UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ | INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS | FACULDADE DE METEOROLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LETÍCIA PEREIRA DA SILVA

EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM DURANTE O ANO DE 2021

N°: 000

BELÉM - PA

ABRIL - 2022

LETÍCIA PEREIRA DA SILVA

EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM DURANTE O ANO DE 2021

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau Bacharel em Meteorologia.

Área de concentração: Geociências
Linha de pesquisa: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

Belém-PA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)autor(a)

S586e Silva, Letícia Pereira da.

Eventos extremos de precipitação sobre a região metropolitana de Belém durante o ano de 2021 / Letícia Pereira da Silva. — 2022.

53 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências,Faculdade de Meteorologia, Belém, 2022.

1. Precipitação. 2. Eventos extremos. 3. Percentis. I.Título.

CDD 551.5

LETÍCIA PEREIRA DA SILVA

EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM DURANTE O ANO DE 2021

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau Bacharel em Meteorologia.

Área de concentração: Geociências
Linha de pesquisa: Meteorologia

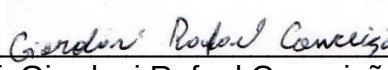
Data de aprovação: 20/04/2022.

Conceito: BOM

Banca Examinadora:

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Alexandre Melo Casseb do Carmo - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Giordani Rafael Conceição Sodré - Membro
Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me dar saúde, energia e esperança sempre na minha vida.

Ao Tenente Coronel Sá Gille por mostrar esse curso e incentivar a ter a formação de Meteorologista.

Ao meu orientador Prof. Everaldo Barreiros de Souza pela paciência, orientação e comprometimento neste trabalho.

Ao corpo docente e técnico da Faculdade de Meteorologia, do Instituto de Geociências e ao Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia em especial a Doutora Nilzele de Vilhena Gomes Jesus e Bernadino Simões Neto pela paciência e a oportunidade de desenvolver meu crescimento pessoal e profissional.

A minha família Farias pelo apoio moral, afetivo e financeiro nos momentos mais complicados e pelo incentivo de lutar a cada dia pelo meus sonhos.

A todos os colegas e amigos de curso em especial a Dênis José Cardoso Gomes, Alfredo Jimenes, Kaio Matheus, Rubens Evangelista, Thais Costa, Thomas Silva, Fabrício Nascimento, Valkíria Costa, Valeria Nakale, Renata Carvalho, Priscila Ribeiro, Elivaldo Carvalho, Emily Pires, Matheus Farias, Talleson Santos e Raimundo Pereira que estiveram dentro de todo o período incentivando e ajudando sempre diante as dificuldades.

“Tatakae!”

Eren Yeager

RESUMO

Os eventos extremos de precipitação estão cada vez mais presentes e intensos ao longo dos anos e tem preocupado a sociedade com problemas ambientais e socioeconômicos. Este trabalho teve o objetivo de estudar os eventos extremos diários na região metropolitana de Belém durante o ano de 2021. Seis eventos extremos com precipitação diária excedendo o limiar do percentil98 (59,9 mm/dia) foram identificados nos meses do regime chuvoso (fevereiro a maio). O efeito desses eventos no ciclo diurno das variáveis meteorológicas foi avaliado, com resultados indicando impactos locais, principalmente a queda brusca e intensa da temperatura do ar e a ocorrência de rajadas de vento na entrada do evento extremo. A análise das imagens de satélite (GridSAT) demonstraram que a chuva extrema foi provocada pela passagem de Linhas de Instabilidade ou Aglomerados Convectivos, os quais se associaram a outros sistemas meteorológicos de escalas maiores.

Palavras-chave: precipitação; eventos extremos; percentis.

ABSTRACT

Extreme precipitation events are increasingly present and more intense over the last years and they have concerned society with environmental and socioeconomic problems. This work aimed to study the daily extreme events in the metropolitan region of Belém during the year 2021. Six extreme events with daily rainfall exceeding the 98th percentile threshold (59.9 mm/day) were identified in the rainy season (February to May). The effect of these events on the diurnal cycle of meteorological variables was evaluated, with results indicating local impacts, mainly the intense and rapid decline in air temperature and the occurrence of gusts of wind at the entrance of the extreme event. The analysis of satellite images (GridSAT) showed that the extreme rainfall was caused by the passage of Lines of Instability or Convective Clusters, which were associated with other larger scale meteorological systems.

Keywords: rainfall; extreme events; percentiles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo sobre a região metropolitana de Belém – PA, em destaque vermelho a estação automática do INMET. 15

Figura 2 – Precipitação acumulada diária (entre 00 a 23 hora local) da estação automática de Belém durante o ano de 2021. A linha preta indica o valor do percentil 98. Unidade: mm/dia. 19

Figura 3 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 3a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 3b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 3c), na estação automática durante o evento extremo do dia 09/fev/2021. 20

Figura 4 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 09/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 23

Figura 5 - Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 09/fev/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 24

Figura 6 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 16/fev/2021. 25

Figura 7 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 28

Figura 8 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 29

Figura 9 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 11/mar/2021. 30

Figura 10 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 34

Figura 11 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 11/mar/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 35

Figura 12 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 11/abr/2021. 35

Figura 13 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 11/abr/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 38

Figura 14 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 11/abr/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 39

Figura 15 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 10/mai/2021. 39

Figura 16 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 10/mai/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 42

Figura 17 – Imagem de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 10/mai/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 43

Figura 18 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 13/mai/2021. 44

Figura 19 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 13/mai/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 47

Figura 20 – Imagem de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 13/mai/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul. 48

Figura 21 – Notícia veiculada pelo G1 Pará. 49
Figura 22 – Notícia veiculada pelo G1 Pará. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 09 de fevereiro de 2021. 21

Tabela 2 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 16 de fevereiro de 2021. 27

Tabela 3 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 11 de março de 2021. 33

Tabela 4 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 11 de abril de 2021. 37

Tabela 5 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 10 de maio de 2021. 41

Tabela 6 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 13 de maio de 2021. 46

Tabela 7 – Lista de ocorrências de desastres no dia 11 de março de 2022. ... 50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivos 14
2 MATERIAL E MÉTODOS 15
2.1 Área de estudo e bases de dados 15
2.2 Metodologia 16
3 RESULTADOS 18
3.1 Seleção dos eventos extremos de precipitação diária 18
3.2 Análises do ciclo diurno e identificação dos sistemas atuantes 19
3.2.1 Caso 1: 09 de fevereiro de 2021 19
3.2.2 Caso 2: 16 de fevereiro de 2021 25
3.2.3 Caso 3: 11 de março de 2021 30
3.2.4 Caso 4: 11 de abril de 2021 35
3.2.5 Caso 5: 10 de maio de 2021 39
3.2.6 Caso 6: 13 de maio de 2021 44
4 DISCUSSÃO 49
5 CONCLUSÃO 51
REFERÊNCIAS 52

1 INTRODUÇÃO

Na região Amazônica, a precipitação é a variável mais importante desta região tropical, por apresentar maior variabilidade espaço-temporal ao longo do território. Destacam-se os eventos extremos de precipitação, cuja ocorrência pode ser intensa e rápida (menos de uma hora) ou prolongada (várias horas). Eventos meteorológicos extremos estão numa categoria de fenômenos ligados aos desastres naturais, sejam eles: Enxurradas, Inundações, Alagamentos, Vendavais, Granizos, Trovoadas e Raios. Estes eventos afetam diretamente o cotidiano da sociedade e impactam a dimensão social, incluindo aspectos ambientais, político, econômico e institucional (COSTA, et al, 2018).

O tempo severo tem sido uma preocupação permanente para as pessoas, considerando seu potencial de causar perda de vidas, danos à propriedade e outras repercuções ambientais, em todo o mundo (ORTEGA et al., 2009). As ocorrências de chuvas intensas e tempestades com raios estão associadas a fortes sistemas de convecção em escalas meteorológicas variando de grande, sinótica e de mesoescala, os quais são influenciados pelos pulsos de aquecimento solar diários (FENG et al., 2009).

As nuvens de tempestades são também conhecidas como nuvens cumulonimbos (CB), que comumente são classificadas em tempestades isoladas e tempestades organizadas, onde as isoladas tem duração de aproximadamente 1 ou 2 horas e sua ocorrência está relacionada a fatores locais como, orografia, aquecimento diurno e teor de umidade local. Por outro lado, as tempestades organizadas ou sistemas convectivos de mesoescala, além da duração e atividade elétrica intensa, costumam ser mais severos, apresentando chuvas fortes, ventos violentos e granizo (PINTO JR; PINTO, 2000).

A escala de um fenômeno meteorológico descreve as suas condições espaço/temporal. Eventos de tempestades se encaixam em mesoescala, têm dimensões de 1km até cerca de 100 km. Neste conjunto são encaixados os fenômenos: tornados, linhas de instabilidade, tempestades isoladas, conjuntos ou sistemas de nuvens, ilhas de calor e brisa (USP, 2021).

1.1 Objetivos

O objetivo geral é identificar os eventos mais intensos de precipitação na escala diária registrados sobre a Região Metropolitana de Belém durante o ano de 2021, analisando os efeitos no ciclo diurno das variáveis atmosféricas e identificando a atuação dos sistemas meteorológicos.

Os objetivos específicos são:

a) Determinar os valores diários da precipitação acumulada entre 0 a 23 horas local e distinguir os eventos diários de precipitação mais intensa;

b) Investigar os efeitos dos eventos extremos no ciclo diurno das variáveis atmosféricas (precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ar e velocidade do vento);

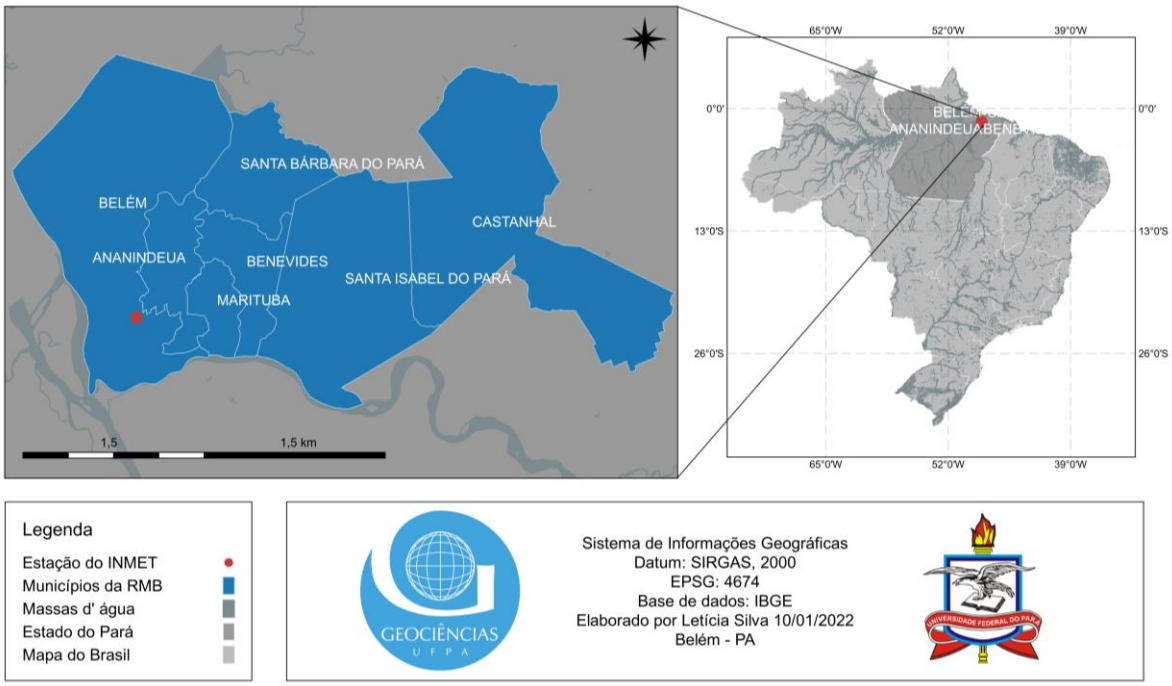
c) Identificar os sistemas meteorológicos que provocam os eventos extremos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e bases de dados

A Figura 1 mostra a Região Metropolitana de Belém (RMB), localizado na região Norte do Brasil, ao nordeste do estado do Pará, próxima a linha equatorial onde é constituída por uma zona tropical úmida. A RMB possui 7 municípios: Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará, Santa Isabel do Pará e Castanhal. Sua área total tem aproximadamente 3.565,783 km², com população estimada em todos os municípios de 2.505,242 hab/m² (IBGE, 2022). Segundo Dubreuil et al. (2018), a região apresenta a classificação Koppen do tipo Af e de acordo com INMET (2022) sua climatologia é regida com precipitação média anual de 2850 mm, umidade relativa de 84%, temperatura de 28ºC, pressão atmosférica de 1012 hPa e intensidade do vento de 3,5 m/s.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo sobre a região metropolitana de Belém – PA, em destaque vermelho a estação automática do INMET.



Fonte: Do autor.

Utilizam-se os seguintes dados:

- Dados horários da estação meteorológica automática do INMET durante o ano de 2021 (01 janeiro a 31 de dezembro) de precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, onde as recomendações feitas pela World Meteorological Organization (WMO) indicam que uma estação meteorológica pode ser utilizada em um raio de 50 km para definir os mesmos;
- Dados da estação meteorológica de superfície extraídos nos dias dos eventos extremos da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) por meio do código padrão registrado de forma horária o *METeorological Aerodrome Report* (METAR) e *SPECIal Weather Report* (SPECI) para registros específicos de alterações do tempo;
- Imagens de satélite (GridSAT) no canal infravermelho com dados de temperatura do topo de brilho das nuvens obtidos no NCEI/NOAA (KNAPP et al., 2011). Pelos estudos de Machado e Rossow (1993), identificam-se as nuvens de convecção profunda com valores inferiores a -30°C na temperatura de brilho no topo das nuvens;
- Informações jornalísticas sobre o impacto dos eventos extremos.

2.2 Metodologia

Identificação dos eventos extremos de precipitação:

Inicialmente foi calculado o acumulado diário de precipitação entre 0 e 23 horas local do ano de 2021 (1 de janeiro a 31 de dezembro). Com a série temporal dos dias com precipitação acima de zero (dias sem precipitação foram excluídos) ao longo de 2021 foi determinado o Percentil 98 (P98) para selecionar os dias de ocorrência dos eventos extremos (precipitação diária mais intensa).

