

Estimation of convective precipitation extremes over the eastern sector of Northeast Brazil originating from cold clouds.

Eduardo Almeida da Silva*, Gabriel Víctor Silva do Nascimento**, Ingrid Paloma Carneiro de Lima***, Tiago Bentes, Mandú****, Maria Uilhiana Gomes de Andrade*****, Matheus Henrique Bezerra de Melo*****, Weber Andrade Gonçalves*****

*Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, RN, Brasil, eduardometeorologistaufn@gmail.com, **Mestrando pelo programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, RN, Brasil, gabriel.victor.1409@gmail.com, ***Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB, Brasil, ingridpaloma.cl@gmail.com, ****Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP, Brasil, tiagobentes1@gmail.com, *****Mestra pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, RN, Brasil, uilhiana.andrade@gmail.com, *****Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB, Brasil, matheushbm10@hotmail.com, *****Professor Doutor pelo programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, RN, Brasil, weber.goncalves@ufrn.br

Received 3 December; accepted 05 December.

Abstract

In light of this research, the aim is to characterize two physical variables of clouds that generate extreme precipitation over the Eastern Northeast Brazil (ENEB) region, quarterly, between the years 1998 to 2014. This characterization specifically focuses on cold clouds (*Ice Water Path* > 0). To accomplish this study, data sourced from the Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM satellite's Microwave Imager (TMI) instrument, from product 2ACLIM, were utilized. The variables analyzed using these sensors were: Integrated Ice Content (kg/m²) and Convective Precipitation estimate (mm/h). In order to analyze these variables over ENEB, statistical methods and measures such as mean, percentile 99, analysis of variance (ANOVA), and the non-parametric Kruskal-Wallis and Dunn tests were employed. These tests assessed whether there was statistical difference between the means of the variables of cloud systems generating extreme convective precipitation across the analyzed quarters for ENEB. The key findings indicate that during the quarters from December to February and from March to May, higher quantities of extreme convective precipitation estimates and integrated ice content were observed for cloud systems generating extreme precipitation over ENEB. However, it was established that there existed statistical differences in at least two pairs of means for these variables among the quarters, that is, (p-value < 0.01). Ultimately, the study concludes that convective precipitation extremes originating from cold-type clouds occur over the examined region.

Keywords: 2ACLIM, TRMM, Quarters.

Estimativa de extremos de precipitação convectiva sobre o Leste do Nordeste do Brasil oriundos de nuvens frias

Resumo

Diante dessa pesquisa, propõe-se caracterizar duas variáveis físicas das nuvens que geram precipitação extrema sobre o Leste do Nordeste (LNEB), por trimestre, entre os anos de 1998 a 2014, levando em consideração as nuvens frias (Conteúdo Integrado de Gelo > 0). Portanto, para esse estudo, se fez uso de dados provenientes do sensor satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM, Microwave Imager (TMI)*, do produto 2ACLIM. As variáveis analisadas a partir desses sensores foram: Conteúdo Integrado de Gelo (kg/m²) e estimativa de Precipitação Convectiva (mm/h). Para analisar essas variáveis sobre o LNEB, utilizou-se de métodos e medidas estatísticas como média, percentil 99, análise de variância (ANOVA) e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e Dunn. Estes, verificaram se houve diferença estatística entre as médias das variáveis das nuvens geradoras de precipitação convectiva extrema entre os trimestres analisados para o LNEB. Os principais resultados apontaram, que entre os trimestres de dezembro a fevereiro e de março a maio, apresentaram maiores quantitativos de estimativa de precipitação extrema convectiva e de conteúdo integrado de gelo para as nuvens geradoras de precipitação extrema sobre o LNEB. Porém, constatou-se que houve diferença estatística em pelo menos dois pares de médias dessas variáveis entre os trimestres, ou seja, (valor-p < 0,01). Por fim, conclui-se, que há extremos oriundos de precipitação convectiva provenientes de nuvens do tipo fria, sobre essa localidade em análise.

Palavras-chave: 2ACLIM, TRMM, Trimestres.

1. Introdução

As nuvens desempenham um papel de suma importância para o sistema climático da Terra. Elas

são classificadas como aglomerados visíveis de gotículas de água ou cristais de gelo suspensos na atmosfera. Dentre os componentes da atmosfera, as

nuvens são responsáveis pela absorção e espalhamento de luz solar que incide sobre todo o globo. Elas desempenham um papel importante no sistema climático da Terra, sendo uma resposta direta à circulação geral da atmosfera, ao equilíbrio energético e aos padrões de precipitação.

Compreende-se que a precipitação é uma variável pertinente para estudos hidrometeorológicos. De acordo com (Rodrigues, 2019), estudar a variável precipitação é de suma importância para compreender seus impactos, positivos ou negativos, em vários setores da sociedade, tais como saúde pública, agropecuária, recursos hídricos, entre outros.

Ressalta-se, através dos estudos elaborados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), que os eventos extremos climáticos já estão presentes em toda parte do globo terrestre, principalmente em áreas que são suscetíveis à ocorrência de desastres naturais, como é o caso da região Nordeste do Brasil (NEB). Mudanças no padrão de distribuição de algumas variáveis meteorológicas, tais como precipitação e temperatura trazem diversos problemas para os sistemas ambientais, a população, a agricultura, entre outras áreas. E tais mudanças, aumentam a frequência e intensidade de secas e inundações e provocam, por exemplo, redistribuição de recursos hídricos (Li et al., 2013). E áreas mais vulneráveis a adversidades climáticas, como a região do NEB sofrem com as consequências mais graves destas mudanças, com secas mais intensas.

A precipitação do NEB é modulada principalmente pelos padrões da variabilidade interanual da temperatura do Oceano Pacífico, em associação com o sistema atmosférico El Niño Oscilação Sul (ENOS). Um padrão que se apresenta com períodos secos, associados com o El Niño (fase quente), e períodos úmidos La Niña (fase fria) (Marengo et al., 2017; Oliva, 2019).

Os principais sistemas meteorológicos que contribuem para a ocorrência de extremos climáticos associados a chuvas intensas no Leste do Nordeste (LNEB) são: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT, setor norte dessa região em estudo), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (Oliva, 2019).

Para caracterizar a estrutura física das nuvens, alguns pesquisadores têm se atentado em utilizar dados oriundos dos sensores *TRMM Microwave Imager (TMI)*, ambos provenientes do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*, como (Abreu et al., 2021; Han et al., 2010; Liu et al., 2008; Qin et al., 2018; Rodrigues, 2019; Silva et al., 2022; Yang et al., 2019), entre outros.

Destaca-se que o NEB e consequentemente sua porção leste é uma região suscetível a variações de precipitação (Oliveira et al., 2017), sendo assim, salienta-se que compreender cada vez mais os processos físicos das nuvens geradoras de precipitação extrema é de grande importância (Heiblum et al., 2011).

A região do NEB é caracterizada por períodos com déficit de precipitação (Marengo et al., 2017) e excessos (Silva et al., 2018) e (Rodrigues et al., 2020), que podem causar desastres naturais, como eventos de seca, deslizamentos de terra, inundações, alagamentos e enxurradas. Estes podem ocasionar prejuízos econômicos e perda de vidas, especialmente para populações de baixo poder aquisitivo que vivem em áreas vulneráveis a desastres naturais.

(Rodrigues et al., 2020) realizaram um estudo sobre estimativas de período de retorno de eventos de precipitação extrema diária sobre o NEB. Em seus resultados, foi possível associar esses retornos com registros de desastres naturais do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) entre janeiro de 2016 e fevereiro de 2019. Foi observado que, durante o período analisado, houve registro de 508 desastres naturais, como deslizamentos de encostas, inundações, enxurradas e alagamentos.

Portanto, o objetivo do presente estudo é caracterizar os trimestres, com mais ocorrências de nuvens convectivas frias causadoras de eventos de precipitação extrema sobre o LNEB. Ressalta-se que esses tipos de nuvens têm a característica de presença de gelo em sua estrutura (Conteúdo Integrado de Gelo – IWP > 0). As variáveis a serem analisadas são: conteúdo integrado de gelo e estimativa de precipitação convectiva sobre o LNEB.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo:

Para presente pesquisa, optou-se em analisar o LNEB localizado entre 5°18'0''S e 36°38'24''W e 8°57'30''S e 34°13'48'' W, que inclui a faixa litorânea desde o leste do estado do Rio Grande do Norte até o sul de Pernambuco (Figura 1).

