada sobre esse tema.

Verificar se a gênese dos SCMs e o comportamento médio durante estes anos de maior ocorrência mudaram (se a gênese foi mais próximo ao litoral ou não).

Outro importante aspecto a ser analisado é por quê o estado do Piauí é o que mais ocorre gênese de SCMs?

Verificar a quantidade de eventos de DOLs nos anos em que a ocorrência de SCMs foi maior.

Por fim, além das questões anteriormente citadas, em um cenário de mudanças climáticas, quais as projeções futuras em relação aos SCMs no NEB?

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B.; BARBOSA, A. C. B.; SILVA, E. M.; JUNIOR, F. C. V.; SILVA, M. L.; SANTOS, A. C. S.; LIRA, M. A. T.; SOMBRA, S. S. **Oscilações intrassazonais convectivas entre as regiões Índico-Pacífico e o Nordeste do Brasil**: Algumas Características Observacionais e de Modelagem. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 1, p. 193-206, 2018.
- ALVES, J. M. B.; TEIXEIRA, R. F. B.; FERREIRA, A. G. **Um intenso sistema convectivo de mesoescala no setor leste da região nordeste: o caso de 20 a 21 de maio de 1999**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 16, n.1, p. 19-31, 2001.
- ARAGÃO, J. O. R. **Um estudo a estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, p. 219, 1975.
- ARNAUD, Y.; DESBOIS, M.; MAIZI, J. **Automatic tracking and characterization of African convective systems on meteosat pictures**. *J. Appl. Meteor.*, 31, p. 443-453, 1992.
- AUGUSTINE, J. A.; HOWARD, K. W. **Mesoscale Convective Complexes over the United States during 1985**. *Monthly Weather Review*, Boston, v. 116, n. 3, p. 685-701, 1988.
- BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. **Sistemas convectivos intensos no semi-árido brasileiro: o controle da grande escala**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 3, p. 395-410, 2005.
- BARBOSA, R.L.; OYAMA, M. D.; MACHADO, L. A. **Climatologia das perturbações convectivas iniciadas na costa norte do Brasil**. *Rev. Bras. Meteor.* v. 21, n. 1, p. 107-117, 2006.
- BLAMEY, R. C.; REASON, C. J. C. **Mesoscale convective complex over southern Africa**. *Journal of Climate*, v. 25, p. 753-766, 2012.
- BYERS, H. R.; BRAHAM, R. R. J. **Thunderstorm structure and circulation**. *Journal of Meteorology*, v. 5, n. 3, p. 71-86, 1949.
- CALBETE, N. O.; GAN, M.; SATYAMURTY, P. **Vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam sobre a região Nordeste do Brasil**. *Climanalise especial*. Edição Comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 21, 1996.
- CARDOSO, L. K. S. **Aspectos climáticos das posições da zona de convergência intertropical e dos anticiclones semipermanentes do atlântico sul e do pacífico sul: relações com regimes de chuva no nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, PB, 2019.

CARVALHO, L. M. V.; C. JONES. **A satellite method to identify structural properties of mesoscale convective systems Based on Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE)**. J. Appl. Meteor., n. 40, p. 1683-1701, 2001.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. **Climatology of south American cold fronts**. VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Wellington, New Zealand, 2003.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; Dias, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de Textos, 2009.

CHAMIS, M. L. **Climatologia da zona de convergência do atlântico sul: holoceno médio, presente e futuro**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

CHAN, S. C. **Análise dos distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico tropical sul**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, 1990.

CONFORTE, J. C. **Um estudo de complexos convectivos de mesoescala sobre a América do Sul**. Tese de Doutorado, 140 f. INPE, São Jose dos Campos, SP, 1997.

CORFIDI, S. F.; MERRITT, J. H.; FRITSCH, J. M. **Predicting the movement of mesoscale convective complexes**. Wea. Forecasting, 11, p. 41-46, 1996.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; GONÇALVES, W. A.; MATTOS, E. V. **Sistemas convectivos de mesoescala associados a eventos extremos de precipitação sobre o semiárido do nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Vol. 42 - 1 / 2019, p. 317-328, 2019.