Análise do ciclo diurno

Foram plotados os dados horários (0 a 23 hora local) das variáveis atmosféricas nos dias de ocorrência dos eventos extremos objetivando analisar os efeitos dos eventos extremos no clima local.

Sistema meteorológico atuantes

Foram plotadas as sequencias temporais das imagens de satélite GridSat objetivando identificar qual sistema meteorológico provocou a ocorrência do evento extremo.

Código METAR/SPECI

Foram descodificados os códigos METAR/SPECI registrados na estação meteorológica de superfície (0 a 23 horal local) e tabelados para a verificação de nebulosidade presente e as condições adversas sobre as datas calculadas e definidas como extremas.

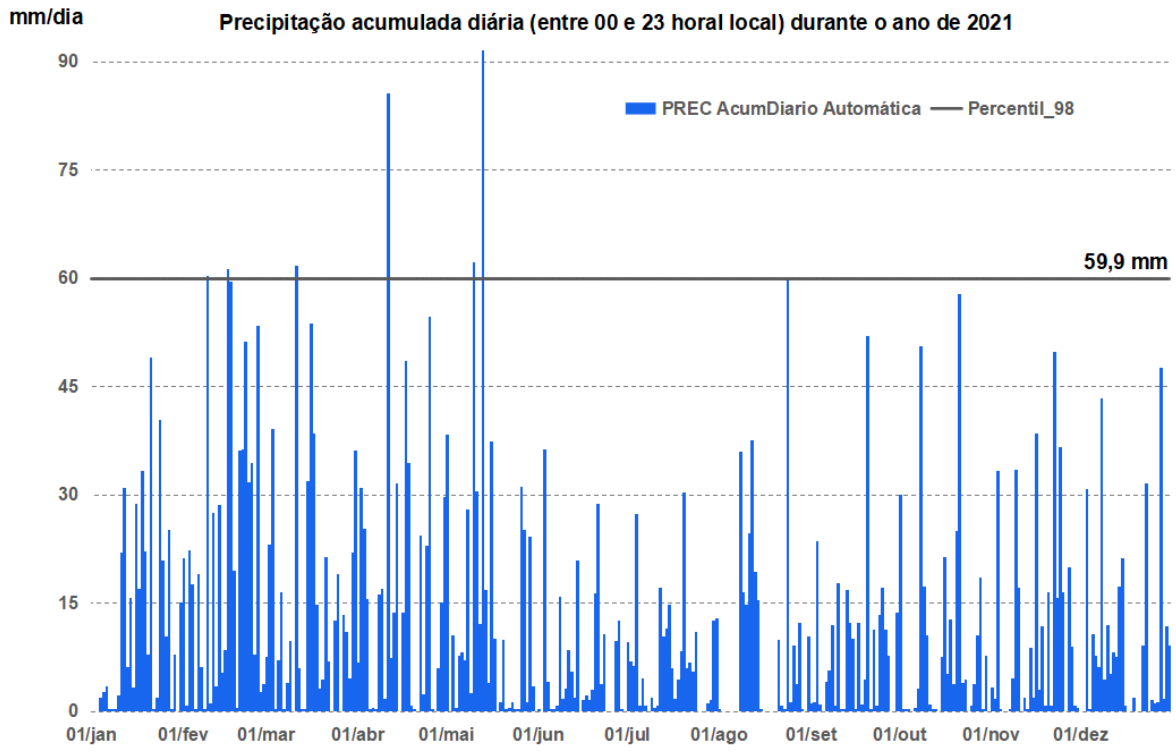
3 RESULTADOS

3.1 Seleção dos eventos extremos de precipitação diária

A Figura 2 mostra o gráfico de barras com a precipitação acumulada diária no ano de 2021 (1 de janeiro a 31 de dezembro), sendo que a linha horizontal em preto índica o valor do P98 (59,9 mm/dia) que será usado para selecionar a ocorrência dos eventos extremos.

Foram observados nos meses de fevereiro a maio os eventos pluviométricos mais intensos. Destacaram-se seis dias com chuva diária acima do P98: 9 de fevereiro (60,4 mm), 11 de fevereiro (61,4 mm), 11 de março (61,8 mm), 11 de abril (85,6 mm), 10 e 13 de maio (62,2mm e 91,6 mm). Tais eventos ocorreram nos meses do período de verão e outono nos quais temos uma intensidade prolongada de chuvas através dos sistemas meteorológicos atuantes de escala sinótica nesta época no ano, como a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e de outros sistemas atuantes na meso escala e escala local como as linhas de instabilidade (LI) e brisas marítimas (SOUZA; AMBRIZZI, 2004; SILVA; LUCIO; SILVA, 2015).

Figura 2 – Precipitação acumulada diária (entre 00 a 23 hora local) da estação automática de Belém durante o ano de 2021. A linha preta indica o valor do percentil 98. Unidade: mm/dia.



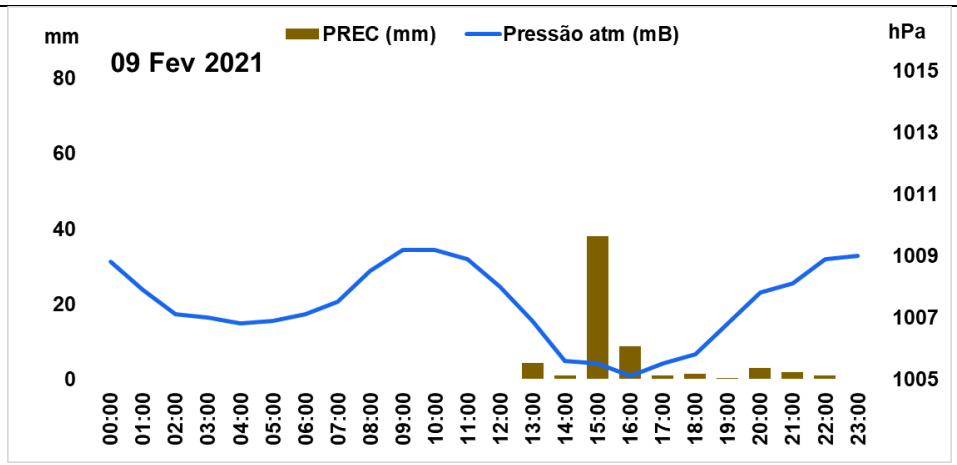
3.2 Análises do ciclo diurno e identificação dos sistemas atuantes

3.2.1 Caso 1: 09 de fevereiro de 2021

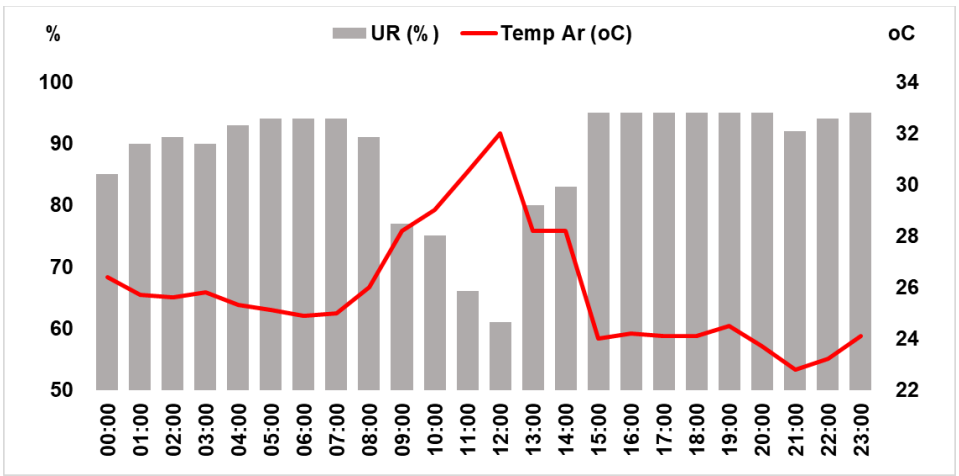
A Figura 3 mostra o comportamento horário da precipitação e pressão atmosférica (Figura 3a), umidade e temperatura do ar (Figura 3b), e velocidade do vento (Figura 3c) registrada no dia 09 de fevereiro de 2021 na estação automática do INMET em Belém. No período que foi registrada a chuva de 13:00 as 22:00 HL, com seu maior valor as 15:00 HL (38 mm), a pressão, nesses horários decresceu e indicou a tendência de favorecer a formação de nuvens convectivas. Além disso, foi observado sobre os horários de precipitação que a umidade relativa e a temperatura do ar, apresentam relações inversamente proporcionais, e subsequentemente, a velocidade do vento possui alterações significativas para indicar condições iniciais de uma nuvem cumulonimbus.

Figura 3 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 3a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 3b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 3c), na estação automática durante o evento extremo do dia 09/fev/2021.

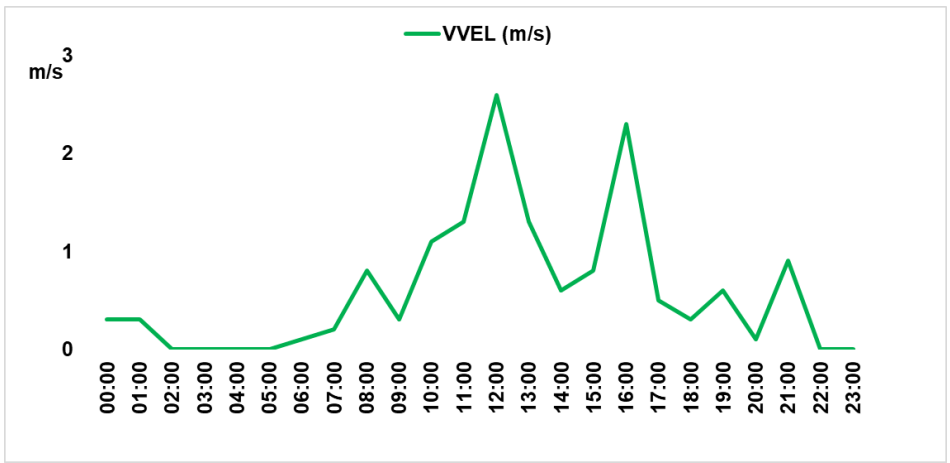
(a)



(b)



(c)



A Tabela 1 representa os dados extraídos do METAR/SPECI do dia 09 de fevereiro de 2021 de 00:00 ate 23:00 (hora local) registrados na estação

meteorológica do Aeroporto Internacional de Belém Júlio César Ribeiro (SBBE). Às 04:00 ate 22:00, foi mostrado o decaimento da temperatura do ar (29 para 24ºC) e a permanência do ponto de orvalho (24ºC) no qual foi indicativo para o aumento da umidade relativa contribuindo no horário de 13:00 HL para a formação e a presença confirmada de Torres de cúmulos (TCU), onde teve sua evolução para a nuvem cumulonimbus (CB) até as 18:00 HL, promovendo dentro deste horário chuva fraca a moderada com trovoadas e sobre as vizinhanças. Neste horário a visibilidade horizontal sobre o aeródromo caiu ate 4000 metros em conjunto com as alterações pertinentes da velocidade do vento com seu maior valor em 5,7 m.s¹ registrado pelo SPECI às 14:32 HL, e valores decrescentes da pressão atmosférica.

Tabela 1 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 09 de fevereiro de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s¹)	Rajada (m.s¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
09/0000	80	3,1	-		-	Céu Claro	-	-	26	24	1011
09/0100	90	2,6	-		-	Céu Claro	-	-	26	24	1010
09/0200	80	2,1	-		-	Céu Claro	-	-	26	24	1010
09/0300	60	2,1	-		-	Céu Claro	-	-	26	24	1009
09/0400	80	1,5	-	8000	-	Nenhuma nuvem significativa	-	-	25	24	1009
09/0500	90	1,0	-	8000	-	Nenhuma nuvem significativa	-	-	25	24	1009
09/0600	130	2,1	-	5000	-	Névoa úmida	3048	-	25	24	1009
09/0700	100	2,1	-	9000	-	-	3048	-	25	24	1010
09/0800	100	2,1	-	9999	-	-	3048	-	26	24	1011
09/0900	70	2,6	-	9999	-	-	3048	-	27	24	1012
09/1000	50	5,1	-	9999	-	-	3048	-	28	24	1012
09/1100	80	4,6	-	9999	-	-	671	-	30	24	1011
09/1200	80	3,1	-	9999	-	-	-	-	31	24	1011
09/1300	50	4,6	-	9999	-	-	914	TCU	31	23	1009
09/1400	300	4,1	-	9999	-	Chuva fraca	610	TCU	29	24	1008
09/1432	60	5,7	-	3000	-	Chuva moderada	396	-	27	24	1008
09/1500	110	2,6	-	4000	-	Chuva fraca com trovoadas	335	CB	24	23	1008
09/1600	130	2,1	-	4000	-	Chuva fraca com trovoadas	914	CB	24	23	1007
09/1700	90	3,6	-	5000	-	Trovoadas	2438	CB	24	23	1008
09/1800	170	1,0	-	5000	-	Trovoadas e pancadas de chuva nas vizinhanças	2560	CB	24	23	1008
09/1900	10	2,6	-	5000	-	Chuva fraca	2469	-	24	23	1009
09/2000	10	1,5	-	7000	-	Chuva fraca	2347	-	24	23	1010
09/2100	50	4,1	-	7000	-	Chuva fraca	1829	-	23	20	1011
09/2200	30	3,6	-	7000	-	Chuva fraca	1829	-	24	21	1011
09/2300	110	1,5	-	9999	-	-	-	-	24	23	1011

Fonte: (REDEMET, 2022).

A sequência temporal (3 em 3 horas) das imagens de satélite GridSAT do canal infravermelho do dia 09 de fevereiro de 2021 referente ao nordeste paraense, em destaque a delimitação (azul) temos a Região Metropolitana de Belém é mostrada na Figura 4. Às 15:00 HL foi observado um centro de convecção bem

intenso sobre a região de estudo, no qual a temperatura do topo de brilho das nuvens chegou a aproximadamente -70ºC e intensificou-se as 18:00 HL, onde estendeu-se sobre a costa paraense, assim como em alguns pontos sobre o centro-leste paraense onde iniciou a dissipação durante os horários de 21:00 a 00:00 HL.