A partir da classificação climática de Koppen-Geiger, observa-se que boa parte da região norte e leste da LNEB com um clima As e Aw, apresentando-se com uma estação mais seca no inverno Aw ou no verão As (Alvarez et al., 2013).

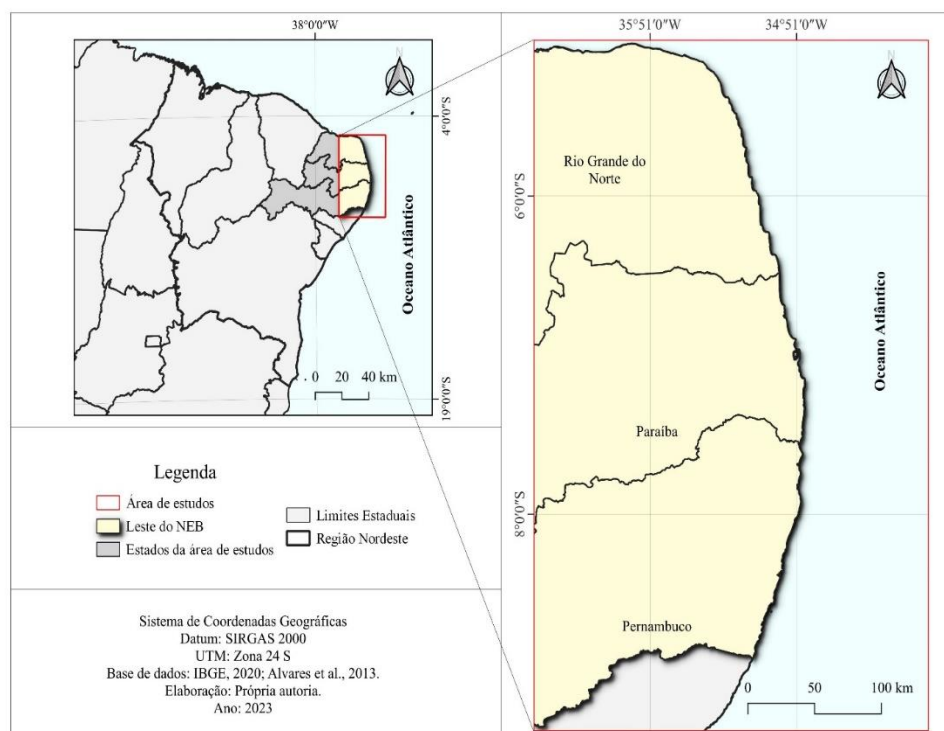


Figura 1. Área de localização, Leste do Nordeste – LNEB. Fonte: Autores (2023).

Optou-se em analisar o LNEB, pois essa região do NEB é a que apresenta as maiores intensidades de precipitação extrema e as maiores frequências de desastres naturais (Rodrigues et al., 2020). Resultados similares, foram observados por (Oliveira et al., 2016; Palharini e Vila, 2017; Rodrigues, 2019). A partir de (Reboita et al., 2012), ressalta-se que o registro de precipitação dessa localidade é beneficiado pelos sistemas meteorológicos DOL, VCAN e ZCIT.

Dados:

Os dados da presente pesquisa, se concentra em informações da estrutura física das nuvens sobre a LNEB, quando a precipitação convectiva oriunda de nuvens frias, for maior ou igual ao percentil 99

Tabela 1 - Quantitativos de informações por trimestre da estimativa de precipitação concevtiva extrema $\geq (P_{99})$.

Trimestre	Quantidade de informações da estimativa de precipitação concevtiva extrema sobre o LNEB $\geq P_{99}$.
1-DJF	1.067.081
2-MAM	2.122.697
3-JJA	1.156.738
4-SON	387.834

Destaca-se que para caracterizar nuvens frias, observou-se a variável, conteúdo integrado de gelo, do inglês, (*Ice water path* – kg/m^2 - IWP), com

(extremos), ou seja, pretende-se analisar as variáveis que geraram 1% das precipitações diárias intensas que ocorreram entre os anos de 1998 a 2014 (17 anos) no LNEB por trimestre (1-DJF; 2-MAM; 3-JJA e 4-SON). Foram observadas em termos de registros quantitativos (2.824.350 informações a respeito das nuvens com presença de gelo em sua estrutura física, ou seja, conteúdo integrado de gelo, do inglês, *Ice water path* (IWP>0).

Diante das informações gerais das nuvens frias, ressalta-se, que para presente pesquisa analisou-se, apenas os valores da estimativa de precipitação convectiva extrema $\geq (P_{99})$ por trimestre, e a partir desse valor (Tabela 1), analisou-se o comportamento da variável, (*Ice water path* – kg/m^2 - IWP).

valores de IWP > 0, classificando os tipos de nuvens, como fria.

Essas informações, foram extraídas do produtos 2ACLIM, respectivamente, associados ao sensor *TRMM microwave imager (TMI)* a bordo do *Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*, que se referem à precipitação superficial e perfis verticais de hidrometeoros,

disponibilizados pela plataforma STORM (<https://storm.pps.eosdis.nasa.gov/storm/>). Para o presente estudo foram avaliadas duas variáveis do produtos 2ACLIM: conteúdo integrado de gelo e precipitação convectiva (Tabela 2).

Tabela 2 - Variáveis físicas das nuvens associados ao produto 2ACLIM do satélite TRMM.

Produto	Variável
2ACLIM	Conteúdo Integrado de Gelo (<i>Ice water path</i> – kg/m ²)
	Precipitação Convectiva (<i>Convective Precipitation</i> – mm/h)

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019).

2.1 Métodos:

De início para presente pesquisa, optou-se por calcular medidas estatísticas como, mediana, primeiro e terceiro quartil, para precipitação convectiva (mm/h) e para o conteúdo integrado de gelo (kg/m²), por trimestre (1-DJF; 2-MAM; 3-JJA; 4-SON).

Em seguida, calculou-se o percentil 99 (P_{99}) da variável precipitação convectiva (mm/h), e com isso, pode-se analisar o comportamento por trimestre do conteúdo integrado de gelo (kg/m²), ambos oriundos do produto 2ACLIM.

Para verificar se existe diferença estatística entre as variáveis físicas por trimestre sobre o LNEB, utilizou-se a técnica estatística da Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA é um método para testar a igualdade de duas ou mais médias populacionais, baseado na análise das variâncias amostrais. Para essa técnica, os dados amostrais são separados em grupos. ANOVA é uma técnica que testa, por meio da soma de quadrados das diferenças, as diferenças entre dois pares de médias. Os resultados da ANOVA, evidenciam se a distribuição das variáveis estudadas em pelo menos um trimestre difere dos demais, porém não indica entre quais trimestre há diferença estatística. A partir dessa metodologia, deseja-se testar:

$$H_0: \mu_{1-DJF} = \mu_{2-MAM} = \mu_{3-JJA} = \mu_{4-SON}$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j,$$

$$\text{para pelo menos duas das médias, } i, j \\ = 1 - DJF, 2 - MAM, 3 - JJA, 4 - SON$$

em que μ_i (μ_j) representa a média da variável física da nuvem por trimestre i (j). Ou seja, H_0 : não há diferença entre as médias da variável física da nuvem H_1 : há diferença entre as médias da variável física da nuvem em pelo menos dois trimestres.

Observa-se que para os resultados da ANOVA, serem válidos, é necessário que os dados apresentem distribuição normal, variância constante e independência. Diante dessas premissas, foram analisadas através de testes de normalidades: Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov-Normality Test.

Após a aplicação dos testes de normalidade foi diagnosticado, que os dados não seguem uma distribuição normal de probabilidade. Porém, como as premissas da ANOVA, não foram atendidas, optou-se em aplicar ao banco de dados, a transformação de BoxCox, que é uma técnica, bastante utilizada pela comunidade científica, para que dados não normais, se aproximem o quão próximo da distribuição normal de probabilidade e tenha variância constante (Box e Cox, 1964). Contudo, mesmo com essa aplicação de Box e Cox, os dados continuaram não normais.