COUTINHO, E. C.; FISCH, G. **Distúrbios ondulatórios de leste (DOL's) na região do centro de lançamento de Alcântara - MA**. Revista Brasileira de Meteorologia, São José Dos Campos, SP, n. 22, p. 193-203, 2007.

DEAN, G. A. **Three dimensional wind structure over south America and associated rainfall over Brazil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, (LAFE-164), 1971.

DOSWELL, C. A.; BOSART, L. F. **Extratropical synoptic-scale processes and severe convection**. Meteorological Monographs, American Meteorological Society, vol. 28, n. 50, p. 27-69, 2001.

EICHHOLZ, C. W. **Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul, 2011.

EICHHOLZ, C. W.; CAMPOS, C. R. J. **Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul em 2006.** Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Vol. 37 - 1 / 2014, p. 70-80, 2014.

FEIDAS, H.; CARTALIS, C. **Monitoring mesoscale convective cloud systems associated with heavy storms with the use of meteosat imagery.** J. Appl. Meteor., v. 40, p. 491-512, 2001.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. **Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, n. 1, 2005.

FERREIRA, N. J.; CHAN, C. S.; SATYAMURTY, P. **Análise dos distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico equatorial sul.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, Rio de Janeiro, Anais, SBMET, p. 462-466, 1990.

FERREIRA, R. N.; RICKENBACH, T. M.; HERDIES, D. L.; CARVALHO, L. M. V. **Variability of south american convective cloud systems and tropospheric circulation during january-march 1998 and 1999.** American Meteorological society, v. 131, p. 961-973, May 2003.

FILHO, A. J. P.; CARBONE, R. E.; TUTTLE, J. D.; KARAM, H. A. **Convective rainfall in Amazonia and adjacent tropics.** Atmospheric and Climate Sciences, Scientific Research Publishing, v. 5, n. 02, p. 137, 2015.

FRITSCH, J. M.; FORBES, G. S. **Mesoscale convective systems.** Meteorological Monographs, American Meteorological Society, vol. 28, n. 50, 323-357, 2001.

GAN, M. A. **Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul.** Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-5400-TDI/479, 1992.

GONZALES, R. A.; ANDREOLI, R. V.; CANDIDO, L. A.; KAYANO, M. T.; SOUZA, R. A. F. **A influência do evento el nino – oscilação sul e atlântico equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul.** Revista ACTA Amazônica, v. 43(4), p. 469-480, 2013.

GRAY, W. M.; JACOBSON, J. R. W. **Diurnal Variation of Deep Cumulus Convection.** Mon. Wea. Rev., 105, p. 1171-1188, 1977.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em <https://clima.inmet.gov.br/prec>. Acesso em: novembro de 2020.

JUNIOR, A. W. M. **Uma ferramenta para análise automática dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. **Upper tropospheric cyclonic vortices in the subtropical South Atlantic**. Tellus 33, p. 538-551, 1981.

LAURENT, H. **Characteristics of the Amazonian mesoscale convective systems observed from satellite and radar during the WETAMC/LBA experiment**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–21, 2002.

LIEBMANN, B.; SMITH, C. A. **Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset**. Bull. Amer. Meteor. Soc., v. 77, p. 1275-1277, 1996.

LIMA, K. C. **Descargas elétricas atmosféricas em sistemas convectivos de mesoescala no sul da América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2005.

LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; FREITAS, I. G. F. **Características dos complexos convectivos de mesoescala no Nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. Especial, p. 727-734, 2020.

MACEDO, S. R.; L. A. T. MACHADO; D. VILA. **ForTraCC – Previsão a curto prazo e evolução dos sistemas convectivos**. ForTraCC V1.1 – Guia do Usuário. 20pp, 2004.

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

MACHADO, L.; ROSSOW, W. **Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters**. Monthly Weather Review, v. 121, n. 12, p. 3234–3260, 1993.

MADDOX, R. A. **Mesoscale convective complexes**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, p. 374–1387, 1980.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; BESERRA, E.A.; LACERDA, F.F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. In: Medeiros S.S. Gheyi H.R. Galvão C.O. Paz V.P.S. Organizadores: Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido; p. 384-422, 2011.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHAES, A. R.; FONTANELE, D. **A seca plurianual de 2010-2017 no Nordeste e seus impactos**. Parc. Estrat. Brasília DF, v. 22, n. 44, p. 17-40, 2017.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. **On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model**. J. Atmos. Sci., v. 38, n. 12, p. 26253-2675, 1981.