Na Figura 5, pode-se identificar a média das imagens de satélite GridSAT do canal infravermelho do dia 09 de fevereiro de 2021 ao nordeste paraense, em destaque azul temos a Região Metropolitana de Belém. A atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) estava em torno de 4ºN, sobre o continente e o oceano Atlântico Sul, chegou a favorecer as condições de instabilidade registradas sobre os horários na estação automática de Belém.

Figura 4 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 09/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

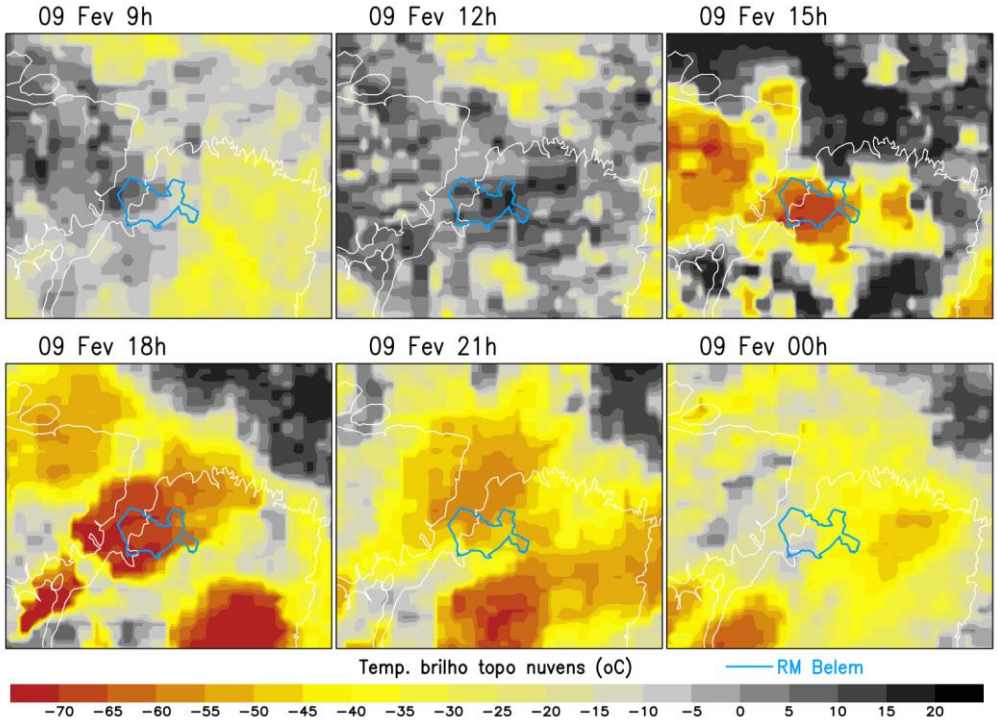
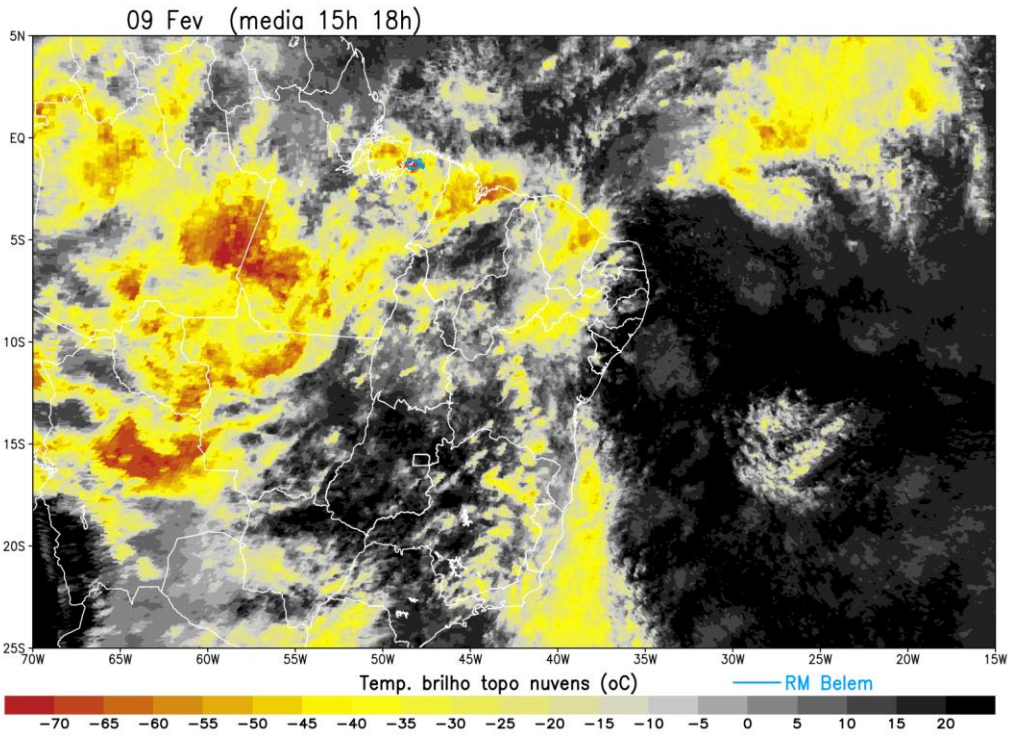


Figura 5 - Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 09/fev/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

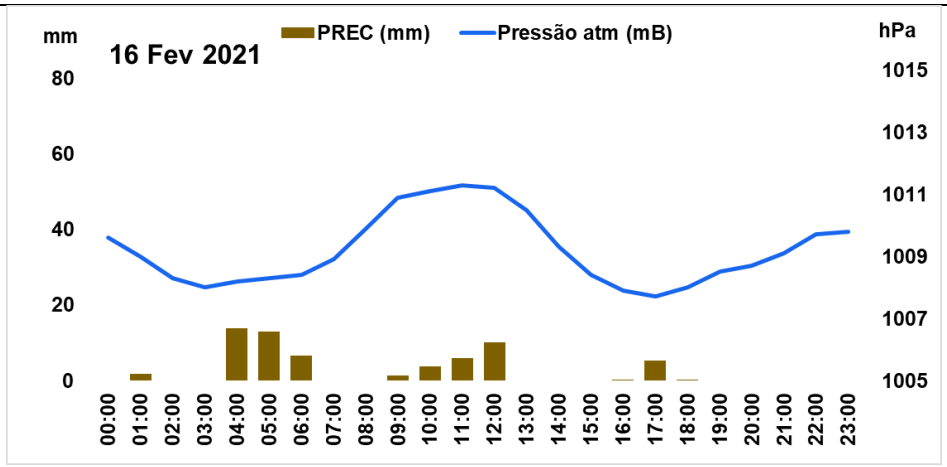


3.2.2 Caso 2: 16 de fevereiro de 2021

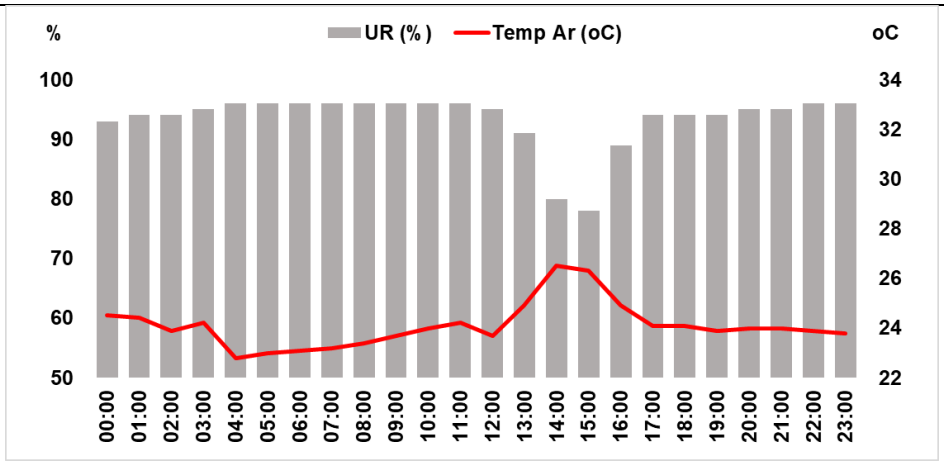
A variabilidade horária da precipitação e pressão atmosférica (Figura 6a), umidade e temperatura do ar (Figura 6b), e velocidade do vento (Figura 6c), registrados no dia 16 de fevereiro de 2021 na estação automática do INMET em Belém. A precipitação iniciou-se neste dia pelos horários de 01:00 as 06:00 HL, seguindo em intervalos de 09:00 até 12:00 HL e 16:00 até 18:00 HL, mostrando seu maior pico nos horários da 04:00 HL (13,8 mm) e 12:00 HL (10 mm), o que pode ser indicado pela pressão atmosférica, que mostrou decaimento neste dia, em conjunto com a temperatura e a umidade, que estão inversamente ligadas para a formação de chuva. Assim como a velocidade do vento mostrou suas variações decorrentes a nuvem que estava passando no momento durante todo o período de precipitação.

Figura 6 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 16/fev/2021.

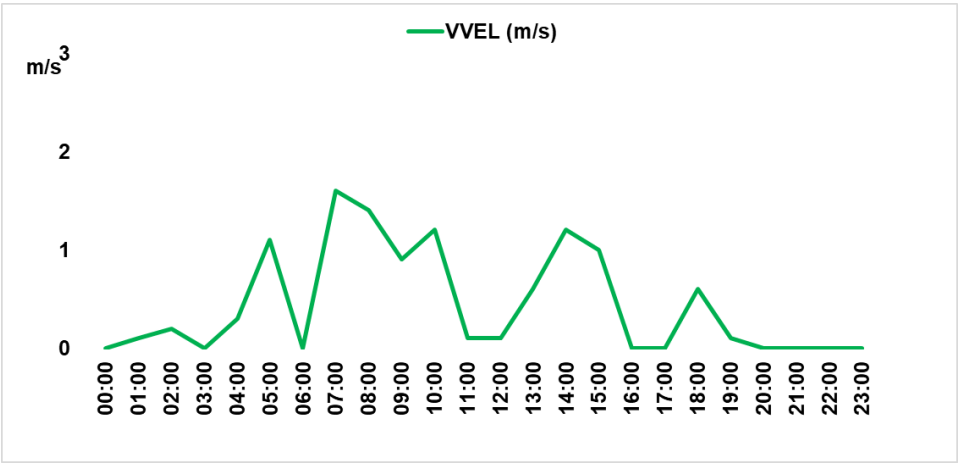
(a)



(b)



(c)



A Tabela 2 mostra as condições adversas do tempo registradas no código METAR/SPECI sobre o Aeroporto Internacional de Belém no dia 16 de fevereiro de 2021. Os registros de TCU foram frequentes durante todo o período das 00:00 ate 05:00, e de 15:00 às 19:00 onde as temperaturas permaneceram próximas e condizentes para o aumento do teor de umidade relativa local, favorecendo de chuva fraca a moderada com nevoa úmida e sobre as vizinhanças observadas. A nebulosidade local também mostrou sua base mais baixa à 213 metros com visibilidade horizontal em ate 3000 metros a cerca do aeroporto. Houve registros de seis (6) reportes de SPECI para analisar as variações de velocidade do vento com sua maior intensidade em 5,1 m.s¹ no horário das 03:00 HL.

Tabela 2 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 16 de fevereiro de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s⁻¹)	Rajada (m.s⁻¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
16/0000	40	2,6	-	9999	-	-	2134	-	24	23	1012
16/0048	50	4,6	-	4000	-	Chuva fraca	610	TCU	24	22	1012
16/0100	30	4,1	-	3000	-	Chuva fraca	610	TCU	23	22	1012
16/0200	20	2,1	-	9999	-	-	762	-	24	23	1011
16/0300	330	2,6	-	9999	-	-	2134	-	25	23	1010
16/0333	70	5,1	-	1800	-	Chuva moderada	244	TCU	23	22	1011
16/0400	100	4,1	-	2000	-	Chuva moderada	213	TCU	23	22	1010
16/0500	60	3,1	-	3000	-	Chuva fraca	610	TCU	23	23	1011
16/0600	360	2,1	-	3000	-	Chuva fraca	610	-	23	22	1011
16/0632	70	3,1	-	3000	-	Chuva fraca	213	-	23	22	1011
16/0700	120	3,1	-	5000	-	Chuva fraca	549	-	23	22	1011
16/0800	90	6,2	-	5000	A 2000 metros no setor nordeste do aeródromo	Chuvisco fraco	1066	-	23	22	1012
16/0900	110	2,1	-	3000	-	Chuva fraca	610	-	23	23	1013
16/1000	160	2,1	-	2000	-	Chuva moderada	274	-	23	23	1013
16/1100	60	1,5	-	2000	-	Chuva fraca	610	-	24	22	1014
16/1127	80	3,1	-	1500	-	Chuva moderada	152	-	23	23	1014
16/1200	60	4,1	-	2000	-	Chuva moderada	152	-	23	22	1014
16/1215	40	2,6	-	5000	-	Chuva fraca	762	-	23	22	1013
16/1300	250	1,0	-	7000	-	-	914	-	24	22	1013
16/1400	280	2,6	-	9999	-	-	914	-	25	23	1012
16/1500	320	2,1	-	9999	-	Pancadas de chuva pelas vizinhanças	914	TCU	26	23	1011
16/1600	290	1,5	-	9999	-	Pancadas de chuva pelas vizinhanças	457	TCU	25	23	1010
16/1623	80	3,1	-	3000	-	Chuva fraca com névoa úmida	396	TCU	25	23	1010
16/1700	120	1,5	-	5000	-	Chuva fraca com névoa úmida	518	TCU	24	23	1010
16/1800	30	3,1	-	8000	-	-	610	TCU	24	23	1010
16/1900	60	2,6	-	9000	-	-	610	CU	24	22	1011
16/2000	10	2,1	-	9999	-	-	914	-	24	23	1011
16/2100	320	1,5	-	9999	-	-	2438	-	24	22	1011
16/2200	90	1,0	-	9999	-	-	2438	-	24	23	1012
16/2300	80	1,5	-	9999	-	-	-	-	23	23	1012

Fonte: (REDEMET, 2022).

