

**ESTUDO DA INCIDÊNCIA DE NUVENS CBS NO CENTRO-OESTE
BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO DECENAL (2013-2023) A PARTIR DAS
CARTAS SIGWX PROG****Volnei Gabriel Zoboli¹**
Tammyse Araújo da Silva²**RESUMO**

As nuvens cumulonimbus (CB) têm grande desenvolvimento vertical, formam mau tempo e oferecem riscos ao voo, ocasionando, de efeito, problemas como desvios e atrasos. Partindo dessa problemática, esse estudo teve como objetivo examinar a ocorrência decenal de CBs na região Centro-Oeste brasileira com o intuito de identificar áreas de maior incidência do fenômeno. Para isso, adotou-se uma metodologia de natureza exploratória e qualitativa, apoiada em procedimentos documental e bibliográfico. Assim, os documentos analisados foram cartas SIGWX PROG brasileiras e norte-americanas das 18 UTC. O período de estudo compreendeu 1 de janeiro de 2013 a 30 de junho de 2023, e a área selecionada foi dividida em quatro quadrantes. Com a pesquisa, identificou-se o Quadrante 1 (com apenas uma aerovia inferior) como o mais afetado por CBs. Fazem parte desse quadrante os aeródromos SDH2, SWIY, SWNZ, SDPH, SWUA, SDOV, SWXE, SJUR e SNGV. Constatou-se, ainda, que as CBs apresentaram média altimétrica de 50.000 pés e que a maior frequência anual na região ocorreu no verão. Assim, o estudo conclui que os voos de aeronaves mais leves, principalmente os conduzidos no Quadrante 1, estão sujeitos aos riscos associados às CBs e trovoadas, especialmente nos meses de novembro, dezembro e janeiro. Por esta razão, fica evidente a necessidade do uso de radar meteorológico, do planejamento de voo eficiente e do adiamento do voo, em alguns casos, quando se voa naquela região. Como sugestão, rotas alternativas precisam ser pensadas para operações aéreas nas regiões mais afetadas, na intenção de proporcionar desvios seguros e eficientes.

Palavras-chave: Nuvens Cumulonimbus. Região Centro-Oeste Brasileira. Mapeamento. Redemet.

¹ Graduado em Ciências Aeronáuticas, PUC/GO. Piloto privado. Inglês ICAO nível 5. E-mail: gabrielzoboli@hotmail.com

² Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica de Goiás. Graduada em Ciências Aeronáuticas pela UnisulVirtual. Professora da Escola Politécnica e de Artes no curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. EC-PREV pelo CENIPA. Credenciada no SGSO pela ANAC e pela INFRAERO. Treinamento de CRM e alta performance pela FCT. E-mail: tammyse@hotmail.com / tammyse@pucgoias.edu.br

STUDY OF THE INCIDENCE OF CBS CLOUDS IN THE BRAZILIAN MIDWEST: A DECADE-LONG ASSESSMENT (2013-2023) BASED ON SIGWX PROG CHARTS

ABSTRACT

Cumulonimbus clouds (CB) have significant vertical development, create adverse weather conditions, and pose risks to aviation, resulting in issues such as diversions and delays. Building upon this problem, the objective of this study was to examine the decadal occurrence of CBs in the Brazilian Midwest region to identify areas with a higher incidence of the phenomenon. To achieve this, an exploratory and qualitative methodology was adopted, supported by documentary and bibliographic procedures. The analyzed documents included Brazilian and North American SIGWX PROG charts at 18 UTC. The study period covered January 1, 2013, to June 30, 2023, and the selected area was divided into four quadrants. The research revealed that Quadrant 1 (with only one lower airway) was the most affected by CBs. Aerodromes SDH2, SWIY, SWNZ, SDPH, SWUA, SDOV, SWXE, SJUR, and SNGV are part of this quadrant. It was also observed that CBs had an average altimetric height of 50,000 feet, and the highest annual frequency in the region occurred in the summer. Consequently, the study concludes that flights of lighter aircraft, especially those operated in Quadrant 1, are subject to risks associated with CBs and thunderstorms, particularly in the months of November, December, and January. Therefore, the need for the use of meteorological radar, efficient flight planning, and, in some cases, flight postponement in that region becomes evident. As a suggestion, alternative routes need to be considered for air operations in the most affected regions to provide safe and efficient diversions.

Keywords: *Cumulonimbus clouds. Brazilian Midwest Region. Mapping. Redemet.*

1 INTRODUÇÃO

As CBs são nuvens cumuliformes que se desenvolvem verticalmente pela agitação convectiva atmosférica. Elas estão regularmente relacionadas às condições meteorológicas adversas e representam riscos para aeronaves nas vizinhanças, devido às tempestades e fenômenos associados, como fortes turbulências e chuvas intensas (WMO, 2018 *apud* Rais *et al.*, 2020; NWS, s.d.; Harding, 2011). Ao considerar esse cenário, a presente pesquisa objetiva delinear e estudar a ocorrência de nuvens CB em um espaço circunscrito do planalto central do Brasil, o que é justificado pelos riscos que essas nuvens apresentam ao voo. O estudo é relevante à medida que, segundo Peck (2015) *apud* Rais *et al.*, (2020), a trovoada gerada por CBs é apontada como um dos principais fatores que geram atrasos de decolagens de aeronaves.

Assim, a pesquisa, de natureza exploratória, analisa as ocorrências de nuvens CB em parte do Centro-Oeste brasileiro nos últimos 10 anos, usando cartas SIGWX PROG disponíveis na Redemet. De natureza quantitativa, os dados coletados e tratados são expostos por meio de tabelas e gráficos. A revisão bibliográfica envolveu fontes como Google Acadêmico e livros especializados, enquanto a busca documental concentrou-se nos sites do DECEA e da Redemet.

Estruturada em quatro seções, além desta que a introduz, a pesquisa inicia-se com uma revisão teórica sobre o comportamento das nuvens CBs, seus fenômenos correlatos, a influência no voo, os procedimentos dos pilotos ao identificarem esses associados e as cartas de rota (ENRC) na navegação aérea. A segunda seção apresenta os procedimentos metodológicos. A terceira demonstra e explica os resultados. Por fim, as considerações finais são tecidas.

Ao término, os resultados devem fornecer informações úteis, ao identificar áreas e períodos do ano mais afetados pelas nuvens CBs para parte da região Centro-Oeste brasileira.

2 REVISÃO TEÓRICA

As CBs surgem da instabilidade atmosférica, que resulta do processo convectivo¹ em nuvens cumuliformes, com topos acima de 12.000 metros (Ferreira, 2006; Putra; Lursinsap, 2014). Essas nuvens acarretam fenômenos como trovoadas², tornados³ e trombas d'água⁴ (Harding, 2011; Daniel, 2022). Na aviação, estas condições representam graves ameaças, causando atrasos dos voos, desorientação para pilotos, turbulências e acidentes, principalmente durante cruzeiro e descida (ANAC, 2021; Mazon *et al.*, 2017 *apud* Rais *et al.*, 2020). Formações de gelo, raios e *windshear*⁵ resultantes dessas nuvens podem complicar sistemas e estruturas de aeronaves (Barros; Balero, 2012; Cabral, 2006 *apud* Barros; Balero, 2012).

Para prevenir riscos, pilotos adotam medidas como o planejamento meteorológico de voo com desvios para evitar áreas com CBs e a escolha de aeródromos mais seguros (Bianchini, 2016; ANAC, 2017). O radar meteorológico a bordo é instrumento crucial para detecção e desvio nessas condições (Costa; Silva, 2016). Contudo, nem sempre esse planejamento é tido como eficiente, demandando uma análise meteorológica mais detalhada e aprofundada, o que contempla consultas ao SIGMET, ao AIRMET, ao GAMET, entre outros informes disponíveis na REDEMET, e a imagens de satélite, sendo esta análise um dos enfoques deste estudo.