NICOLINI, M.; SAULO, A. C.; TORRES, J. C.; SALIO, P. **Enhanced precipitation over southeastern south america related to strong low-level jet events during austral warm season**. Meteorologia, n. 27, p. 59-69, 2002.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, 1986.

RAO, V. B.; MARQUES, V. S. **Water vapor characteristics over Northeast Brazil during two contrasting years**. J. Climate Appl. Meteor., v.23, n.6, p. 440-444, 1984.

REHBEIN, A. **Sistemas convectivos de mesoescala observados na Bacia Amazônica durante o projeto GOAmazon**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

REHBEIN, A; AMBRIZZI T.; MECHOSO, C. R. **Mesoscale convective systems over the Amazon basin. Part I: climatological aspects**. Internacional Journal of Climatology, n. 38, p. 215-229, 2017.

REHBEIN, A; AMBRIZZI T.; MECHOSO, C. R.; ESPINOSA, S. A. I.; MYERS, T. A. **Mesoscale convective systems over the Amazon basin: The GoAmazon2014/5 program**. Internacional Journal of Climatology, n. 39, p. 5599-5618, 2019.

REHBEIN, A. **Sistemas convectivos de mesoescala na bacia Amazônica: clima presente e projeções futuras em cenários de mudanças climáticas**. Tese de Doutorado em Meteorologia - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2021.

ROCA, R.; FIOLEAU, T. **Extreme precipitation in the tropics is closely associated with long-lived convective systems**. Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (Université de Toulouse III, CNRS, CNES, IRD), Toulouse, France. Communications Earth & Environment, 2020.

ROCHA, A. P. B.; DANTAS, E. M.; MORAIS, I. R. D.; OLIVEIRA, M. S. **Geografia do Nordeste**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, RN, n. 2, p. 216, 2011.

ROMATSCHKE U; HOUZE R. A. **Extreme Summer Convection in South America**. Journal of Climate. v.23, p. 3761–3791, 2010.

SAKAMOTO, M. S.; MACHADO, L. A. T.; AMBRIZZI, T. **Algumas considerações sobre os sistemas convectivos observados durante o SALLJEX**. Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, SP, 2008.

SAKAMOTO, M. S. **Sistemas convectivos de mesoescala observados na região subtropical da América do Sul durante o SALLJEX**. Tese de Doutorado

em Meteorologia – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

SAKAMOTO, M. S. **Moisture sources and life cycle of convective systems over western colombia**. Advances in Meteorology, v. 2011.

SAKAMOTO, M. S. **Características gerais dos sistemas convectivos de mesoescala observados no estado do Ceará e adjacências**. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Gramado, Rio Grande do Sul, RS, 2012.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. **Mesoscale convective systems over southeastern south America and their relationship with the South American Low-Level Jet**. Monthly Weather Review, v. 135, p. 1290-1309, 2007.

SEGALIN, B. **Características dos sistemas convectivos de mesoescala nas simulações climáticas do RegCM4**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

SELUCHI, M. E.; CALBETE, N. O.; ROZANTE, J. R. **Análisis de un desarrollo ciclónico en la costa oriental de América Del Sur**. Rev. Bras. Meteor., 16(1), p. 51-65, 2001.

SILVA DIAS, M. A. F. **Storms in Brazil**. Storms, R. Pielke Jr. e R. Pielke Sr., Ed., Routledge, p. 207-219, 1999.

SIQUEIRA, J. R.; ROSSOW, W. B.; MACHADO, L. A. T.; PEARL, C. **Structural characteristics of convective systems over south America related to cold-frontal incursions**. Mon. Wea. Rev., n. 133, p. 1045-1064, 2005.

SOUZA, E. B.; ALVES, J. M. B. **Estudo diagnóstico de um complexo convectivo de mesoescala observado no norte do Nordeste do Brasil**. X CBMet e VIII Congresso da Flismet, Brasília, GO, 1998.

SOUZA, P. S. **Estudo da atuação de um sistema de latitudes médias no semi-árido do nordeste do Brasil: aspectos de grande e mesoescala**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Paraíba – PB, 2003.