A Figura 7 apresenta a sequência temporal (3 em 3 horas) das imagens de satélite GridSAT do canal infravermelho do dia 16 de fevereiro de 2021 ao nordeste paraense, em destaque azul, temos a Região Metropolitana de Belém. A formação das nuvens desde a madrugada de 03:00 até as 15:00 HL, mostraram persistência sobre a região estendendo-se até a costa do nordeste, com a temperatura do topo de brilho das nuvens em cerca de -55ºC, nos quais são indicativos para nuvens precipitantes.

A média das imagens de satélite GridSAT do canal infravermelho do dia 09 de fevereiro de 2021 ao nordeste paraense é analisada na Figura 8, em destaque azul a RMB. A configuração do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o oceano Atlântico Equatorial e ao litoral nordestino estava atuante em conjunto na presença da ZCIT,

no qual sua posição estava em torno de 3ºN. Esses sistemas meteorológicos impulsionaram nuvens profundas nessa região de acordo com os estudos de Albuquerque et al. (2010);

Figura 7 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

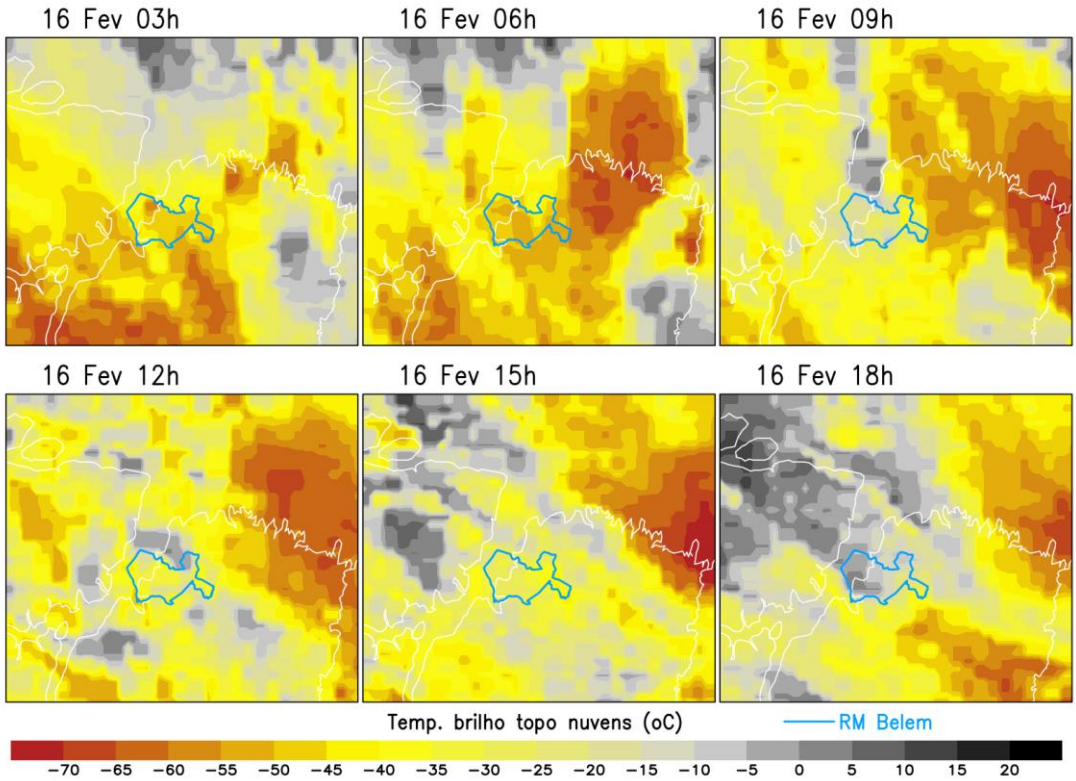
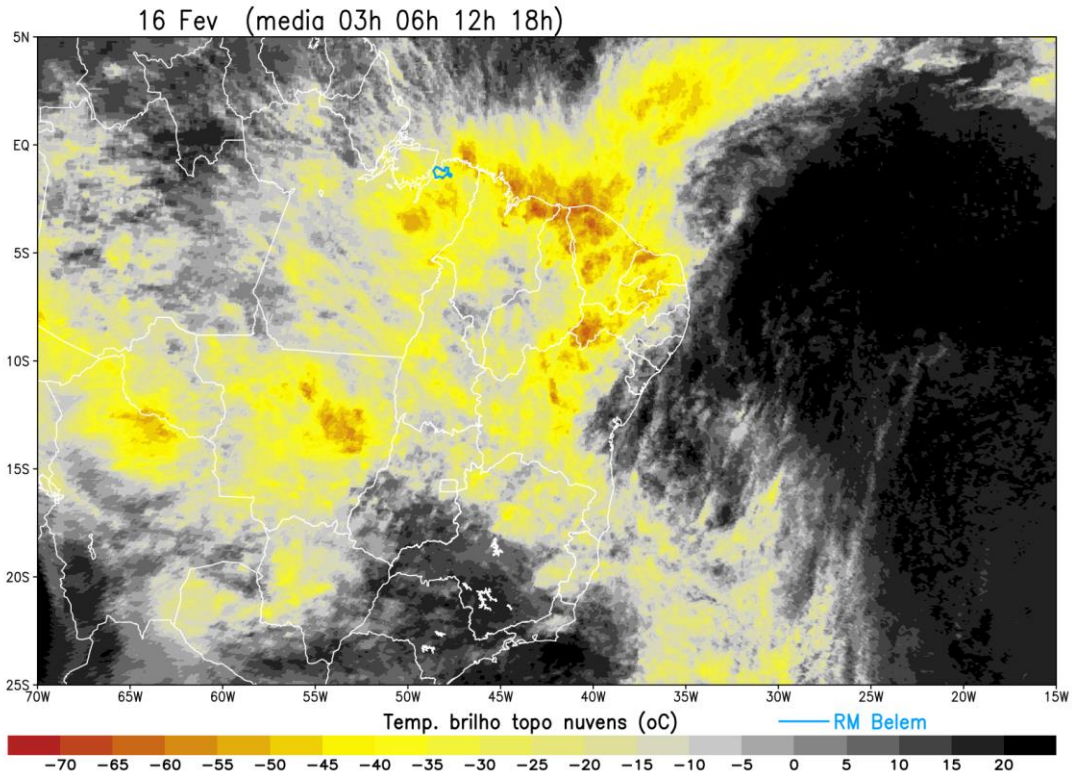


Figura 8 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

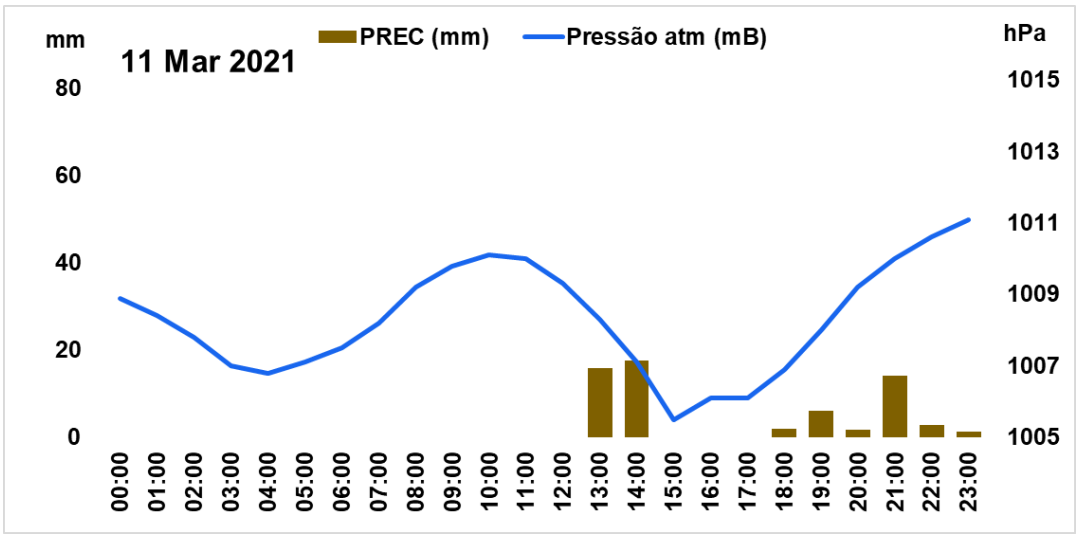


3.2.3 Caso 3: 11 de março de 2021

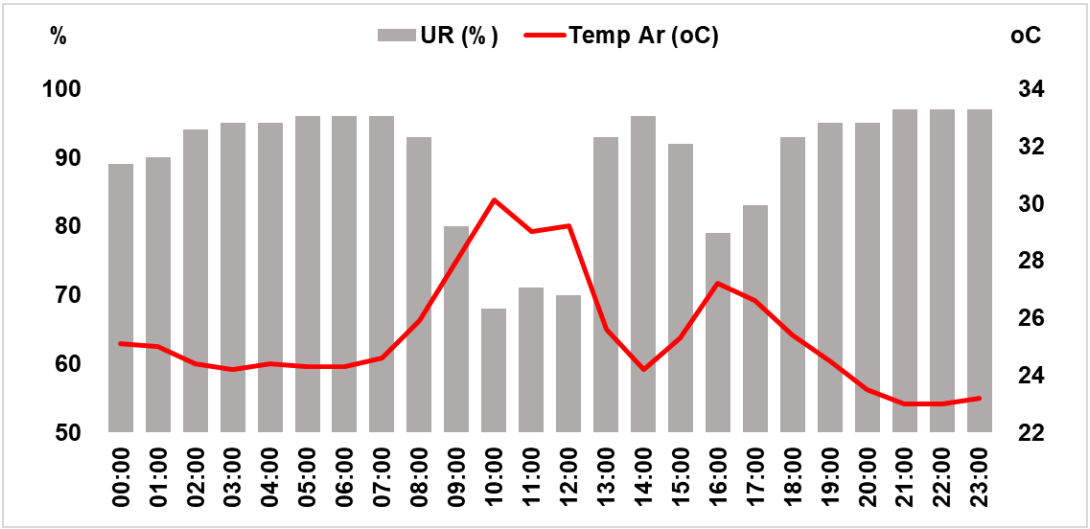
No dia 11 de março de 2021, foi observada (Figura 9) a variabilidade horária das componentes meteorológicas em análise, onde houve registros de precipitação nos horários de 13:00 as 14:00 HL e 18:00 até 23:00 HL, com valor máximo de 17,6 mm às 14:00 HL. A pressão apresentou tendências de diminuição durante o período máximo de chuva ocorrido, nos quais são coerentes com os valores de temperatura do ar e umidade relativa. A presença da velocidade do vento atingindo a 3 m/s no horário das 20:00 HL, mostraram a relação direta com a pluviosidade registrada.

Figura 9 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 11/mar/2021.

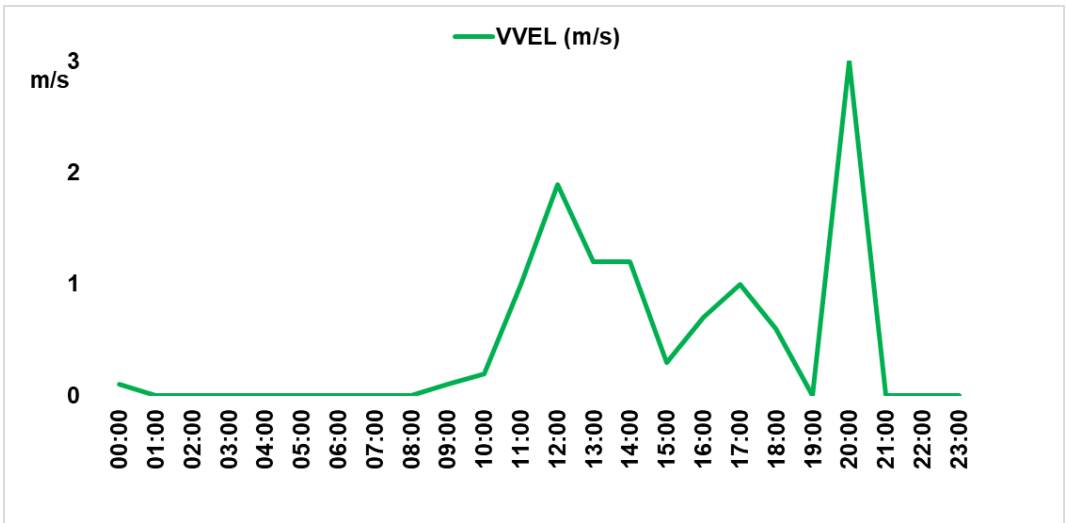
(a)


mm
11 Mar 2021
PREC (mm)
Pressão atm (mB)
hPa
80
60
40
20
0
1015
1013
1011
1009
1007
1005
00:00
01:00
02:00
03:00
04:00
05:00
06:00
07:00
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00
20:00
21:00
22:00
23:00

(b)


%
UR (%)
Temp Ar (oC)
oC
100
90
80
70
60
50
34
32
30
28
26
24
22
00:00
01:00
02:00
03:00
04:00
05:00
06:00
07:00
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00
20:00
21:00
22:00
23:00

(c)


VVEL (m/s)
m/s
3
2
1
0
00:00
01:00
02:00
03:00
04:00
05:00
06:00
07:00
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00
20:00
21:00
22:00
23:00

Na Tabela 3 é observado os registros feitos no METAR/SPECI sobre o SBBE no dia 11 de março de 2021. Foi mostrado às 08:00 HL, a diminuição da baixa mais baixa de nebulosidade chegando à 244 metros da superfície. Em seguida os registros de TCU foram frequentes durante todo o período das 12:00 ate 18:00 com pancadas de chuva fraca a forte com trovoadas local e pelas vizinhanças e após isto com quatros (4) reportes de SPECI nos horários de 18:00 às 23:00 de chuva fraca a moderada mas sem registros de TCU ou CB.

