

Artigo

# Características Climatológicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala no Nordeste do Brasil

Leandro Valente Jacinto<sup>1,2</sup> , Waleska Martins Eloi<sup>1</sup> , Meiry Sayuri Sakamoto<sup>2</sup> <sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, Campus Fortaleza, CE, Brasil.*<sup>2</sup>*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, CE, Brasil.*

Recebido em: 13 de Setembro de 2021 - Aceito em: 22 de Fevereiro de 2022

## Resumo

As características meteorológicas de uma determinada região são de grande importância na manutenção das atividades humanas, uma vez que afetam a sociedade tanto de maneira positiva quanto negativa. Assim, o objetivo do estudo foi analisar as principais características dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no Nordeste do Brasil (NEB). Utilizando o ForTraCC, um algoritmo para rastreamento de aglomerados convectivos, as seguintes características foram analisadas: ciclo de vida, distribuição espacial, período de maior frequência e o tamanho. Os resultados mostram que anualmente ocorrem, em média, 321 ( $\pm 137$ ) SCMs no NEB. O mês de março é o que apresenta a maior frequência na ocorrência de SCMs, enquanto agosto a menor. O quadrimestre fevereiro-março-abril-maio (FMAM) é o período com maior ocorrência de SCMs. No NEB, os SCMs se formam com uma frequência maior durante o dia, além de possuir um tempo médio de duração de 7 h ( $\pm 5$  h) e atingirem o estágio de maduro após 3 ou 4 h de sua gênese. Na fase de maturação, o tamanho médio é de 50.020 km<sup>2</sup> ( $\pm 86.453$  km<sup>2</sup>). 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.

**Palavras-chave:** sistema convectivo de mesoescala, ForTraCC, Nordeste do Brasil.

## Climatological Characteristics of Mesoscale Convective Systems in Northeast Brazil

### Abstract

The meteorological characteristics of a given region are of great importance in the maintenance of human activities, as they affect society both positively and negatively. Thus, the objective of the study was to analyze the main characteristics of Mesoscale Convective Systems (MCSs) in Northeast Brazil (NEB). Using the ForTraCC, an algorithm for tracking convective clusters, the following characteristics were analyzed: life cycle, spatial distribution, period of highest frequency and size. The results show that an average of 321 ( $\pm 137$ ) MCSs occur annually in the NEB. The month of march is the one with the highest frequency in the occurrence of MCSs, while august is the lowest. 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, having an average duration time of 7 h ( $\pm 5$  h) and reaching the stage of maturity after 3 or 4 hours of their genesis. At the maturity stage, the average size is 50.020 km<sup>2</sup> ( $\pm 86.453$  km<sup>2</sup>). 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.

**Keywords:** mesoscale convective system, ForTraCC, Northeast of Brazil.

## 1. Introdução

A região Nordeste do Brasil (NEB) destaca-se por possuir algumas características marcantes, por exemplo, a irregularidade pluviométrica, os períodos de seca e o ele-

vado déficit hídrico. O NEB tem como principais sistemas atmosféricos causadores de chuva a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs)

bem como influência de Sistemas Frontais (Alves *et al.*, 2018).

O clima do NEB é fortemente influenciado ainda pelos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical que, dependendo das condições de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) observadas afetam a convecção, (Lyra *et al.*, 2016). No oceano Pacífico 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. Já no oceano Atlântico Tropical, segundo Servain (1991) e Nobre *et al.* (1996), a presença de águas mais quentes (frias) no Atlântico Tropical Norte pode impactar negativamente (positivamente) no regime de precipitação do NEB, uma vez que a ZCIT tende a ficar mais afastada (próxima). Além disso, de acordo com Silva *et al.* (2017), a presença de um gradiente inter-hemisférico da TSM no oceano Atlântico pode ter impacto na formação de outros sistemas indutores de precipitação no NEB como, por exemplo, as Linhas de Instabilidade (LIs).

Destaca-se o fato de outros mecanismos físicos interagirem com os sistemas atmosféricos citados anteriormente, com impacto no regime de chuva do NEB, por exemplo, os sistemas de brisas marítima e terrestre, a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), (Teixeira, 2008; Lyra *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2018).

Tais sistemas atmosféricos que atuam no NEB, contribuem para disparar ou suprimir a atividade convectiva, e influenciam a formação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), objeto desse estudo. Segundo Machado e Rossow (1993), esse tipo de sistema possui, extensão entre 20 e 200 km, mas, em alguns casos podem atingir tamanhos que variam de 200 a 2000 km de extensão e mais de 18 km de altura (de sua base até o topo).

Nos últimos anos, estudos observacionais, com metodologias objetivas, e de modelagem têm sido elaborados visando entender melhor as principais características dos SCMs e o ambiente sinótico no qual tem gênese. Recentemente, um dos estudos mais completos (com 14 anos de dados) sobre SCMs tropicais na América do Sul (AS) é o de Rehbein (2016), voltado para a Bacia Amazônica. Para o NEB, destaca-se o estudo recente realizado por Lyra *et al.* (2020) que utilizaram 10 anos de dados (2008 a 2017) para analisar as características dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), caso particular de SCMs. Com a finalidade de prever eventos extremos possivelmente associados a ocorrência de SCMs e entender melhor o ambiente sinótico no qual tem gênese, se faz necessário também a utilização e a melhoria de modelos de previsão numérica do tempo (Gallus, 1999; Lopez, 2007; Pinto e Campos, 2007; Calado *et al.*, 2018).

No entanto, por serem considerados de baixa previsibilidade e estarem associados a eventos meteorológicos extremos, um estudo detalhado sobre os SCMs baseado em um período prolongado de dados e uma técnica objetiva de rastreamento de aglomerados convectivos se torna relevante. Diante do exposto, este estudo tem por objetivo analisar as principais características dos SCMs que se formam/atuaem na região do NEB em um período de 17 anos.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Dados utilizados e área de estudo