2.1 A DINÂMICA DAS NUVENS CBS: FORMAÇÃO E FENÔMENOS ASSOCIADOS

¹ O processo convectivo ocorre quando áreas de um líquido ou gás estão mais frias ou mais quentes que as que os cerca. Essas diferenças de temperaturas fazem essas áreas se elevarem (se estiverem mais quentes) ou descerem (se estiverem mais frias) (MetOffice, s.d.[a]).

² As trovoadas também são reconhecidas como tempestades.

³ Tornados são massas giratórias de ar com alto poder destrutivo que colidem com a superfície terrestre, frequentemente associados a nuvens CBs. Em raras ocasiões, podem se formar na base de nuvens cumulus. Também conhecidos como ciclones, alguns podem se manifestar como funis de condensação emanando da base de uma nuvem CB (Daniel, 2022).

⁴ Trombas d'água são tornados que se originam sobre a água, surgindo da mesma maneira que tornados ou sendo tornados que atravessam a água (Daniel, 2022).

⁵ Windshear é a mudança repentina e drástica na velocidade e/ou direção do vento em um curto espaço de tempo, podendo submeter a aeronave à violentas correntes de ar ascendentes e descendentes (Bianchini, 2017).

Nuvens cumuliformes se formam em condições atmosféricas instáveis (o ar quente, menos denso, sobe; e o ar frio, mais denso, desce) resultando em desenvolvimento vertical. Originadas pelo processo convectivo, assumem formato irregular, semelhante a imensos tufo de algodão. Com a instabilidade atmosférica, o movimento ascendente rápido propicia desenvolvimento vertical significativo, gerando a nuvem cumulonimbus. Quando as condições favorecem o transporte de energia para um ponto, uma corrente convectiva leva essa energia a altitudes mais elevadas. Essa convergência afeta o vapor de água, formando nuvens que evoluem para grandes cumulus e, subseqüentemente, para nuvens CB (Ferreira, 2006).

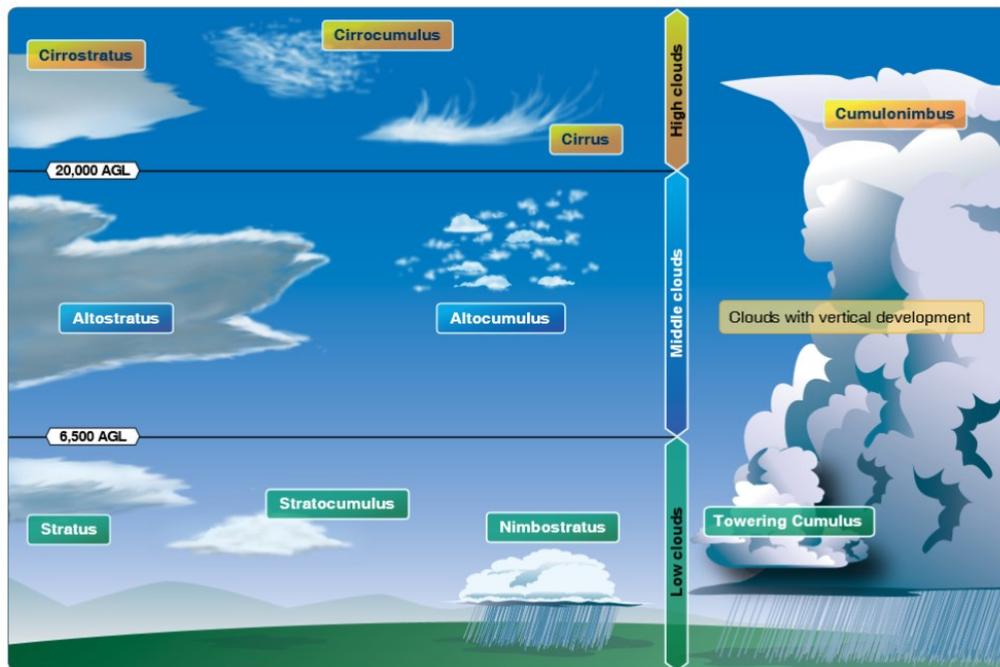
Sobre as características da CB, ela tem uma base escura, geralmente medindo até 300 metros acima da superfície, e seu topo pode ultrapassar 12.000 metros (39.000 pés) (Putra; Lursinsap, 2014). Essa nuvem, uma cumulus bem desenvolvida com topo cirroso, é nomeada "nimbus"⁶ devido à forte precipitação. Robusta e densa, assume dimensão vertical em forma montanhosa ou de torre. A região do topo é lisa, fibrosa e pode desenvolver bigorna ou pluma. Abaixo da CB, formam-se nuvens baixas, esgarçadas, associadas ou não, com precipitações intensas (Souza, 2019). A Figura 1 compara visualmente tipos de nuvens, destacando aparências e alturas de base.

Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697



⁶ Nimbus significa tempestade (Brandão, s. d.).

Figura 1 – Tipos básicos de nuvens



Fonte: FAA, 2016.

Ao observar a Figura 1, evidencia-se a grandiosidade da CB em relação a outras nuvens, tanto em termos de desenvolvimento vertical quanto de densidade. A solidez da CB viabiliza a ocorrência de um fenômeno exclusivo dessa nuvem, a trovoada. Bianchini (2017) resume a trovoada como conjunto de fenômenos (gelo, pancada⁷ de chuva, turbulência, relâmpagos, entre outros) que ocorrem na CB.

A trovoada passa por três estágios diferentes: cumulus, maturidade e dissipação. O primeiro, chamado de grande cumulus, inicia-se quando a nuvem é visível e as correntes convectivas começam. Essas nuvens são formadas apenas por vapor de água, que sobe devido a essas correntes, condensando e formando a nuvem (Harding, 2011). Nesta fase, a turbulência é ascendente e, normalmente, não há precipitação (Bianchini, 2017).

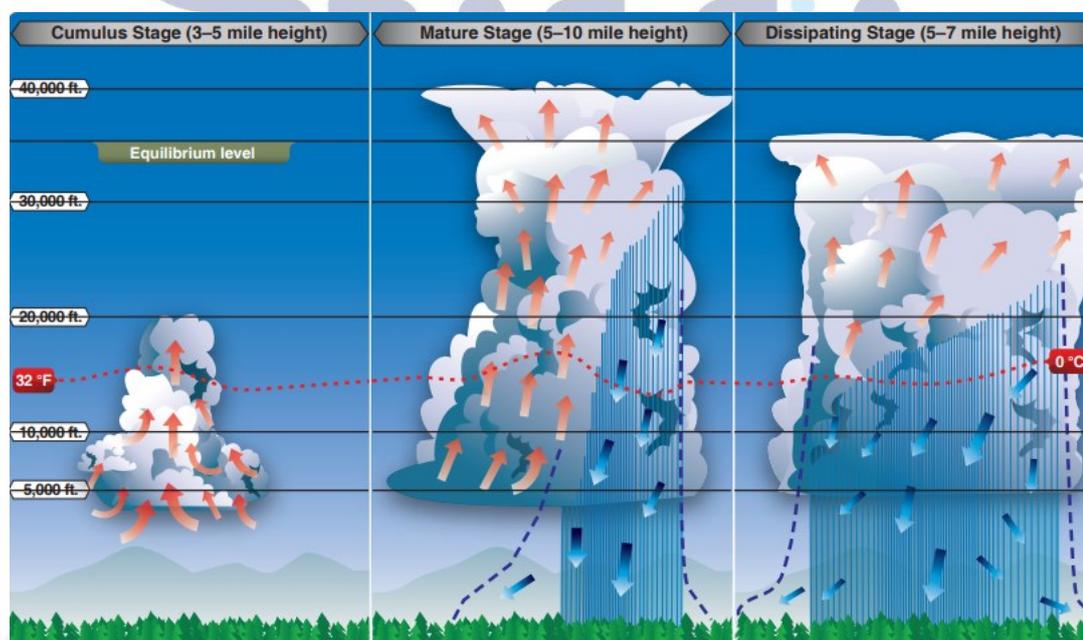
No estágio de maturidade das trovoadas, a precipitação líquida da nuvem CB começa. Esse estágio é caracterizado pela presença de água, água "super-resfriada" e gelo. As correntes ascendentes e descendentes internas potencializam-se, dando origem a descargas elétricas ou raios (Harding, 2011).