Tabela 3 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 11 de março de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s⁻¹)	Rajada (m.s⁻¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
11/0000	60	2,1	-	-	-	Céu claro	-	-	25	23	1012
11/0100	70	1,5	-	-	-	Céu claro	-	-	25	23	1011
11/0200	100	2,1	-	-	-	Céu claro	-	-	24	23	1010
11/0300	60	1,5	-	9999	-	-	3048	-	24	23	1010
11/0400	60	1,0	-	9999	-	-	3048	-	25	23	1009
11/0500	80	1,0	-	9999	-	-	3048	-	24	23	1009
11/0600	100	1,0	-	9999	-	-	-	-	24	23	1010
11/0700	140	1,0	-	9999	-	-	3048	-	25	24	1010
11/0800	0		-		-	Céu claro	-	-	26	24	1011
11/0900	270	0,6	-	9999	-	-	366	-	27	25	1012
11/0931	310	0,6	-	9999	-	-	396	-	27	24	1012
11/1000	280	0,4	-	9999	-	-	671	-	28	24	1013
11/1100	340	0,4	-	9999	-	-	1066	-	28	24	1012
11/1200	310	0,4	-	9999	-	Pancadas de chuva pelas vizinhanças	914	TCU	28	24	1012
11/1228	320	0,3	-	2000	-	Chuva moderada	914	-	26	24	1011
11/1300	270	0,6	-	3000	-	Chuva fraca com trovoadas	396	CB	24	24	1011
11/1340	90	0,1	-	500	-	Chuva forte com trovoadas	396	CB	25	23	1011
11/1400	70	0,2	-	500	-	Chuva forte com trovoadas	244	CB	23	23	1010
11/1420	300	0,6	-	9999	-	-	579	TCU	24	23	1009
11/1500	350	0,6	-	9999	-	-	610	TCU	24	24	1008
11/1600	30	0,5	-	9999	-	-	3048	TCU	27	23	1008
11/1700	10	0,3	-	9999	-	-	2133	TCU	26	24	1008
11/1800	90	0,4	-	9999	-	-	2133	TCU	26	24	1009
11/1824	90	0,1	-	1500	-	Chuva moderada	335	-	23	23	1010
11/1846	40	0,3	-	9999	-	Chuva fraca	640	-	24	23	1010
11/1900	40	0,4	-	9999	-	Chuva fraca	701	-	24	23	1010
11/2000	100	0,4	-	5000	-	Chuva fraca	2438	-	24	24	1011
11/2018	120	0,1	-	2500	-	Chuva moderada	670	-	23	22	1012
11/2035	130	0,4	-	5000	-	Chuva moderada	610	-	22	22	1012
11/2100	110	0,5	-	6000	-	Chuva moderada	2743	-	22	22	1012
11/2200	110	0,3	-	6000	-	Chuva fraca	2133	-	23	22	1013
11/2300	100	0,6	-	9999	-	Chuva fraca	2743	-	23	22	1014

Fonte: (REDEMET, 2022).

A Figura 10 foi mostrado às 15:00 HL, nuvens com a temperatura de brilho em aproximadamente -70ºC, indicando nuvens com grande desenvolvimento vertical (MACHADO; ROSSOW, 1993) prolongando-se até o final do dia.

O padrão de nebulosidade observado na faixa equatorial (Figura 11), Amazônia Legal e centro-leste do Brasil mostram a circulação do ZCAS conectada com a ZCIT em 4ºN, em que tais sistemas sinóticos contribuem para o aumento da baixa pressão atmosférica e consequentemente convecção, fatores que caracterizam a instabilidade atmosférica e favorecem a formação de nuvens precipitantes.

Figura 10 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 16/fev/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

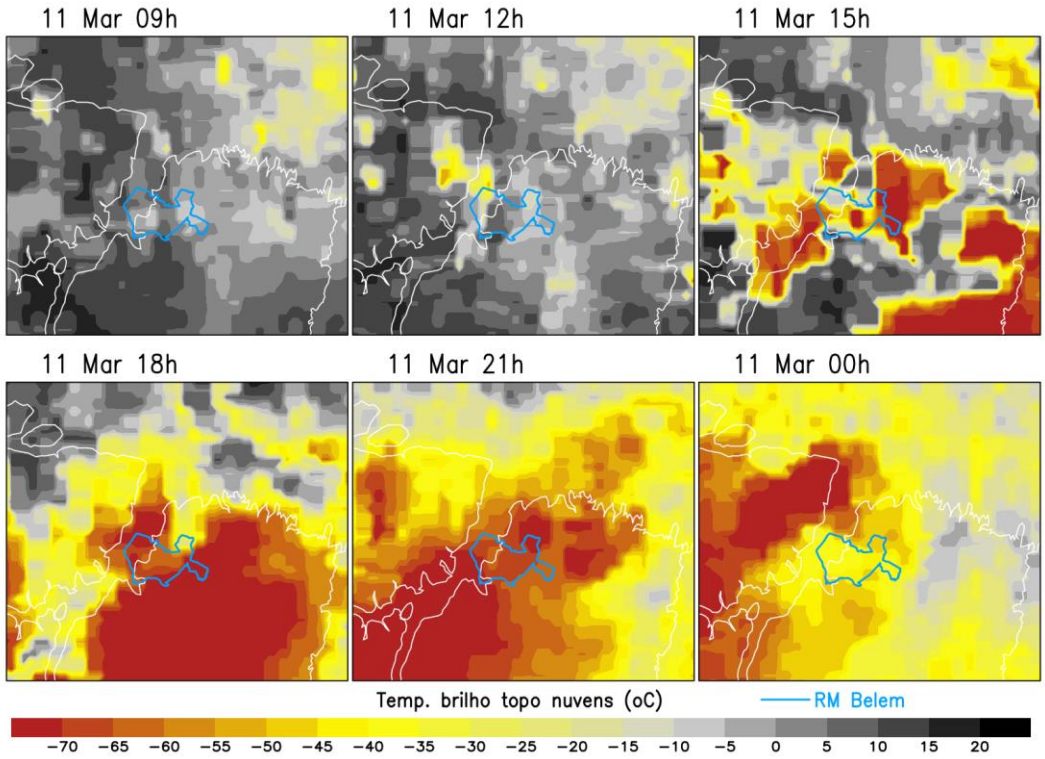
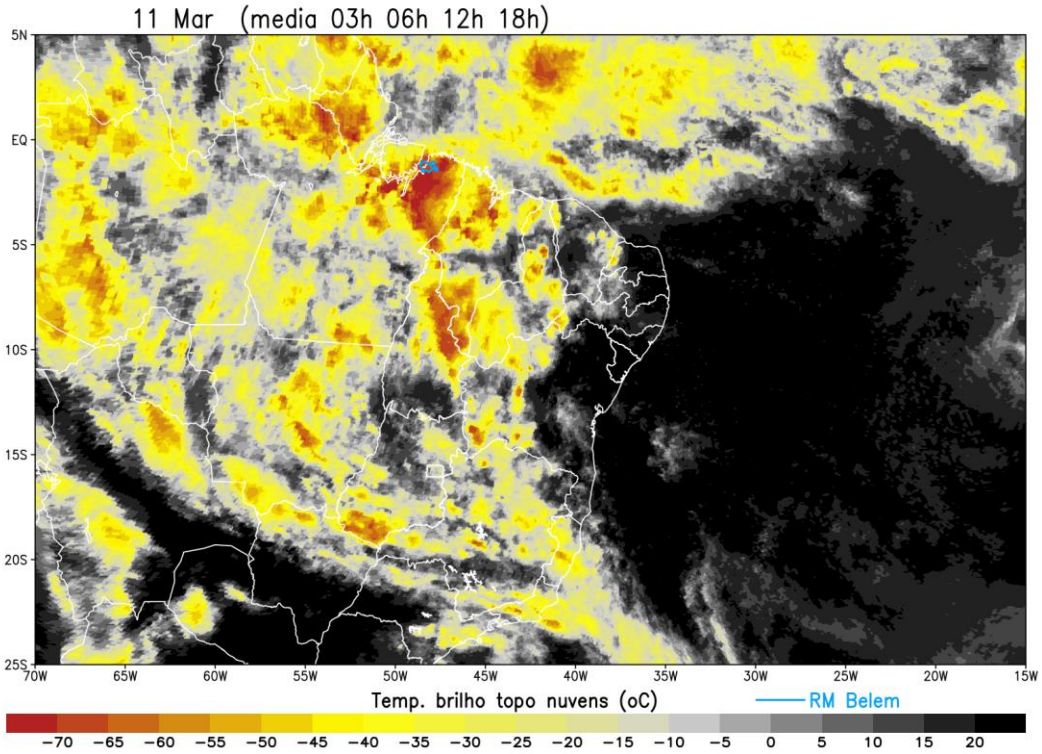


Figura 11 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 11/mar/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

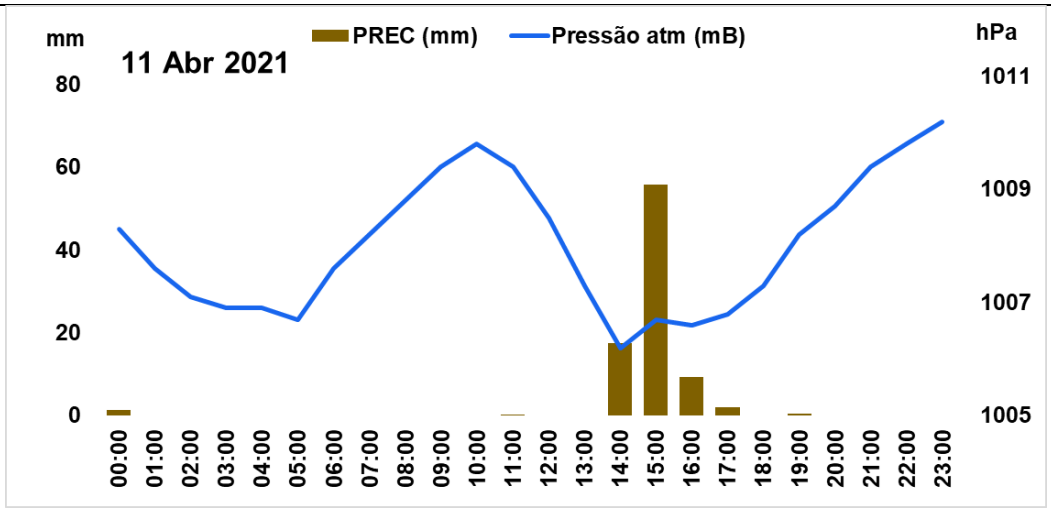


3.2.4 Caso 4: 11 de abril de 2021

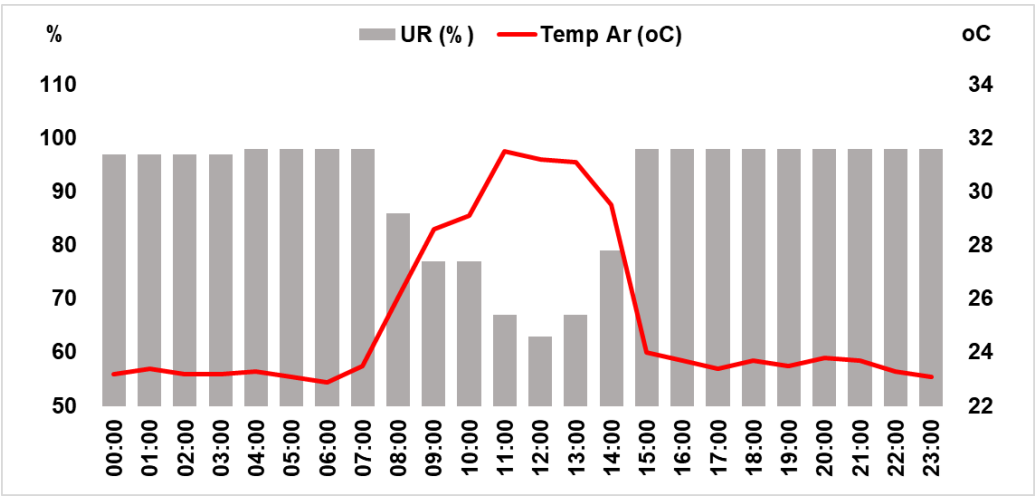
Sobre a Figura 12 foi observado o ciclo diurno do dia 11 de abril de 2021, das variáveis meteorológicas em análise, onde apresentou mudanças significativas na umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento (08:00 as 14:00 HL), no momento que teve a presença da chuva de 14:00 as 19:00 HL, com valores registrados de 55,8 mm de pluviosidade somente as 15:00 HL no qual foi mostrada a pressão diminuiu drasticamente neste período.

Figura 12 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 11/abr/2021.

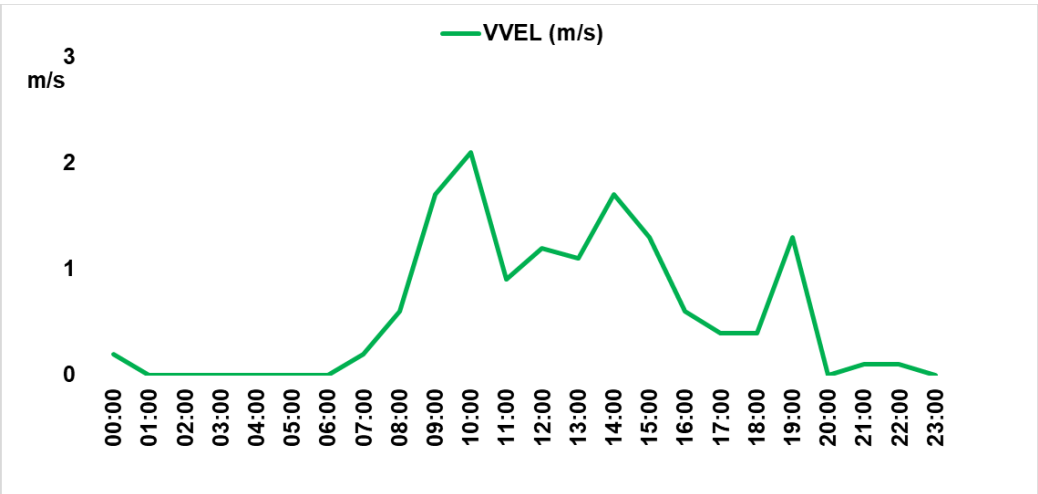
(a)



(b)



(c)



As condições adversas do tempo extraídas do código METAR/SPECI do dia 11 de abril de 2021 estão sendo mostradas na Tabela 4. Nos primeiros horários de 01:00 até 09:00 HL foi observado céu claro, sem variações significativas de

temperatura, pressão atmosférica e vento. De 14:00 as 19:00 HL, foi verificado reportes de SPECI com a presença de rajada de vento de 15,4 m.s¹, pancadas de chuva fraca a forte com trovoadas e registro de TCU e CB nos horários comentados. As temperaturas próximas aumentaram o teor de umidade na superfície favorecendo a formação de convecção registrada.