Então, diante desse resultado, optou-se em utilizar testes não-paramétricos, os quais não seguem as premissas impostas do teste de comparações de médias (ANOVA). Os testes não-paramétricos utilizados foram, o de Kruskal-Wallis (Myles e Douglas, 1973) e Dunn (Dunn, 1964)

3 Resultados e discussão

Os resultados abaixo, sintetizam, por meio de gráficos e medidas descritivas as características das variáveis: precipitação convectiva e conteúdo integrado de gelo oriundo do produto 2ACLIM, das nuvens que geram precipitação extrema sobre o Leste do Nordeste (LNEB). A partir da Figura 2 a e b, observa-se o comportamento da variável precipitação convectiva (mm/h) das nuvens geradoras de precipitação extrema sobre o LNEB, por trimestre. Observa-se na (Figura 2a) que os registros trimestrais, de estimativa de precipitação

extrema ($\geq P_{99}$) do produto 2ACLIM, foram em média, 8,26 mm/h (1-DJF), 8,94 mm/h (2-MAM), 5,42 mm/h (3-JJA) e 5,10 mm/h (4-SON.) Destaca-

se, a partir da (Figura 2b), valores máximos de estimativa de precipitação convectiva no trimestre 1 de 99,61 mm/h, no 2 de 78,82 mm/h, no 3 de 32,19 mm/h e 4 de 56,37 mm/h.

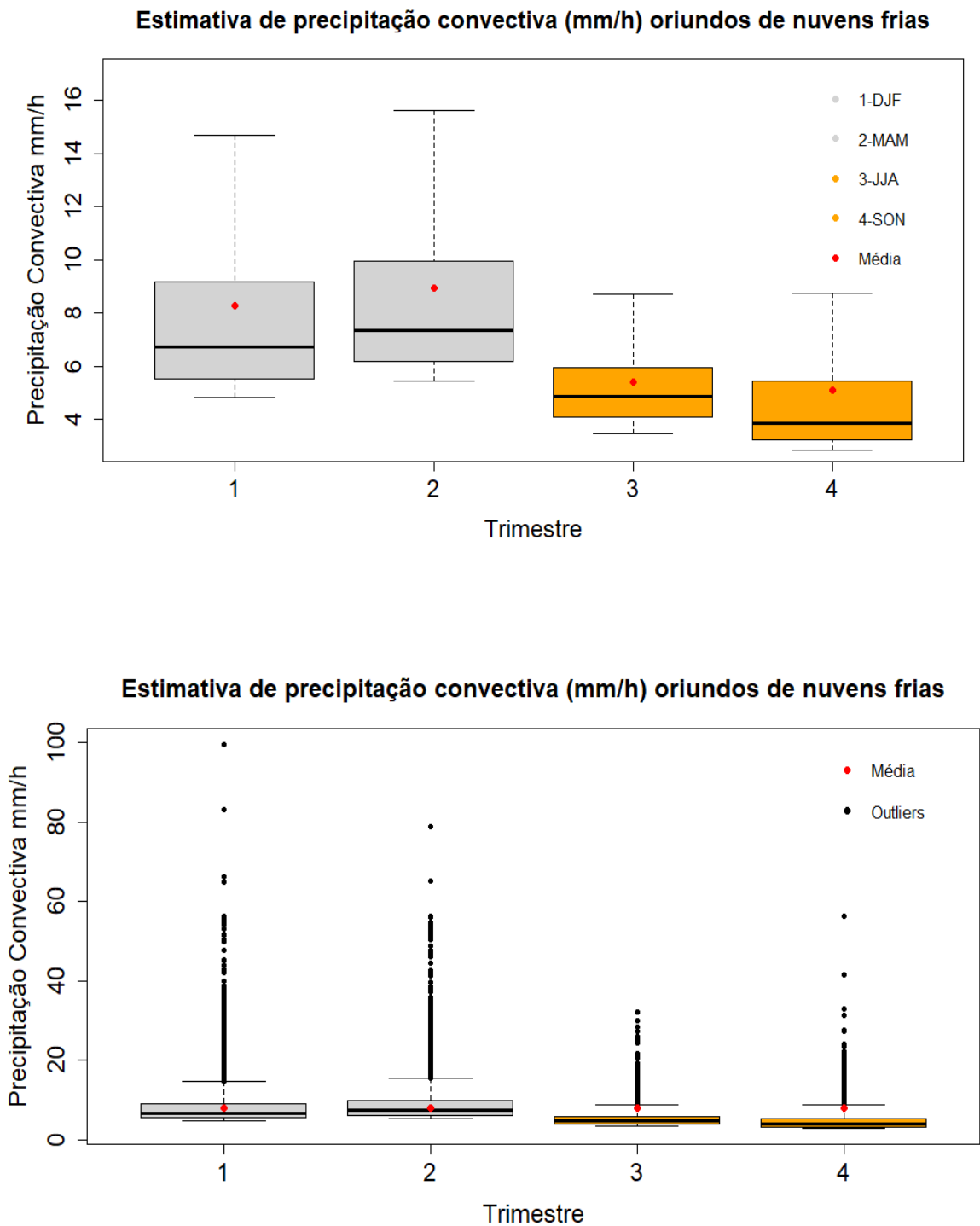


Figura 2. Variabilidade da precipitação convectiva, com valores $\geq P_{99}$, entre os anos de (1998 a 2014), para o LNEB, oriundos do produto 2ACLIM, sensor *Microwave Imager TRMM (TMI)*. A) Recorte para melhor visualização da variabilidade da precipitação convectiva; B) Variabilidade com os dados de precipitação convectiva completos.

Em trabalhos elaborados por (Oliveira et al., 2016; Rodrigues, 2019), estes autores afirmam que a LNEB, apresenta-se com as maiores intensidades de precipitação entre as demais regiões do Nordeste do Brasil (NEB).

Segundo, (Kousky, 1979; Moura e Schukla, 1981; Oliveira et al., 2016), que os maiores registros de precipitação no setor norte na área de estudo, concentram-se com maiores valores entre os meses de fevereiro a maio, período que coincide com atuação posicionamento da Zona de Convergência Intertropical mais ao sul de sua climatologia (Reboita et al., 2012; Utida et al., 2019).

Alguns estudos corroboram com o mencionado na presente pesquisa, como (Palharini e Vila, 2017), que em seus estudos, afirmam que cerca de 60% da precipitação registrada no mês de

março entre os estados do Rio Grande do Norte ao norte do Sergipe, são precipitações oriundas de convecção profunda. (Reboita et al., 2012), discorrem em suas análises, que em junho de 2010 entre os estados de Pernambuco e Alagoas houveram, registros de altas taxas de precipitação, ocasionada a partir de uma atuação simultânea de uma frente fria, Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e complexo convectivo de mesoescala (CCM).

O resultado do teste de Kruskal-Wallis, apontou que existe diferença estatística (*valor - p* < 0,01) na precipitação convectiva (mm/h) entre pelo menos dois trimestres. Os resultados do teste de Dunn (Tabela 3), indicaram que as diferenças são significativas entre todos os trimestres 1-(DJF, 2-MAM, 3-JJA e 4-SON) (*valor-p* < 0,01).

Tabela 3. Resultados do teste de Dunn para variável (**Precipitação Convectiva - mm/h**). Estatística de teste e seus respectivos valores-p sobre a região do LNEB, ao nível de significância de 99%, oriundo do produto 2ACLIM. Os valores marcados em asterisco representam a significância do (Valor-p < 0,01).