TEIXEIRA, R. F. B. **O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, n. 3, p. 282-291, 2008.

UVO, C. B. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do Nordeste brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1989.

UVO, C. B.; NOBRE, C. A. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do nordeste brasileiro. Parte I: A posição da ZCIT no Atlântico equatorial**. In: Climanálise, v.4, n.7, p. 34-40, 1989a.

VEBER, M. E; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. **Desenvolvimento de Atividades Convectivas Sobre a Região Nordeste do Brasil, Organizada Pela Extremidade Frontal**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. Especial, p. 995-1003, 2020.

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

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern applied statistics with S. Fourth. New York: Springer, 2002**. ISBN 0-387-95457-0. Disponível em: <<http://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>>.

VIANA, D. R.; AQUINO F. E.; MUÑOZ V. A. **Avaliação de desastres no Rio Grande do Sul associados a complexos convectivos de mesoescala**. Sociedade & Natureza, Uberlândia, 21 (2), p. 91-105, 2009.

VILA, D.A. **Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre sudamerica: ciclos de vida y circulación en gran escala asociada (rainy mesoscale convective systems over South America: life cycle and the associated large scale environment)**. Programa de Pós-graduação em Ciências. Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Universidade de Buenos Aires, Tese de doutorado, 132 p, 2004.

VILA, D.; MACHADO, L. A. T.; VELASCO, E. I. **Los sistemas convectivos de mesoescala sobre la Cuenca del Plata: la técnica FORTRACC**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis, SC, Anais, SBMet, 2006.

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

VITORINO, M. I.; SILVA, M. E. S.; ALVES, J. M. B. **Classificação de sistemas convectivos de mesoescala no setor norte do Nordeste brasileiro**. Rev. Bras. Meteorol., v. 12, n. 1, p. 21-32, 1997.

WILLIAMS, M.; HOUZE, R. A. **Satellite-observed characteristics of winter monsoon cloud clusters**. Mon. Wea. Rev., n. 115, p. 505-519, 1987.

ZIPSER, E. J. **Use of a conceptual modelo of the life cycle of mesoscale convective systems to improve very-short-range forecasts nowcasting**. K. Browning, Ed., Academic Press, p. 191-204, 1982.

ANEXOS

ANEXO A – RELAÇÃO DE ANOS NEUTRO, COM EL NIÑO E LA NIÑA.

Quadro 1 - Oceanic Niño Index (ONI) para os anos de 2000 a 2016. Índice padrão para identificar os fenômenos El Niño (aquecimento acima do normal das águas do Pacífico Equatorial) e La Niña (resfriamento abaixo do normal das águas do Pacífico Equatorial), segundo o Climate Prediction Center (CPC). Para El Niño leva-se em consideração 5 trimestres consecutivos com valores acima de 0,5 e para La Niña 5 trimestres consecutivos de valores abaixo de -0,5. A intensidade dos fenômenos pode ser classificadas em: fracos ($\geq 0,5$ e $\leq 0,9$), moderados ($\geq 1,0$ e $\leq 1,4$) e fortes ($\geq 1,5$)

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6

Fonte dos Dados: Climate Prediction Center (CPC).

APÊNDICES

**APÊNDICE A – RELAÇÃO DE QUANTAS IMAGENS (POR ANO) FORAM
PROCESSADAS PELO ALGORITIMO FORTRACC.**

Quadro 2 - Relação da quantidade de imagens no canal infravermelho processadas anualmente (2000 a 2016) pelo ForTraCC

ANO	QUANTIDADE DE IMAGENS
2000 (bissexto)	15.744
2001	17.520
2002	17.520
2003	17.520
2004 (bissexto)	17.568
2005	17.520
2006	17.520
2007	17.520
2008 (bissexto)	17.568
2009	17.520
2010	17.520
2011	17.520
2012 (bissexto)	17.568
2013	17.520
2014	17.520
2015	17.520
2016 (bissexto)	11.712
TOTAL	290.400

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – RELAÇÃO DA QUANTIDADE DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA QUE SOBRARAM APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS NAS SAIDAS DO FORTRACC.