Tabela 4 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 11 de abril de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s¹)	Rajada (m.s¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
11/0000	110	0,3	-	9999	-	-	2743	-	23	22	1011
11/0100	100	0,5	-	-	-	Céu claro	-	-	23	23	1010
11/0200	80	0,5	-	-	-	Céu claro	-	-	23	23	1010
11/0300	80	0,4	-	-	-	Céu claro	-	-	23	22	1009
11/0400	90	0,5	-	-	-	Céu claro	-	-	24	23	1009
11/0500	100	1,0	-	-	-	Céu claro	-	-	23	23	1009
11/0600	160	0,6	-	-	-	Céu claro	-	-	24	23	1010
11/0700	140	0,6	-	9999	-	-	-	-	24	23	1010
11/0800	130	0,5	-	-	-	Céu claro	-	-	26	24	1011
11/0900	100	0,3	-	-	-	Céu claro	-	-	28	25	1012
11/1000	110	0,2	-	9999	-	-	579	-	30	24	1012
11/1100	140	0,3	-	9999	-	-	-	-	30	24	1012
11/1200	40	0,4	-	9999	-	-	1006	-	31	23	1011
11/1300	60	0,3	-	9999	-	-	1127	-	32	24	1010
11/1400	310	0,2	-	9000	-	Pancadas de chuva pelas vizinhanças	701	TCU	27	25	1009
11/1426	340	0,1	-	3000	-	Chuva fraca com trovoada	457	CB	26	22	1009
11/1434	360	0,1	15,4	1500	-	Chuva forte com trovoada	366	CB	25	21	1009
11/1500	140	0,4	-	2000	-	Chuva fraca com trovoada	457	CB	24	20	1010
11/1600	10	0,3	-	9999	-	Chuva fraca	610	TCU	24	20	1009
11/1700	70	0,3	-	5000	-	Chuva fraca com trovoada	610	CB	24	21	1009
11/1800	70	0,6	-	9999	-	Chuva fraca	3048	-	24	21	1009
11/1900	90	1,0	-	9999	-	-	3048	-	24	21	1011
11/2000	0	0	-	9999	-	-	3048	-	24	22	1011
11/2100	160	0,6	-	-	-	Céu claro	-	-	24	22	1012
11/2200	150	0,6	-	-	-	Céu claro	-	-	23	23	1012
11/2300	120	1,9	-	-	-	Céu claro	-	-	23	22	1013

Fonte: (REDEMET, 2022).

A Figura 13 apresenta a evolução do evento extremo ocorrido no dia 11 de abril de 2021, em destaque a região de estudo. Constatou-se as nuvens profundas se aproximando sobre a RMB nos horários das 15:00 as 18:00 HL, com a temperatura de brilho no topo das nuvens próximos a -60ºC, e após o ocorrido, a nuvem começou a decrescer nos horários subsequentes.

A Figura 14 mostra a média de 15:00 a 18:00 HL, sobre o continente e oceano Atlântico no dia 11 de abril de 2021. Com a posição da ZCIT entre o equador e 6ºS, sua presença esta susceptível para a ocorrência de chuva, principalmente

sobre o centro oeste da América do Sul onde foi observado também a presença da ZCAS e na maior parte da Amazônia com nordeste brasileiro.

Figura 13 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 11/abr/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

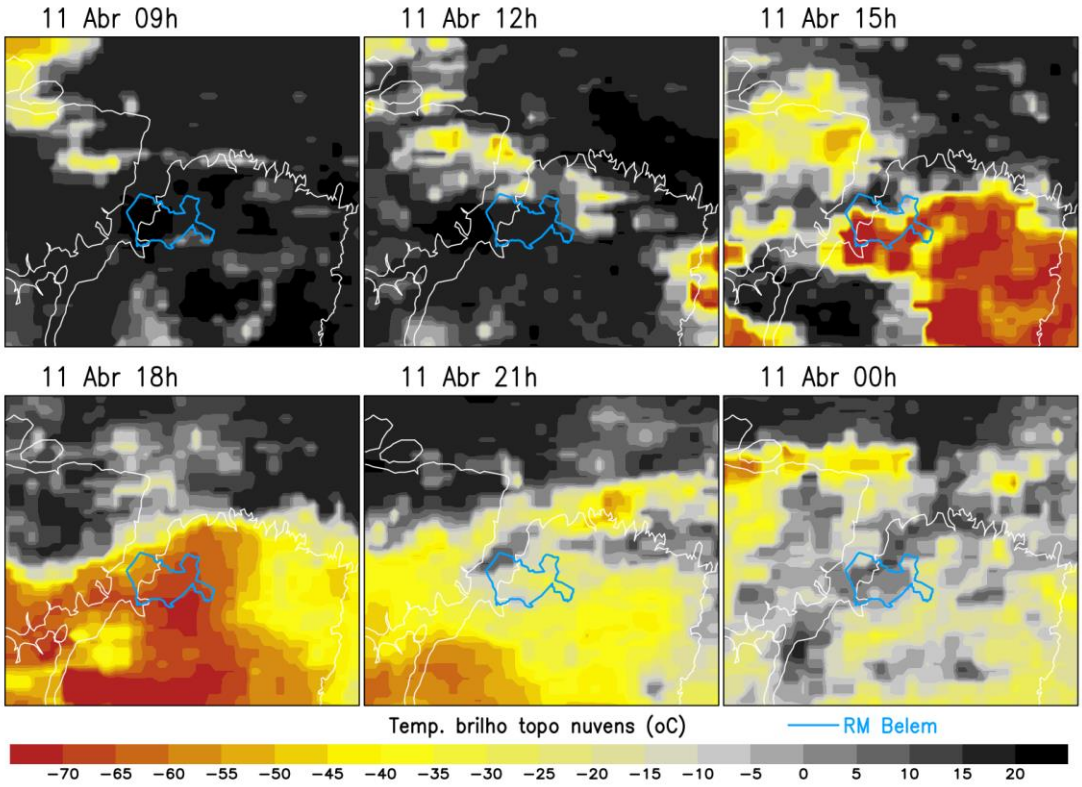
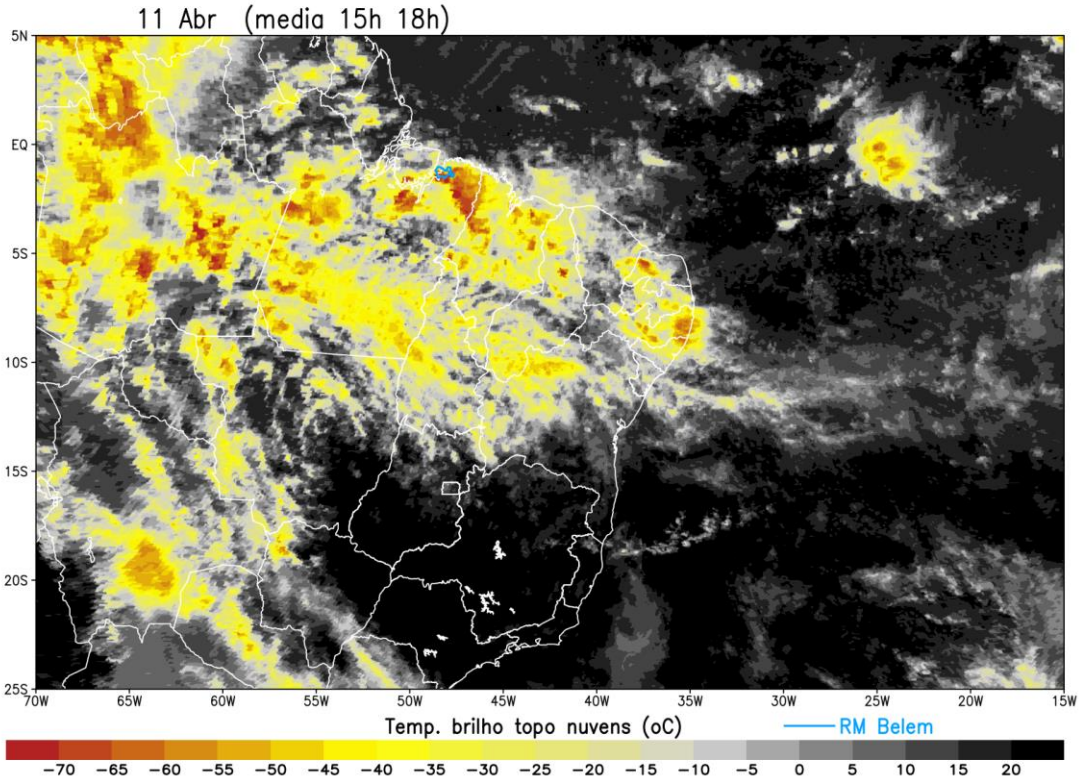


Figura 14 – Imagem de satélite GridSAT média de 15 a 18:00 HL, durante o evento extremo do dia 11/abr/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

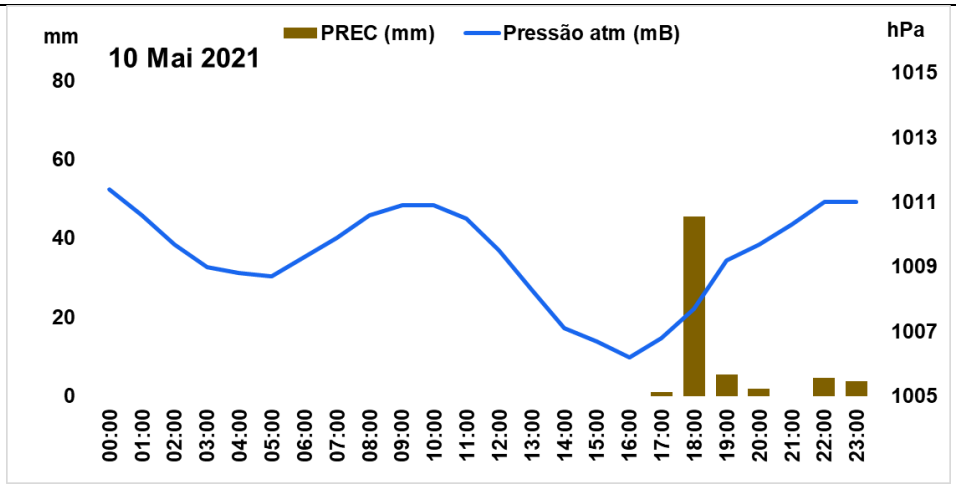


3.2.5 Caso 5: 10 de maio de 2021

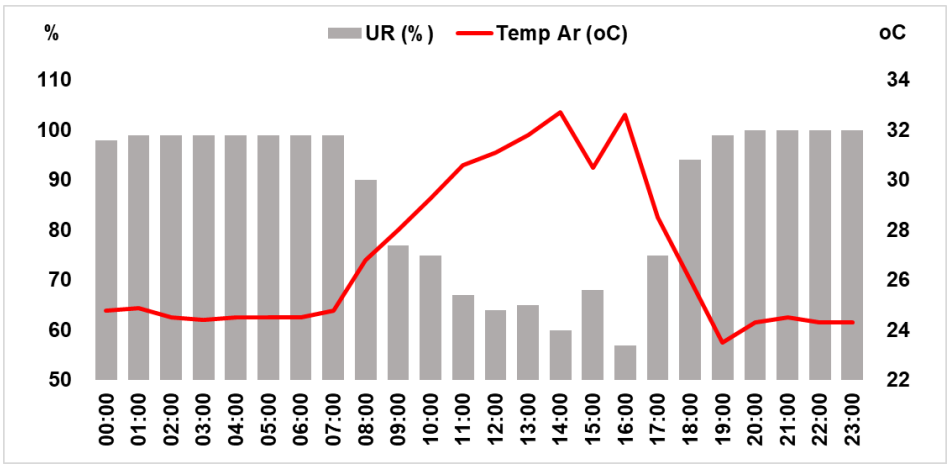
A Figura 15 mostrou o comportamento diurno do evento extremo que ocorreu no dia 10 de maio de 2021 registrados na estação automática do INMET, localizado em Belém. Nos horários de 08:00 às 15:00 HL foi analisado sobre a temperatura do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica, o aumento dos seus valores, em seguida, foi observada a presença de precipitação dentro o período de 17:00 até 23:00 HL com maior volume de chuva foi marcado com 76,6 mm às 18:00 HL.

Figura 15 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 10/mai/2021.

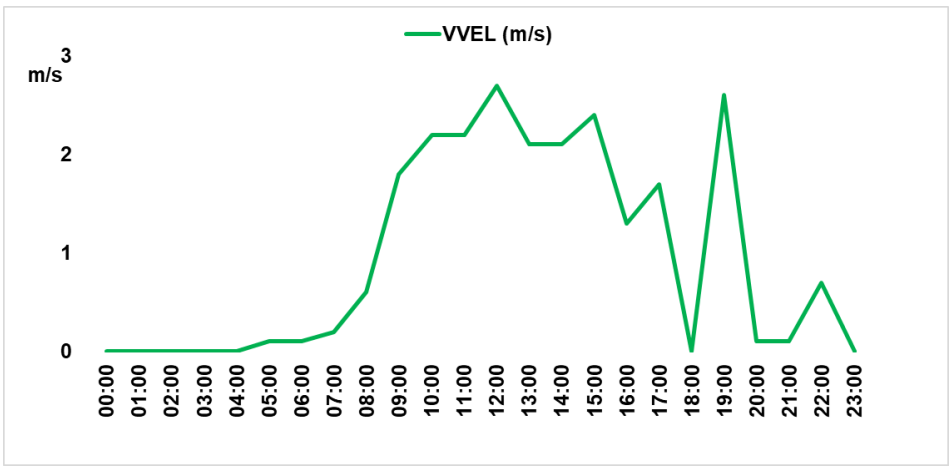
(a)



(b)



(c)



Sobre a Tabela 5 temos a decodificação do código METAR/SPECI registrado no dia 10 de maio de 2021 na estação meteorológica do Aeroporto Internacional de Belém. Os registros de TCU foram observados nos horários de 14:00 a 20:00 HL, com variações de chuva forte a fraca mostrando apenas a diminuição da visibilidade vertical e sobre a pressão atmosférica. Os registros de temperatura do ar com do

ponto de orvalho se mostrando significativos para o favorecimento de umidade durante e após a passagem da nuvem de instabilidade, apesar de não ter sido registrado variações significativas da velocidade do vento.