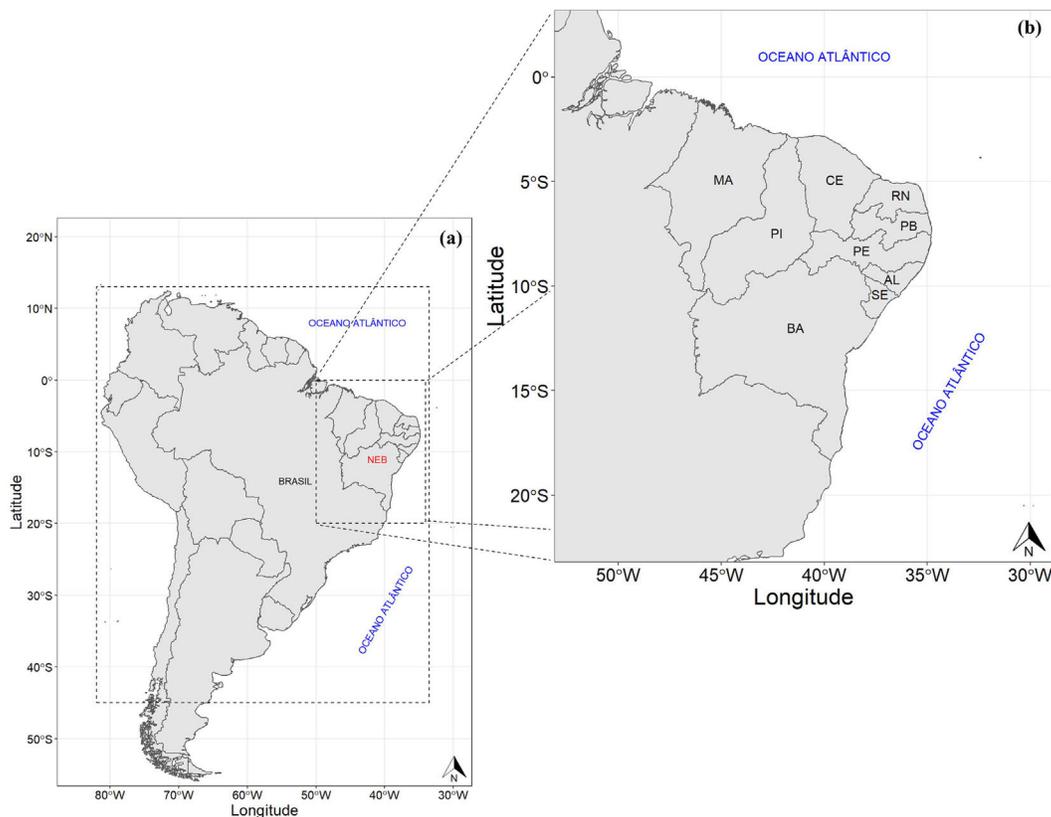
Para a obtenção dos parâmetros morfológicos dos SCMs foram utilizadas imagens de satélites geoestacionários na banda do infravermelho (aproximadamente 10,8  $\mu\text{m}$ ), as quais foram aplicadas ao algoritmo de rastreamento de aglomerados convectivos desenvolvido por Machado *et al.* (1998), denominado de Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC). As imagens possuem resolução temporal de 30 min e espacial (pixel) de 4 km x 4 km, e estão disponíveis para download em Climate Prediction Center / National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service (CPC/NCEP/NWS). As imagens são globais, mas foram recortadas para a região da América do Sul (AS) abrangendo as latitudes de 13° N a 45° S e longitudes de 82° W a 33° W, porém foram estudados apenas os SCMs nos quais atuam no NEB, conforme pode ser visualizado na Fig. 1.

Nesse estudo foram utilizados 17 (dezessete) anos de imagens de satélite de alta resolução espacial e temporal, os quais abrangem o período de 2000 a 2016. Sendo as características analisadas: i) ciclo de vida, ii) distribuição espacial, iii) período de maior frequência e o iv) tamanho.

### 2.2. Seleção de SCMs

Na primeira etapa foram identificadas, utilizando-se imagens de satélite no canal infravermelho, todas as nuvens que possuem topos bem desenvolvidos e um padrão característico de crescimento, máxima expansão e decaimento da área de cobertura. Em seguida, foram selecionados apenas os SCMs novos, ou seja, que tiveram gênese espontânea (não resultaram da divisão ou junção de outros sistemas), garantindo assim que todos os sistemas estudados tivessem um único início e fim. Além disso, foram selecionados apenas SCMs cujo tempo mínimo foi de 3 h de duração.

Para garantir a melhor caracterização dos SCMs no NEB bem como para fins de comparação com resultados de outros estudos os quais usaram o ForTraCC (Sakamoto, 2009; Eichholz, 2011; Rehbein, 2016; Rehbein *et al.*, 2017; Rehbein *et al.*, 2019), outros filtros foram utilizados, são eles:



**Figura 1** - (a) Área da América do Sul (caixa tracejada maior) na qual as Imagens de Satélites Globais foram recortadas; (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).

- Temperatura mínima igual ou inferior a 221 K (-52 °C) em pelo menos uma fase do ciclo de vida;
- Temperatura de 235 K (-38 °C) durante todo o seu ciclo de vida;
- SCMs cujos deslocamentos, entre um passo de tempo e outro, foram menores do que 300 km, para evitar ligações inexistentes entre SCMs diferentes.
- Todos os SCMs, em pelo menos um momento do seu ciclo de vida, tiveram sua trajetória sobre a região do NEB;
- Área inicial mínima de 2.400 km<sup>2</sup> (150 pixels).

Vale ressaltar que, nesse estudo, o termo “preferenciais” é utilizado para fazer referência a valores máximos.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Climatologia da ocorrência de SCMs na região Nordeste do Brasil (NEB)

Na região do NEB, de acordo com [Lyra \*et al.\* \(2014\)](#), os principais sistemas que podem contribuir para a manutenção prolongada dos SCMs atuam, com maior regularidade, nos meses de novembro a março (sistemas frontais, ZCAS e VCANs); no período de fevereiro a maio (ZCIT); nos meses de março a agosto (DOLs); e nos meses de abril

a julho (Alta Subtropical do Atlântico Sul). No entanto, mesmo tendo um período chuvoso bem definido, historicamente os anos com chuvas acima da média no NEB são raros, exercendo influência na formação de SCMs.

Embora nesse estudo as análises não sejam feitas para SCMs com ciclo de vida distintos, os resultados mostram que, dos 5.329 sistemas identificados, os sistemas de curta duração ( $\geq 3$  e  $< 6$  h) foram ligeiramente mais frequentes, com 50,5% (2.689), do que os sistemas com tempo de duração maior ou igual a 6 h (longa duração), com 49,5% (2.640). Destaca-se ainda que, nos anos em que a quantidade de SCMs de longa duração foi menor (maior), a estação chuvosa do NEB ficou abaixo (acima) da média, principalmente em anos de El Niño, por exemplo, os anos de 2015 e 2016.

A climatologia da distribuição mensal e o desvio padrão da ocorrência de SCMs na região do NEB é apresentada na [Fig. 2](#).