⁷ As pancadas são um tipo de precipitação que normalmente ocorrem de nuvens isoladas, caracterizadas por uma intermitência e por ser intensas ou não (MetOffice, s.d.[b]).

Esse estágio é o mais devastador da trovoada, no qual a presença de correntes ascendentes e descendentes geram forte turbulência dentro e próximo à nuvem. Abaixo dela, o ar que desce aumenta os ventos superficiais e diminui a temperatura (FAA, 2016). Além disso, pedras de gelo (granizo ou saraiva) se encontram tanto no interior da nuvem quanto são arremessadas para fora dela, juntamente com os ventos de rajadas e os relâmpagos. Nesta fase, o topo da nuvem pode alcançar 50.000 pés nos trópicos (Bianchini, 2017).

Uma vez que o movimento vertical próximo ao topo da nuvem diminui, seu topo se espalha e assume a forma de uma bigorna. Neste ponto, a tempestade entra no estágio de dissipação. A dissipação é quando as correntes descendentes se espalham e substituem as correntes ascendentes necessárias que sustentavam a tempestade (FAA, 2016). A Figura 2 ilustra os três estágios de uma trovoada.

Figura 2 – Estágios da trovoada



Fonte: FAA, 2016.

Observa-se, na Figura 2, o maior desenvolvimento vertical no segundo estágio, o de maturidade. Além disso, o equilíbrio entre correntes ascendentes e descendentes torna-se evidente nessa fase. Segundo a Federal Aviation Administration (FAA, 2016), os três ciclos da trovoada podem durar entre uma e

duas horas e dependem das condições para sua formação (massa de ar associada, latitude e período do ano). Na mesma linha, Bianchini (2017) também associa o tempo do ciclo da trovoada a diferentes fatores, porém, destaca que normalmente a duração da fase de maturidade pode ser entre 15 e 30 minutos.

2.2 A INFLUÊNCIA DAS CBS E TROVOADAS ASSOCIADAS SOBRE O VOO E PRÁTICAS RECOMENDÁVEIS

Um dos mais significativos impactos dos fenômenos associados às nuvens CBs, além dos relacionados à indústria e a outros fatores do dia a dia das pessoas, reside no perigo que representam para as operações aéreas (Putra; Lursinsap, 2014). Voar sob tempestades expõe as aeronaves a chuva intensa, gelo, raios e turbulência violenta (FAA, 2016). Além desses fenômenos, elas também são responsáveis por parte dos atrasos na decolagem de aeronaves (Peck, 2015 citado em Rais *et al.*, 2020).

Ao se aproximarem da trovoada, os pilotos enfrentam desorientação situacional devido às oscilações da pressão atmosférica, o que torna as leituras altimétricas pouco confiáveis. Já dentro da tempestade, a densa nebulosidade da CB prejudica ainda as referências visuais do piloto, o que também o leva à desorientação espacial (Barros; Balero, 2012). Além da desorientação espacial, as turbulências geradas por estas nuvens são relevantes para a segurança, já que dados de ocorrências aeronáuticas apontam a participação de turbulência como uma de suas causas, sobretudo nas fases de cruzeiro e descida, segundo Mazon *et al.*, (2017) *apud* Rais *et al.*, (2020).

A nuvem CB potencialmente produz turbulências severas (WMO, 2018 *apud* Rais *et al.*, 2020), cuja intensidade pode variar entre 1.500 e 3.000 metros de altura, podendo estender-se até o topo da nuvem, o que prejudica aeronaves de pequeno porte, causando-lhes inclusive danos estruturais (Cabral, 2006 *apud* Barros; Balero, 2012).

Os raios, outro fenômeno associado às trovoadas, também podem impactar aeronaves em voo. Seus riscos estão relacionados a ignição do vapor de combustível dos motores, falhas em sistemas eletro/eletrônicos, danos

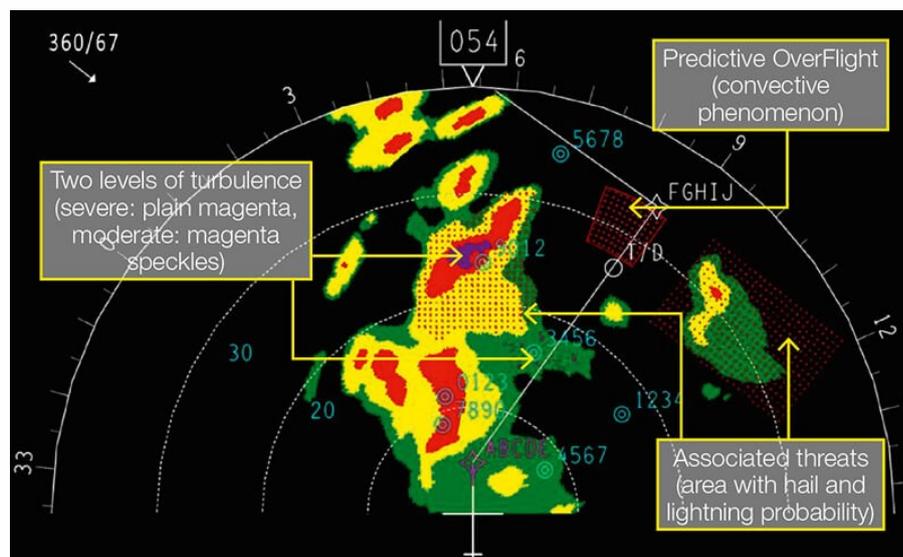
mecânicos, entre outros. Apesar dos riscos, a fuselagem, geralmente coberta com material metálico, atua como uma "Gaiola de Faraday", distribuindo igualmente a corrente da descarga elétrica e minimizando danos internos. Os descarregadores estáticos nas asas e estabilizadores contribuem para a eliminação de cargas elétricas na fuselagem (ANAC, 2021).

A possível formação de gelo em diferentes partes da aeronave e o risco de congelamento são outras complicações enfrentadas por pilotos que voam em tempestades. O depósito de gelo se dá sobre as hélices, superfícies de controle, asas e outras regiões críticas, o que compromete o desempenho da aeronave e a segurança do voo. Isto ocorre porque o gelo impacta a visibilidade, bloqueia entradas de ar, prejudica comunicações e sensores, simbolizando, portanto, ameaças substanciais à operação segura. A formação de gelo modifica o perfil aerodinâmico, aumentando o arrasto e diminuindo a eficiência das asas e, por isso, exige uma abordagem cuidadosa por parte dos pilotos quando voando em condições meteorológicas adversas (NWS, s. d.).