Variável	Trimestre	Estatística do teste	Valor-p
	analisado		
Precipitação Convectiva (mm/h) – 2ACLIM	DJF – MAM	-22,80	< 0,001*
	DJF – JJA	51,80	< 0,001*
	DJF – SON	47,83	< 0,001*
	MAM – JJA	68,84	< 0,001*
	MAM – SON	61,11	< 0,001*
	JJA – SON	6,08	< 0,001*

A partir da Figura 3 c e d, observa-se o comportamento da variável (Conteúdo Integrado de Gelo – kg/m²) das nuvens geradoras de precipitação extrema sobre o LNEB, por trimestre (1-DJF; 2-MAM; 3-JJA; 4-SON). Observa-se na (Figura 3c) o comportamento do conteúdo integrado de gelo (> P₉₉) da estimativa de precipitação convectiva do produto 2ACLIM, foram em média 1-DJF: 2,99 kg/m²; 2-MAM: 3,18 kg/m²; 3-JJA: 1,97 kg/m² e 4-SON: 2,11 kg/m². Diante da (Figura 3d), observa-se

valores extremos da estimativa para essa variável nos trimestres (1-DJF: 52,07 kg/m²; 2-MAM: 38,09 kg/m²; 3-JJA: 6,45 kg/m² e 4-SON: 13,6 kg/m²). Para essa variável, também foi utilizada o teste de Kruskal-Wallis, que indicou que o conteúdo integrado de gelo (kg/m²) possui características diferentes entre pelo menos dois trimestres. Os resultados do teste de Dunn (Tabela 4), indicaram que as diferenças são significativas entre todos os trimestres (1-DJF, 2-MAM, 3-JJA e 4-SON) (*valor-p* < 0,01).

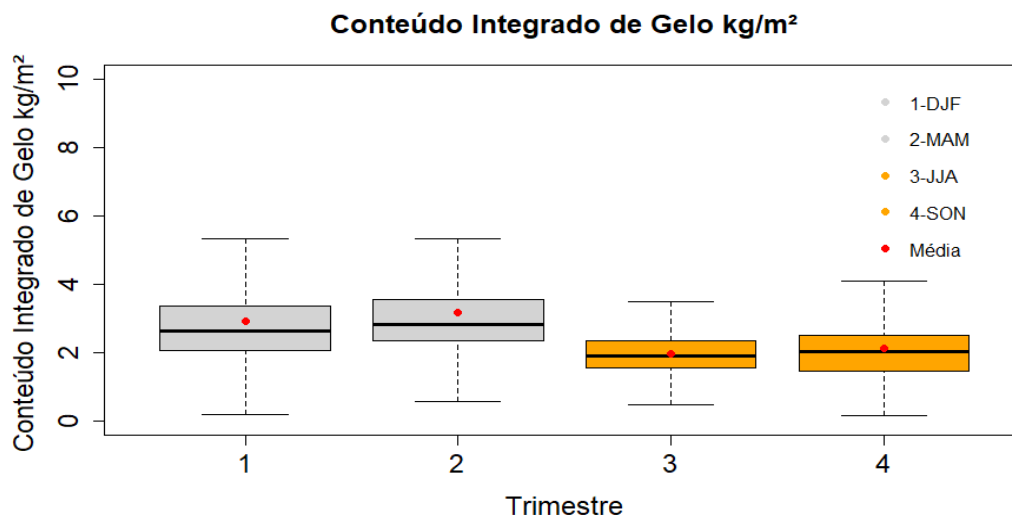
Tabela 4. Resultados do teste de Dunn para variável (Conteúdo Integrado de Gelo kg/m²). Estatística de teste e seus respectivos valores-p sobre a região do LNEB, ao nível de significância de 99%, oriundo do produto 2ACLIM. Os valores marcados em asterisco representam a significância do (Valor-p < 0,01).

Variável	Trimestre analisado	Estatística do teste	Valor-p
(Conteúdo Integrado de Gelo kg/m ²) - 2ACLIM	DJF – MAM	-16,36	< 0,001*
	DJF – JJA	49,50	< 0,001*
	DJF – SON	30,85	< 0,001*
	MAM – JJA	61,86	< 0,001*
	MAM – SON	40,36	< 0,001*
	JJA – SON	-7,24	< 0,001*

Nessas figuras os maiores registros do conteúdo integrado de gelo foram concentrados entre os trimestres 1 e 2, dos quais até 75% de IWP $\leq 3,54$ kg/m² e os 25% superiores a 3,54 kg/m². Percebe-se uma redução acentuada entre os trimestres 3 e 4 em comparação aos dois primeiros trimestres analisados sugerindo uma diminuição de

nuvens convectivas profundas e aumento de nuvens convectivas rasas, ou seja, um leve surgimento de nuvens do tipo quente, superior as nuvens frias. De acordo com (Palharini e Vila, 2017), no leste da região do NEB há presença significativa de nuvens convectivas rasas que corrobora com os resultados da presente pesquisa.

C



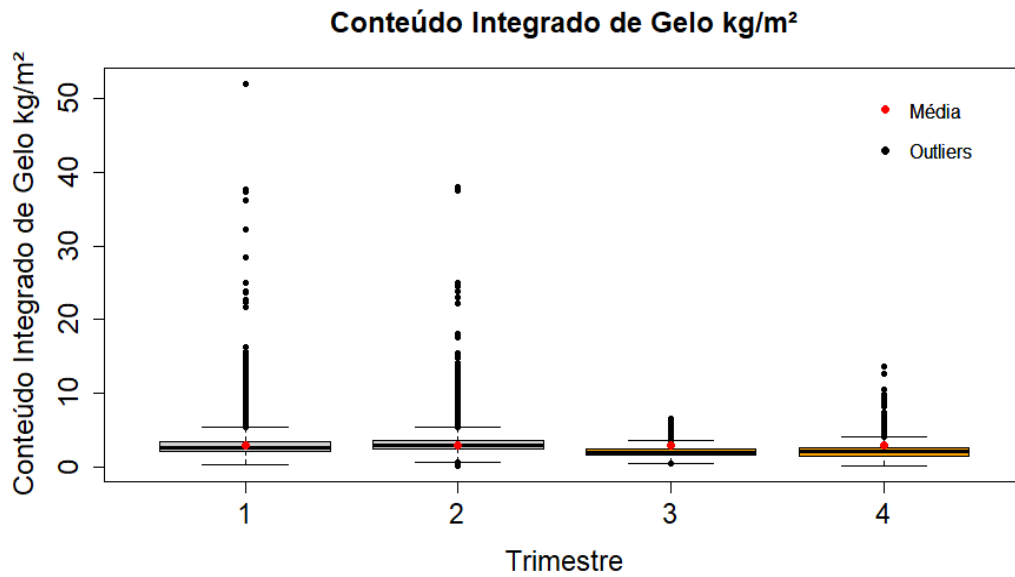


Figura 3. Variabilidade do Conteúdo Integrado de Gelo, em relação dos valores $\geq P_{99}$ da variável precipitação convectiva, entre os anos de (1998 a 2014), para o LNEB, oriundos do produto 2ACLIM, sensor *Microwave Imager TRMM (TMI)*. A) Recorte para melhor visualização da variabilidade do Conteúdo Integrado de Gelo; B) Variabilidade com os dados do Conteúdo Integrado de Gelo completos.

Destaca-se, para corroborar com os resultados apresentados acima, a cidade de Recife e o ano de 2011 como estudo de caso e especificamente os meses de abril e maio (Tabela

4). Segundo (Silva et al., 2022) a cidade do Recife registrou os maiores volumes de precipitação diária entre as capitais dos estados da área de estudo.

Tabela 4. Distribuição temporal da precipitação mensal para Recife-PE entre os anos de 2000 a 2019.

Anos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2000	276	87	174	435	265	562	575	443	336	58	45	99
2001	58	56	133	327	59	432	355	211	106	103	32	109
2002	231	199	409	140	304	583	282	124	42	49	87	33
2003	53	158	397	116	225	474	282	194	136	52	26	51
2004	249	226	168	378	327	537	359	138	81	33	18	13
2005	14	80	75	168	507	709	182	290	45	59	8	174
2006	12	32	158	322	338	432	222	185	79	8	84	106
2007	83	226	138	347	208	390	331	223	127	25	40	30
2008	85	32	395	314	415	391	374	294	47	53	16	18
2009	85	376	142	351	410	333	386	290	83	16	49	47
2010	193	45	92	273	114	543	259	191	74	37	23	84
2011	139	336	129	647	755	303	544	201	35	34	75	41
2012	198	189	138	55	190	296	261	163	19	54	9	25

2013	95	47	98	229	316	491	416	225	146	129	76	177
2014	108	148	252	268	315	322	278	162	248	146	56	71
2015	65	56	341	74	178	460	446	116	35	16	30	91
2016	124	70	268	292	478	148	110	57	57	14	17	68
2017	28	21	156	289	399	489	490	112	84	63	14	30
2018	153	146	120	484	231	143	135	98	58	23	37	74
2019	141	116	159	290	216	463	432	183	110	59	3	22

Fonte: (Silva *et al.*, 2021).