Os resultados mostram que a média anual de ocorrência de SCMs no NEB é de 321 ( $\pm 137$ ) e que o número médio de casos de SCMs no NEB começa a aumentar a partir do mês de outubro, com 21 SCMs ( $\pm 10$ ), atinge um máximo no mês de março, com 54 SCMs ( $\pm 21$ ), e a partir do mês de abril com 42 ( $\pm 13$ ) SCMs começa a decair,

apresentando um mínimo no mês de agosto, com 4 SCMs ( $\pm 3$ ). É possível que a maior quantidade de SCMs no mês de março seja reflexo da presença da ZCIT, principal sistema indutor de chuva sobre o NEB, a qual está abaixo da linha do Equador nesse período (Uvo *et al.*, 1998), o que contribui para aumentar a instabilidade sobre a região e, consequentemente, o potencial convectivo.

Os resultados encontrados estão de acordo com um estudo recente de Lyra *et al.* (2018), os quais analisaram os CCMs no período de 2013 a 2015 e mostraram um número maior de casos no mês de março. Em relação a outras regiões os resultados também são similares pois, a exemplo da Bacia Amazônica (Rehbein *et al.*, 2017), no NEB a quantidade maior de SCMs acompanha o ciclo anual da precipitação, com um máximo no verão austral.

A Fig. 3, apresenta a climatologia da frequência relativa (%) mensal da ocorrência de SCMs. Constata-se 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. Verifica-se ainda, conforme a Fig. 3, que 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, a ZCAS e os 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. Já 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%.

Esses resultados são similares a um estudo de Costa *et al.* (2019) que, ao avaliar as características dos SCMs ocorridos no NEB nos anos de 2010 e 2011, verificaram uma maior frequência nos trimestres outubro-novembro-dezembro (OND) e janeiro-fevereiro-março (JFM). Outro estudo recente conduzido por Lyra *et al.* (2020) sobre os CCMs, caso particular de um SCM, os quais se formam/atua no NEB também mostrou que a maior frequência de tais sistemas ocorre no outono e no verão austral. Em relação a região subtropical da América do Sul os resultados para o NEB também são similares pois, segundo Eichholz e Campos (2014), os SCMs subtropicais ocorrem com maior frequência nos meses mais quentes do ano.

Os resultados evidenciam que, no período em que a ZCIT está presente na região, no quadrimestre FMAM, a frequência de SCMs é maior, seguido do período em que os sistemas frontais, a ZCAS e os VCANs são os principais sistemas indutores de convecção na região. Tais resultados são corroborados por um estudo recente de Lyra *et al.* (2018), os quais mostraram que 62,5% dos casos de CCMs que se formam/atua no NEB estão relacionados com a ZCIT, seguido pela atuação de VCANs com 18,7% dos casos. 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 sig-

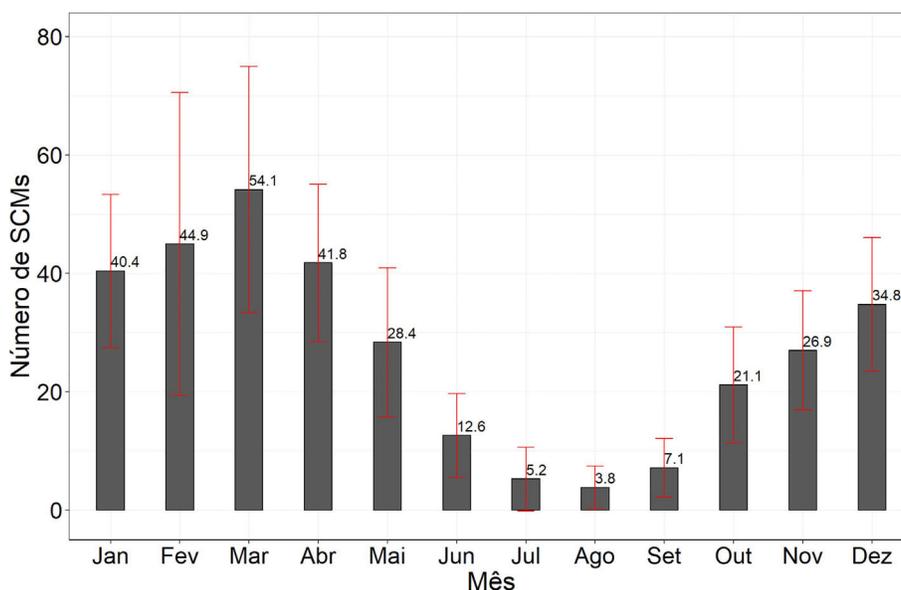
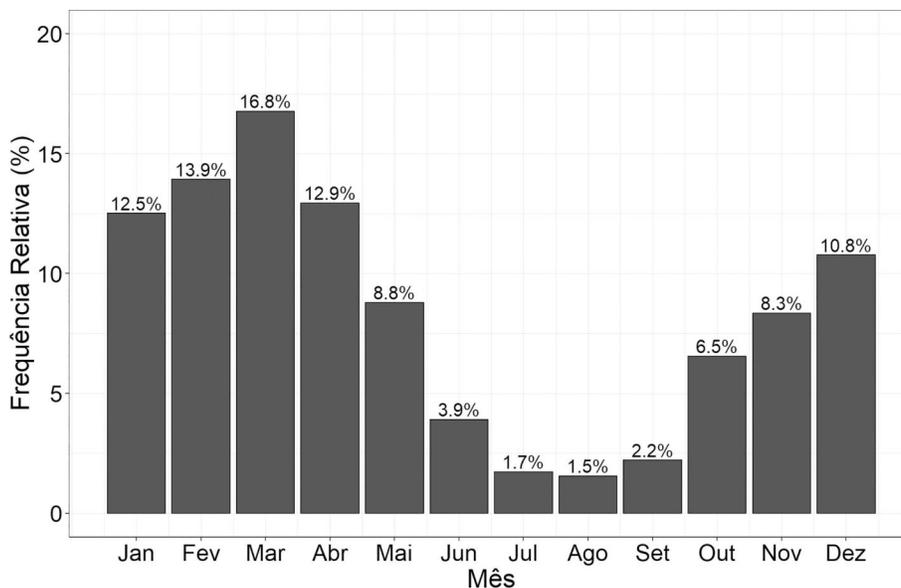


Figura 2 - Média mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB. As barras vermelhas representam o desvio padrão.



**Figura 3** - Climatologia da frequência relativa (%) mensal da ocorrência de SCMs na região do NEB.

nificativa 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.

Nota-se, o importante papel que a ZCIT exerce na gênese de SCMs no NEB pelo fato de, no quadrimestre FMAM, haver uma frequência maior dos SCMs. Também, vale destacar que no quadrimestre FMAM a ZCIT pode interagir ainda com outros sistemas atmosféricos (sistemas frontais, ZCAS, VCANs, DOLs etc.), os quais geram intensa instabilidade e convergência de massa em baixos níveis da troposfera, contribuindo para a maior frequência de SCMs nesse período.