Para evitar ou mitigar os riscos ora apresentados, algumas aeronaves são dotadas de radar capaz de auxiliar os pilotos à medida que fornecem dados sobre as condições meteorológicas em tempo real. Este equipamento, segundo Ferber e Silva (2023), permite que a tripulação tome decisões baseadas em informações, efetue desvios e outros procedimentos voltados à segurança.

Assim, em voos sob condições de mau tempo, o radar meteorológico em aeronaves é decisivo para orientar pilotos. Este equipamento, ao fornecer dados sobre a constituição de formações, como chuva, granizo e neve, possibilita que os tripulantes evitem áreas críticas. Mais que isso, ele indica a intensidade das precipitações e permite ao piloto avaliar as turbulências a elas relacionadas, causadas pelas tempestades e variações de vento (Kayton; Fried, 1997 *apud* Costa; Silva, 2016). Essas informações, destacadas pelo *display* do radar, contribuem para tornar o voo mais confortável e seguro aos passageiros e tripulantes (Costa; Silva, 2016). A Figura 3 ilustra os dados apresentados na tela do radar.

Figura 3 – Radar meteorológico de bordo Rockwell Collins Multiscan WXR-2100 (equipado em aeronaves das famílias A320, A330 e A340)



Fonte: Airbus Safety First, 2016.

A Figura 3⁸ mostra os níveis de turbulência encontrada em trovoadas. Por exemplo, a turbulência severa é identificada pela cor magenta totalmente preenchida, enquanto a moderada aparece na mesma cor, porém, como manchas. O radar também exibe as áreas de fenômenos convectivos e as de probabilidades de raios e granizos (Airbus Safety First, 2016).

Vale acrescentar que a tripulação, ainda que voe em aeronave com radar embarcado, deve proceder ao planejamento de seu voo, o que inclui uma pesquisa meteorológica abrangente (Bianchini, 2017). Esse processo envolve uma análise minuciosa das condições meteorológicas nos aeródromos de origem, de destino e alternativo, por intermédio de boletins e previsões meteorológicas. O planejamento precede a decolagem, com a consulta de informações meteorológicas em fontes como Redemet⁹ (ANAC, 2017). Ao detectar trovoadas nas proximidades dos aeródromos ou ao longo da rota, o piloto deve planejar

⁸ Cores do radar: preta, verde, amarela, vermelha e magenta, indicando, respectivamente, chuvas muito leves ou ausência de retorno, chuvas com baixa intensidade, chuvas moderadas, chuvas fortes e precipitação severa. A cor vermelha, por exemplo, indica chuva com intensidade maior que 12-15 mm/h, com retornos fortes no radar meteorológico.

⁹ A Rede de Meteorologia (REDEMET) é o canal utilizado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) para fornecer dados meteorológicos para a aviação civil e militar (Decea, 2019).

estratégias para evitar ou minimizar os riscos (Bianchini, 2017). Esse cuidado é essencial para garantir voos seguros (ANAC, 2017).

Nos casos de aproximações com trovoadas, pilotos, com suporte da torre de controle e do radar meteorológico, devem avaliar a segurança do pouso. Se as condições não garantirem segurança ou melhoria, é responsabilidade do comandante dirigir-se a um aeródromo alternativo (Bianchini, 2017).

Conforme observado, são diferentes os fenômenos meteorológicos associados às CBs e evitar voar dentro dessas nuvens é, possivelmente, a melhor defesa (Putra; Lursinsap, 2014), já que seus topos elevados não permitem o sobrevoo. Para aviões leves, por exemplo, voar acima dessas tempestades é impossível. Como visto, as CBs podem atingir alturas impressionantes, de 50.000 a 60.000 pés, a depender da latitude. Uma prática recomendada é contornar trovoadas identificadas como severas ou com eco extremo no radar por pelo menos 20 milhas náuticas, pois o granizo pode cair a várias milhas das nuvens. Se contornar não for possível, a orientação é que aeronaves leves permaneçam em solo até que a tempestade passe (FAA, 2016).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa exploratória de abordagem quantitativa documenta a presença de nuvens CB no Centro-Oeste brasileiro entre 1 de janeiro de 2013 e 30 de junho de 2023 a partir das cartas SIGWX PROG. Os objetos do estudo foram definidos como nuvens CBs e região central do Brasil. A revisão bibliográfica se apoia em fontes sobre a temática hospedadas no Google Acadêmico e em livros especializados, assim como em órgãos governamentais, como o Decea, além da Redemet para a busca documental, por meio de acesso aos seus sites.

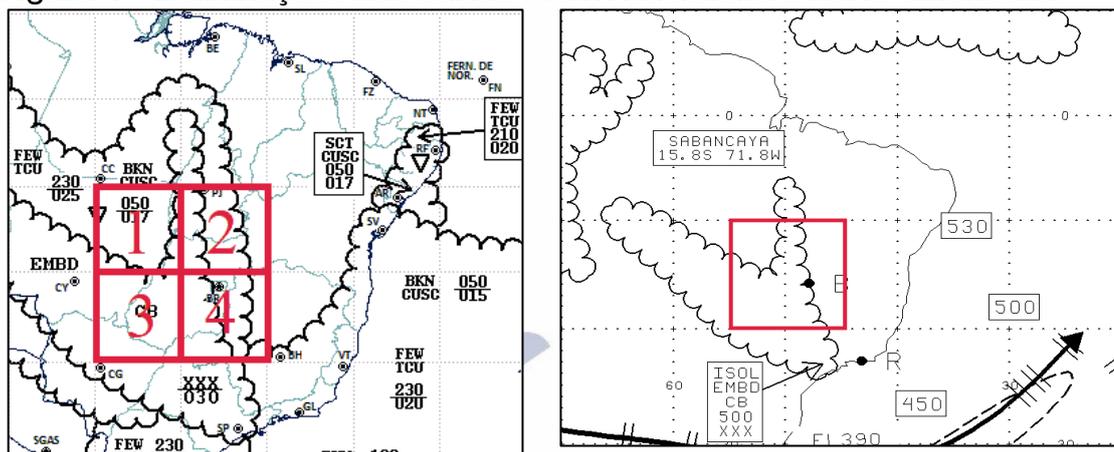
O mapeamento foi fundamentado nas cartas SIGWX PROG brasileiras (elaboradas pelo CIMAER¹⁰ e disponibilizadas pela REDEMET) e norte-americanas (pela WAFC¹¹). As cartas brasileiras abrangem o espaço vertical da superfície até

¹⁰ Comando Integrado de Meteorologia Aeronáutica.

¹¹ *World Area Forecast Centre*.

o FL250¹² e serviram para mapear as bases das CBs. As norte-americanas, de intervalo vertical entre o FL 250 e o FL630, foram utilizadas para registrar o topo. A área de observação foi definida pelas coordenadas 10°S 55°W, 20°S 55°W, 20°S 45°W e 10°S 45°W. Nas cartas brasileiras, a área dividiu-se em quadrantes 1, 2, 3 e 4. As delimitações de ambas são visíveis na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Delimitações nas cartas SIGWX brasileira e norte-americana



(a) Delimitação na carta brasileira.

Fonte: Redemet, 2023.

(b) Delimitação na carta norte-americana.

Fonte: Redemet, 2023.

O horário escolhido das cartas foi 18 horas UTC¹³ devido à intensa atividade convectiva nesse período. Observações das características das nuvens CBs (ISOL, OCNL, FRQ e EMBD)¹⁴ e dos níveis verticais de suas bases e topos¹⁵ (FL) foram realizadas. Para a análise das rotas e aeródromos afetados, essa delimitação foi aplicada às cartas de rota (ENRC)¹⁶, conforme mostrado na Figura 5.