A Tabela 5 mostra a quantidade de sistemas que sobraram após a aplicação dos filtros, utilizando o pacote Percolator (<https://github.com/salvatirehbein/percolator>) versão 0.4.4), na seguinte ordem: pré-filtro; filtro_a; filtro_b; filtro_d. Os resultados do *pré-filtro* e do *filtro_a* abrangem a América do Sul, em uma grade compreendida entre as latitudes de 13°N a 45°S e longitudes de 82°W a 33°W. Já os resultados do *filtro_b* e do *filtro_d* correspondem aos SCMs que se formaram/atuaram sobre o NEB.

Salienta-se que outros critérios, além dos filtros, foram estabelecidos no tópico 3.2.1 para a seleção dos SCMs.

- **Pré-filtro:** Calcula o tempo (UTC) de duração do SCM e as distâncias totais entre os centros de massa na fase de gênese e de dissipação e obtém as fases do ciclo de vida para, assim, filtrar os SCMs de acordo com o padrão característico de crescimento, máxima expansão e decaimento. Além disso, filtra os SCMs de acordo com o tipo de gênese, apenas sistemas considerados novos (N), ou seja, de origem espontânea.
- **Filtro_a:** Filtra os SCMs com ciclo de vida igual ou superior a 3 horas e classifica os SCMs em curta ou longa duração (aqui chamado de **filtro_a**).
- **Filtro_b:** Filtra os SCMs de acordo com a região de interesse. Nesse estudo todos os SCMs, em pelo menos um momento do seu ciclo de vida, tiveram sua trajetória sobre a região do NEB;
- **Filtro_d:** Filtra os SCMs de acordo com o tamanho da área inicial que, nesse caso, é de no mínimo 150 pixels (2.400 km²). Além disso, filtra os SCMs cujos deslocamentos, entre um passo de tempo e outro, foram menores do que 300km, para evitar ligações inexistentes entre SCMs diferentes .

Os resultados apresentados nesse estudo são baseados no número de SCMs resultantes após a aplicação do *filtro_d*. Na Tabela 5, além do total de SCMs resultantes após a aplicação do *filtro_d*, está discriminado quanto desse total corresponde a SCMs de curta e longa duração.

Tabela 5 - Quantidade de SCMs resultantes após a aplicação dos filtros nas saídas do ForTraCC. Período utilizado: 2000 a 2016

Ano	Pré-filtro	Filtro_a	Filtro_b	Filtro_d		
				Total	Curta Duração	Longa Duração
2000	56.498	22.354	381	347	172	175
2001	70.189	24.521	551	469	219	250
2002	70.877	23.421	407	381	171	210
2003	60.835	19.787	369	325	160	165
2004	62.868	20.529	357	328	166	162
2005	62.047	20.221	352	312	155	157
2006	65.167	20.876	443	399	188	211
2007	62.153	19.415	322	285	134	151
2008	64.364	20.699	389	337	153	184
2009	70.754	22.803	492	435	184	251
2010	64.319	21.213	382	352	161	191
2011	65.472	21.461	429	379	171	208
2012	77.466	18.256	369	329	168	161
2013	86.058	13.780	187	171	127	44
2014	81.270	12.879	191	177	127	50
2015	75.641	12.273	193	190	148	42
2016	51.167	8.052	118	113	85	28
Total	1.147.145	322.540	5.932	5.329	2.689	2.640

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – RELAÇÃO DOS MESES SEM INFORMAÇÃO (S.I.) E MESES EM QUE O FORTRACC NÃO RASTREOU (zero SCMs) SISTEMAS DE CURTA E LONGA DURAÇÃO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.

Tabela 6 - Relação dos meses sem informação (S.I.) e meses em que o ForTraCC não rastreou sistemas (zero SCMs). Período utilizado: 2000 a 2016

ANO	SITUAÇÃO	
	SCM - Curta Duração MESES	SCM - Longa Duração MESES
2000	S.I. Jan	S.I. Jan
2001	zero SCMs Ago	zero SCMs Ago
2002	zero SCMs Jul	
2003		
2004		
2005		zero SCMs Ago
2006		zero SCMs Jul
2007	zero SCMs Ago	zero SCMs Ago
2008		
2009	zero SCMs Ago	zero SCMs Jul
2010	zero SCMs Set	zero SCMs Ago
2011	zero SCMs Set	
2012	zero SCMs Ago	zero SCMs Jul - Ago
2013		zero SCMs Ago
2014	zero SCMs Jul	zero SCMs Jul – Ago - Set
2015	zero SCMs Ago	zero SCMs Jun - Jul – Ago - Set
2016	S.I. Set – Out – Nov – Dez	zero SCMs Jun – Jul - Ago
		S.I. Set – Out – Nov – Dez

Fonte: Autor.