### 3.2. Climatologia da frequência relativa horária dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

Em relação ao tempo de duração, o destaque fica para os SCMs com ciclo de vida de 4 h, pois apresentam o maior percentual de ocorrência no NEB, com frequência relativa de 23%, conforme é apresentado na Fig. 4. Já os SCMs com tempo de duração maior ou igual a 12 h representam um total de 19% de todos os sistemas que se formam na região.

A frequência maior de SCMs de ciclo de vida curto e o baixo percentual de sistemas de com ciclo de vida longo, segundo Rehbein *et al.* (2017), pode estar diretamente associada a atividade sinótica relativamente fraca (por exemplo, frentes frias), pois sistemas atmosféricos de escala maior podem oferecer suporte e manutenção mais prolongada aos SCMs. Embora a média anual de ocorrência de SCMs seja diferente, a frequência maior (menor) de sistemas de curta duração (longa duração) também foi

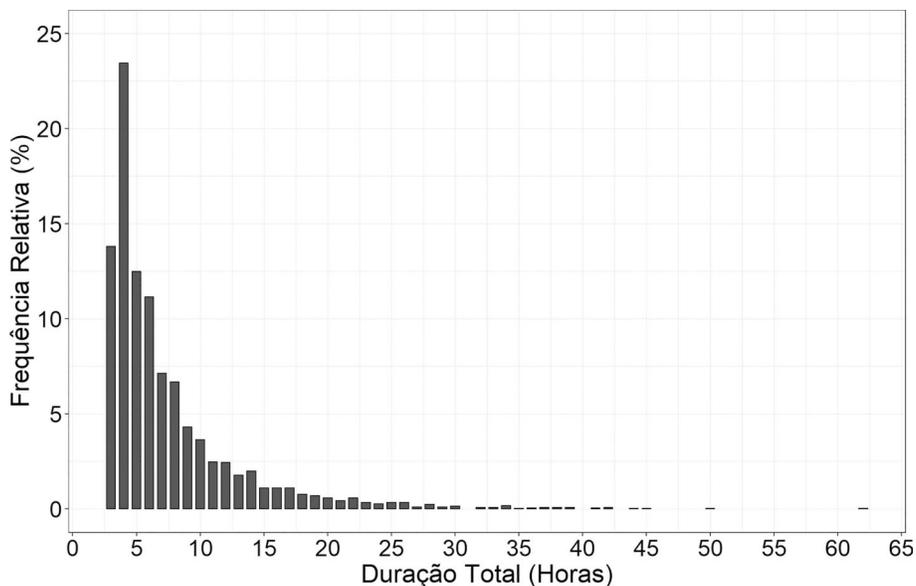
encontrada por Rehbein *et al.* (2017) ao estudar a região tropical da Bacia Amazônica, com 64% (36%). Destaca-se contudo que, embora os SCMs com ciclo de vida maiores ocorram com menor frequência no NEB, segundo Costa *et al.* (2019), estão constantemente relacionados com eventos de precipitações intensas nos trimestres janeiro-fevereiro-março (JFM) e outubro-novembro-dezembro (OND).

Para o NEB, os resultados encontrados evidenciam que o tempo médio de duração dos SCMs é de 7 h ( $\pm 5$  h), corroborando com resultados anteriores como, por exemplo, Salio *et al.* (2007) os quais encontraram durações entre 6 e 9 h, enquanto Rehbein (2016) encontrou um tempo médio de 6 h para SCMs com gênese sobre o continente. Já Lyra *et al.* (2020), ao estudar os CCMs (SCMs de longa duração) no NEB, encontrou um tempo de duração média de 8 h.

A Fig. 5 apresenta os horários preferenciais dos SCMs quanto as três fases distintas: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação.

A Fig. 5a mostra que a maior parte dos SCMs no NEB tem ciclo de vida diurno, pois o período preferencial de gênese ocorre das 13 às 16 UTC, concentrando 38,2% de todos os sistemas que se formam na região, com uma frequência máxima às 14 UTC. Apesar do horário das 15 UTC 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 22 UTC, onde ocorre outro pico.

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



**Figura 4** - Climatologia da frequência relativa (%) da ocorrência de SCMs em relação ao tempo de duração (horas) na região do NEB.

NEB. A explicação mais provável para um segundo pico na ocorrência de SCMs as 22 UTC, 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.

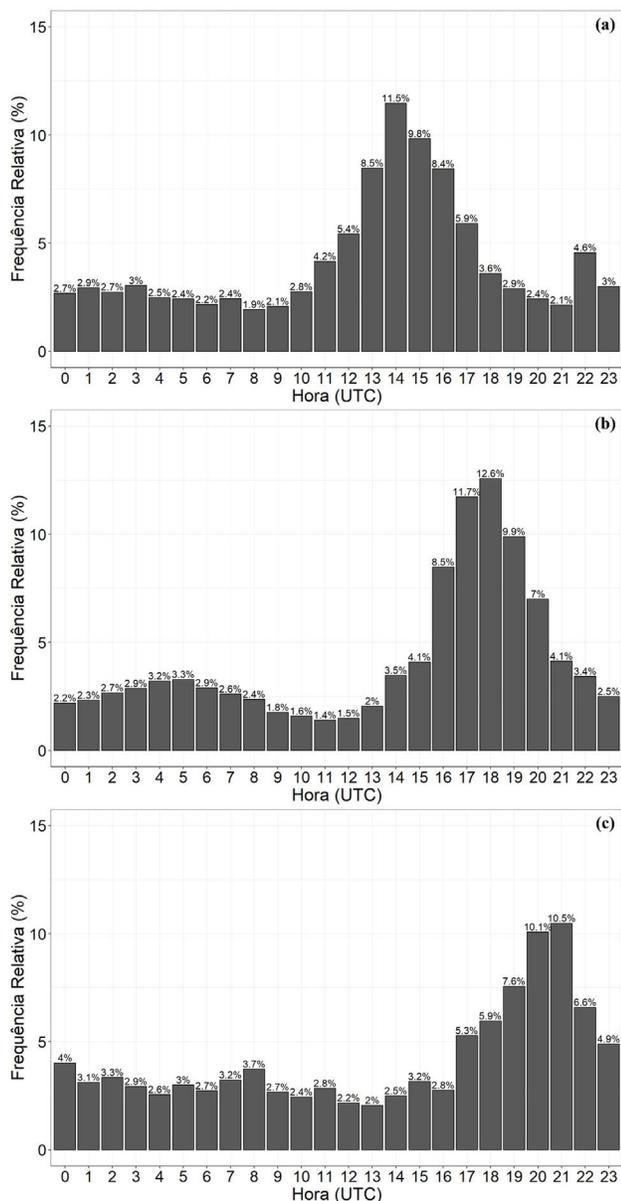
A partir das 23 UTC a frequência dos SCMs diminui bastante até às 8 UTC, horário em que a quantidade é mínima, e voltando a aumentar a partir das 11 UTC. Em relação ao horário de gênese os resultados encontrados para o NEB foram ligeiramente diferentes dos SCMs amazônicos, continentais e oceânicos, os quais se formam a maior parte no período das 17 às 19 UTC, ([Rehbein et al., 2017](#)). No entanto, ao comparar os resultados encontrados para o NEB com a região oeste da Colômbia, [Sakamoto et al. \(2011\)](#), observa-se similaridade nos horários de máxima gênese dos SCMs, pois ocorrem principalmente no período da tarde e estendendo-se até o período da noite, estando possivelmente associados a atuação da brisa marítima bem como aos efeitos do aquecimento do ciclo diurno. Vale destacar ainda que, a exemplo de [Sakamoto et al. \(2011\)](#), a frequência mínima de gênese encontrada dos SCMs no NEB ocorre no período da manhã, estando coerentes com os resultados encontrados por [Velasco e Fritsch \(1987\)](#) para latitudes baixas da América do Sul.