¹² FL: *Flight Level*, ou nível de voo. Um FL250 significa que o nível de voo é de 25.000 pés de distância vertical.

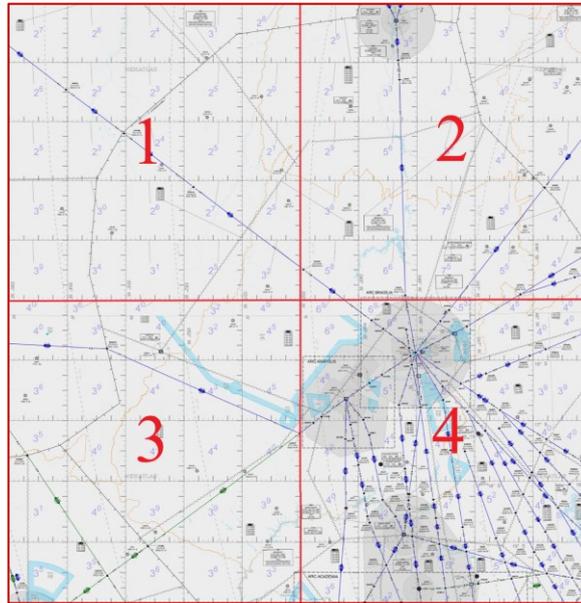
¹³ É a hora local do meridiano de Greenwich, adotada internacionalmente na aviação para evitar divergência decorrente do fato de a hora não ser a mesma em localidades diferentes (Santos, 2019).

¹⁴ ISOL: é a CB individual/isolada de outras nuvens; OCNL: é a CB bem separada de outras nuvens (ocasionais); FRQ: é a CB com pequena ou nenhuma separação (frequentes); EMBD: é a CB embutida em camadas de outras nuvens ou encobertas por névoa seca (embutidas).

¹⁵ Se a base está a 030, significa que a distância entre a superfície e a base da nuvem é de 3.000 pés. Um topo a 390, corresponde a uma distância vertical de 39.000 pés da superfície.

¹⁶ De acordo com Costa Filho (2019), as Cartas de Rota (ENRC – Enroute Chart, são responsáveis por proporcionar a facilidade na navegação ao longo de rotas ATS. Atualmente, existe no Brasil uma série de 18 cartas contendo as rotas ATS RNAV e convencionais. As cartas são divididas em superiores e inferiores. As superiores são classificadas em H1/H2, H3/H4, H5/H6, H7/H8 e H9. Já as inferiores são classificadas em L1/L2, L3/L4, L5/L6, L7/L8 e L9.

Figura 5 – Delimitação nas cartas ENRC L2, L5 e L6



Fonte: adaptada de Aisweb, 2023.

Examinar minuciosamente esses quadrantes nas ENRC é essencial para uma avaliação abrangente dos principais aeródromos impactados ao longo dos anos pelos fenômenos associados às nuvens CBs, sobretudo trovoadas. Os resultados levam à compreensão mais completa e detalhada das tendências meteorológicas e suas implicações na aviação e aeródromos.

4 RESULTADOS

Os resultados indicam o Quadrante 1 como o de maior frequência de nuvens CBs, recorrentes para os meses de novembro, dezembro e janeiro. Também apontam para a ocorrência dessas nuvens, em média, do FL 030 (média das bases) ao FL500 (média dos topos).

4.1 MAPEAMENTO DAS NUVENS CBS NA REGIÃO CENTRO-OESTE (2013-2023)

O mapeamento conduzido por meio das cartas SIGWX, selecionadas e examinadas para o período e horário escolhidos, permitiu a elaboração de tabelas mensais, como a Tabela 1, que exemplifica os dados para janeiro de 2013.

Tabela 1 – Resultado das ocorrências de CB no Centro-Oeste em janeiro de 2013

Dias	CB	Quadrante	FL da Base	FL do Topo
1	I-E e O-E	1/3/4 e 3	030 e 030	500 e 520
2	I-E e I-E	1/3/4 e 3	030 e 030	500 e 500
3	I-E, O-E e I-E	1/2, 2, e 3/4	030, 030 e 030	510, 520 e 490
4	I-E	1/2/3/4	035	480
5	I-E e O-E	1/2/3 e 3	030 e 025	530 e 530
6	I-E e I-E	1/2/3/4 e 3	030 e 030	500 e 480
7	I-E e I-E	1/2/3/4 e 3/4	030 e 030	480 e 480
8	I-E e I-E	1/2/3/4 e 3	030 e 030	460 e 460
9	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/3	035 e 035	480 e 500
10	I-E e I-E	1/2 e 1/3/4	030 e 030	480 e 480
11	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3	030 e 030	500 e 520
12	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3/4	030 e 030	500 e 520
13	I-E e O-E	1/3 e 1/3	035 e 035	500 e 520
14	I-E	1/3/4	030	450
15	I-E	1/2/3/4	030	480
16	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3/4	030 e 030	510 e 520
17	I-E e O-E	1/2/3/4 e 2/4	030 e 030	500 e 520
18	I-E	2	030	500
19	I-E, O-E e O-E	1/2/3/4, 3 e 2	030, 030 e 030	480, 530 e 530
20	I-E	1/2/3 e 4	030	500
21	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3/4	030 e 030	500 e 530
22	I-E e O-E	1/2 e 1/2/3/4	030 e 030	530 e 530
23	I-E	1/2/3 e 4	030	530
24	I-E	1/2 e 3	035	500
25	I-E e O-E	1/2/3/4 e 3	030 e 030	500 e 520
26	I-E e O-E	2/3/4 e 1/2/3	030 e 030	480 e 530
27	I-E	1/2/3/4	035	480
28	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3/4	030 e 035	530 e 530
29	F	1/2/3/4	035	500
30	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3	035 e 035	450 e 500
31	I-E e O-E	1/2/3/4 e 1/2/3/4	030 e 030	450 e 450
Total	55	-	-	-
Freq.	-	3	030	500

Legenda: I-E: CB Isolada e Embutida. O-E: CB Ocasional e Embutida. F: CB Frequente.

Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Essa tabela fornece detalhes sobre o tipo de nuvem CB (I-E, Isolado e Embutido; O-E, CB Ocasional e Embutido; F, CB Frequente), os quadrantes afetados (1, 2, 3 e 4, conforme Tabela 1), os níveis de voo correspondentes à base e ao topo das formações, o que proporciona uma compreensão mais completa da distribuição e características dessas nuvens ao longo do tempo.

Para ilustrar, a Tabela 1 descreve o primeiro dia de janeiro de 2013 (primeira linha) e indica ocorrências de CBs isoladas e embutidas (I-E) nos quadrantes 1, 3 e 4, entre 3.000 pés (FL030) e 50.000 pés (FL500). Nesse mesmo dia, também foram registradas CBs ocasionais e embutidas (O-E) no quadrante 3, variando de 3.000 pés (FL030) a 52.000 pés (FL520).

Em síntese, para o mês de janeiro documentou-se um total de 55 ocorrências de CBs. O Quadrante mais frequentemente afetado foi o 3, com 47 ocorrências, destacando-se pela sua maior incidência. A base mais recorrente dessas formações foi FL030 (mínimas registradas para o FL025 e máximas no FL035), o que indica uma consistência notável nesse nível altimétrico. Quanto aos topos, predominou o FL500 (mínimo 450 e máximo 530), o que revelou a elevada presença dessas nuvens em altitudes mais altas.

Seguindo o mesmo padrão, as tabelas mensais foram compiladas e, posteriormente, agrupadas por ano. A Tabela 2, a seguir, resume as ocorrências ao longo de 2013, com base nos dados mensais.

