Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

USO DE RADAR METEOROLÓGICO PARA A AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS ASSOCIADAS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO LESTE DA AMAZÔNIA

Use of meteorological radar for the evaluation of polarimetric variables associated with lightning in Eastern Amazonia

Uso de radar meteorológico para la evaluación de variables polarimétricas asociadas a rayos en la Amazonía Oriental

Ana Paula Paes dos Santos
Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV DS)
anapaulaps02@gmail.com

Paulo Maurício Moura de Souza
Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM)
paulo.moura.souza@gmail.com

Douglas Batista da Silva Ferreira
Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV DS)
douglas.silva.ferreira@itv.org

Enrique Vieira Mattos
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
enrique@unifei.edu.br

Ivan Sariava
Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM)
ivan.saraiva@sipam.gov.br

Francisco José Lopes de Lima
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
francisco.lopes.lima@gmail.com

Renata Gonçalves Tedeschi
Instituto Tecnológico Vale - Desenvolvimento Sustentável (ITV DS)
renata.tedeschi@itv.org

Paulo Afonso Fischer Kuhn
Universidade Federal do Pará (UFPA)
pkuhn@ufpa.br

Resumo: A compreensão da microfísica de nuvens associada a tempestades severas com grande incidência de descargas atmosféricas pode servir como base científica para o desenvolvimento de sistemas de alerta para a proteção de vidas e equipamentos expostos a céu aberto. Neste trabalho, foram avaliadas as variáveis polarimétricas de um radar meteorológico durante tempestades com elevada ocorrência de descargas atmosféricas em áreas do Leste da Amazônia, com o intuito de subsidiar melhorias em um projeto de alerta de descargas atmosféricas. O estudo foi realizado para eventos com registros acima de 13.000 descargas/dia na região de interesse. Os resultados mostraram que regiões com alta atividade elétrica apresentaram maior produção de cristais de gelo e maior disponibilidade de gotas super-resfriadas em níveis mais altos das nuvens, mecanismos indispensáveis no processo de separação de cargas, cujo principal fator que favoreceu este comportamento foram os movimentos verticais mais intensos dentro das nuvens. Nas áreas de menor atividade elétrica, as frequências dos valores negativos das variáveis polarimétricas foram menores, indicativo de campo elétrico menos intensos, e consequente menor geração de descargas atmosféricas. Desta forma, os resultados sugerem que a inclusão dos dados do radar no sistema de alerta de descargas atmosféricas apresenta potencial para gerar informações mais precisas.
Palavras-chave: Descargas Atmosféricas. Radar Meteorológico. Amazônia.

Abstract: Understanding the microphysics of clouds associated with severe storms with high incidence of lightning can serve as a scientific basis for the development of warning systems to protect lives and equipment exposed to the outdoors. In this work, the polarimetric variables of a meteorological radar during storms with high occurrence of lightning in areas of Eastern Amazonia were evaluated, with the aim of subsidizing improvements in the lightning warning system. The study was carried out for events with records above 13.000 lightning/day in the region of interest. The results showed that regions with high electrical activity showed greater production of ice crystals and greater availability of super-cooled drops at higher levels of the cloud, essential mechanisms in the charge separation process, whose main factor that favored this behavior were the movements more intense verticals inside the cloud. In areas of low electrical activity, the frequencies of negative values of polarimetric variables were lower, indicative of less intense electric fields, and consequent lower generation of lightning. Thus, the results suggest that the inclusion of radar data in the lightning warning system has the potential to generate more accurate information.
Keywords: Lightning. Meteorological Radar. Amazonia.

Resumen: La comprensión de la microfísica de las nubes asociadas con tormentas severas con alta incidencia de rayos puede servir como base científica para el desarrollo de sistemas de alerta para proteger vidas y equipos expuestos al cielo abierto. En este trabajo se evaluaron las variables polarimétricas de un radar meteorológico durante tormentas con alta ocurrencia de rayos en zonas de la Amazonía Oriental, con el objetivo de subsidiar mejoras en el sistema de alerta de rayos. El estudio se realizó para eventos con registros superiores a 13.000 rayos/día en la región de interés. Los resultados mostraron que las regiones con alta actividad eléctrica presentaban mayor producción de cristales de hielo y mayor disponibilidad de gotas sobreenfriadas en los niveles superiores de la nube,

mecanismos esenciales en el proceso de separación de cargas, cuyo principal factor que favoreció este comportamiento fueron los movimientos verticales más intensos en el interior de la nube. En áreas de menor actividad eléctrica, las frecuencias de valores negativos de las variables polarimétricas fueron menores, indicando un campo eléctrico menos intenso, y consecuentemente menor generación de rayos. Por lo tanto, los resultados sugieren que la inclusión de datos de radar en el sistema de alerta de rayos tiene el potencial de generar información más precisa.

Palabras clave: Rayo. Radar Meteorológico. Amazonia.

Submetido em: 31/01/2023
Aceito para publicação em: 27/06/2023
Publicado em: 15/07/2023

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como uma das principais regiões de ocorrência de descargas atmosféricas no mundo, com aproximadamente 80 milhões por ano (ODA et al., 2022). Isto deve-se a sua extensa continentalidade localizada na região tropical, o que resulta em maior disponibilidade de energia para a formação de nuvens de tempestades e consequentemente maior número de descargas atmosféricas (PINTO JR., 2021).

Associado a este fato, o alerta divulgado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2013, 2021) em seus últimos relatórios, o AR5 e AR6 (do inglês, *Assessment Report 5 and Assessment Report 6*), em relação a intensificação dos eventos climáticos extremos, provocados pelo aquecimento do planeta, fortalece a preocupação em relação ao aumento da incidência de descargas atmosféricas no País e o desenvolvimento de pesquisas que possam apontar para o conhecimento do clima futuro (DOS SANTOS et al., 2017).

No leste da Amazônia brasileira, dentre outras setores de produção (como setor elétrico, construção, água e pecuária), a cadeia de mineração é impactada negativamente pela incidência de descargas atmosféricas, tanto pelos falsos alertas como pela falha de alertas. Um falso alerta é aquele em que o alerta é disparado, mas não há de fato a ocorrência da descarga atmosférica, implicando na interrupção de alguns processos produtivos. Logo, trata-se de uma condição que afeta diretamente as receitas da indústria mineral. Por outro lado, uma falha de alerta é quando há a descarga e nenhum alerta de advertência foi emitido. Neste caso, tal condição impacta diretamente a segurança de pessoas e equipamentos.

Em vista de melhorar o sistema de alerta de tempestades na região, algumas medidas foram tomadas, uma delas foi a instalação de um radar meteorológico e outra a concepção de um projeto de pesquisa e desenvolvimento de alertas de descargas atmosféricas, intitulado *Lightning Early Warning Artificial Intelligence System* - LEWAIS (ALVES et al., 2022). A primeira fase do LEWAIS, utilizando um modelo reativo baseado somente em dados de descargas atmosféricas apresentou uma redução do percentual de alertas falsos e falhos. No entanto, acredita-se que o sistema pode gerar níveis de alertas ainda mais precisos com a inserção de dados do radar meteorológico.

Este contexto se baseia em estudos que mostram que informações de radar meteorológico podem gerar indicativos importantes para previsões de descargas

atmosféricas, conforme exposto por Wang et al. (2016), Mattos et al. (2016), Shrestha et al. (2021), dentre outros. Shrestha et al., (2021), mostraram que é viável o uso de medidas do radar para prever taxas de relâmpagos a curtíssimo prazo (menor que 30 minutos) e que a eficiência da previsão reduz a significância para períodos superiores a 30 minutos.

Um relevante estudo relacionou dados de radar meteorológico Doppler com dados de incidência de descargas atmosféricas nuvem-solo (HONDL e EILTS, 1994). A partir da análise de 28 tempestades, foi observado que a detecção inicial de um eco de 10 dBZ perto do nível de congelamento pode ser um forte indicativo da incidência de descargas atmosféricas, e as condições de circulação atmosférica são frequentemente acompanhadas de convergência e divergência em baixa altitude e no topo do eco do radar, respectivamente. Outro resultado encontrado pelos autores é referente ao tempo de antecipação entre a detecção de um limiar de eco e o início de uma tempestade, que varia entre 5 e 45 minutos.

Liu et al. (2011), ao analisar a evolução da atividade elétrica dentro de um sistema convectivo de mesoescala, baseados em dados de uma rede de detecção de descargas e dados de radar meteorológico, documentaram que as fontes de radiação sobre a rede de detecção apresentaram uma boa correlação com os ecos do radar. Deste modo, estudos prévios já demonstraram resultados promissores do uso de radar meteorológico como indicativo da ocorrência de descargas atmosféricas.

Com o objetivo de avaliar as propriedades de tempestades convectivas e os relâmpagos sobre Gates Ocidentais no período das monções de junho a setembro de 2014, Utsav et al., (2022) integraram informações de um radar banda X aos registros de descargas atmosféricas. Os resultados mostraram que a maioria das tempestades produtoras de relâmpagos estavam localizadas a sotavento, em oposição para o lado do vento na região. Essas tempestades tinham maior desenvolvimento vertical, áreas maiores e apresentaram maior probabilidade de granizo quando comparadas com aquelas sem descargas. Na estação quente, a convecção apresentou preponderância de descargas nuvem-solo negativo (NS-) que as nuvem-solo positiva (NS+). Tempestades com predomínio de NS+ exibiram fluxo de massa de ar vertical muito maior (> 2 vezes) na troposfera média (6-9 km) que tempestades sem NS+. Os autores também observaram que nas tempestades NS+, as descargas intranuvem aumentaram significativamente acima do nível de congelamento. Além destes, outros trabalhos como os de Metzger e Nuss (2013), e Karunarathna et al. (2017) também avaliaram

a ocorrência de descargas atmosféricas com base em informações do radar meteorológico. Embora tenha sido evidenciado a importância desta ferramenta para a previsão de tempestades a curtíssimo prazo, não existem estudos avaliando as tempestades e relâmpagos para o leste da Amazônia. Estudos dessa natureza são de extrema importância para o entendimento da formação dos relâmpagos nessas tempestades, e para gerar subsídios para aprimorar os alertas operacionais, no âmbito do projeto LEWAIS.

Diante do exposto, o presente estudo visa investigar a estrutura vertical das tempestades elétricas a partir do radar meteorológico e relacionar os perfis das variáveis polarimétricas com a ocorrência de relâmpagos na região. Os resultados obtidos poderão prover conhecimento científico para subsidiar melhorias no sistema de alerta de descargas atmosféricas, e assim, contribuir com o aumento da produtividade e acima de tudo, a proteção das vidas dos trabalhadores nas áreas de mineração, bem como para outros setores de produção, como da construção, elétrico, agropecuário etc.