Embora uma quantidade relativamente elevada de SCMs tenham gênese no período noturno, o fato de 56% de todos os sistemas se formarem diurnamente (das 12 às 19 UTC), deixa evidente que o aquecimento diurno é uma força que tem um papel fundamental na formação de aglomerados convectivos no NEB.

Conforme a [Fig. 5b](#), o horário de maturação dos SCMs no NEB ocorre, em média, de 3 a 4 h após a sua gênese, principalmente no período das 16 às 19 UTC, sendo às 18 UTC o horário em que a frequência é máxima. A partir das 19 UTC, há um gradativo decaimento até às 5 UTC, onde há outro pico na frequência de SCMs atingindo o estágio maduro, e a partir desse horário decresce novamente até às 11 UTC onde a frequência é mínima, voltando a aumentar a partir das 14 UTC. O período preferencial de dissipação dos SCMs no NEB, conforme a [Fig. 5c](#), fica compreendido das 19 às 22 UTC, com uma máxima frequência às 21 UTC. Às 22 UTC, 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 13 UTC, e volta a aumentar a partir das 17 UTC.

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 22 UTC e das 22 às 00 UTC, respectivamente, ([Rehbein et al., 2016](#)). Diferentes horários preferenciais de gênese (03 UTC), maturação (06 UTC) e dissipação (12 UTC) também foram encontrados por [Segalin \(2012\)](#) para a região Centro-Oeste do Brasil, considerada de clima tropical.

Ainda que 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, 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 h após a fase de gênese. Vale ressaltar ainda que, assim como para outras regiões estudadas, os SCMs no NEB têm, em sua



**Figura 5** - Climatologia dos SCMs quanto ao horário de: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016.

maioria, gênese entre o período da manhã e da tarde, por causa do máximo aquecimento da superfície.

### 3.3. Climatologia do tamanho médio ( $\text{km}^2$ ) dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

A área média encontrada na fase de gênese dos SCMs no NEB foi de  $5.796 \text{ km}^2$  ( $\pm 21.803 \text{ km}^2$ ), enquanto nas fases de maturação e dissipação os sistemas apresentam tamanho médio de  $50.020 \text{ km}^2$  ( $\pm 86.453 \text{ km}^2$ ) e  $13.391 \text{ km}^2$  ( $\pm 32.976 \text{ km}^2$ ), respectivamente. Ao considerar todo o ciclo de vida, o tamanho médio dos SCMs no NEB é de  $23.585 \text{ km}^2$  ( $\pm 14.831 \text{ km}^2$ ). Esses resultados estão de acordo com um estudo de Sakamoto (2012) sobre

os SCMs no Ceará (CE) e vizinhança, no qual mostrou que os sistemas continentais (oceânicos) possuem, em média,  $60.000 \text{ km}^2$  ( $63.000 \text{ km}^2$ ). 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  $160.000 \text{ km}^2$  para os continentais, e  $98.000 \text{ km}^2$  para os oceânicos, segundo Sakamoto (2009).

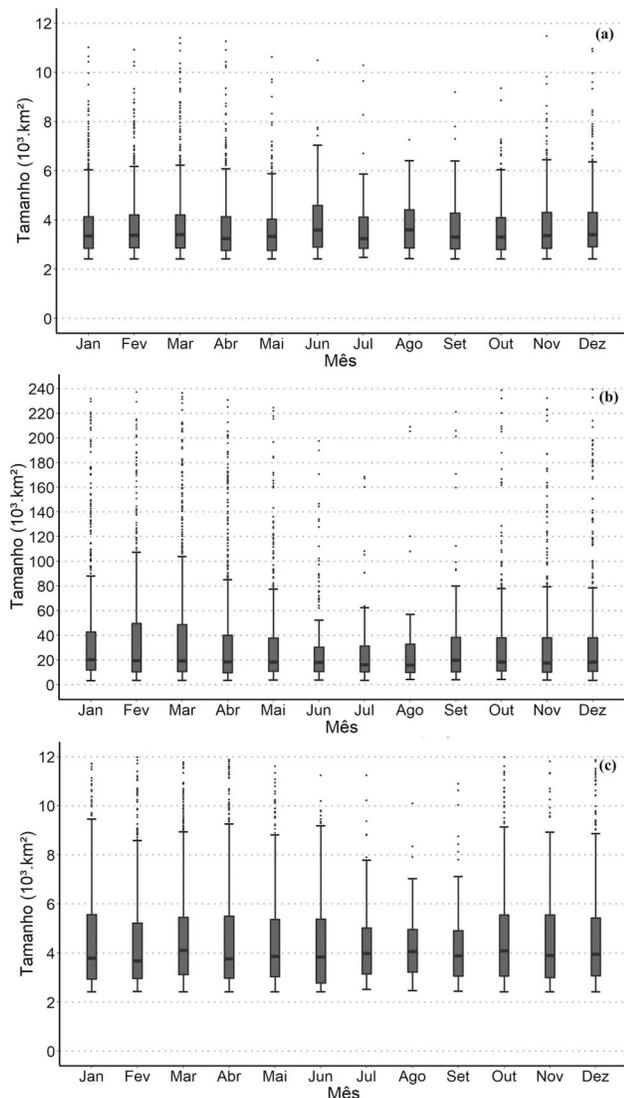
Anteriormente, Conforte (1997) mostrou que na AS os CCMs possuem em média uma área de  $190.000 \text{ km}^2$ , mas em alguns casos o tamanho pode ser, inclusive, superior. Em relação a América do Norte (AN), Velasco e Fritsch (1987) verificaram similaridades entre os sistemas com ciclo de vida longo, com exceção do tamanho, pois, segundo os autores, os SCMs da AS são, em média, 60% maiores. Para o NEB um estudo recente, para SCMs com ciclo de vida longo, de Lyra *et al.* (2020) bem como um estudo de Blamey e Reason (2012) para a África do Sul, mostraram que os valores médios encontrados da área foram de  $120.000 \text{ km}^2$  e  $121.000 \text{ km}^2$ , respectivamente.