Tabela 5 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 10 de maio de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s¹)	Rajada (m.s¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
10/0000	0	0	-	9999	-	-	3048	-	25	24	1014
10/0100	80	1,0	-	-	-	Céu claro	-	-	25	24	1013
10/0200	240	1,0	-	-	-	Céu claro	-	-	25	24	1012
10/0300	0	0	-	9999	-	-	-	-	25	24	1011
10/0400	190	1,0	-	9999	-	-	-	-	25	24	1011
10/0500	120	1,0	-	9999	-	-	-	-	25	24	1011
10/0600	170	1,0	-	9999	-	-	3048	-	25	24	1012
10/0700	160	1,0	-	9999	-	-	-	-	25	24	1012
10/0800	150	0,5	-	9999	-	-	-	-	27	24	1013
10/0900	110	0,4	-	9999	-	-	-	-	28	24	1013
10/1000	130	0,3	-	9999	-	-	3048	-	28	24	1013
10/1100	130	0,2	-	9999	-	-	-	-	30	23	1013
10/1200	140	0,2	-	9999	-	-	823	-	31	23	1012
10/1300	170	0,2	-	9999	-	-	-	-	31	23	1011
10/1400	120	0,3	-	9999	-	-	-	TCU	32	23	1010
10/1500	140	0,3	-	9999	-	-	1067	TCU	32	23	1009
10/1600	160	0,3	-	9999	-	-	1067	TCU	32	23	1009
10/1700	50	0,2	-	9999	-	-	610	TCU	28	25	1009
10/1800	30	0,3	-	9999	-	Chuva fraca	610	TCU	26	24	1010
10/1842	110	0,1	-	4000	-	Chuva forte	457	-	25	24	1011
10/1900	100	0,1	-	3000	-	Chuva forte	274	TCU	24	23	1012
10/2000	190	1,0	-	9999	-	Chuva fraca	914	TCU	24	23	1012
10/2100	140	1,0	-	9999	-	Chuva fraca	914		24	24	1012
10/2200	130	0,6	-	9999	-	-	2438		25	24	1013
10/2300	160	0,6	-	3000	-	Chuva moderada	762		24	24	1013
10/2324	180	1,0	-	6000	-	Chuva fraca	1067		24	24	1013

Fonte: (REDEMET, 2022).

Na Figura 16 foi observada a atuação da nuvem presente no evento extremo do dia 10 de maio de 2021 sobre as imagens do GridSAT. A nuvem localizada na costa litorânea do Pará deslocou-se para dentro do continente, sujeito a ter sua maior atuação em 18:00 HL confirmados nos registros da Figura 6a, com temperatura do de brilho no topo das nuvens de -70ºC, e ao longo das horas abrandou-se sobre a região.

Foi mostrado na Figura 17 no dia 10 de maio de 2021 a média das imagens de satélite GridSAT sobre a extensão do Brasil e Atlântico. Na área equatorial, localizou-se a presença da ZCIT influenciando no Oceano Atlântico, em torno de 03°N/04°N e diretamente ao litoral do Amapá, Amazonas, Pará e Piauí.

Figura 16 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 10/mai/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

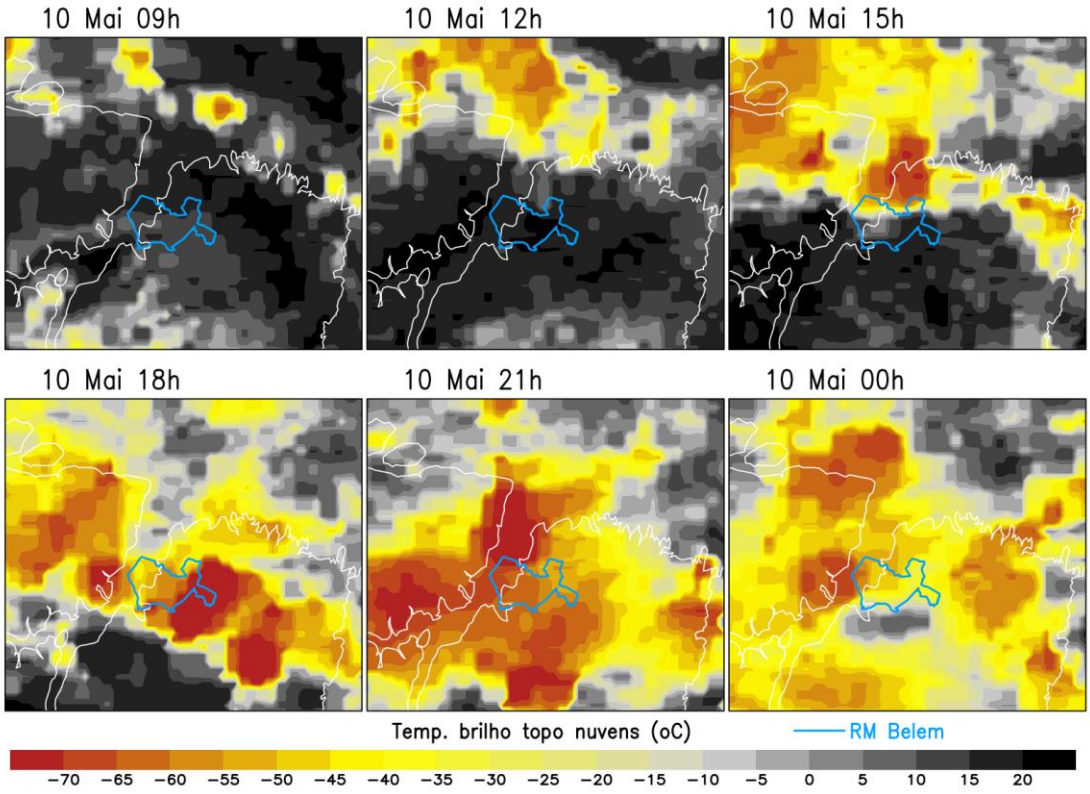
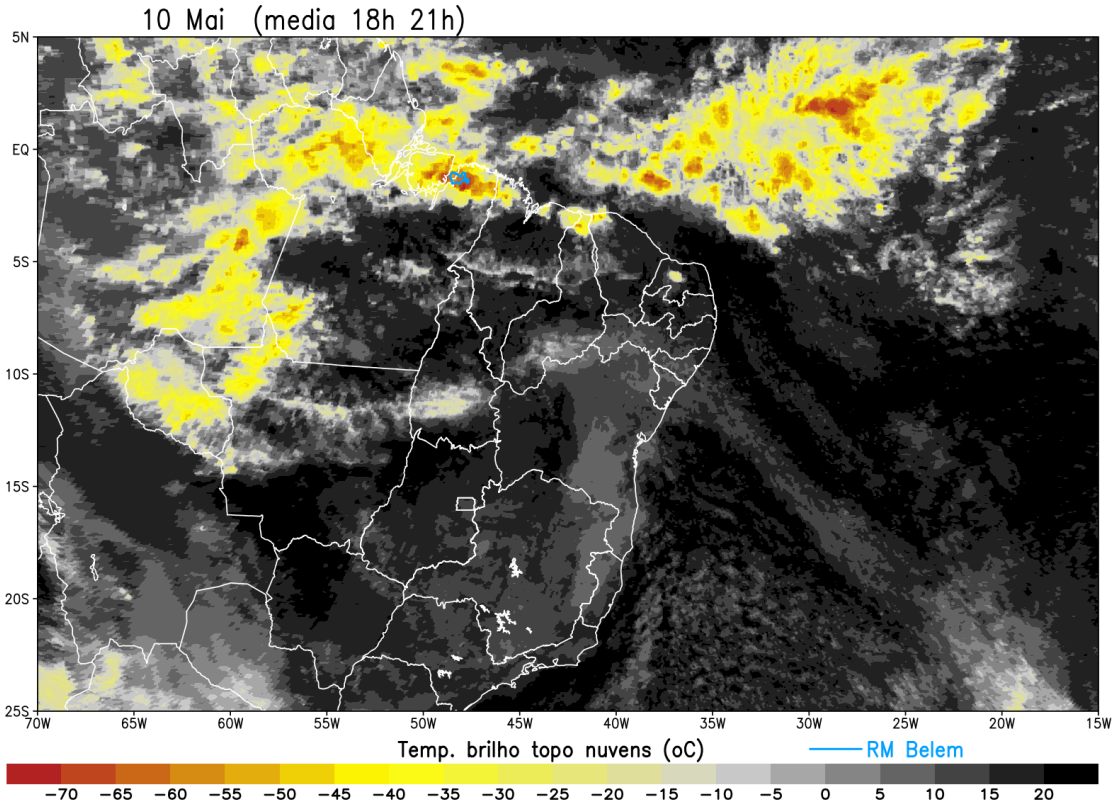


Figura 17 – Imagem de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 10/mai/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

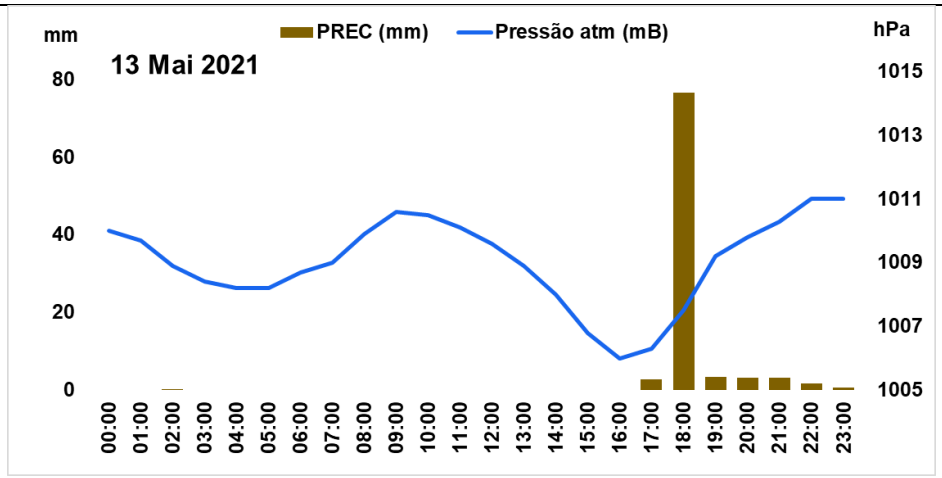


3.2.6 Caso 6: 13 de maio de 2021

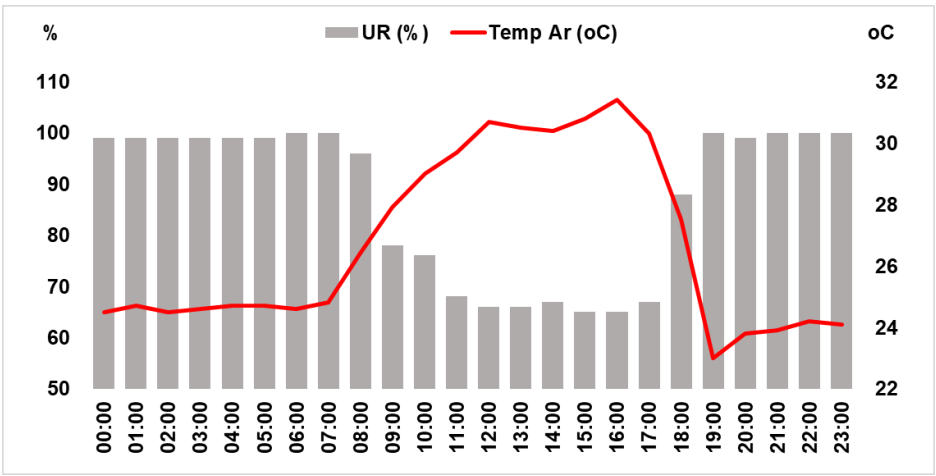
Sobre a Figura 18 foi observado o ciclo diurno das variáveis meteorológicas registradas no dia 13 de maio de 2021 na estação automática do INMET em Belém. Foi analisado no dia o evento extremo, o comportamento sobre a pressão atmosférica e umidade relativa decairam a partir de 09:00 até 16:00 HL, o aumento gradativo da temperatura e das alterações na velocidade do vento de 08:000 as 19:00 HL, resultaram em chuva sobre os horários das 17:00 as 23:00 HL, mostrando seu máximo volume somente as 18:00 HL de 76,6 mm.

Figura 18 – Gráficos do comportamento horário da precipitação (mm) e pressão atmosférica (hPa) (Figura 6a), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa (%) (Figura 6b) e velocidade do vento (m/s) (Figura 6c), na estação automática durante o evento extremo do dia 13/mai/2021.

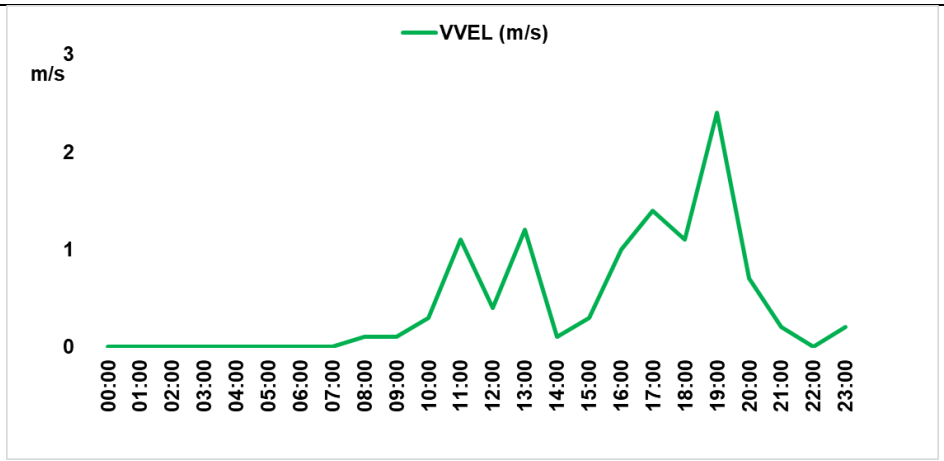
(a)



(b)



(c)



A Tabela 6 mostra os dados decodificados do METAR/SPECI no dia 13 de maio de 2021 sobre o SBBE. Valores de pressão atmosférica a partir de 13:00 HL começaram a diminuir favorecendo o crescimento vertical da nuvem TCU nos horários de 13:00 a 15:00 HL em seguida pancadas de chuva forte com trovoadas pelas vizinhanças de 18:00 ate 19:00 HL, com três (3) SPECI reportados em particular no horário das 18:36 HL que registrou rajada de vento de 13,9 $m.s^{1}$. De 19:00 até 19:19 HL notou se a presença de CB sobre o aeródromo, decaindo a visibilidade horizontal e vertical. Nos horários de 00:00 às 17:00 HL mostrou céu claro sem presença de eventos significativos.