2. METODOLOGIA

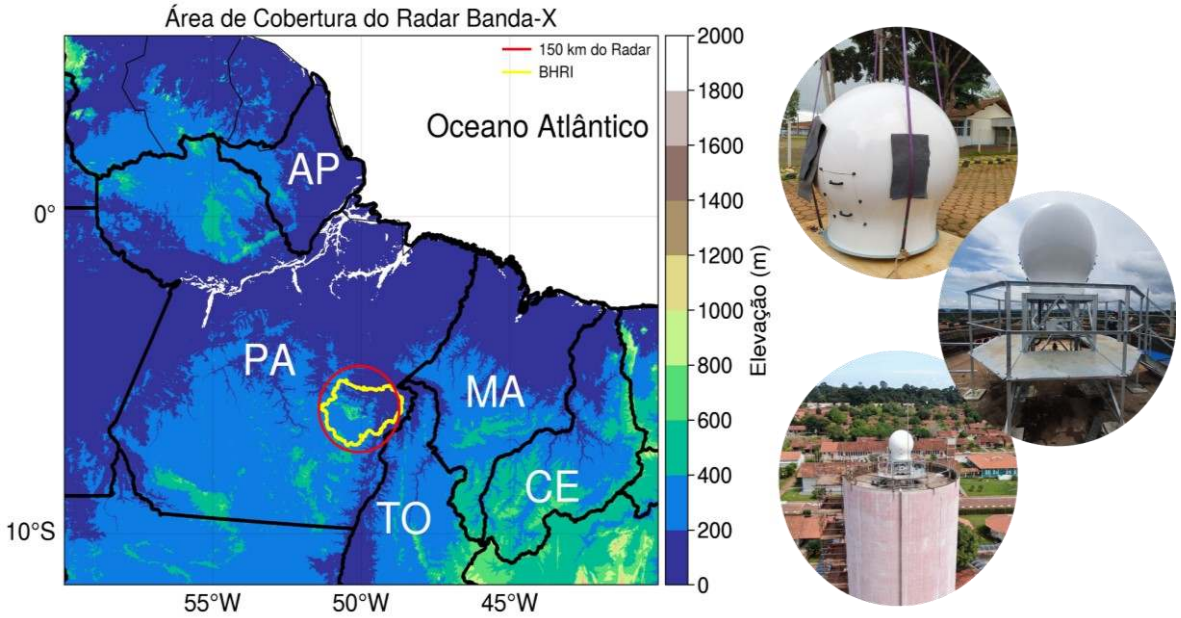
O presente estudo foi desenvolvido para a região de influência do radar meteorológico, instalado no sudeste do estado do Pará, Brasil (Figura 1a). A região abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), a qual contém as maiores jazidas multiminerais da região Amazônica e extração industrial de minérios de ferro, manganês, cobre e níquel em unidades de conservação e mineração artesanal, como ouro, pedras preciosas e outros, em áreas fora das unidades de conservação (SOUZA FILHO et al., 2021).

A região apresenta em torno de 1/3 de áreas protegidas (unidades de conservação e terras indígenas), fato este que é um indicativo da relevância ambiental da região para a proteção da biodiversidade (SILVA et al., 2021). As áreas de desflorestamento correspondem, em torno da metade da área da Bacia e são predominantemente utilizadas para pastagens. Cerca de 35% do rebanho bovino do estado do Pará são oriundos da BHRI (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017) e os ativos produzidos na região correspondem a 25% do PIB do Estado (SILVA JÚNIOR et al., 2017). A região também abrange áreas urbanizadas, como os municípios de Parauapebas e Canaã dos Carajás, por exemplo.

A Figura 1b apresenta a abrangência do radar meteorológico instalado no Núcleo Urbano de Carajás (Pará-Brasil). O radar foi adquirido com o objetivo de dar suporte e minimizar os alertas vermelhos falsos e falhos em relação a eventos meteorológicos adversos, como a incidência de descargas atmosféricas e chuva extrema. Este radar é uma ferramenta de monitoramento atmosférico fabricado pela GAMIC, Banda-X com dupla polarização e está configurado para operar varreduras com cobertura de 150 km, resolução radial do feixe de 50 m, PRF de 650 Hz, velocidade da antena de 2.2 rpm, abertura do feixe de 2.0º, e amostras a cada 1° de azimute com 10 elevações (ângulos de 1.0º para o inferior e 45º para superior). Opera com frequência temporal de 5 minutos e cada volume *scan* inclui informações de refletividade corrigida (total, horizontal e vertical), a refletividade não corrigida (horizontal e vertical), velocidade radial (horizontal e vertical), largura espectral (horizontal e vertical), refletividade diferencial (ZDR), fase diferencial (PHIDP), fase diferencial específica (KDP) e coeficiente de correlação (RHOHV).

No presente trabalho foi produzido *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) de 1 a 16 km de altura e alcance de 150 km com resolução horizontal e vertical de 1 km, respectivamente. Os perfis verticais de refletividade (Z) foram gerados através da metodologia *Contour Frequency by Altitude Diagrams* (CFAD) conforme proposto por Yuter e Houze (1995). Além da refletividade, foram utilizadas as seguintes variáveis do radar: ZDR, KDP e o PHV.

Figura 1 - Localização da área de estudo, no sudeste do Pará – Brasil (a). O círculo vermelho representa o alcance de 150 km do radar e em amarelo a delimitação da Bacia Hisdrográfica do Rio Itacaiunas – BHRI; e Radar Meteorológico instalado no Núcleo Urbano de Carajás-Pará-Brasil (b).



Fonte: Vale (2021).

Para o ano de 2021, cujos dados do radar meteorológico estão completos desde o dia 19 de janeiro, foram selecionadas tempestades com números elevados de ocorrência de descargas atmosféricas (Intranuvem - IN mais Nuvem-Solo - NS) sobre a região em estudo. Os dados de descargas atmosféricas são derivados da BrasilDAT Dataset (PINTO e PINTO, 2018), que combina dados de várias redes para obter maior eficiência de detecção que redes individuais, sendo capaz de capturar cerca de até 90% delas.

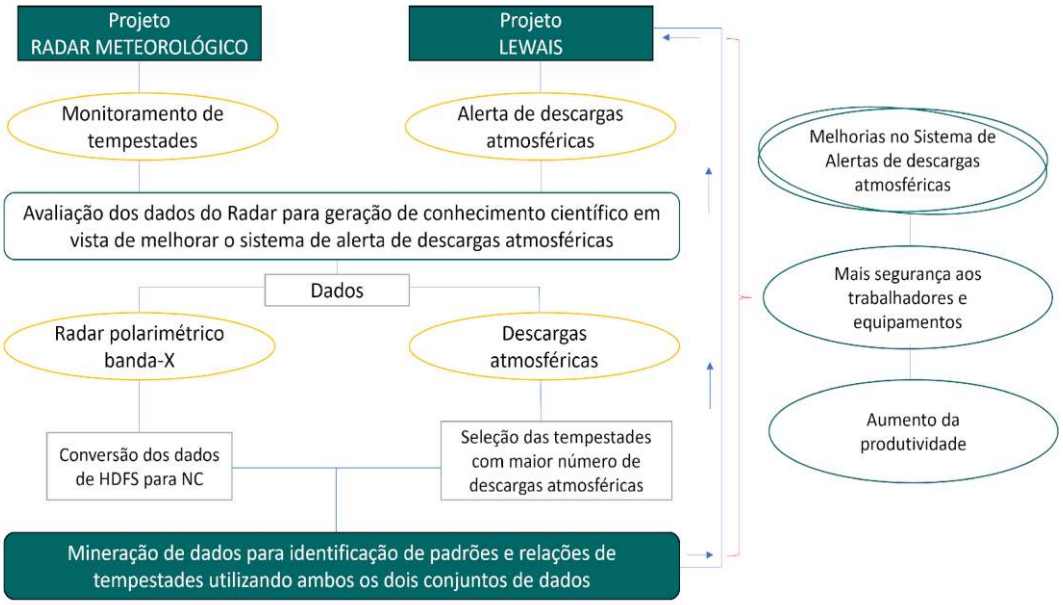
Para cada uma destas tempestades foi avaliada a distribuição horária das descargas para identificação do período de maior atividade elétrica. Em seguida, essas informações foram combinadas com os dados do radar para avaliar de que forma os parâmetros desta ferramenta se comportavam durante eventos de máxima incidência de descargas.

A Figura 2 ilustra os objetivos gerais dos Projetos Radar Meteorológico[1] e LEWAIS e a relação entre ambos para gerar mais segurança aos trabalhadores e equipamentos, além do

[1] Projeto de pesquisa do Instituto Tecnológico Vale (ITV) iniciado em janeiro de 2022, que tem como objetivos: aprimorar as previsões meteorológicas de curto prazo; desenvolver modelos de detecção de tempestades a partir de inteligência artificial e; relacionar os dados de radar meteorológico com a incidência de descargas atmosféricas.

aumento da produtividade. O tópico seguinte apresenta os resultados obtidos neste trabalho, que contempla a primeira parte da mineração de dados para melhorias do sistema de alerta.

Figura 2 - Fluxograma da relação entre os Projetos Radar Meteorológico e LEWAIS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3. DESENVOLVIMENTO

Os primeiros resultados deste trabalho correspondem ao levantamento dos dias com maior número de descargas atmosféricas para o período chuvoso do ano de 2021 (quando o radar entrou em operação), mais especificamente entre os meses de fevereiro a maio.

Para este período chuvoso, observaram-se várias situações com convecção ativa nos estados do Norte do País, associada à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS consiste em uma persistente banda de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, desde o sul e leste da região Amazônica até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul (KODAMA 1992; SATYAMURTI et al, 1998; LIEBMANN et al, 2001; CARVALHO et al, 2002a, 2004).

Além da ZCAS, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sistemas meteorológicos de mesoescala, como linhas de instabilidade (LI's) e Sistemas Convectivos também favoreceram para o aumento da convecção na região e consequentemente na concentração

de descargas na região. A ZCIT é uma banda de nebulosidade na faixa equatorial do globo, responsável pelo desenvolvimento de nuvens de tempestade, associada a elevados volumes de chuva e descargas atmosféricas (UVO e NOBRE, 1989). As LI's correspondem a uma organização convectiva com dimensão espacial de mesoescala, e podem se apresentar como linhas de células convectivas contínuas ou aproximadamente contínuas (COHEN et al., 1995).