A Tabela 2 revela que em 2013 ocorreram 349 instâncias de nuvens do tipo CB na região, distribuídas entre 271 isoladas e embutidas, 77 ocasionais e embutidas e 1 frequente. Notavelmente, em 112 dias do mesmo ano, não foram registradas formações de CB na região. As altitudes das bases variaram de FL025 a FL040, com média em FL030, enquanto os topos oscilaram entre FL400 e FL560, com média em FL500.

Tabela 2 – Resultados do ano de 2013

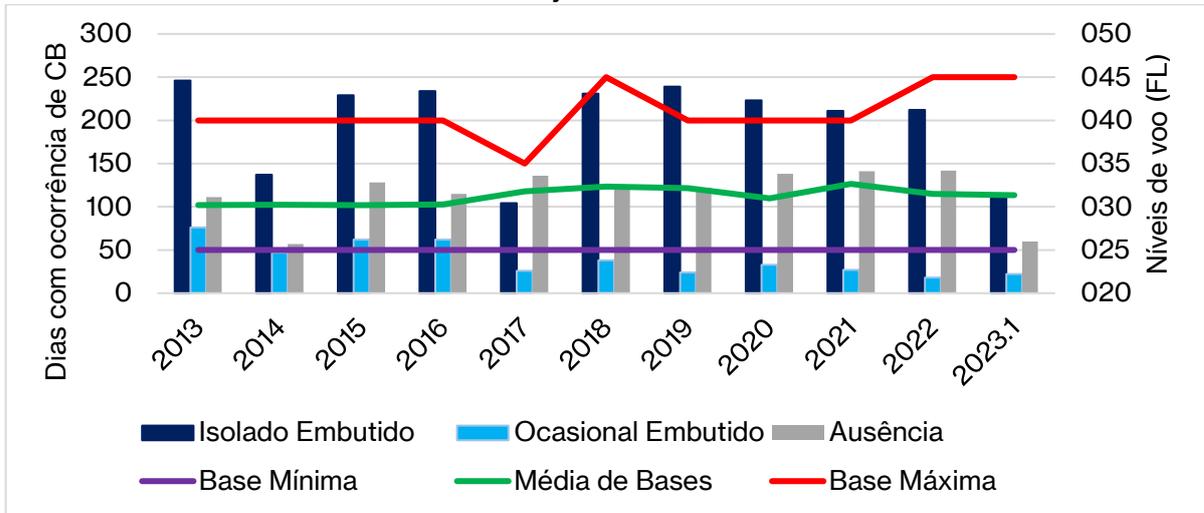
Mês	ISOL EMBD	OCNL EMBD	FRQ	CBs	A	Base Mín.	Base Máx.	Topo Mín.	Topo Máx.
1	36	18	1	55	0	025	035	420	530
2	29	12	0	41	0	025	035	480	560
3	33	10	0	43	0	025	040	410	540
4	29	6	0	35	3	030	035	460	560
5	15	0	0	15	17	025	035	420	530
6	12	0	0	12	19	025	035	420	550
7	2	0	0	2	29	030	035	460	500
8	0	0	0	0	31	-	-	-	-
9	19	0	0	19	12	025	035	400	520
10	30	5	0	35	1	025	035	430	530
11	34	7	0	41	0	025	035	430	530
12	32	19	0	51	0	025	035	450	550
Total	271	77	1	349	112	-	-	-	-

Legenda: A: Ausência de nuvens do tipo CB no dia.

Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Dos exemplos das Tabelas 1 e 2, catalogaram-se os meses de todos os anos, resultando em 126 tabelas mensais compiladas em 11 tabelas anuais. Importante notar que, nos anos de 2014 e 2017, a coleta de dados foi comprometida devido a uma falha no site da Redemet, que indisponibilizou as cartas entre 15/03 e 31/07, em 2014, e entre 01/01 e 25/04, em 2017. Como resultado, esses anos apresentam déficit em relação aos demais. Com base nos dados anuais, foram elaborados os Gráficos 1 e 2, a seguir.

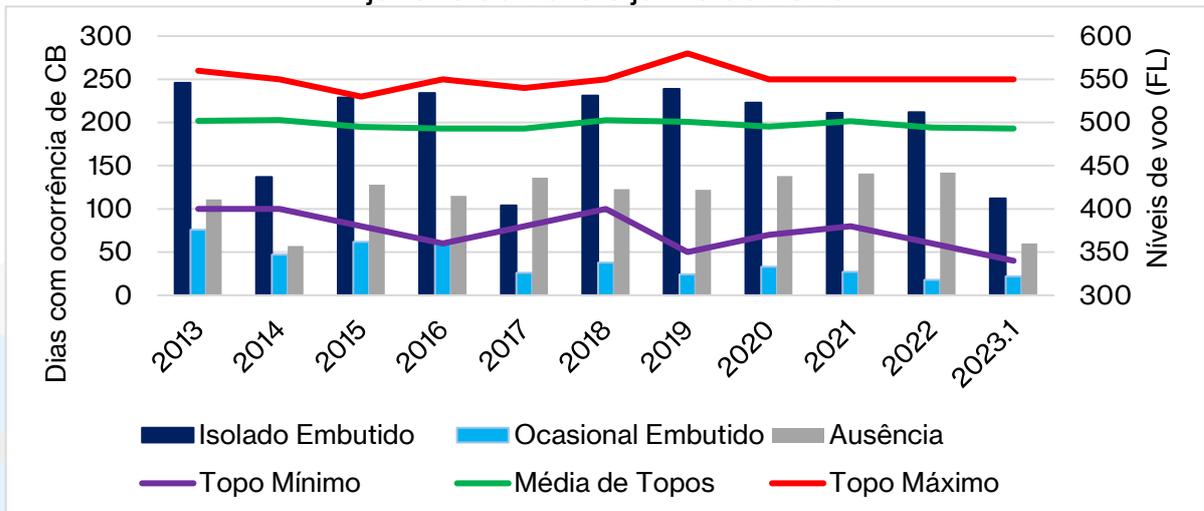
Gráfico 1 – Resultado (com FL das bases) da ocorrência de CBs entre janeiro de 2013 e junho de 2023



Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

No Gráfico 1, referente aos níveis de voo das bases, observa-se que a base mínima foi FL025 em todos os anos, enquanto a base máxima atingiu FL045 em 2018, 2022 e 2023, mantendo a média em torno de FL030. No Gráfico 2, que aborda os níveis de voo dos topos, o topo mínimo ocorreu em 2023 a FL340, e o máximo foi FL580 em 2019, com a média dos topos permanecendo em FL500 em todos os anos.