Além disso, (Costa *et al.*, 2022) apontam que Recife é a cidade, do litoral nordestino brasileiro, que mais sofre com relação à ocorrência de desastres naturais, oriundos de precipitações extremas. A partir da estimativa de precipitação de satélite (TRMM) (Figura 4), foi possível identificar que no mês de abril de 2011 houve estimativas de

precipitações intensas sobre o LNEB, em destaque sobre as cidades que compõem o estudo de caso, com valores de estimativa de precipitações médias mensais, entre 440 à 750 mm/mês, 340 à 430 mm/mês e 250 à 310 mm/mês, para Recife-PE, João Pessoa-PB e Natal-RN, respectivamente.

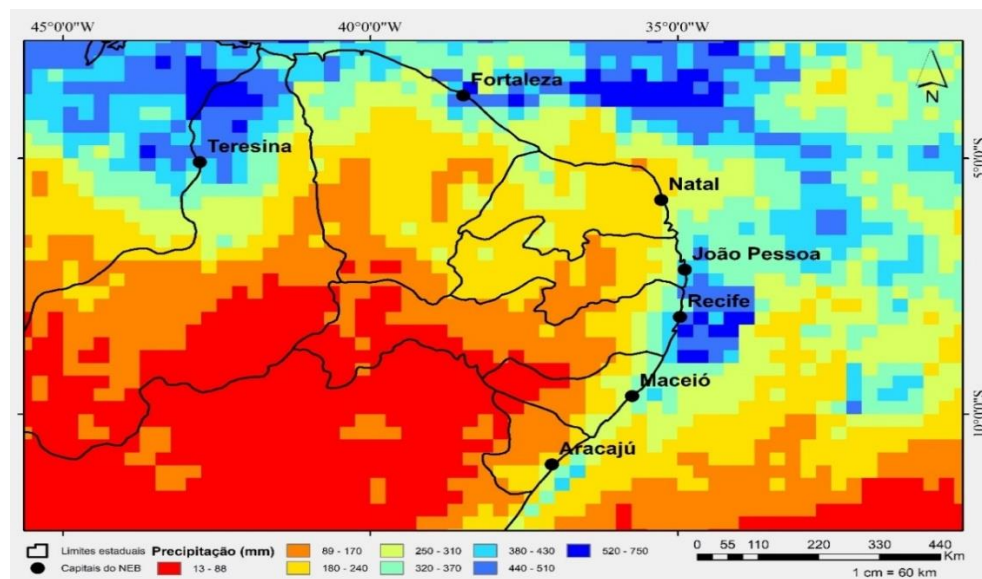


Figura 4. Estimativa dos acumulados de precipitação (mm) no mês de abril de 2011 para cidade de Recife-PE a partir de dados do satélite (TRMM). Fonte: (Silva, 2020).

Ainda assim, (Silva *et al.*, 2022), discorre que durante os trinta dias de abril de 2011, houveram seis dias com acumulados de precipitação, superiores a 40 mm/dia. Esses autores ainda destacam que entre os dias 18 e 19 de abril de 2011, o acumulado foram superiores a 180 mm/dia devido a atuação conjunta da ZCIT com um cavado na alta troposfera e um cavado invertido em 500 hPa (CLIMANÁLISE, 2011).

Na Figura 5, observa-se o posicionamento médio climatológico da (ZCIT) durante o mês de

abril de 2011. Notavelmente, no período entre os dias 16 e 20 de abril de 2011, incluindo os dias 18 e 19 de abril, a ZCIT se destacou pelo seu posicionamento médio zonal. Durante essa fase, percebe-se que a ZCIT estava situada mais ao sul de sua climatologia, conforme representado na Figura 5. Essa mudança na posição desse sistema meteorológico teve um impacto significativo nas condições do tempo dessa região, contribuindo para um aumento nas precipitações no setor norte do Nordeste do Brasil (NEB) e consequentemente

da cidade de Recife. O regime de precipitação foi diretamente influenciado pela migração sazonal da ZCIT em direção ao sul, um fenômeno

caracterizado pelo deslocamento do ar quente e úmido, conforme discorrido por (Figuerola e Nobre; Rao e Hada, 1990).

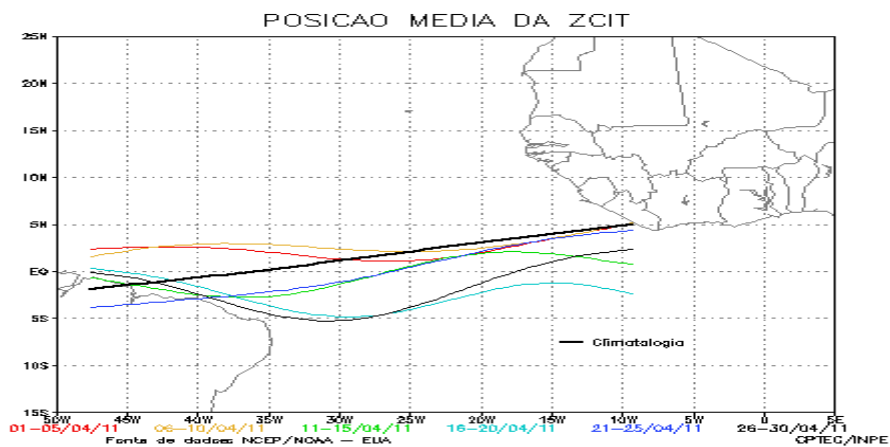


Figura 5. Posição climatológica da ZCIT para o mês de abril de 2011 (C). Fonte: Climanálise (2011).

Já as chuvas mais acentuadas da costa leste do estado do Rio Grande do Norte, foram provocadas pela atuação de distúrbios ondulatórios de leste, principalmente na capital potiguar, Natal - RN, com excedente de 114,7 mm, no dia 13/04/2011. Por meio das imagens de satélite do canal GOES-12 do canal infravermelho, realçadas a partir da temperatura de brilho do topo das nuvens, entre as 09:00 horas local (HL) do dia 18 de abril de 2011, até as 05:00 da manhã do dia 19 de abril de 2011 (Figura 6), é possível observar temperaturas de topo para cidade de Recife,

João Pessoa e Natal variando entre -60°C a -30°C , compreende-se a partir de (Silva et al., 2022), que temperaturas de topo de nuvem entre -60°C e -40°C , são em média um indicativo de temperaturas de topo de nuvens geradoras de precipitação intensa. Resultados apresentados por (Fialho e Molion, 2019), ressaltam que ao menos entre os dias 17 a 21 de abril de 2011, atuação de DOL, intensificou as precipitações dessa localidade em análise.