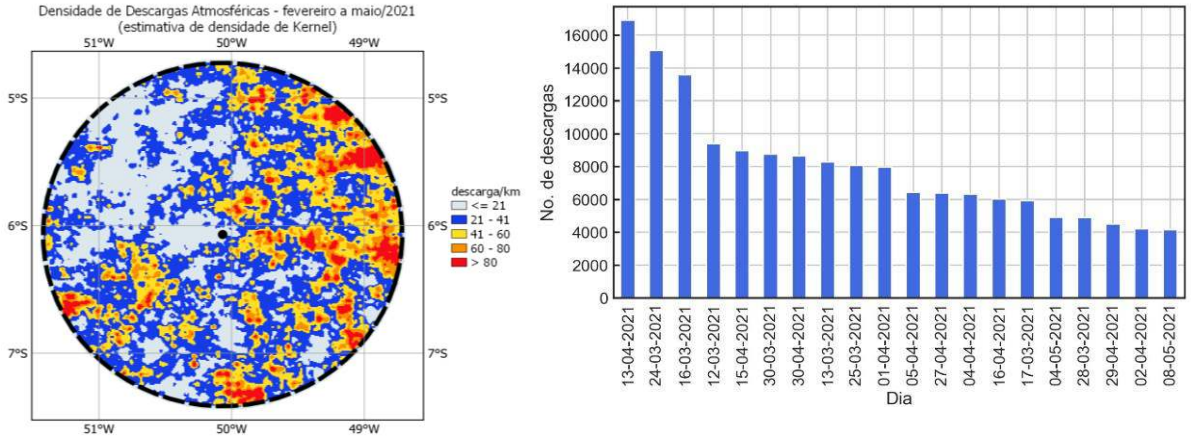
A Figura 3a mostra a densidade de de descargas atmosféricas para o período em estudo. Observou-se que a maior densidade (acima de 80 descargas/km²) ocorreu em áreas do centro-leste e sudoeste do radar meteorológico.

A Figura 3b apresenta o levantamento dos vinte dias com maior atividade elétrica na região para o período em estudo. Verificou-se que a maior parte dos eventos ocorreram em torno de 4.000 a 9.000 descargas/dia. No entanto, três eventos desta série de dados merecem destaque, com registros entre aproximadamente 13.000 e 17.000 descargas/dia.

Estas tempestades com totais de descargas superiores a 13.000 registros claramente representam eventos atípicos para a região em estudo. Este limiar permitiu identificar o dia 13/04/2021 com total de 16.907 descargas; o dia 24/03/2021 com registros de 15.064 descargas; e o dia 16/03/2021 com 13.595 descargas.

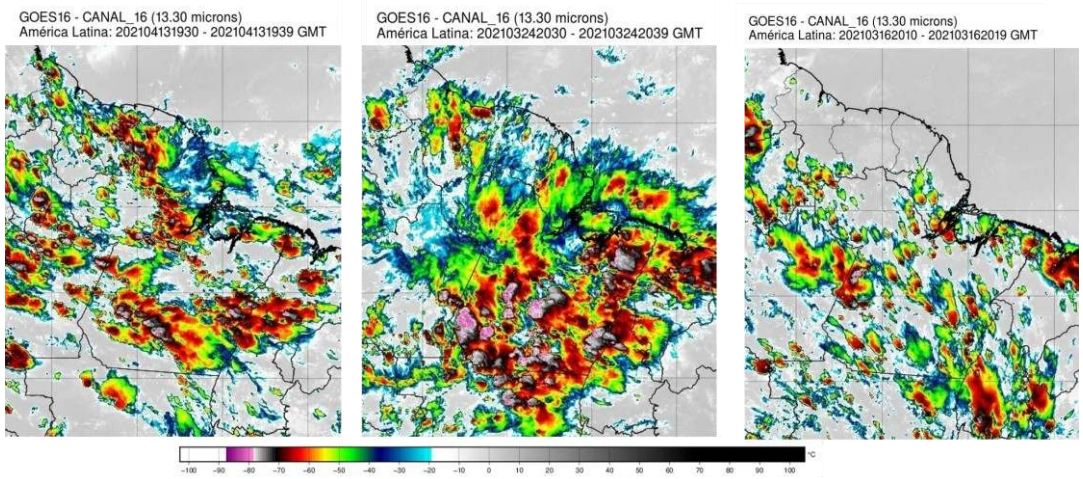
As imagens de satélite para os três dias selecionados são apresentadas na Figura 4. Verificou-se a presença de muita instabilidade, com nuvens de grande desenvolvimento vertical, representado por nuvens de topos frios (aproximadamente -70°C), em ambos os três dias na região em estudo.

Figura 3 - Descargas atmosféricas na região de influência do radar meteorológico no período de fevereiro a maio de 2021. Em (a) têm-se a densidade de descargas e em (b) a contagem dos 20 dias com o maior número de descargas na região.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 4 - Imagens de satélite GOES-16 do canal infravermelho (13,3 microns) para os dias: (a) 13/04/2021, (b) 24/03/2021 e (c) 16/03/2021.



Fonte: INPE (2021).

As seções a seguir apresentam os estudos de caso para cada tempestade selecionada. Para avaliar de forma mais detalhada os perfis verticais das variáveis do radar meteorológico durante as ocorrências das descargas atmosféricas, foram geradas duas regiões de interesse em cada tempestade: área 1 e área 2. A área 1 corresponde a região com maior número de descargas atmosféricas e a área 2 a região com o menor número. Essas áreas foram criadas baseadas no Eco Top de 20 dBZ (maior altitude em que há ocorrência da refletividade de 20 dBZ). Observou-se que as descargas atmosféricas ocorreram em regiões onde o Eco Top de 20 dBZ atingiram, no mínimo 10 quilômetros (km) de altura. Desta forma, foram gerados os

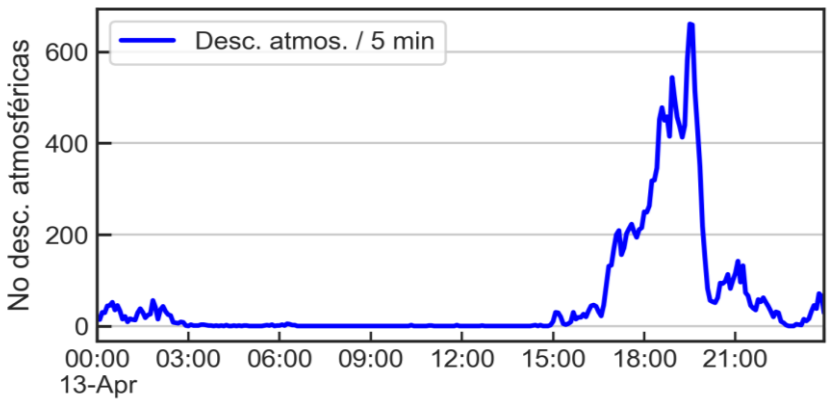
acumulados das descargas elétricas dentro dessas regiões de acordo com o tempo de interesse, que serão mostrados nas descrições de cada evento.

3.1. Tempestade 1: 13/04/2021

A Figura 5 apresenta a distribuição dos acumulados de descargas atmosféricas a cada cinco minutos ao longo do dia 13/04/2021. Observou-se que ocorreram algumas descargas no início do dia (entre 00:00 e 03:00 UTC), provavelmente resultante de uma tempestade do dia anterior. Ao longo do dia, até 15 UTC não houve registro de descargas, e a partir deste horário, a instabilidade aumentou expressivamente na região, com máximos em torno das 18:00 às 20:00 UTC (15:00 às 17:00 hora local).

Este período de ocorrência de tempestades sugere que a atividade convectiva pode ter se desenvolvido por aquecimento diurno, quando a atmosfera aquece ao longo do dia e com a combinação da umidade relativa do ar elevada da região, favorece a formação de nuvens profundas, com grande potencial para geração de descargas atmosféricas (WALLACE & HOBBS, 2006).

Figura 5 - Número de descargas atmosféricas acumulado a cada cinco minutos no dia 13/04/2021 para a área em estudo.



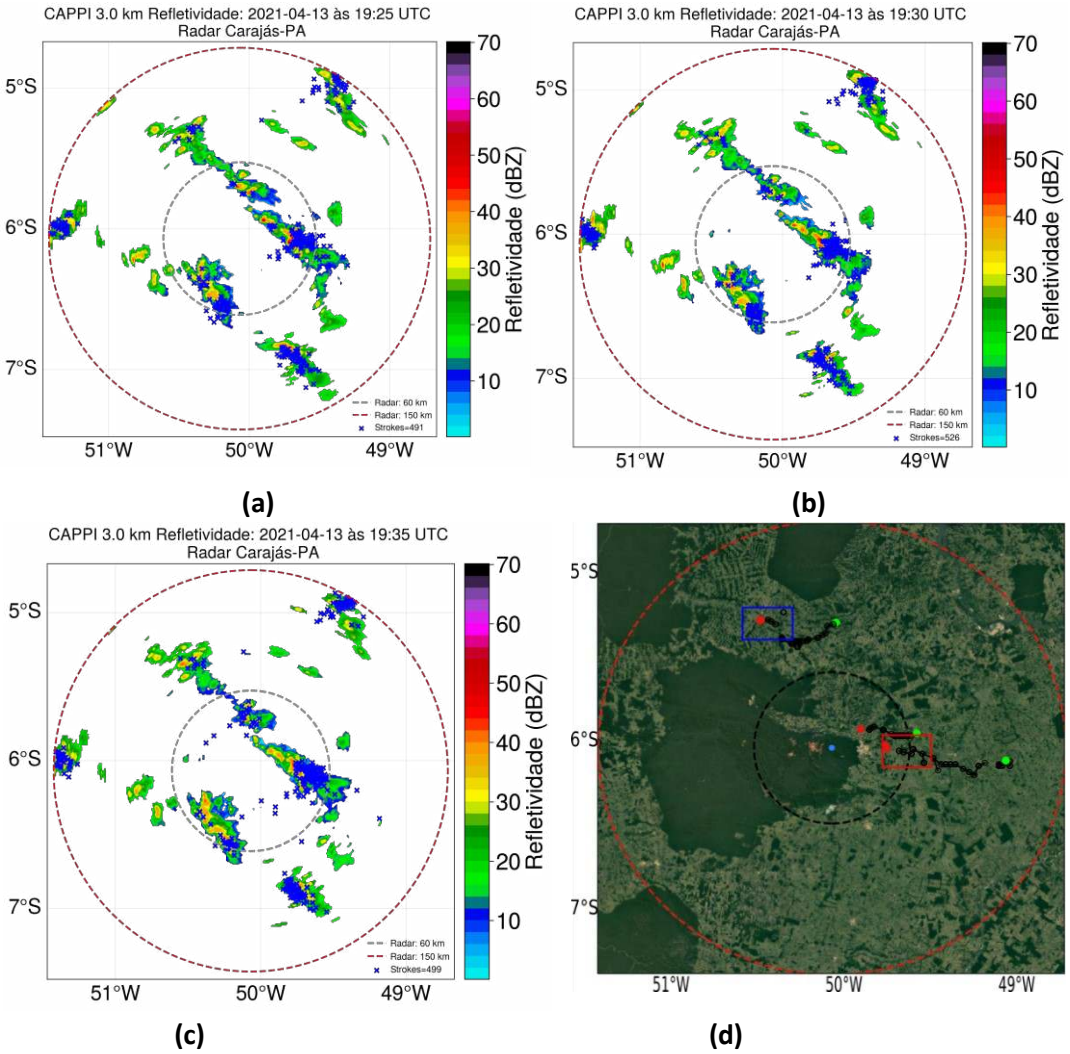
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 6a, 6b e 6c apresenta os dados de descargas atmosféricas sobrepostos ao campo de refletividade do radar meteorológico para 5 minutos antes do pico de descargas, durante e 5 minutos depois, respectivamente. Estas imagens sugerem que a tempestade

esteve associada a passagens de LI's pela região. Em ambos os horários, notou-se que nas regiões com intensa atividade elétrica, houve a permanência da refletividade em torno de 50 dBZ.