A Fig. 6 mostra o comportamento mensal da área média ( $10^3 \text{ km}^2$ ) dos SCMs nas fases de gênese, maturação e dissipação, respectivamente. 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 do ano.

Na fase de gênese (Fig. 6a), 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  $4 \times 10^3 \text{ km}^2$ . Esses resultados são similares aos encontrados por Rehbein *et al.* (2017) acerca dos SCMs amazônicos, continentais e oceânicos, cujos tamanhos médios são  $5.186,3 \text{ km}^2$  ( $\pm 1.103,7 \text{ km}^2$ ) e  $3.896,1 \text{ km}^2$  ( $\pm 1.297,7 \text{ km}^2$ ), respectivamente. Embora os resultados encontrados para a fase de gênese sejam similares a outros estudos para a região tropical vale destacar que, nesse estudo, a área inicial mínima para detecção dos SCMs pelo ForTraCC é de  $2.400 \text{ km}^2$ .

No estágio de maturação dos SCMs (Fig. 6b), fase em que atingem seu tamanho máximo em área, é possível identificar o período de janeiro a abril como sendo aquele cujo sistemas atingem os maiores tamanhos, pois no mínimo 25% dos sistemas possuem tamanhos superiores a  $40 \times 10^3 \text{ km}^2$ . O destaque fica para os meses de fevereiro e março, onde o tamanho dos SCMs pode superar os  $100 \times 10^3 \text{ km}^2$ . A partir do mês de maio até o mês de dezembro, observa-se que 75% dos SCMs que atuam na região possuem tamanho inferior a  $40 \times 10^3 \text{ km}^2$ , sendo esse percentual ligeiramente maior no período de junho a agosto.

No estágio de maturação, de um modo geral, evidencia-se o período em que a ZCIT está sobre a região como sendo aquele em que os SCMs atingem os maiores tamanhos. O período em que os DOLs são os principais



**Figura 6** - Climatologia mensal da área média ( $10^3 \text{ km}^2$ ) dos SCMs de acordo as três fases: (a) Gênese; (b) Maturação; (c) Dissipação. Período utilizado: 2000 a 2016.

indutores de convecção na região, junho a agosto, é aquele em os SCMs atingem os menores tamanhos, enquanto o mês de setembro, no qual os sistemas frontais e ZCAS são os principais sistemas, fica caracterizado como sendo o mês em que o tamanho da área máxima dos sistemas começa a aumentar. A sazonalidade verificada para os SCMs na fase de maturação (Fig. 6b), com um máximo no período de janeiro a abril, mínimo de junho a agosto e voltando a aumentar a partir de setembro, é bastante similar ao comportamento temporal da convecção na região do NEB e corrobora um estudo recente de Costa *et al.* (2019), acerca de eventos extremos de precipitação associados a SCMs no NEB (com duração superior a 6 h) nos anos de 2010 e 2011, no qual demonstrou que os núcleos convectivos maiores foram mais frequentes no período de outubro a março.

Nos meses de primavera e verão do Hemisfério Sul (HS), os sistemas frontais apresentam ampla penetração continental entre as latitudes de  $15^\circ \text{ S}$  e  $20^\circ \text{ S}$ , 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, (Oliveira, 1986). Uma possível explicação para o menor tamanho dos SCMs no mês de julho é a ausência de sistemas atmosféricos como os sistemas frontais, a ZCAS, os VCANs e a ZCIT, uma vez que esses sistemas podem oferecer suporte dinâmico mais prolongado e, consequentemente, contribuir para SCMs maiores e mais duradouros.

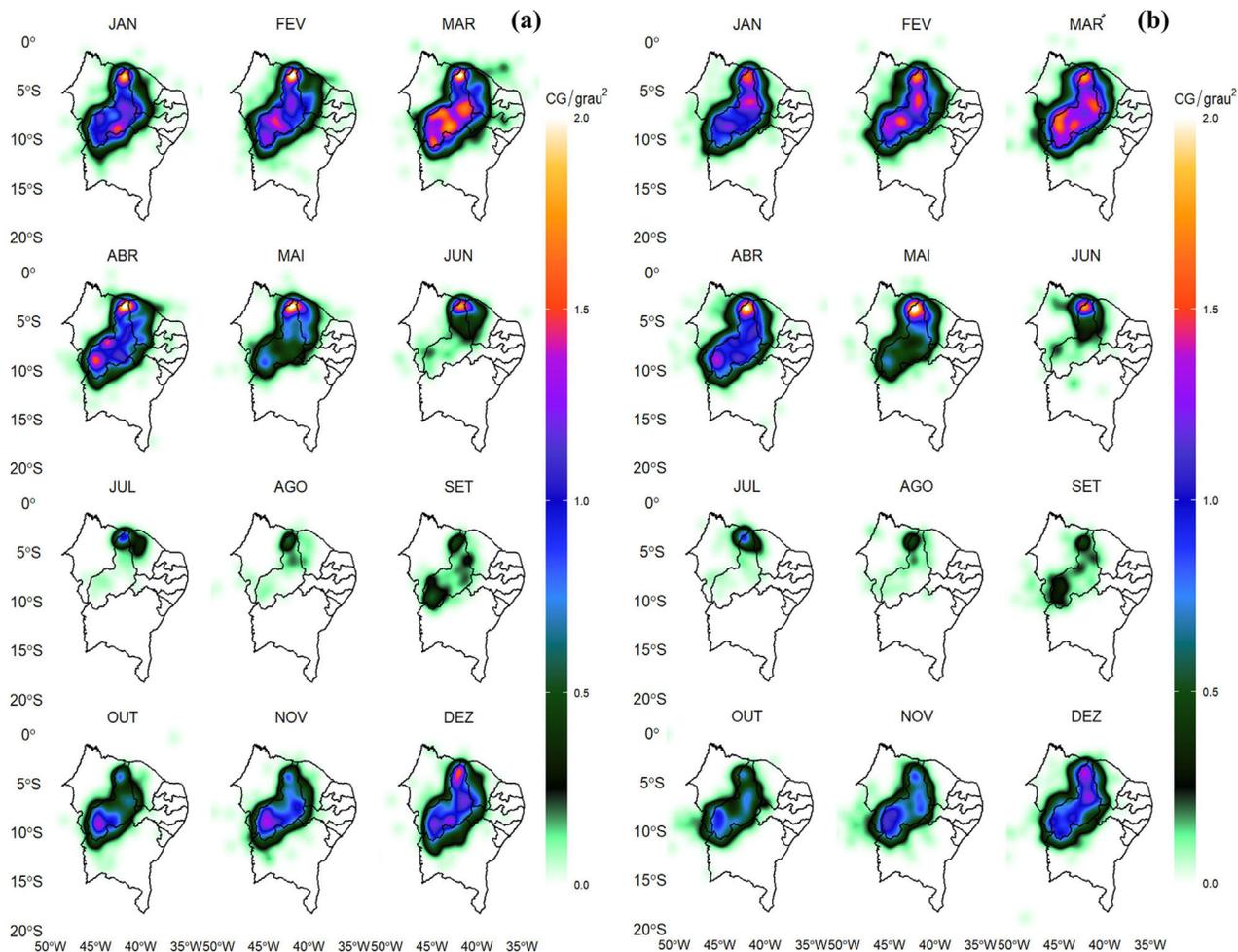
Na fase de dissipação (Fig. 6c), assim como na fase de gênese (Fig. 6a), não é possível identificar grandes diferenças nos tamanhos dos SCMs no decorrer dos meses. Porém, em todos os meses, a maior parte (mais de 75%) dos SCMs dissipam-se com tamanho inferior a  $6 \times 10^3 \text{ km}^2$ . Destaca-se ainda o fato de no período de outubro a junho alguns eventos de SCMs se dissiparem com tamanhos superiores a  $8 \times 10^3 \text{ km}^2$ .