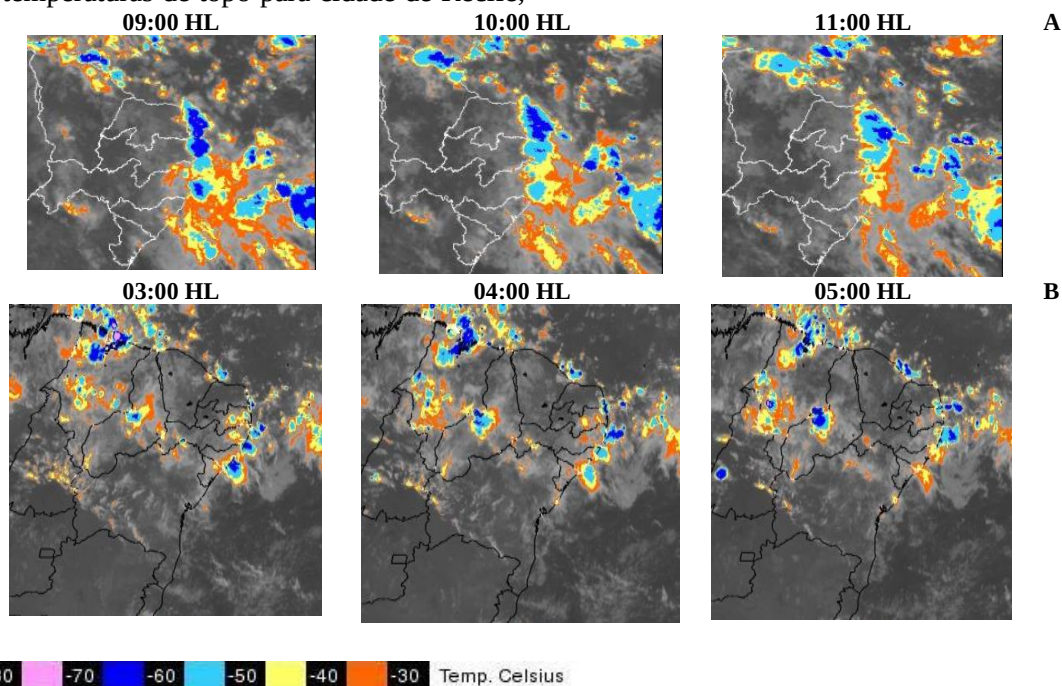


Figura 6. Imagens de satélite do GOES-12, entre os dias 18 (09:00 as 11:00 hora local) e 19 (03:00 as 05:00 hora local), em abril de 2011. Fonte: Banco de dados de imagens do satélite INPE/CPTec/DSA.

A mesma análise foi feita para o mês de maio de 2011, a partir da (Figura 7), através da estimativa de precipitação média mensal para as capitais que compõem o leste do NEB. Observou-se para Recife-PE e João Pessoa-PB, estimativas de precipitações médias mensais de 460 à 620 mm/mês e para Natal – RN, precipitações médias variando de 260 à 310 mm/mês. De acordo com

relatório do Climanálise (2011), as condições de dias com precipitações acentuadas, foram condicionadas pela proximidade da ZCIT, aliada às condições da Temperatura da superfície no mar (TSM) a propagação de distúrbios no escoamento de leste e a formação de cavados na média e alta troposfera.

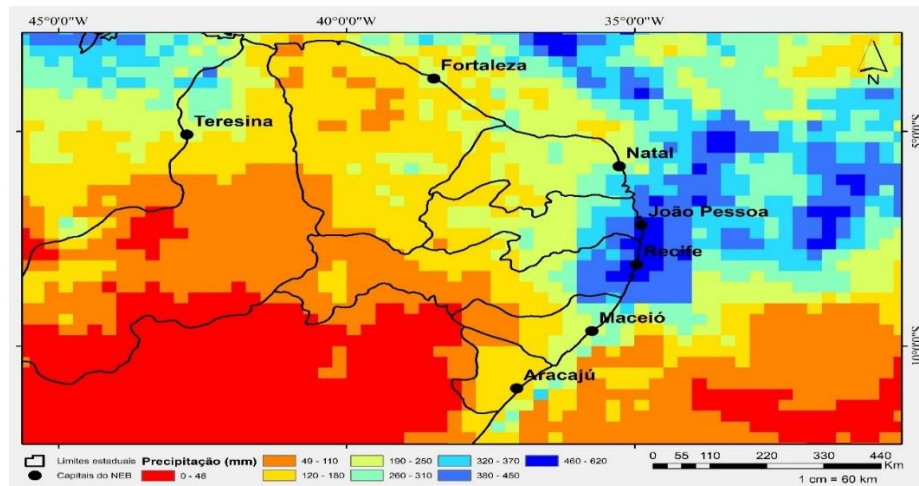
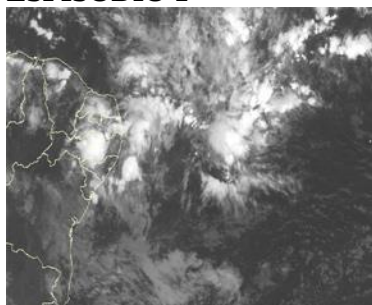


Figura 7. Estimativa dos acumulados de precipitação (mm) no mês de maio de 2011 para cidade de Recife-PE a partir de dados do satélite (TRMM). Fonte: (Silva *et al.*, 2021).

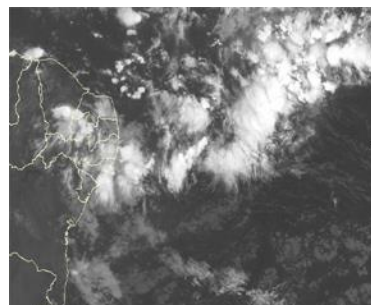
Ainda para o mês de maio de 2011, destaca-se a primeira quinzena, quando foram verificados aglomerados de nuvens convectivas associados à propagação de DOL, atuando em conjunto com a nebulosidade associada a ZCIT. A

partir da (Figura 8), é possível perceber a formação de episódio de DOL, com nuvens convectivas desde a costa litorânea do estado do Rio Grande do Norte até Alagoas durante o mês de maio de 2011.