A Figura 6d apresenta a delimitação de duas áreas da tempestade em estudo: a área retangular delimitada pela cor vermelha (área 1) representa a área com maior número de descargas atmosféricas e a área azul (área 2) corresponde à área com menor número de descargas. As linhas com marcadores circulares mostram o deslocamento do sistema a partir do campo de refletividade para o CAPPI de 3 km, onde o círculo em verde mostra a primeira ocorrência do núcleo do sistema (refletividade acima de 25 dBZ) a parti das 18:00 UTC e o círculo em vermelho onde o núcleo se encontrava às 19:35 UTC. Os deslocamentos dos outros sistemas foram removidos da imagem para deixá-la o mais limpo possível. Essas regiões foram utilizadas para realização de cortes verticais na atmosfera, com o objetivo de analisar o perfil dos parâmetros do radar (conforme supracitado), expostos nas Figuras 7 e 8.

Figura 6 - Acumulados (em cinco minutos) de descargas atmosféricas sobrepostos a imagem de CAPPI de 3 km de altura de refletividade do radar meteorológico para o dia 13/04/2021. Os registros são: (a) 5 minutos antes (19:25 UTC) do pico de descargas; (b) durante (19:30 UTC) e (c) 5 minutos depois (19:35 UTC). Em (d) os retângulos simbolizam a área 1 (vermelho) núcleo com maior número de descargas e área 2 (azul) o núcleo com menor número de descargas.

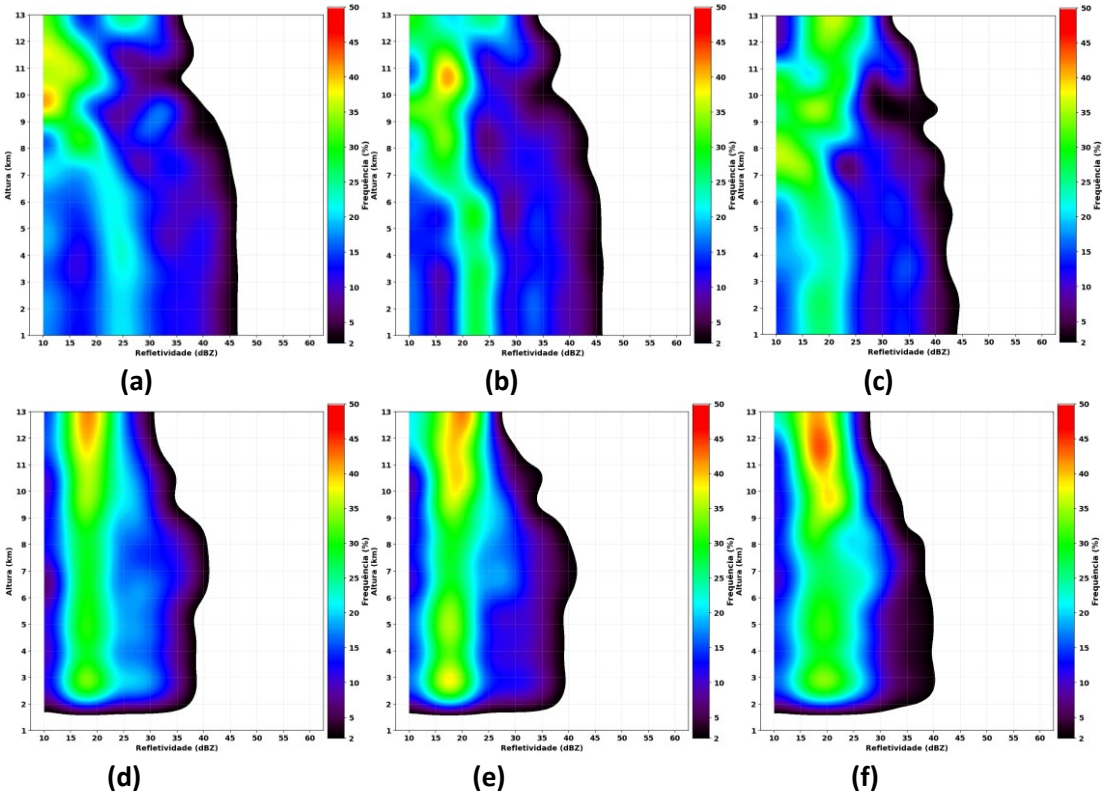


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 7 ilustra os CFAD para as duas áreas analisadas. Ao analisar os resultados verifica-se que a área com maior acumulado de descargas atmosféricas apresentou um espectro de refletividade maior, com valores acima de 45 dBZ entre os tempos 19:25 e 19:30 UTC, períodos que precedem e ocorre o pico da variável em análise, respectivamente. Nestes intervalos, notou-se que as refletividades de 45 dBZ atingem o nível de 8 km, o que não ocorreu na região 2. O fator responsável para esta distribuição se deve aos movimentos verticais dentro da nuvem estarem mais intensos na área de maior atividade elétrica em comparação com a área de baixa atividade. Com as regiões ascendentes mais intensas as gotas

de chuva são transportadas para regiões mais frias (fator significante para o processo de transferência de cargas entre os hidrometeoros) e, consequentemente, maior é a produção de cristais de gelo. Já as regiões descendentes favorecem as colisões entre os cristais de gelo com outros hidrometeoros, como gotas super-resfriadas e outros cristais de gelo, formando os processos de acreção e agregação, respectivamente, processos fundamentais no processo de eletrificação.

Figura 7 - CFAD da refletividade do radar 5 minutos antes do pico de descargas atmosféricas (19:25 UTC), durante (19:30 UTC) e 5 minutos depois (19:35 UTC): As Figuras (a), (b) e (c) correspondem a área 1 e (d), (e) e (f) correspondem a área 2.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os gráficos das variáveis polarimétricas KDP, ZDR e ROHV (Figura 8) foram feitas em linhas de contornos de frequência devido às variáveis apresentarem variabilidade considerável nos seus valores em cada nível, o que inviabiliza o uso da média aritmética ou ponderada. Para essas variáveis, os CFADs foram calculados considerando os três tempos de análise (antes, durante e depois do pico de descargas atmosféricas).

Comparando os CFADs para a área de maior atividade elétrica (Figuras 8a-8c) e área de menor atividade elétrica (Figuras 8d-8f), nota-se comportamentos bem distintos em todas as

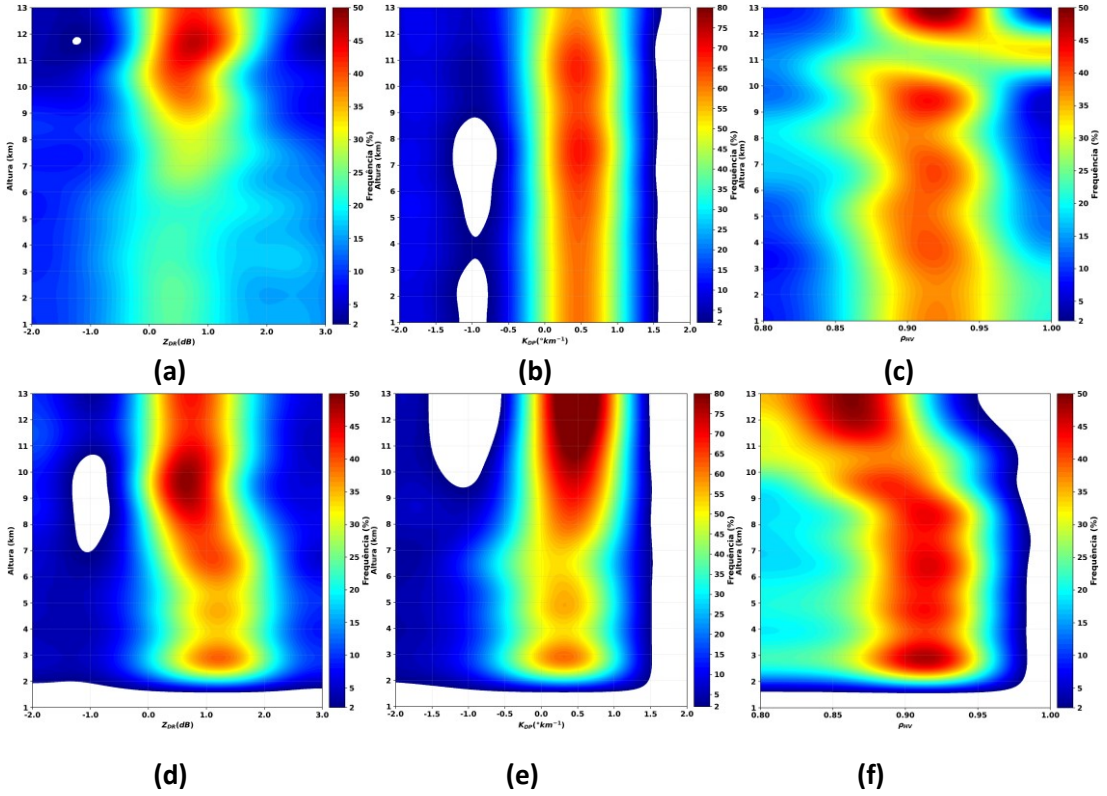
variáveis. Em relação a variável ZDR, percebe-se que os valores entre -1 e 3 (dB) são bem mais distribuídos na área de maior atividade elétrica do que na área de baixa atividade elétrica, principalmente entre 1 e 7 km de altura, onde podemos destacar os níveis entre 4 e 6 km, que, de acordo com as curvas nesses níveis de ZDR, sugere maior produção de cristais de gelo e derretimento dos mesmos. Outro ponto que chama atenção na distribuição de ZDR é o aumento da frequência dos valores nulos e negativos a partir do nível de 7 km, o que está relacionado com cristais de gelo verticalmente orientados por campo elétrico.