Gráfico 2 – Resultado (com FL dos topos) da ocorrência de CBs entre janeiro de 2013 e junho de 2023

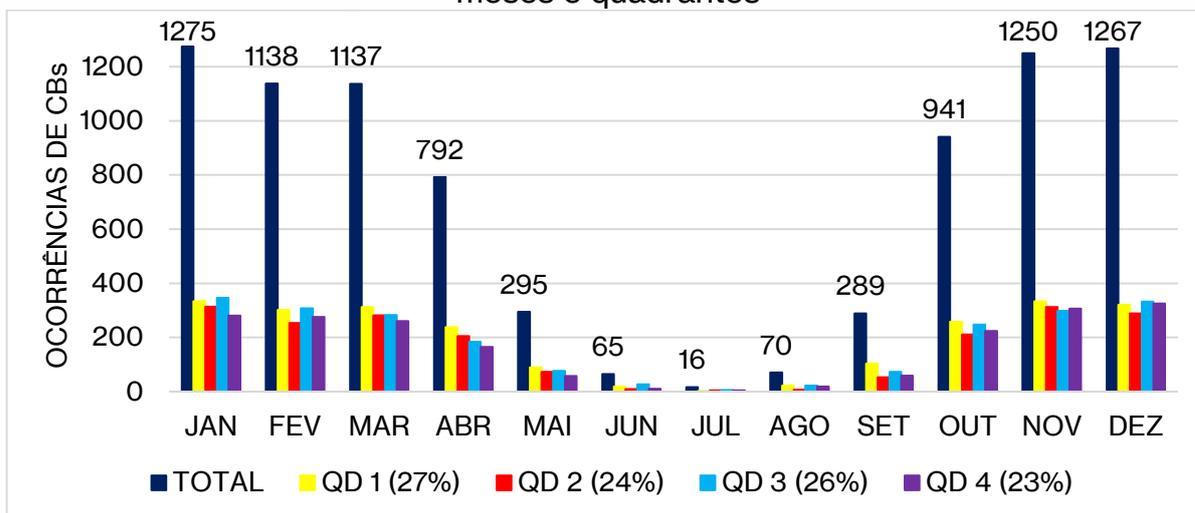


Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

Com base nos dados de ambos os gráficos, a média anual de ocorrências foi de 256 dias, com uma média de 123 dias sem eventos. Houve, ao longo do período analisado, 2.178 dias com ocorrências de CBs isolados embutidos e 435 dias com ocorrências de CBs ocasionais embutidos. O ano mais impactado foi 2013.

O Gráfico 3 foi desenvolvido para demonstrar as ocorrências ao longo dos meses e quadrantes afetados em todos os anos. Considerando não apenas os dias com ocorrências, mas a quantidade total ao longo do período, os números apresentam uma visão abrangente dos eventos.

Gráfico 3 – Resultado da ocorrência de CBs em todo o período, dividido por meses e quadrantes



Legenda: QD 1: Quadrante 1. QD 2: Quadrante 2. QD 3: Quadrante 3. QD 4: Quadrante 4.
Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

Conforme evidenciado no Gráfico 3, os meses com maior incidência de CB ao longo do período investigado foram janeiro, novembro e dezembro. Em relação aos quadrantes, os mais impactados foram o Quadrante 1, responsável por 27% das ocorrências, e o Quadrante 3, com 26% das ocorrências (Figura 5).

Como resultado, os aeródromos mais afetados pertencem ao Quadrante 1, que compreende Porto Alegre do Norte (SDH2), Santa Isabel do Morro (SWIY), Fazenda Jamaica (SWNZ), Fazenda Piratininga (SDPH), São Miguel do Araguaia

(SWUA), Mozarlândia (SDOV), PCH Paratinga II (SWXE), Fazenda Reunidas (SJUR) e Fazenda Tanguru (SNGV).

4.2 INTERPRETAÇÃO CRÍTICA DA OCORRÊNCIA DE CBS: CONSIDERAÇÕES SOBRE UMA DÉCADA (2013-2023) NA REGIÃO CENTRO-OESTE BRASILEIRA

Ferreira (2006), Putra e Lursinsap (2014) e a FAA (2016) ressaltaram o desenvolvimento vertical significativo das nuvens CB. Isto foi confirmado com os resultados da pesquisa que identificaram nas CBs analisadas uma extensão vertical de 50.000 pés, cerca de 15 quilômetros. Para aeronaves leves, enfrentar uma nuvem desse porte comumente impossibilita desvios abaixo ou acima. Segundo Putra e Lursinsap (2014), a única ação recomendada para esses casos é evitar voar em regiões de CBs e de trovoadas.

Por outro lado, caso o voo em mau tempo seja inevitável, um equipamento indispensável é o radar meteorológico. Nesse sentido, os resultados validam a relevância do emprego de radares a bordo durante voos em condições meteorológicas adversas, conforme sugerido por Costa e Silva (2016). O uso desse equipamento permite que pilotos detectem a presença de CBs mesmo em condições de visibilidade reduzida. Além disso, é viável identificar os fenômenos esperados dentro das nuvens visualizadas no radar, como apontado por Kayton e Fried (1997) citados por Costa e Silva (2016).

Todavia, as rotas ficam comprometidas com mau tempo em períodos específicos do ano. Isto é corroborado por Ferreira (2006), ao explicar que as CBs decorrem de condições atmosféricas instáveis, e esta instabilidade predomina nos meses de verão devido às intensas correntes convectivas causadas pelo calor. Sob esse prisma, o estudo confirmou maior incidência nos meses de novembro, dezembro e janeiro, período de verão para o hemisfério sul.

Ao voar nas regiões identificadas com maior incidência de CBs nos períodos especificados, é essencial que os pilotos adotem medidas preventivas. A primeira consiste no uso do radar meteorológico que, segundo Costa e Silva (2016), é uma importante ferramenta utilizada em prol de decisões precisas sobre a rota. A

segunda envolve o planejamento meteorológico adequado antes de todos os voos, preferencialmente optando por rotas livres de formações semelhantes, conforme recomendado por Bianchini (2017).

Outro aspecto avaliado é que, diante da maior incidência dessas formações no Quadrante 1, pilotos devem ficar atentos ao sobrevoar essa área em momentos críticos. A análise das cartas ENRC (Figura 5) revela apenas uma aerovia inferior nesse quadrante (AISWEB, 2023), exigindo avaliação de rotas alternativas em quadrantes menos impactados (2, 3 e 4) para evitar as CBs.

A FAA (2016) sugere que os pilotos devem manter uma distância mínima de 20 milhas náuticas do núcleo da CB. No entanto, em razão de existir apenas uma aerovia inferior no Quadrante 1, o que indica limitada disponibilidade de opções de rota, desvios substanciais podem não ser viáveis na região. Por isso, caso o voo envolva os aeródromos desse quadrante em períodos de mau tempo, a orientação de Bianchini (2017) é avaliar as condições meteorológicas de forma mais precisa, adiando decolagens ou optando por alternativas seguras ao chegar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco deste estudo se deteve nas nuvens Cumulonimbus (CBs), seus fenômenos associados e seu impacto na região Centro-Oeste brasileira. A pesquisa apresentou como objetivos centrais: distribuir essa região em quatro quadrantes, analisar as formações da CB entre 2013 e 2023 (com o apoio da SIGWX PROG) e identificar períodos e áreas com maior incidência.

Durante o estudo, foram identificadas características das nuvens CB, que compreenderam a formação em ar instável, sua considerável extensão vertical e fenômenos de risco para voos (chuva forte, gelo, turbulência). Meios de mitigação, como o uso de radares meteorológicos e planejamento eficiente de voos, também foram abordados.

Ao examinar o período decenal, apurou-se o Quadrante 1 da região estudada como o de maior incidência de nuvens CBs. Essas formações foram

recorrentes ao longo dos anos nos meses de novembro, dezembro e janeiro e alcançaram médias altimétricas de 50.000 pés.

Esses achados permitem concluir que os voos, sobretudo de aviões mais leves, para os aeródromos SDH2, SWIY, SWNZ, SDPH, SWUA, SDOV, SWXE, SJUR e SNGV apresentam potenciais riscos, em virtude da forte possibilidade de lidar com formação de CBs e trovadas, o que reforça a necessidade de se planejar adequadamente a rota, observando preventivamente alternativas seguras, ou mesmo de se adiar a operação aérea. Além disso, verifica-se a necessidade de utilização do radar meteorológico, especialmente no verão brasileiro, período propício à evolução de CBs na região Centro-Oeste.

Com base nos resultados, sugerem-se estudos sobre rotas alternativas para os voos conduzidos no Quadrante 1, pois as limitações de aerovias (apenas uma aerovia inferior nesse quadrante) foram evidenciadas. A investigação da ocorrência de nuvens CB nos quadrantes adjacentes também é sugerida, visando propor rotas alternativas para a aviação.