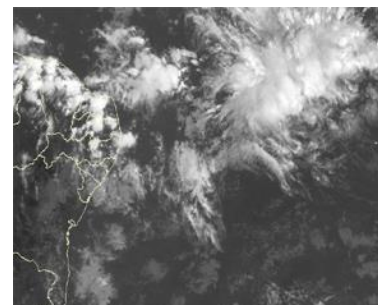
ESPISÓDIO 1



01/05/11 00:00 TMG

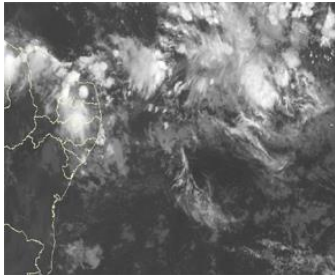


01/05/11 09:00 TMG



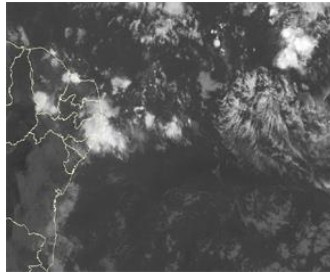
01/05/11 18:00 TMG

ESPISÓDIO 2

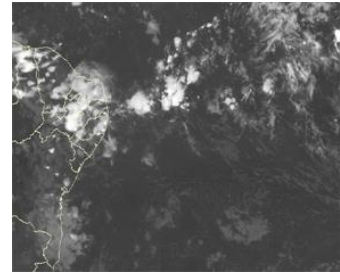


02/05/11 00:00 TMG

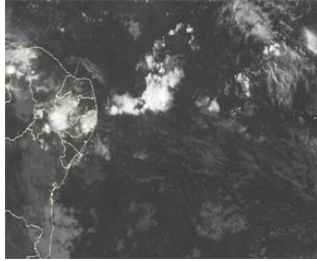
ESPISÓDIO 3



02/05/11 12:00 TMG

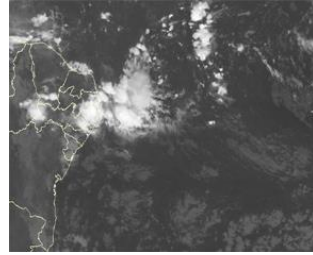


02/05/11 21:00 TMG

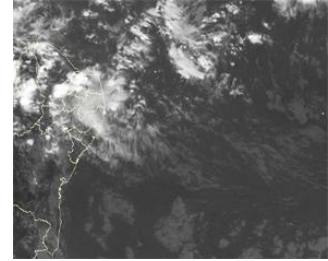


03/05/11 00:00 TMG

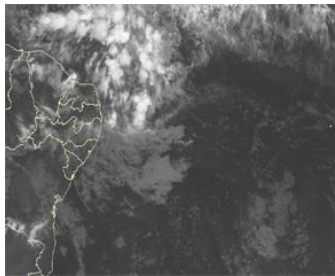
ESPISÓDIO 4



03/05/11 09:00 TMG

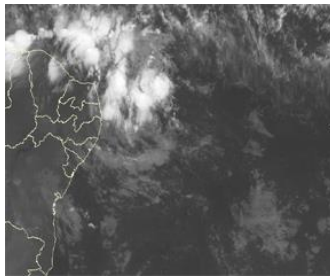


03/05/11 18:00 TMG

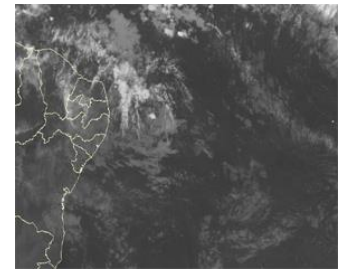


09/05/11 00:00 TMG

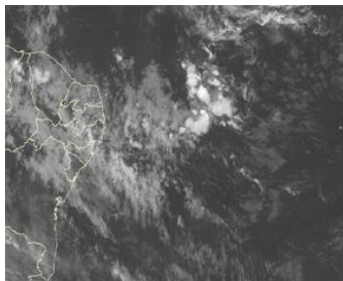
ESPISÓDIO 5



09/05/11 09:00 TMG

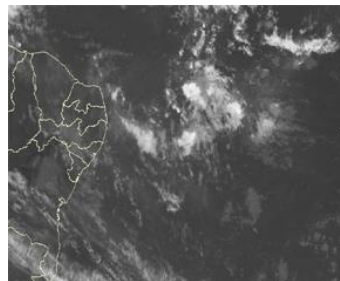


10/05/11 00:00 TMG



16/05/11 00:00 TMG

ESPISÓDIO 6



16/05/11 12:00 TMG

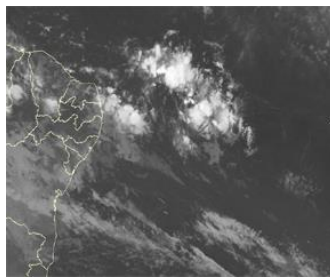


17/05/11 12:00 TMG

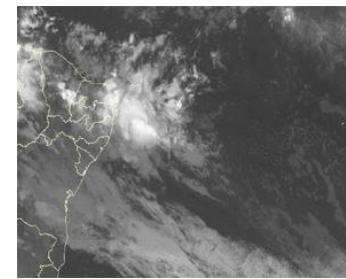


18/05/11 21:00 TMG

ESPISÓDIO 7



19/05/11 09:00 TMG



20/05/11 03:00 TMG

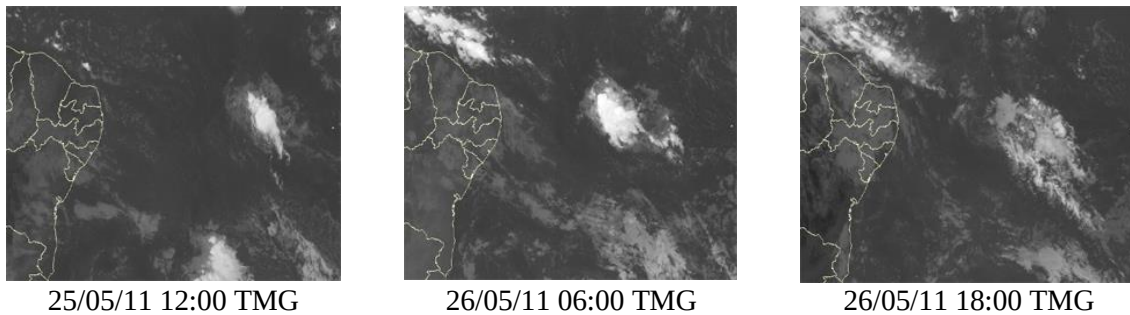


Figura 8. Imagens de satélite GOES-12, canal infravermelho, ilustrando a formação de nuvens associadas ao DOL, para o mês de maio de 2011, sobre o oceano atlântico até a costa leste do NEB. Fonte: (CLIMANÁLISE, 2011).

É válido ressaltar que, de acordo com (Silva et al., 2021), no mês de maio de 2011, foram registrados nove dias com precipitações superiores a 30 mm/dia, e o dia com maior registro de chuva, foi o dia 05/05/2011, com valor de 135,8 mm/dia. A partir do boletim da climanálise (2011), percebe-se que na primeira quinzena desse referido mês,

observou aglomerados de nuvens convectivas associados à propagação de DOL, entre o leste do NEB desde a costa do estado do Rio Grande no Norte ao litoral norte do estado de Alagoas. A exemplo desses episódios, destaca-se o dia 05/05/2011 com maior registro de precipitação para esse mês.

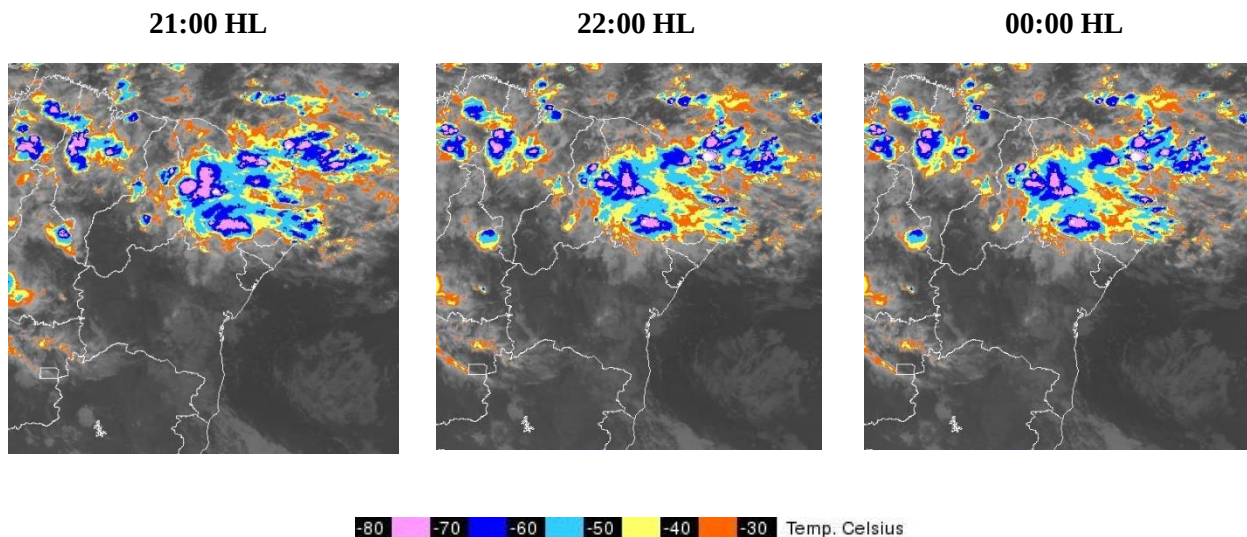


Figura 9. Imagens de satélite do GOES-12, para do 05/05/2011, das 21:00 às 00:00 HL. Fonte: Banco de dados de imagens do satélite INPE/CPTEC/DSA.

Na (Figura 9), através das imagens do satélite GOES-12, do canal infravermelho, realçadas a partir da temperatura do topo das nuvens, entre os horários locais das capitais em análise neste estudo de caso, que as temperaturas de topo de nuvem, variam de -60°C e -40°C . Diante

de estudos elaborados por (Ribeiro e Nunes, 2011) e (Silva et al., 2021 e 2022), temperaturas entre essas variações, contribuem para formação de nuvens de precipitações, como indicado na figura 9.

4 Conclusões

Com base nos resultados apresentados na presente pesquisa, foi possível caracterizar as variáveis físicas, precipitação convectiva e conteúdo integrado de gelo sobre o Leste do Nordeste (LNEB) por meio de estimativas, através de dados do produto 2ACLIM, provenientes do

sensor *TRMM Microwave Imager (TMI)*, oriundos do satélite TRMM, durante os anos de 1998 a 2014. Os principais resultados apontaram os maiores registros de extremos de precipitação ($\geq P_{99}$) na estimativa de precipitação convectiva nos

trimestres 1-DJF e 2-MAM, com valores médios de 8,26 mm/h e 8,94 mm/h, respectivamente e com maiores valores entre os trimestres de (1-DJF: 99,61 mm/h; 2-MAM: 78,82 mm/h). A partir desses registros de precipitação convectiva $\geq P_{99}$, foram observados os maiores registros da variável conteúdo integrado de gelo, também nos trimestres 1-DJF e 2-MAM, com valores médios de 2,99 kg/m² e 3,18 kg/m², respectivamente, com maiores registros dessa variável entre os trimestres (1-DJF: 52,07 kg/m²; 2-MAM: 38,09 kg/m²).