Em relação a KDP e RHOHV é notória a diferença entre as áreas de alta e baixa atividade elétrica. O perfil de KDP na área 1 mostra contornos de frequência com maior constância (linhas mais retas) entre as alturas, onde o eixo do espectro (-0,5 a 1,2 °km^{-1}) de maior valor ficou por volta de 0,5, enquanto este eixo para a área 2 ficou por volta de 0.4.

Na área de menor atividade elétrica nota-se aumentos da frequência de KDP acima do nível de 7 km de altura para valores a partir de 0,5 °km^{-1}, enquanto na região de alta atividade as frequências se mantiveram praticamente constantes. Tal comportamento está relacionado diretamente com os movimentos verticais em cada região que, através do comportamento de KDP e RHOHV, mostraram-se mais intensos na área de maior atividade elétrica, como foi discutido anteriormente.

Correntes ascendentes mais intensas elevam os cristais de gelo para níveis mais altos, o que pode ser observado claramente no gráfico de RHOHV para a área 1, que possuiu maior frequência para valores a partir de 0,95 acima do nível de 8 km, mostrando maior homogeneidade e concentração dos cristais de gelo. Com correntes ascendentes mais fracas, menos cristais de gelo orientados verticalmente são transportados para níveis mais altos da nuvem, o que pode ser visto no gráfico RHOHV para a área de menor atividade elétrica, em que acima do nível de 8 km há uma redução das frequências da variável, fazendo com que as frequências de KDP a partir de 0 ,5 °km^{-1} se tornem mais frequentes, indicando um campo elétrico mais fraco.

Figura 8 - CFADs das variáveis polarimétricas ZDR, KDP e RHOHV, respectivamente, entre os tempos 19:25 até 19:35 para a área de maior atividade elétrica (a-c) e menor atividade elétrica (d-f).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

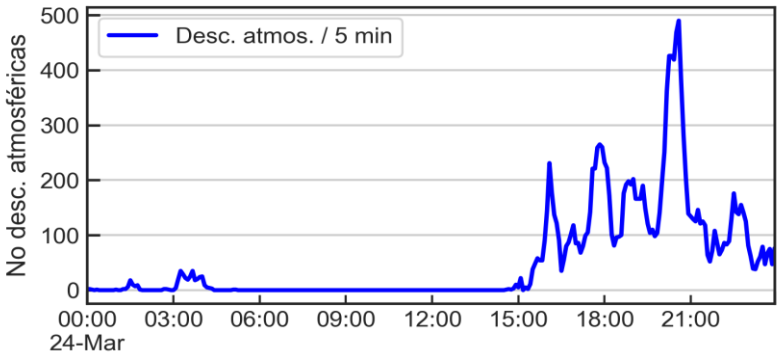
3.2. Tempestade 2: 24/03/2021

O dia 24/03/2021 apresentou um total de 15.064 registros de descargas atmosféricas, classificando este evento como o segundo mais intenso na região para o período em estudo. Por meio da Figura 9 é possível observar que no início do dia houve registros abaixo de 100 descargas (a cada 5 min). Ao longo da manhã e em parte da tarde não houve descargas, entretanto, a partir de aproximadamente 15:00 UTC até o final do dia houve bastante atividade elétrica na região. Nesse período, o pico máximo de descargas ocorreu às 20:35 UTC (17:35 hora local) com aproximadamente 500 registros.

Observou-se que apesar de toda a instabilidade observada em grande parte do estado do Pará nas imagens de satélite (Figura 4b), o elevado número de descargas atmosféricas sobre a região em estudo foi gerado por núcleos isolados de tempestades, conforme evidencia a Figura 10. Em ambos os três horários (Figura 10a, 10b e 10c) a refletividade variou entre aproximadamente 40 e 50 dBZ. A Figura 10d destaca as duas áreas (retângulos) com núcleos de maior (vermelho) e menor (azul) atividade elétrica, para posterior análise dos CFADs. Neste

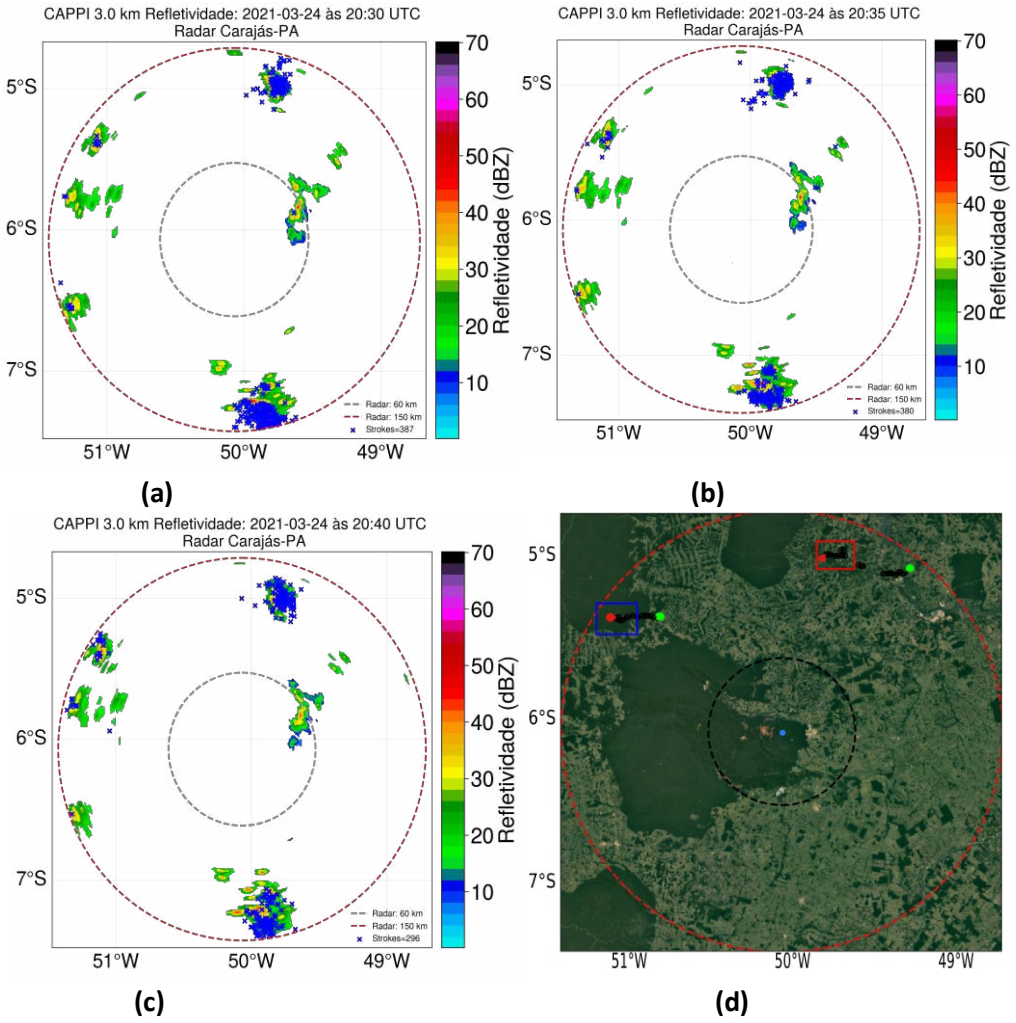
painel, é possível notar o deslocamento do núcleo do sistema com refletividade a partir de 25 dBZ entre os horários das 19:00 e 20:40 UTC, mostrando um deslocamento aproximado de leste nas duas regiões, onde o sistema que atinge a área de maior atividade elétrica surge bem próximo do rio que aparece na região. Comparando o evento em questão com o que foi analisado anteriormente é possível notar que as altas atividade elétricas ocorreram antes de atingirem as serras e a baixas atividades ocorreram entre as serras nas latitudes entre 5.5 e 5.0°S. Em relação ao echotop de 20 dBZ em ambos os dias, foi visto que nas áreas de maior atividade houve ocorrências acima do nível de 14 km de altura, enquanto as de baixas atividades elétricas não ultrapassaram 12 km.

Figura 9 - Número de descargas atmosféricas em escala horária a cada cinco minutos no dia 24/03/2021 para a área em estudo (horários em UTC).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 10 - Acumulados (em cinco minutos) de descargas atmosféricas sobrepostos a imagem de refletividade do radar meteorológico para o dia 24/03/2021. Os registros são: (a) 5 minutos antes (20:30 UTC) do pico de descargas, (b) durante (20:35 UTC) e (c) 5 minutos depois (20:40 UTC). Em (d) os retângulos simbolizam a área 1 (vermelho) núcleo com maior número de descargas e área 2 (azul) o núcleo com menor número de descargas.



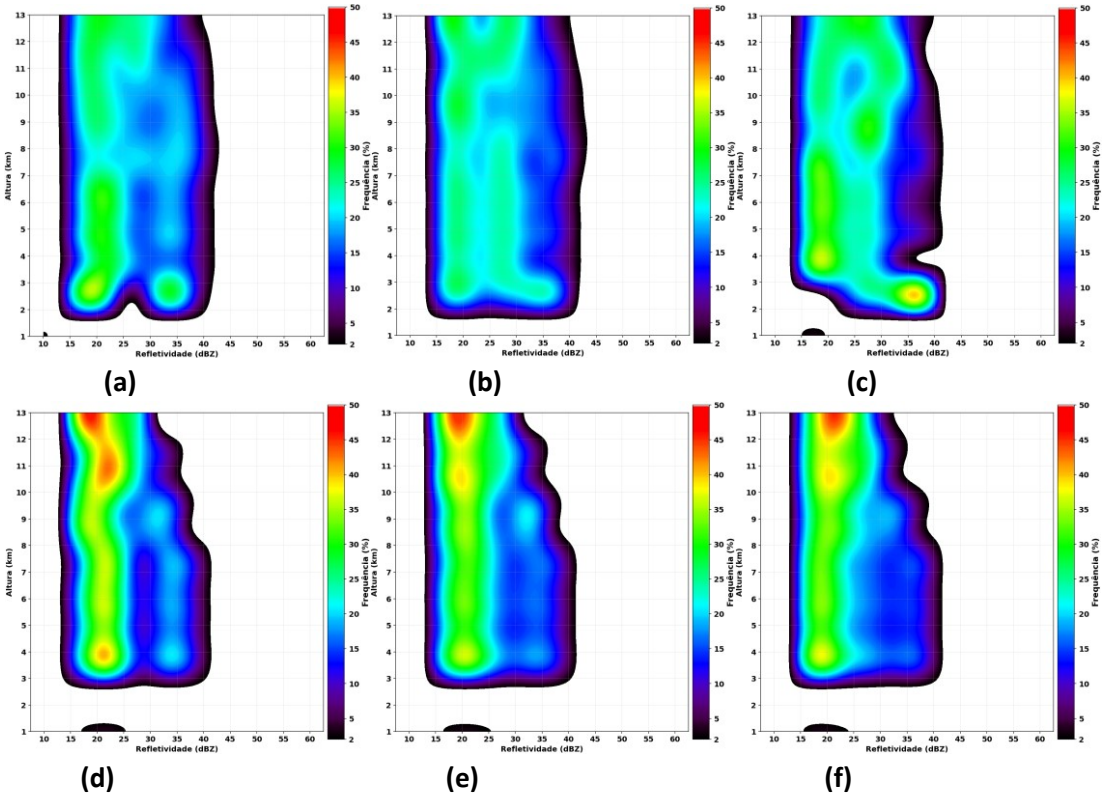
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Comparando os CFAD de refletividade deste dia (Figura 11) com os ocorridos no dia 13/04/2021, notou-se uma similaridade dos contornos de frequências das áreas com menos atividade elétrica, onde as maiores frequências ocorreram entre as refletividades de 15 e 20 dBZ entre os primeiros 5 km de altura e também foi notado uma redução mais acentuada das refletividades entre 35 e 40 dBZ a partir do nível de 8 km, o que pode estar relacionado com movimentos verticais menos intensos em comparação com os movimentos nas áreas de alta atividade elétrica.