REFERÊNCIAS

AIRBUS SAFETY FIRST. **Optimum use of weather radar**. 2016. Disponível em: <https://safetyfirst.airbus.com/optimum-use-of-weather-radar/>. Acesso em: 30 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Meteorologia e planejamento de voo**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/assuntos-relacionados/meteorologia-e-o-planejamento-de-voo>. Acesso em: 30 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Trovoadas**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/condicoes-meteorologicas-adversas-para-o-voo/trovoadas#a09>. Acesso em: 31 ago. 2023.

AISWEB. **Cartas de rota (ENRC)**. 2023. Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas&p=rotas>. Acesso em: 29 out. 2023.

BARROS, J. R.; BALERO, J. C. DA S. A influência do clima e do tempo do Centro-Oeste do Brasil nas condições de voo na região. **Elisée – Revista de Geografia da UEG**, Goiânia, v. 1, n. 2, p. 25-49, jul./dez., 2012.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 5, p. 178-201, nov/dez. 2023.

BIANCHINI, D. **Meteorologia para pilotos**. São Paulo: Editora Bianch, 2017.

BRANDÃO, R. G. Dicionário de meteorologia. [S. l.]: [s.n.], [s.d.].

CABRAL, E. A Climatologia voltada às atividades aeronáuticas. *Revista Brasileira de Climatologia*, São Paulo, v. 1, 2005. In: BARROS, J. R.; BALERO, J. C. DA S. A influência do clima e do tempo do Centro-Oeste do Brasil nas condições de voo na região. **Elisée – Revista de Geografia da UEG**, Goiânia, v. 1, n. 2, p. 25-49, jul./dez., 2012.

COSTA FILHO, A. S. DA. **Refreshment de regulamento de tráfego aéreo**. São Paulo: Espaço Aéreo, 2019.

COSTA, M. V. DA.; SILVA, T. A. DA. A importância do radar meteorológico de bordo na prevenção de acidentes aeronáuticos da aviação geral. **Conexão Sipaer**, São José dos Campos, v. 7, n. 1, p. 72-81, 2016. Disponível em: <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/view/386/329>. Acesso em: 16 set. 2023.

DANIEL, R. Tornado: a brief introduction. **Journal of Climatology & Weather Forecasting**, Bruxelas, v. 10, Issue 12, p. 1-2, 2022. Disponível em: <https://www.iomcworld.com/open-access/tornado-a-brief-introduction.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **O que é a Redemet?** 2019. Disponível em: <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/o-que-e-a-redemet>. Acesso em: 20 set. 2023.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **FL – Nível de voo**. s.d. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/index.cfm?i=utilidades&p=glossario&single=2229>. Acesso em: 20 set. 2023.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Pilot's handbook of aeronautical knowledge. In: **Chapter 12: weather theory**. Washington: FAA, 2016. Disponível em: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/pilot_handbook.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

FERBER, B. M.; SILVA, T. A. da. Interpretação do radar meteorológico e a tomada de decisão: uma discussão acerca do conhecimento adquirido sobre meteorologia nos cursos de formação de piloto comercial no Brasil. **Revista Brasileira de Aviação Civil e Ciências Aeronáuticas**, [online], v. 3, n. 3, 151-180, 2023. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/158>. Acesso em: 10 out. 2023.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

HARDING, K. **Thunderstorm formation and aviation hazards**. Silver Spring: NOAA, 2011. Disponível em: <https://www.weather.gov/media/publications/front/11jul-front.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

KAYTON, M.; FRIED, W. R. Avionics navigation systems. 2nd. New York: Wiley, 1997. In: COSTA, M. V. DA.; SILVA, T. A. DA. A importância do radar meteorológico de bordo na prevenção de acidentes aeronáuticos da aviação geral. **Conexão Sipaer**, São José dos Campos, v. 7, n. 1, p. 72-81, 2016. Disponível em: <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/view/386/329>. Acesso em: 16 set. 2023.

MAZON, J.; ROJAS, J. I.; LOZANO, M.; PINO, D.; PRATS, X.; MIGLIETTA, M. M. Influence of meteorological phenomena on worldwide aircraft accidents, 1967–2010. *Met. Apps*, [S.l.], v. 25, p. 236-245, 2017. In: RAIS A. F.; SETIAWAN, F.; YUNITA, R.; MEINOVELIA, E.; SOENARDI; FADLI, M.; WIJAYANTO, B. Prediction of cumulonimbus (CB) cloud based on Integrated Forecast System (IFS) of European Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) in the Flight Information Region (FIR) of Jakarta and Ujung Pandang, **Journal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca**, Jakarta, v. 21, n. 2, p. 95-100, 2020. Disponível em: <https://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JSTMC/article/view/4100/3896>. Acesso em: 25 out. 2023.

METOFFICE. **What is convection?** s. d.[a.] Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/what-is-convection#:~:text=Convection%20is%20the%20rising%20motion,see%2C%20particularly%20within%20the%20air>. Acesso em: 16 set. 2023.

METOFFICE. **What is the difference between rain and showers?** s. d.[b]. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/rain/rain-and-showers>. Acesso em: 28 out. 2023.

NATIONAL WEATHER SERVICE (NWS). **Ice hazards**. (s. d.). Disponível em: https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/icing_stuff/icing/icing.htm. Acesso em: 31 ago. 2023.

PECK, L. The impacts of weather on aviation delays at O.R. Tambo International Airport, South Africa. 2015. Master Thesis (Master of Science in Geography) - University South Africa. In: RAIS A. F.; SETIAWAN, F.; YUNITA, R.; MEINOVELIA, E.; SOENARDI; FADLI, M.; WIJAYANTO, B. Prediction of cumulonimbus (CB) cloud based on Integrated Forecast System (IFS) of European Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) in the Flight Information Region (FIR) of Jakarta and

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 5, p. 178-201, nov/dez. 2023.

Ujung Pandang, **Journal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca**, Jakarta, v. 21, n. 2, p. 95-100, 2020. Disponível em: <https://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JSTMC/article/view/4100/3896>. Acesso em: 22 out. 2023.

PUTRA, A. W.; LURSINSAP, C. Cumulonimbus prediction using artificial neural network back propagation with radiosonde indices. *In: Seminar Nasional Penginderaan Jauh*, 2014. Disponível em: https://karya.brin.go.id/id/eprint/10873/1/Prosiding_Agie%20Wandala%20Putra_BMKG_2014.pdf. Acesso em: 7 set. 2023.

SANTOS, I. L. DO. **Navegação aérea descomplicada – 1ª parte**. Belo Horizonte: editora do autor, 2019.

SOUZA, W. B. **Meteorologia para aviação: piloto comercial**. Brasília: editora do autor, 2019.

REDEMET. **Cartas meteorológicas**. 2023. Disponível em: <https://www.redemet.aer.mil.br/>. Acesso em: 28 out. 2023.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Aviation Hazards**. Geneva: WMO, 2018. *In: RAIS A. F.; SETIAWAN, F.; YUNITA, R.; MEINOVELIA, E.; SOENARDI; FADLI, M.; WIJAYANTO, B.* Prediction of cumulonimbus (CB) cloud based on Integrated Forecast System (IFS) of European Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) in the Flight Information Region (FIR) of Jakarta and Ujung Pandang, **Journal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca**, Jakarta, v. 21, n. 2, p. 95-100, 2020. Disponível em: <https://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JSTMC/article/view/4100/3896>. Acesso em: 4 set. 2023.

ISSN 2763-7697