Identificou-se uma redução acentuada nos valores tanto da variável precipitação convectiva quanto do conteúdo integrado de gelo em relação aos trimestres estudados. Os registros de ambas as variáveis foram menores nos trimestres 3-JJA e 4-SON. Esse resultado sugere que a redução no conteúdo integrado de gelo está associada ao surgimento de nuvens convectivas rasas, ou seja, nuvens sem a presença de gelo em sua estrutura física. Observou-se que todas as variáveis de ambos os produtos obtiveram significâncias estatísticas, ou seja, (valor-p < 0,01), rejeitando assim a hipótese nula H_0 em todos os trimestres. Portanto, conclui-se que os aglomerados de precipitação sobre a localização do estudo de caso, são provenientes de nuvens convectivas profundas entre o período analisado, ou seja, nuvens frias.

6 Referências

- Abreu, L. P., Gonçalves, W. A., Mattos, E. V., Mutti, P. R., Rodrigues, D. T., Silva, M. P. A. 2021. Clouds Microphysical Properties and Their Relationship With Lightning Activity In Northeast Brazil. *Remote Sensing*, 13(21), 4491. <https://doi.org/10.3390/rs13214491>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G. 2013. Koppen's Climate Classification Map For Brazil. *meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Box, G.E.P. and Cox, D.R. 1964 an analysis of transformations (with discussion). *journal of the royal statistical society b*, 26, 211–252.
- Climanálise, 2011. climanálise boletim. disponível: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0411.shtml>. acesso: 14 ago 2023.
- Dunn, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. 1964. *Technometrics*, 6(3), 241- 252.
- Fialho, W. M. B. & Molion, L. C. B. Eventos de Chuva Extremos: Recife-PE em abril de 2011. 2019. *Revista Ambientale*, 3(6), 56-64, 2019.
- Figuerola, S. N., Nobre, C. A. 1990. Precipitation Distribution Over Central And Western Tropical South America. *Climanálise*, 5, 36-44.
- Han, M., Braun, S. A., Olson, W. S., Persson, P. O. G. and Bao, J. W. Application Of Trmm PR and TMI Measurements TO Assess Cloud Microphysical Schemes In The MM5 for a Winter Storm. 2010. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 49 (6), 1129-1148. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2327.1>
- Heiblum, R. H., Koren, I. and Sltaratz, O. 2011. Analyzing Coastal Precipitation Using TRMM Observations. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 11(24), 13201-13217. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13201-2011>
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Summary For Policy Makers. IPCC geneva, 2021.
- Kousky, V.E. Frontal Influences On Northeast Brazil. *Mon. Wea.Rev.* 107, 1142-1153.
- Liu, C., Zipser, E. J., Cecil, D. J., Nesbitt, S. W. 2008. And Sherwood, S. a Cloud And Precipitation Feature Database From Nine Years Of TRMM Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10), 2712-2728. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1890.1>

- Li, C., Von Storch, J.S., Marotzke, J. 2013. Deep-Ocean Heat Uptake And Equilibrium Climate Response. *Climate Dynamics*, 40(5-6), 1071-1086.
- Marengo, J. A., Schaeffer, R., Zee, D., Pinto, H. S. 2017. *Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil*. (1 ed.).
- Moura, A. D & Shukla, J. 1981. On the Dynamics Of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments With a General Circulation Model. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 38 (12), 2653-2675.
- Myles H. And Douglas A.W. 1973. *Nonparametric Statistical Methods*. New York: John Wiley & Sons, p. 115–120.
- Oliva, F. G. 2019. Climatologia e Variabilidade dos Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes no Brasil, Relação com Chuvas Intensas e Impactos Associados. *Revista da Pós-Graduação em Geografia da Puc-Rio*, 12(23), 74-99.
- Oliveira, P. T., Silva, C. M., Santos e Silva., Lima, K. C. 2016. Climatology and Trend Analysis of Extreme Precipitation in Subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130 (1-2), 77-90. DOI 10.1007/s00704-016-1865-z
- Palharini, R. S. A & Vila, D. A. 2017. Climatological Behavior of Precipitating Clouds in The Northeast Region of Brazil. *Advances in Meteorology*, 2017, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2017/5916150>
- Qin, F.; Xian, T & Fu, Y. (2018). Cloud-Precipitation Parameters and Radiative Forcing of Warm Precipitating Cloud Over The Tropical Pacific Ocean Based on TRMM Datasets and Radiative Transfer Model. *Atmosphere*, 9 (6), 2-18. <https://doi.org/10.3390/atmos9060206>
- Rao, V. B. & Hada, K. (1990). Characteristics of Rainfall Over Brazil: Annual Variations and Connections With Southern Oscillations. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, p. 81-91.
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizz, T., Rocha, R. P. 2012. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terra e Didática*, 1(8), 34-50. <https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425>
- Ribeiro, B. Z.; Nunes, A. B. Uso de Sensoriamento Remoto Para Análise de uma Linha de Instabilidade: Estudo de caso para o Rio Grande do sul. in: xv simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 2011, Curitiba - pr. anais do xv simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. são José dos campos: mct/inpe, 2011. v. 15. p. 2150-2156.
- Rodrigues, D. T., Gonçalves, W. A., Spyrides, M. h. c., Silva, C. M. S., Souza, D. O. 2020. Spatial Distribution Of The Level Of Return Of Extreme Precipitation Events in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 40, 12, 5098-5113. <https://doi.org/10.1002/joc.6507>
- Rodrigues, D. T. 2019. Análise de Eventos Extremos de Precipitação no Nordeste do Brasil. [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. BDTD - repositório Digital da UFRN. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/28110>
- Silva, E. A., M, T. B., Lima, I. P. C., Melo, M. H. B.; Andrade, Maria, U. G. 2021 Análise da Variabilidade Temporal da Precipitação em Recife-PE. *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar*, São Paulo, 2(7), 27512. <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i7.512>
- Silva, E. A.; Silva, M. T., Melo, M. M. M. Silva; Mandú, T. B., Lima, I. P. C., Souza, B. S, 2022. Climate and Analysis of The Extreme Precipitation Trends in Recife-PE. *Journal Of Hyperspectral Remote Sensing*, 11(6), 317, <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2021.252132>
- Silva, E. A. 2020. Análise da Variabilidade Temporal da Precipitação Em Recife-PE [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande]
- Silva, H. J. F., Gonçalves, W. A., Bezerra, B. G., Silva, C. M. S., Oliveira, C. P., Mutti, P. R. 2022. Analysis of The influence of Deforestation on the Microphysical Parameters of Clouds in the Amazon. *Remote Sensing*, 14(21) v. 14 (21) 2-23. <https://doi.org/10.3390/rs14215353>
- Silva, P. E., Silva, C. M. S., Spyrides, M. H. C., Andrade, L. M. B. 2018. Precipitation and Air Temperature Extremes in the Amazon and Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 39, 579-595. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>
- Utida, G., Cruz, F. W., Etouneau, J., Bouloubassi, I., Schefub, E., Vuille, M., Novello, V. F., Prado, L. F., Sifeddine, A., Klein, V. 2019. Tropical South Atlantic Influence on Northeastern Brazil Precipitation and ITCZ Displacement During the Past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30737460/>
- Yang, Y.J., Wang, H., Chen, F., Zheng, X.; Fu, Y., Zhou, S. 2019. TRMM-based Optical and Microphysical Features of Precipitating clouds in summer over the yangtze–huaihe river valley, china. *Pure and Applied Geophysics*, 176 (1), 357-370. DOI: 10.1007/s00024-018-1940-8