Em relação à área de maior atividade elétrica, percebe-se que a variação de

refletividade do dia em questão em relação ao evento anterior apresentou uma redução, atingindo até 40 dBZ. Outra diferença entre as áreas de maiores atividades elétricas consiste em uma distribuição das refletividades entre 15 a 40 dBZ mais bem distribuída abaixo de 5 km no evento ocorrido no dia 24/03, o que indica uma precipitação mais intensa na região. Por outro lado, percebe-se que o comportamento da distribuição das frequências das refletividades entre 35 e 40 dBZ acima de 7 km são similares, isto é, esses limiares apresentaram aumentos de frequência 5 minutos antes e no momento em que ocorrem os picos da quantidade de raios, comportamento não ocorrido nas áreas de baixa atividade elétrica, o que está relacionado diretamente com a velocidade vertical.

Figura 11 - CFAD da refletividade do radar 5 minutos antes do pico de descargas atmosféricas (20:30 UTC), durante (20:35 UTC) e 5 minutos depois (20:40 UTC): (a), (b) e (c) correspondem a área 1 e (d), (e) e (f) correspondem a área 2.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

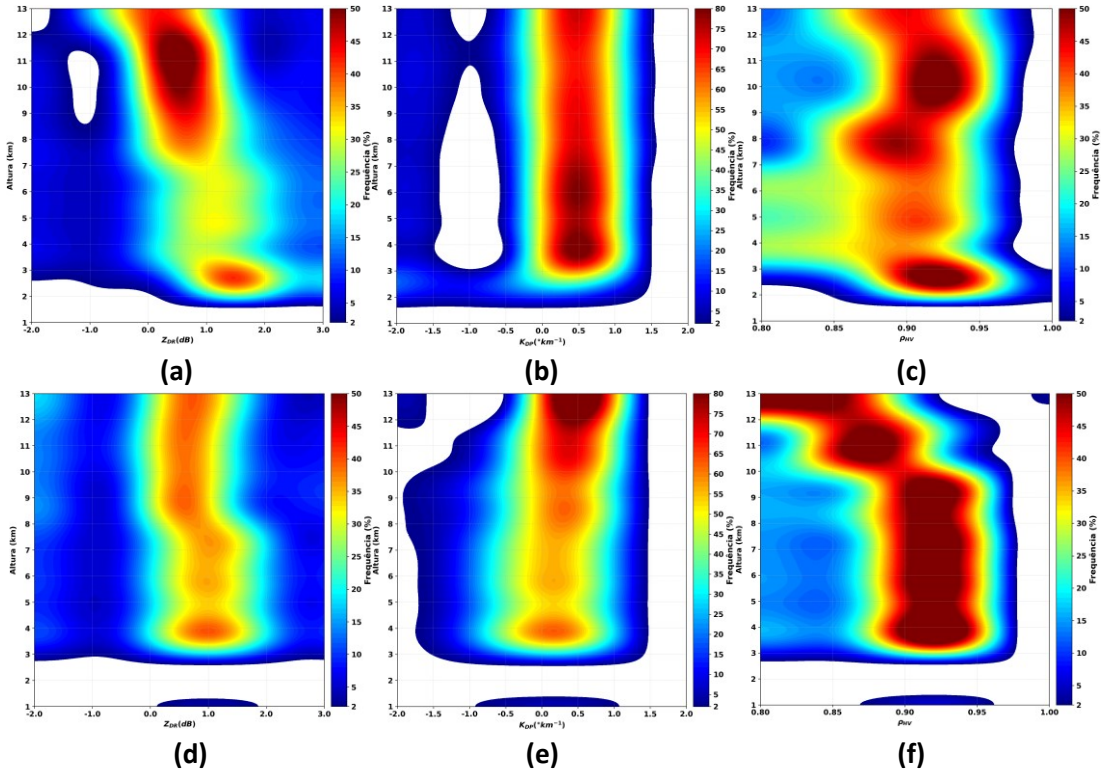
Comparando os gráficos de CFADs das variáveis polarimétricas do dia 24/03/2021 (Figura 12) com os gráficos do dia 13/04/2021 (Figura 8), notou-se que os gráficos das áreas de baixa atividade elétrica possuem similaridades em todas as variáveis, enquanto os contornos das áreas de maior atividade apresentaram mudanças mais visíveis.

Nesta área, percebeu-se que KDP apresentou aumentos das frequências dos valores de 0,5 °km^{-1} abaixo do nível de 5 km juntamente com aumentos das frequências dos valores de 1 e 2 dB da variável ZDR. Tal comportamento indica gotas de chuva mais oblatas, indicando chuva mais intensa, conforme foi mencionado no parágrafo anterior. Entretanto, a partir do nível de 7 km é possível observar semelhanças nos comportamentos das curvas de frequências das áreas de alta atividade, onde os valores abaixo de 0 dB se tornam mais frequentes e KDP apresentou uma linearidade das curvas de frequência, indicando a presença de um campo elétrico mais intenso, orientando os cristais de gelo mais verticalmente.

Em relação ao gráfico de RHOHV, o evento do dia 13/04 apresentou maiores frequências dos valores entre 0,95 e 1, mostrando mais formação de gelo que o dia 24/03, o que está relacionado diretamente com os ramos ascendentes dos movimentos verticais que transportam mais cristais de gelo para níveis mais altos da nuvem. Apesar desta diferença, percebeu-se que os valores a partir de 0.90 acima de 8 km passaram a ter uma maior frequência, mostrando similaridades entre os dias.

Devido as nuvens em regiões de baixa atividade elétrica possuírem desenvolvimento vertical menor em relação àquelas em regiões de maior atividade, é possível notar em ambos os dias que ZDR apresentou frequências menores para valores abaixo de 0 dB a partir do nível de 7 km de altura, indicando uma concentração menor de cristais de gelo orientados verticalmente, o que pode ser confirmado pela inclinação das curvas de frequência de KDP em direção a valores acima de 0,5 °km^{-1} a partir do nível de 8 km. Em relação à RHOHV o comportamento das curvas de frequências foi similar, onde as maiores frequências concentraram-se entre 0,90 e 0,95 até o nível de 9 km e, acima deste nível, ocorreram deslocamento das curvas em direção a valores menores.

Figura 12 - CFADs das variáveis polarimétricas ZDR, KDP e RHOHV, respectivamente, entre os tempos 20:30 até 20:40 para a área de maior atividade elétrica (a-c) e menor atividade elétrica (d-f).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.2. Tempestade 3: 16/03/2021

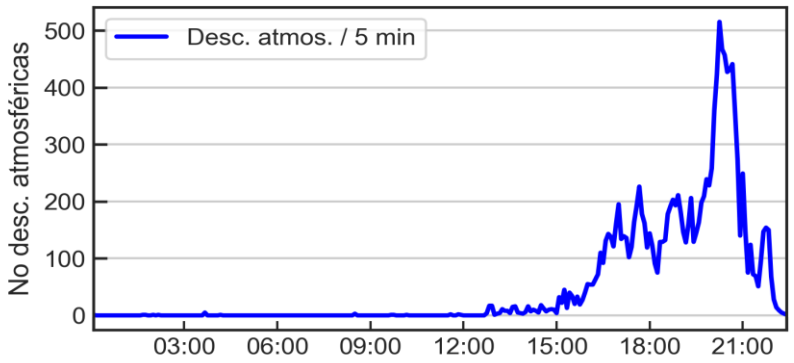
A Figura 13 apresenta a distribuição horária da ocorrência de descargas atmosféricas no dia 16/03/2021. Neste dia, foram totalizados 13.595 registros de descargas. No período entre a madrugada e manhã foram registradas poucas ou nenhuma atividade elétrica na região, entretanto a partir de aproximadamente 13:00 UTC iniciaram os registros de descargas, com máximos entre 20:00 e 21:00 UTC.

É possível observar que o pico máximo, acima de 500 descargas/5 minutos ocorreu às 20:15 UTC (17:15 hora local). Assim, notou-se que em ambos os eventos analisados, as tempestades elétricas ocorreram entre final da tarde e o início da noite na região, o que reforça a sugestão de que as tempestades foram favorecidas pelo aquecimento diurno da atmosfera, conforme comentado anteriormente.