Tabela 6 - Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 13 de maio de 2021.

Dia/ Hora Local	Vento			Visibilidade horizontal (m)	Setorizada (m/setor)	Tempo presente	Nebulosidade		Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (m.s¹)	Rajada (m.s¹)				Base mais baixa (m)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
13/0000	30	0,6	-	-	-	Céu claro	-	-	25	24	1012
13/0100	60	0,3	-	9999	-	-	1219	-	25	24	1012
13/0200	70	0,3	-	9999	-	-	3048	-	25	24	1012
13/0300	50	0,5	-	9999	-	-	2137	-	24	24	1011
13/0400	40	1,0	-	9999	-	-	1219	-	24	24	1011
13/0500	70	1,0	-	9999	-	-	2137	-	24	24	1011
13/0600	110	0,6	-	9999	-	-	2137	-	24	24	1011
13/0700	0	0	-	9999	-	-	2137	-	25	24	1011
13/0800	90	1,0	-	9999	-	-	3048	-	26	24	1012
13/0900	60	0,5	-	9999	-	-	3048	-	27	25	1013
13/1000	50	0,5	-	9999	-	-	3048	-	28	24	1013
13/1100	70	0,4	-	9999	-	-	-	-	29	24	1013
13/1200	30	0,6	-	9999	-	-	3048	-	30	24	1012
13/1300	310	0,3	-	9999	-	-	3048	TCU	30	24	1011
13/1400	360	0,3	-	9999	-	-	3048	TCU	29	24	1011
13/1500	350	0,3	-	9999	-	-	3048	TCU	30	24	1009
13/1600	350	0,3	-	9999	-	-	-	-	29	25	1009
13/1700	360	0,3	-	9999	-	-	-	-	29	25	1009
13/1800	10	0,2	-	9999	-	Pancadas de chuva pelas vizinhanças	-	-	29	25	1009
13/1820	200	0,2	-	1000	-	Chuva forte com nevoa úmida	1219	-	27	25	1011
13/1836	160	0,1	13,9	800	-	Chuva forte	244	-	24	23	1012
13/1900	130	0,1	-	500	-	Chuva forte com trovoada	213	CB	23	22	1012
13/1916	160	0,2	-	4000	-	Chuva fraca com trovoadas	396	CB	23	23	1012
13/2000	100	0,3	--	8000	-	Chuva fraca	2134	TCU	23	23	1012
13/2100	60	0,3	-	6000	-	Chuva fraca	2134	-	24	23	1013
13/2200	60	0,3	-	6000	-	Chuva fraca	1097	-	24	23	1013
13/2300	90	0,6	-	9999	-	Chuva fraca	1829	-	24	23	1013

Fonte: (REDEMET, 2022).

A Figura 19 mostra a passagem da nuvem no dia 13 de maio de 2021, em destaque é observada a RMB no satélite GridSAT. Foi indicado no horário das 15:00 HL o inicio da convecção onde foi sujeito a ter sua maior intensidade no horário das 18:00 HL, com a temperatura de brilho do topo das nuvens de -70ºC em toda a área de estudo.

A média das imagens do satélite GridSAT é observada no dia 13 de maio de 2021. A configuração da ZCIT observada sobre grande parte da faixa equatorial convergiu diretamente no norte do país onde foi localizado o evento extremo.

Figura 19 – Sequência temporal (3/3 hrs) das imagens de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 13/mai/2021 com zoom na área que engloba o nordeste do Pará. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.

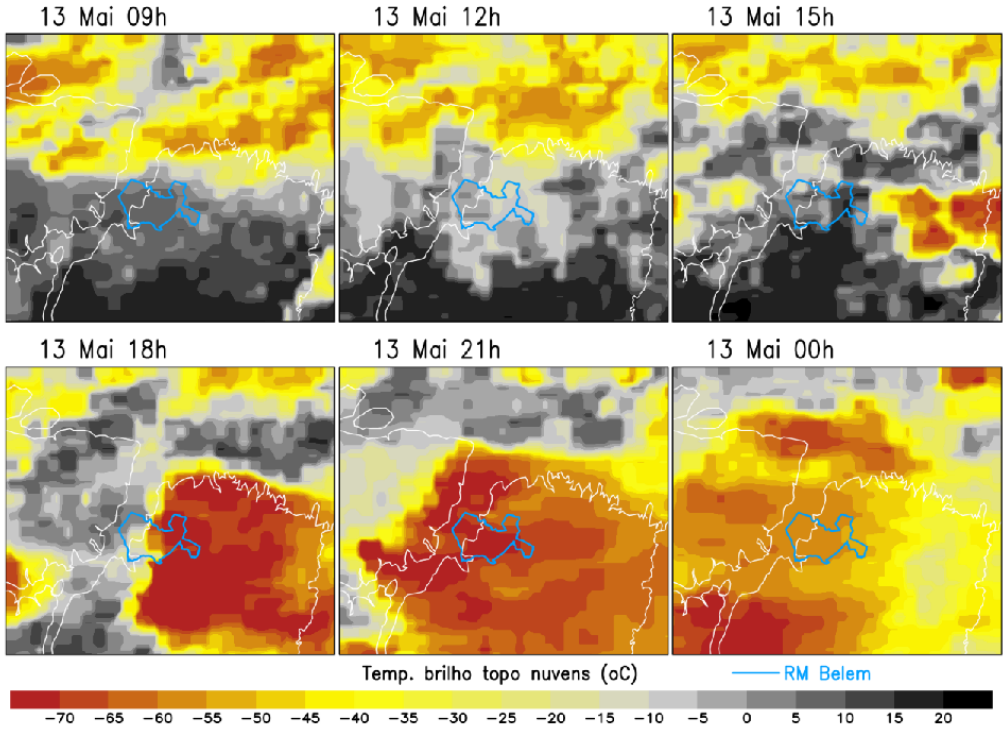
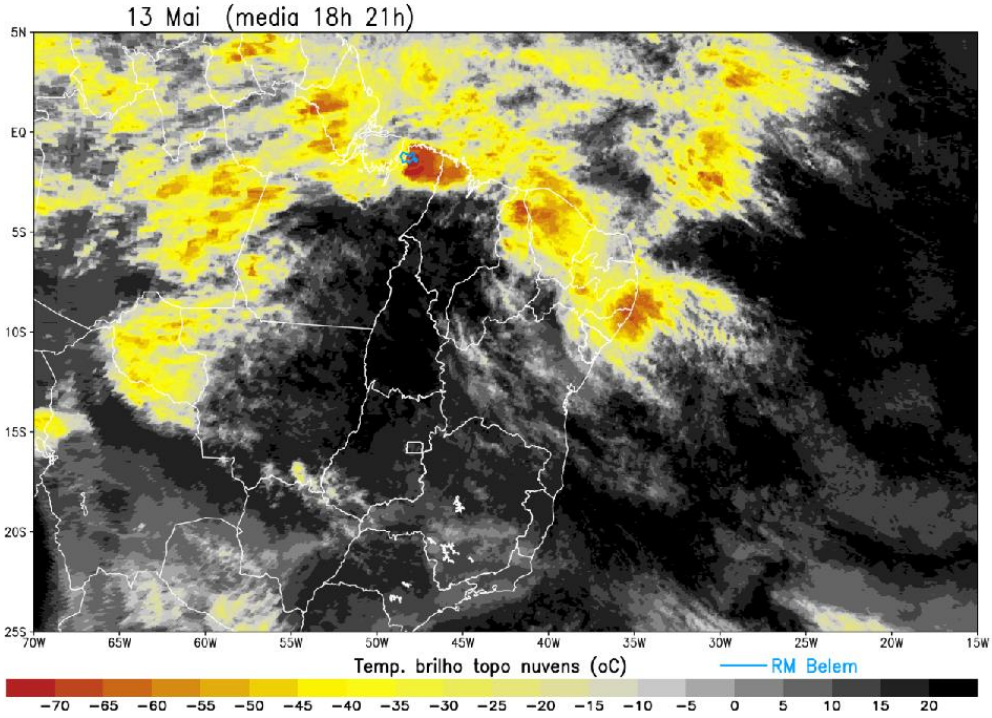


Figura 20 – Imagem de satélite GridSAT durante o evento extremo do dia 13/mai/2021 na área que engloba o Brasil e Atlântico tropical. A localização da RM de Belém é destacada no polígono azul.



4 DISCUSSÃO

No caso 2 registrado no dia 16 de fevereiro de 2021, o evento extremo foi mostrado pelo G1 Pará em Ipixuna do Pará, nordeste do estado onde o impacto da chuva rompeu a rodovia da BR-010 após transbordar um igarapé e segundo o jornal a Prefeitura comentou que 300 famílias ficaram desalojadas e 50 perderam suas casas.

Figura 21 – Notícia veiculada pelo G1 Pará.

Fonte: Notícia (2021a).

No caso 3 do dia 11 de março segundo o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD, 2022), Belém teve registros de erosão de margem fluvial, alagamentos.

Tabela 7 – Lista de ocorrências de desastres no dia 11 de março de 2022.

Município	Registro	Protocolo
Belém	11/03/2021	11420 - Erosão de Margem Fluvial
Belém	11/03/2021	12300 - Alagamentos
Belém	11/03/2021	11420 - Erosão de Margem Fluvial

Fonte: (S2iD, 2022).

No dia 08 de abril de 2021 o G1 mostrou sobre a maior parte da região metropolitana entre os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides e na ilha de Mosqueiro vários registros de incidentes como alagamentos, rajadas intensas do vento relacionadas com a presença da chuva intensa registrada no dia.

Figura 22 – Notícia veiculada pelo G1 Pará.

Fonte: Notícia (2021b).

5 CONCLUSÃO

No ano de 2021 foram identificados seis eventos extremos (valores diários acima do Percentil98) de precipitação na região de Belém. A análise destes eventos mostrou efeitos diretos no ciclo diurno e comportamento das variáveis meteorológicas, tais como a queda brusca da temperatura do ar, a verificação de rajadas de ventos antes da entrada do sistema precipitante. A ocorrência dos eventos, comprovado pelas análises das imagens GridSAT e pelo código METAR/SPECI, se associou com diversas configurações sinóticas de sistemas meteorológicos, sendo que a precipitação intensa foi ocasionada por Linhas de Instabilidade ou Aglomerados Convectivos, cuja propagação foi favorecidos pela manifestação de sistemas de maior escala, como a ZCIT, VCAN, ZCAS, bandas frontais no sudeste do Brasil, dentre outros.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M.F; SOUZA E.B.; OLIVEIRA, M.C.F; SOUZA JR, J.A. Precipitação nas mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendência nas ultimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 6, v.6, p. 151-168, jun. 2010. ISSN:1980-55X.

COSTA, J. N. da; SILVA JÚNIOR, J. B. da; ARAÚJO, S. M. S. de. Riscos e desastres relacionados a eventos extremos (climáticos e meteorológicos) no estado da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 110-125, 23 maio 2018.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. The types of annual climates in Brazil: an application of the classification of Köppen from 1961 to 2015. Confins-revue Franco-bresilienne de Geographie. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 37, n. 1, p. 1–13, 2018. doi: 10.4000/confins.15738.

FENG, G.; QIE, X.; WANG, J.; GONG, D. Lightning and Doppler radar observations of a squall line system. **Atmospheric Research**, v, 91, p.466-478, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. **Panorama**. Disponível em https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama. Acesso em: 19 jan 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA – INMET**. Normais Climatológicas (1981/2010)**. Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/. Acesso em: 19 jan. 2022

KNAPP, K. R. *et al.* Globally gridded satellite (GriSat) observations for climate studies. **B Am Meteorol***.* **Soc***.* v.92, p.893–907, 2011.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B. Structural Characteristics and Radiative Properties of Tropical Cloud Clusters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 121, n.12, p. 3234-3260, Dec. 1993.

NOTÍCIA veiculada pelo. **G1 Pará**. Belém, 11 abr. 2021a. Disponível em: https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2021/04/08/ananindeua-lanca-calendario-do-ano-letivo-2021com-aulas-remotas.ghtml. Acesso em: 14 mar. 2021.

NOTÍCIA veiculada pelo. **G1 Pará**. Belém, 16 fev. 2021b. Disponível em: https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2021/02/16/forte-chuva-alaga-casas-e-deixa-desabrigados-em-ipixuna-do-para.ghtml. Acesso em: 14 mar. 2021.

ORTEGA, E.G.; LÓPEZ,L.; SÁNCHEZ, J.L. Diagnosis and sensitivy study of twosevere storm events in the southeastern Andes. **Atmospheric Research**, v. 93, p. 161-178, 2009.

PINTO JR, O.; PINTO, I.R.C.A. "Tempestades e Relâmpagos no Brasil". **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais** – INPE - São José dos Campos - SP , 2000.

REDEMET. Consulta Mensagens Meteorológicas. **REDEMET.** Disponível em https://www.redemet.aer.mil.br/. Acesso em: 08 Mar. 2022.

SHIMIZU, M. H.; AMBRIZZI, T.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events and their relationship with ENSO and MJO phases over northern South America. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2977–2989, 2016. doi:10.1002/joc.4893.

SILVA, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. “Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon”. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, n. 3, p. 185-192, 2015.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÕES SOBRE DESASTRES – S2iD. **Relatórios**. Disponivel em https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios/. Acesso em: 23/03/2022.

SOUZA, E. B.de; AMBRIZZI, T. “Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms”, **Climanálise**, v. 2, n. 1, p. 1–20, 2004.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. **Dinâmica planetária de tempo e clima**. Disponivel em: https://www.iag.usp.br/siae98/meteorologia/dinamica.htm. Acesso em 22 de jan. de 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO. **Guindace to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. World Meteorological Organization N°8, 5th edition, Geneva Switzerland, 1983. p. 185.