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 como um todo, 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.

### 3.4. Climatologia da densidade média mensal dos SCMs no Nordeste do Brasil (NEB)

Na Fig. 7 é apresentada a climatologia mensal da distribuição espacial dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB para as três fases: (a) gênese; (b) maturação; (c) dissipação. Os resultados mostram que a área do NEB na qual possui as maiores densidades (valores superiores a  $0.5 \text{ CG/grau}^2$ ) 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 (MA); todo o território do Piauí (PI); todo o território do CE, excetuando-se o nordeste na divisa com Rio Grande do Norte (RN); oeste da Paraíba (PB); centro-oeste de Pernambuco (PE); norte e noroeste da Bahia (BA). Em todos os meses do ano a densidade de gênese (Fig. 7a) dos SCMs é amplamente maior sobre o continente quando comparada



**Figura 7** - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB nas três fases: (a) Gênese; (b) Maturação; (c) Dissipação.

com a densidade dos sistemas cuja gênese ocorrem no oceano Atlântico Tropical, sendo o estado do PI uma das áreas do NEB onde, em média, mais se formam sistemas, com valores superiores a  $1.5 \text{ CG/graú}^2$  no período de outubro a junho.

Esses resultados são similares aos encontrados por Velasco e Fritsch (1987), os quais evidenciaram, na América do Sul, uma quantidade maior de SCMs sobre o continente quando comparado ao oceano. A maior densidade de SCMs sobre a superfície continental também foi verificada por Sakamoto *et al.* (2011) ao estudar a região oeste da Colômbia, na qual foi a área onde 64% de todos os sistemas convectivos, observados no ano de 2003, tiveram gênese. Embora a região subtropical da América do Sul possua diferentes aspectos climáticos, o estudo de Eichholz e Campos (2014) sobre os SCMs subtropicais mostrou que, assim como no NEB, a gênese também ocorre com maior frequência sobre o continente.

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. 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 (FMAM).

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.

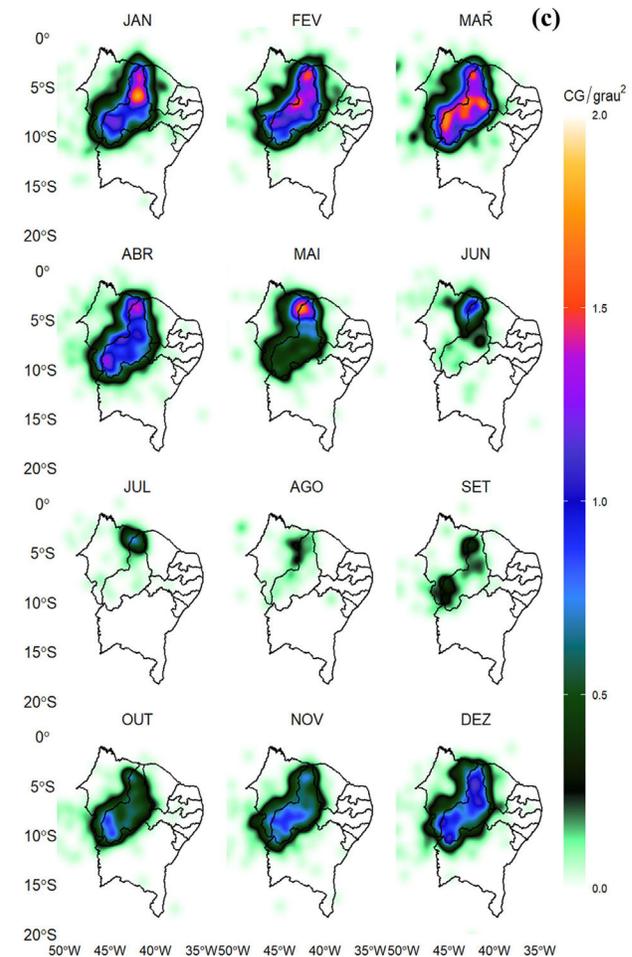
A possível, e mais provável, explicação é que a partir do mês de outubro, primavera no Hemisfério Sul (HS), os sistemas frontais apresentam frequência maior de penetração em latitudes baixas da América do Sul (AS), o que contribui para a formação de SCMs nessa área do NEB. A permanência de sistemas frontais 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, 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 MA, o centro e o norte do PI, os estados do CE e Rio Grande do Norte (RN), além dos sertões dos estados da PB e de PE, 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.

Verifica-se ainda os meses de fevereiro, março e abril como sendo o período no qual há uma maior densidade de gênese (Fig. 7a) dos SCMs sobre o oceano Atlântico Tropical, os quais penetram no NEB, em uma região do oceano aproximadamente compreendida entre 2° S/38° W e 2° S/44° W, porém com valores bem inferiores a área continental. Os resultados aqui apresentados 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 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 de SCMs na porção sul do NEB, sendo verificada uma densidade maior no norte da região, com notoriedade para o nordeste do estado do MA, norte do PI e nas áreas noroeste e oeste do CE.