Na data da Tempestade 3, as imagens de refletividade do radar evidenciaram a passagem de áreas de instabilidade de leste para oeste pela região com valores em torno de 40 a 50 dBZ (Figura 14a - 14c), semelhante ao observado nas tempestades anteriores**.** A Figura

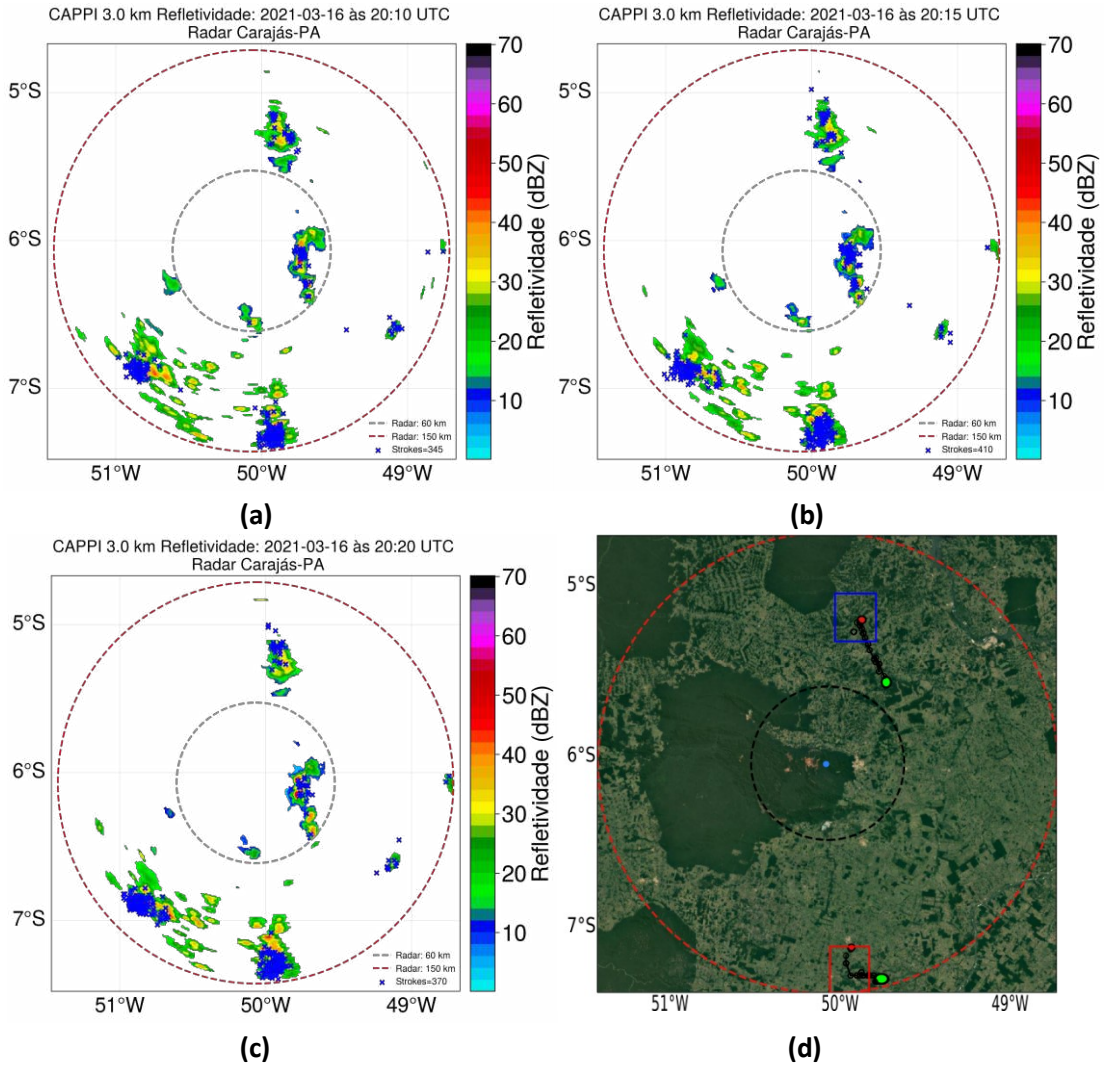
14d destaca as duas áreas com núcleos de maior atividade elétrica (vermelho) ao sul e de menor atividade elétrica (azul) ao norte, para posterior análise dos CFADs. Comparando este painel com os demais eventos já analisados, percebe-se uma diferença no posicionamento da área de menor atividade elétrica. No dia 24/03, percebe-se que a área de maior atividade elétrica ocorreu em uma região bem próxima da região de menor atividade ocorrida no dia 16/03. Entretanto, percebe-se que os deslocamentos dos sistemas foram distintos, onde foi de leste no dia 24/03 e sul-sudeste no dia 16/03, mostrando que o regime de ventos na região (dinâmica) pode ser um fator na produtividade de raios. Já a área de maior atividade ocorreu mais afastada das serras em comparação com os eventos já analisados, entretanto, os comportamentos do echotop de 20 dBZ foram as mesmas, tanto para alta (alturas acima de 14 km) quanto para a baixa atividade elétrica (alturas até 12 km), mostrando que a nuvens que apresentaram mais atividade elétricas possuíam maiores desenvolvimento vertical (o intervalo de tempo considerado para traçar as trajetórias foi das 19:00 até às 20:20).

Figura 13 - Número de descargas atmosféricas em escala horária a cada cinco minutos no dia 16/03/2021 para a área em estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 14 - Acumulados (em cinco minutos) de descargas atmosféricas sobrepostos a imagem de refletividade do radar meteorológico para o dia 16/03/2021. Os registros são: (a) 5 minutos antes (20:10 UTC) do pico de descargas, (b) durante (20:15 UTC) e (c) 5 minutos depois (20:20 UTC). Em (d) os retângulos simbolizam a área 1 (vermelho) núcleo com maior número de descargas e área 2 (azul) o núcleo com menor número de descargas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os CFADS para o dia 16/03/2021 (Figura 15) apresentaram um comportamento mais distinto dos que ocorreram nos outros dias. Para este dia, percebe-se que os contornos de frequência das refletividades entre 15 e 35 dBZ para a área de menor atividade elétrica possuem comportamento similar aos ocorridos no dia 13/04/2021 na área de alta atividade elétrica.

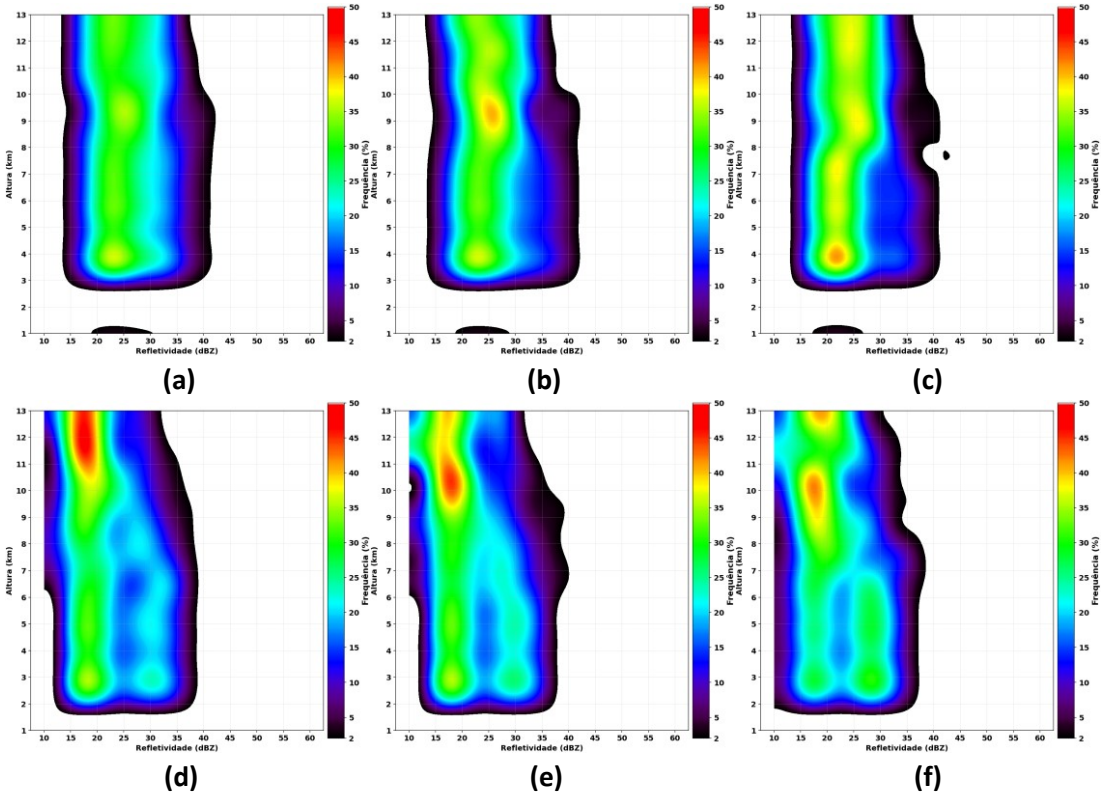
A similaridade consiste em uma maior frequência das refletividades entre 15 e 35 dBZ até o nível de 5 km de altura, o que indica uma precipitação mais intensa em relação as outras áreas de baixas atividades elétricas. Tal afirmação pode ser ratificada pela distribuição de ZDR

(Figura 16, painel d), a qual apresentou maiores frequências de 1 a 3 dB entre 2 e 5 km de altura, igualmente com maiores frequências de KDP de 0.5 °km-1, o que indica gotas mais oblatas em comparação às outras áreas de baixa atividade.

Apesar da similaridade em níveis abaixo de 5 km, como descrito anteriormente, o que justifica que a menor atividade elétrica do dia 16/03 está relacionada diretamente com a diminuição das refletividades entre 30 e 35 dBZ a partir da altura de 7 km, que decai mais rapidamente em comparação com o perfil da alta atividade do dia 13/04 e do dia 16/03, o que indica movimentos verticais mais fracos e, consequentemente, menor produção de gelo e menos separação de cargas entre os hidrometeoros.

A área de alta atividade elétrica para o dia em questão apresentou uma diminuição das frequências das refletividades entre 35 e 40 dBZ em relação às outras áreas de alta atividade. Apesar deste comportamento, é possível observar que ocorrência da refletividade entre 30 e 35 dBZ a partir do nível de 8 km é maior em comparação com a área de menor atividade elétrica (entre as 20:10 e 20:15 UTC), comportamento em comum entre todos os dias analisados, ou seja, foi observado que 5 minutos antes dos picos das descargas atmosféricas nas áreas de alta atividade houve maior frequência das refletividades entre 30 e 35 dBZ a partir de 8 km de altura, o que indica maior produção de cristais de gelo e disponibilidade de gotas super-resfriadas, ingredientes fundamentais para o processo de separação de cargas e eletrificação da nuvem.