APÊNDICE D – CLIMATOLOGIA MENSAL DA ÁREA MÉDIA (km²), COM OS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO, DOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCMs) NO NORDESTE DO BRASIL.

Tabela 7 - Climatologia mensal da área média (km²) dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016

Meses	Área Média (km ²)		
	Todos	Curta Duração	Longa Duração
JANEIRO	35.739 (±62.616)	11.327 (±13.103)	47.585 (±72874)
FEVEREIRO	39.805 (±58.999)	10.509 (±12.511)	51.028 (±65573)
MARÇO	45.574 (±76.104)	11.888 (±16.479)	59.883 (±86314)
ABRIL	34.950 (±63.684)	9.774 (±13.808)	45.522 (±72.807)
MAIO	25.675 (±35.150)	8.965 (±6.770)	32.311 (±39.410)
JUNHO	25.205 (±35.555)	9.556 (±7.724)	30.845 (±39.729)
JULHO	19.245 (±24.536)	8.384 (±7.364)	24.768 (±28.112)
AGOSTO	22.251 (±31.753)	9.205 (±6.484)	29.840 (±37.610)
SETEMBRO	33.026 (±48.226)	11.179 (±16.263)	43.369 (±54.493)
OUTUBRO	50.485 (±107.379)	9.531 (±7.054)	69.329 (±12.5248)
NOVEMBRO	39.566 (±71.710)	10.583 (±14.701)	53.426 (±83.094)
DEZEMBRO	35.421 (±65.748)	9.991 (±9.950)	48.610 (±77.488)

Fonte: Autor.

APÊNDICE E – CLIMATOLOGIA MENSAL DA DISTÂNCIA (km) PERCORRIDA, COM OS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO, DOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCMs) NO NORDESTE DO BRASIL.

Tabela 8 - Climatologia mensal da distância (km) percorrida dos SCMs no NEB. Período utilizado: 2000 a 2016

Meses	Distância (km) Percorrida		
	Todos	Curta Duração	Longa Duração
JANEIRO	325,4 ($\pm 301,5$)	135,3 ($\pm 70,8$)	417,6 ($\pm 326,5$)
FEVEREIRO	349,5 ($\pm 342,6$)	124,3 ($\pm 76,9$)	435,8 ($\pm 365,0$)
MARÇO	348,5 ($\pm 294,7$)	123,5 ($\pm 65,7$)	444,1 ($\pm 302,1$)
ABRIL	337,6 ($\pm 323,4$)	115,6 ($\pm 66,1$)	430,9 ($\pm 342,5$)
MAIO	311,2 ($\pm 333,9$)	118,3 ($\pm 70,3$)	387,9 ($\pm 364,9$)
JUNHO	446,5 ($\pm 442,9$)	121,9 ($\pm 68,7$)	563,6 ($\pm 462,0$)
JULHO	297,4 ($\pm 269,2$)	127,5 ($\pm 67,6$)	383,7 ($\pm 291,3$)
AGOSTO	377,3 ($\pm 365,4$)	118,3 ($\pm 57,0$)	528,0 ($\pm 384,3$)
SETEMBRO	389,3 ($\pm 594,0$)	86,7 ($\pm 50,6$)	532,6 ($\pm 674,5$)
OUTUBRO	404,9 ($\pm 429,0$)	110,3 ($\pm 61,7$)	540,5 ($\pm 456,8$)
NOVEMBRO	319,3 ($\pm 291,2$)	116,2 ($\pm 65,7$)	416,5 ($\pm 306,8$)
DEZEMBRO	320,4 ($\pm 277,3$)	129,4 ($\pm 63,8$)	419,4 ($\pm 293,2$)
TOTAL	352,2 ($\pm 355,4$)	118,9 ($\pm 65,4$)	458,4 ($\pm 380,8$)

Fonte: Autor.