**Figura 7 (cont.)** - Climatologia da densidade mensal dos centros geométricos (CG) dos SCMs no NEB nas três fases: (a) Gênese; (b) Maturação; (c) Dissipação.

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 (Fig. 7b) e dissipação (Fig. 7c), são bastante similares àquelas da fase de gênese. Contudo, observa-se que, em relação a fase inicial (Fig. 7a), nos estágios maduro e de dissipação dos SCMs, há um deslocamento da convecção em direção ao oeste do NEB, e o estado do MA assim como o PI, onde são observados 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. 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.

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, 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 CE e vizinhança, tem seu deslocamento predominantemente para oeste, assim como os SCMs observados na Colômbia, Sakamoto *et al.* (2011).

#### 4. Conclusões

Os SCMs no NEB apresentam maior frequência no mês de março, ao contrário do mês de agosto. O tempo médio de duração dos SCMs no NEB é de 7 h ( $\pm 5$  h).

Os SCMs no NEB se formam com uma frequência máxima as 14 UTC, enquanto no início da manhã (8 UTC) a frequência é mínima. À tarde (18 UTC) é o horário em que os SCMs no NEB mais atingem o estágio de maturação, enquanto a fase de dissipação ocorre com maior frequência a noite (21 UTC).

Quanto ao tamanho médio, considerando todo o ciclo de vida dos SCMs, no NEB é de 23.585 km<sup>2</sup> ( $\pm 14.831$  km<sup>2</sup>). Na fase de maturação, em que atingem o seu tamanho máximo, o tamanho médio é de 50.020 km<sup>2</sup> ( $\pm 86.453$  km<sup>2</sup>).

A gênese dos SCMs no NEB é maior sobre o continente do que sobre o oceano Atlântico Tropical e as áreas preferenciais 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.

#### 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. DOI
- BARBOSA, R.L.; OYAMA, M.D.; MACHADO, L.A. Climatologia das perturbações convectivas iniciadas na costa Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 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, n. 2, p. 753-766, 2012. DOI
- CALADO, R.N.; DEREZYNSKI, C.P.; CHOU, C.S.; SUEIRO, G.; MOURA, J.D.O.; SANTOS, V.R.S. Avaliação do desempenho das simulações por conjunto do modelo Eta-5 km para o caso de chuva intensa na Bacia do Rio Paraíba do Sul em Janeiro de 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 83-96, 2018. DOI
- CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- CONFORTE, J.C. **Um Estudo de Complexos Convectivos de Mesoescala Sobre a América do Sul**. Tese de Doutorado, INPE, São Jose dos Campos, 140 p., 1997.
- 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**, v. 42, n. 1, p. 317-328, 2019. DOI
- DOSWELL, C.A.; BOSART, L.F. Extratropical synoptic-scale processes and severe convection. Meteorological monographs, **American Meteorological Society**, v. 28, n. 50, p. 27-69, 2001. DOI
- 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, Pelotas, 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**, v. 37, n. 1, p. 70-80, 2014. DOI
- 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, n. 5, p. 961-973, 2003. DOI
- 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, p. 15-28, 2005.
- FRITSCH, J.M.; FORBES, G.S. Mesoscale convective systems. Meteorological monographs. **American Meteorological Society**, v. 28, n. 50, p. 323-358, 2001. DOI
- GALLUS, W.A.J.R. Eta simulations of three extreme precipitation events: Sensitivity to resolution and convective parameterization. **Weather and Forecasting**, v. 14, n. 3, p. 405-426, 1999.
- GRAY, W.M.; JACOBSON, J.R.W. Diurnal variation of deep cumulus convection. **Monthly Weather Review**, v. 105, p. 1171-1188, 1977. Doi <http://tropical.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/grayjacobson1977pdf>.
- LIEBMANN, B.; SMITH, C.A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 6, p. 1275-1277, 1996.
- LOPEZ, P. Cloud and precipitation parameterizations in modeling and variational data assimilation: A Review. **Journal of the Atmospheric Sciences - Special Section**, v. 64, n. 11, p. 3766-3784, 2007. DOI
- LYRA, G.B.; JUNIOR, O.J.F.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas State, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014.

- LYRA, G.B.; JUNIOR, O.J.F.; GOIS, G.; ZERI, C.G.; ZERI, M. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 129, n. 2, p. 157-171, 2016. DOI
- LYRA, M.J.A.; CAVALCANTE, L.C.V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Complexos Convectivos de Mesoescala sobre o Nordeste do Brasil e fenômenos adversos associados. **Ibero-American Journal of Environmental Sciences**, v. 9, n. 3, p. 95-103, 2018. DOI
- 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.
- MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 12, p. 3234-3260, 1993. DOI
- MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B.; GUEDES, R.L.; WALKER, E.A.W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.
- MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 26253-2675, 1981. DOI
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996. DOI
- 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, 1986.
- PINTO, L.B.; CAMPOS, C.R.J. Ambiente sinótico e perfis verticais de um Sistema Convectivo de Mesoescala. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 1, p. 31-43, 2007. DOI
- RAO, V.B.; MARQUES, V.S. Water vapor characteristics over Northeast Brazil during two contrasting years. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 23, n. 6, p. 440-444, 1984. Doi <https://www.jstor.org/stable/26181375>.
- 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, 2016.
- REHBEIN, A.; AMBRIZZI T.; MECHOSO, C.R. Mesoscale convective systems over the Amazon Basin. Part I: Climatological aspects. **Internacional Journal of Climatology**, v. 38, n. 1, p. 215-229, 2017. DOI
- 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. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 15, p. 5599-5618, 2019. DOI
- 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, 2009.
- SAKAMOTO, M.S. Moisture sources and life cycle of convective systems over Western Colombia. **Advances in Meteorology**, v. 2011, n. 8, pages 11, 2011. DOI
- 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, 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, n. 4, p. 1290-1309, 2007. DOI
- 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, 2012.
- SELUCHI, M.E.; CALBETE, N.O.; ROZANTE, J.R. Análisis de un desarrollo ciclónico en la Costa Oriental de América del Sur. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2001.
- SERVAIN, J. Simple climatic indices for the Tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 96, n. C8, p. 15137-15146, 1991. DOI
- SILVA, T.S.; ALCÂNTARA, C.R.; SOUZA, E.P.; OLINDA, R.A.; GONÇALVES, W.A. Influência da temperatura da superfície do mar na ocorrência de linhas de instabilidade na costa Norte e Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 261-268, 2017. DOI
- 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. DOI
- 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, 1989.
- UVO, C.B.; REPELLI, C.A.; ZEBIAK, S.E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998. DOI
- VELASCO, I.; FRITSCH, J.M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613, 1987. DOI