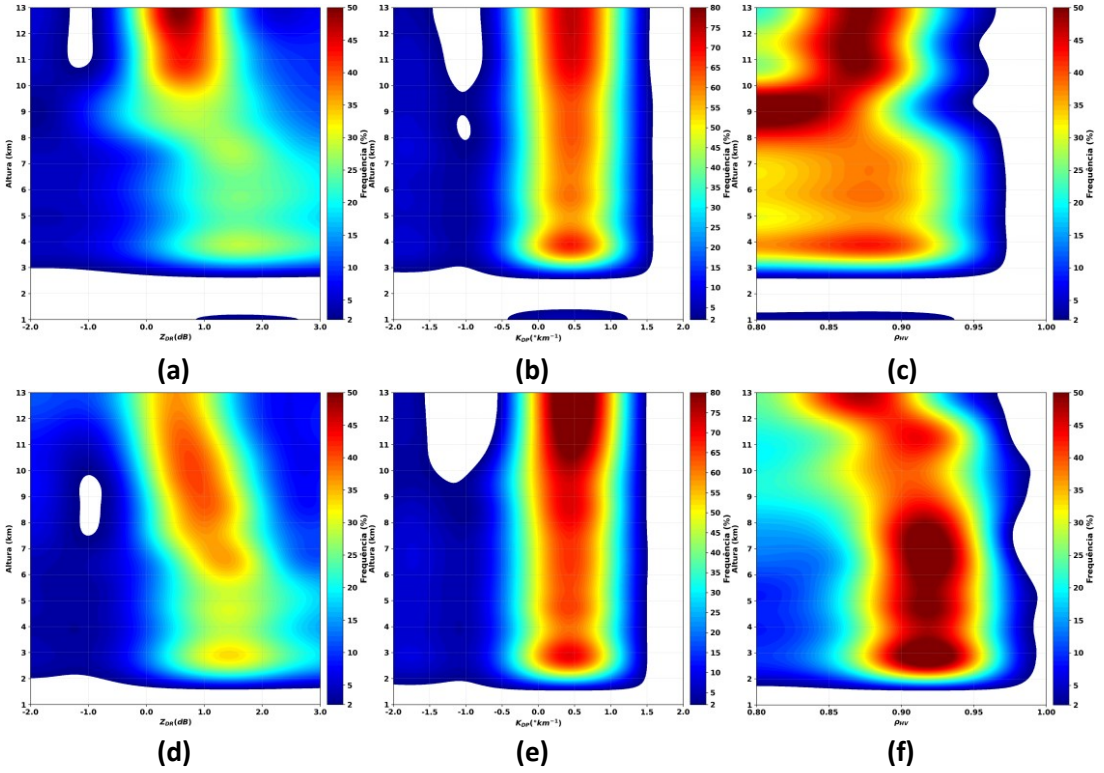
Figura 15 - CFAD da refletividade do radar 5 minutos antes do pico de descargas atmosféricas (20:10 UTC), durante (20:15 UTC) e 5 minutos depois (20:20 UTC): (a), (b) e (c) correspondem a área 1 e (d), (e) e (f) correspondem a área 2.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Conforme descrito anteriormente sobre a similaridade dos contornos de frequências da refletividade horizontal em baixos níveis (abaixo de 5 km) entre a área de baixa atividade elétrica do dia 16/03 com a área de alta atividade do dia 24/03, os contornos das frequências das variáveis polarimétricas do dia em questão (Figura 16) apresentaram comportamentos distintos, onde é possível perceber que as frequências das variáveis acima do nível de 7 km foram diferentes, como é o caso da variável ZDR, em que a partir deste nível os valores tendem a ser mais baixos em ambos dias, porém, as frequências dos valores negativos foram maiores no dia 24/03, indicando maior concentração de gelo orientados verticalmente, comportamento ocorridos nas três tempestades.

Figura 16 - CFADs das variáveis polarimétricas ZDR, KDP e RHOHV, respectivamente, entre os tempos 20:10 até 20:20 para a área de maior atividade elétrica (a-c) e menor atividade elétrica (d-f).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho compreende o primeiro estudo de tempestades severas utilizando dados do radar polarimétrico instalado no leste da Amazônia brasileira, mais especificamente na região da Serra dos Carajás (PA). O objetivo principal do estudo foi avaliar a estrutura vertical das tempestades a partir do radar meteorológico e relacionar os perfis das variáveis polarimétricas com a ocorrência de relâmpagos na região.

O levantamento das tempestades elétricas destacou três eventos. Estas tempestades registraram aproximadamente 13.000 a 17.000 descargas atmosféricas e ocorreram nos dias 16 e 24 de março/2021 e 13 de abril/2021. Os resultados sugerem que as tempestades foram geradas principalmente pelo aquecimento diurno, que associado a elevada umidade do ar, típica da região favoreceram o desenvolvimento de nuvens de tempestades com grande atividade elétrica.

Em relação aos posicionamentos das regiões de atividades elétricas foi notado que as maiores incidência ocorreram antes de atingirem as serras (dias 13/04 e 24/03), onde os

sistemas se formaram mais afastados das mesmas, e as menores atividades ocorreram entre as serras (13/04 e 24/03), onde foi possível observar os surgimentos dos sistemas eletrificados. O resultado aqui obtido mostra a hipótese de que os sistemas que se formam nesta região não se desenvolvem tanto, podendo estar relacionados com as variáveis de temperatura e pressão em superfície, que sofrem influência das serras em comparação com as áreas mais afastadas e com o solo mais exposto (regiões onde se formaram os sistemas de maiores atividades elétricas em todos os casos). Entretanto, tal hipótese precisa ser investiga em trabalhos futuros.

De acordo com os perfis das curvas de frequências das variáveis polarimétricas aqui mostrados, foi possível identificar padrões entre áreas de altas e baixas atividades elétricas também. As altas atividades elétricas apresentaram aumentos das refletividades entre 30 e 35 dBZ a partir de 7 km de altura (5 minutos antes e no momento do pico das descargas), o que indica maior produção de cristais de gelo e maior disponibilidades de gotas super-resfriadas em níveis mais altos da nuvem, ingredientes indispensáveis no processo de separação de cargas, cujos principais fatores que favoreceram este comportamento foram os movimentos verticais mais intensos dentro da nuvem. Para as áreas de menor atividade elétrica, estes valores de refletividade decaíram mais rapidamente, mostrando uma formação de cristais de gelo menor e com menor disponibilidade de gotas super-resfriadas.

As variáveis ZDR e KDP apresentaram maiores frequências de valores negativos a partir de 8 km (acima do nível da isoterma de 0°C) nas áreas de maior atividade elétrica, o que indica cristais de gelo orientados na vertical devido ao campo elétrico mais intenso. Por outro lado, nas áreas de menor atividade elétrica, as frequências dos valores negativos dessas variáveis polarimétricas foram menores, sugerindo campos elétricos mais fracos.

Portanto, este estudo apresentou indícios positivos da relação entre a incidência de descargas atmosféricas e dados de radar meteorológico, os quais podem servir de embasamento científico para melhorar o sistema de *nowcasting* na cadeia de mineração, além de fornecer fundamentos teóricos para o desenvolvimento um sistema de alertas de descargas atmosféricas, no âmbito do projeto LEWAIS, em vista da proteção de trabalhadores e equipamentos expostos a céu aberto.

Diante do que foi mostrado neste manuscrito, ressalta-se a necessidade de mais estudos sobre a relação entre descargas atmosféricas e o uso das variáveis do radar

polarimétrico de Serra dos Carajás-PA como indicador de atividade elétrica atmosférica para a região.

REFERÊNCIAS

ALVES, Marcos A. *et al.* Lightning Warning Prediction with Multi-source Data. In: 36TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP). **Anais**, Cape Town-South Africa, p. 349-354. IEEE, 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942488

CARVALHO, Leila M.V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2377-2394, 2002a. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2

CARVALHO, Leila M.V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108, 2004.

COHEN, Julia C.P.; SILVA DIAS, Maria Assunção; NOBRE, Carlos Afonso. Enviromental conditions associated with amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**. v. 123, p. 3163-3174, 1995. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2

DOS SANTOS, Ana Paula P. *et al.* Climatic Projections of Lightning in Southeastern Brazil Using CMIP5 Models in RCP's Scenarios 4.5 and 8.5. **American Journal of Climate Change**, v. 6, n. 03, p. 539, 2017. DOI: https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.63027

HONDL, Kurt D.; EILTS, Michael D. Doppler Radar Signatures of Developing Thunderstorms and Their Potential to Indicate the Onset of Cloud-to-Ground Lightning. **Monthly Weather Review**. v. 122, p. 1818-1836, 1994. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1818:DRSODT>2.0.CO;2

KARUNARATHNA, Nadeeka *et al.* Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 12, p. 6565-6591, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/2017JD026566

KODAMA, Yasumasa. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. Ser. II, v. 70(4), p. 813-836, 1992. DOI: https://doi.org/10.2151/jmsj1965.70.4_813

LIEBMANN, Brant *et al.* Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1977–1991, 1999. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1877:SCVOSA>2.0.CO;2

LIU, Dongxia *et al.* Evolution of the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing. **Advances in Atmospheric Sciences**., 28, 866–878, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s00376-010-0001-8

MATTOS, Enrique V. *et al.* Polarimetric radar characteristics of storms with and without lightning activity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 23, p. 14,201-14,220, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/2016JD025142

METZGER, Eric; NUSS, Wendell A. The relationship between total cloud lightning behavior and radar-derived thunderstorm structure. **Weather and Forecasting**, v. 28, n. 1, p. 237-253, 2013. DOI: https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00157.1

ODA, Paula S.S., *et al.* An initial assessment of the distribution of total Flash Rate Density (FRD) in Brazil from GOES-16 Geostationary Lightning Mapper (GLM) observations. **Atmospheric Research**, v. 270, p. 106081. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106081

PINTO JÚNIOR, Osmar; PINTO, Iara R.C.A. BrasilDATDataset: Combining data from different lightning locating systems to obtain more precise lightning information. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING DETECTION, Florida, USA. 2018.

PINTO JÚNIOR, Osmar; PINTO, Iara R.C.A. **Brasil campeão mundial de raios**. Artliber, 2021.

SATYAMURTI, Prakki; NOBRE, Carlos A.; SILVA DIAS, Pedro L. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Eds., American Meteorological Society, p. 119–139, 1998.

SHRESTHA, Yunish *et al.* Lightning flash rate nowcasting based on polarimetric radar data and machine learning. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 17, p. 6762-6780, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1933243

SOUZA-FILHO, Pedro W.M. *et al.* Land-use intensity of official mineral extraction in the Amazon region: Linking economic and spatial data. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 4, p. 1706-1717, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.3810

SILVA JÚNIOR, Renato O. *et al.* Estimativa de precipitação e vazões médias para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p. 1638-1654, 2017. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v.10.5.p1638-1654

SILVA, Marcio S. *et al.* Comparison of sediment rating curves and sediment yield in subbasins of the Itacaiúnas River Watershed, Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, 2021.

UTSAV, Bhowmik. *et al.* Relationship between convective storm properties and lightning over the Western Ghats. **Earth and Space Science**, v. 9, n. 9, p. e2022EA002232, 2022. DOI: https://doi.org/10.1029/2022EA002232

UVO, Cintia R.B.; NOBRE, Carlos Afonso. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. **Climanalise**, Vol. 4, número 07, 34 – 40, 1989.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey** (Vol. 92). Elsevier. 2006.

WANG, Jun *et al.* Nowcasting cloud-to-ground lightning over Nanjing area using S-band dual-polarization Doppler radar. **Atmospheric Research**, v. 178, p. 55-64, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.007

YUTER, Sandra E.; HOUZE JR, Robert A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 7, p. 1941-1963, 1995. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<1941:TDKAME>2.0.CO;2