



**CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO DA TURBULÊNCIA
DE CÉU CLARO A PARTIR DE REGISTROS DE AERONAVES:
ANÁLISE DE DADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**

VERSÃO REDUZIDA

Por Ivan Bitar Fiuza de Mello

O autor é Piloto Privado de Avião, Meteorologista e Mestre em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde atuou no estudo da Turbulência de Céu Claro (CAT). Já proferiu palestras sobre temas ligados a impactos da turbulência na segurança de voo e ministrou aulas de Meteorologia Aeronáutica em Escolas Técnicas de Aviação Civil.

Novembro de 2017

1. INTRODUÇÃO

A turbulência de céu claro é conhecida, no meio aeronáutico, como um perigo invisível aos pilotos. O fenômeno se manifesta em grau elevado de imprevisibilidade e, assim, representa uma real ameaça, por não ser detectado pelos radares de bordo convencionais. Inúmeros incidentes aeronáuticos reportados durante décadas estão diretamente atribuídos à CAT. Segundo estatísticas da Federal Aviation Administration (FAA), inúmeros boletins e reportes sobre turbulências provenientes de aeronaves em voo, sobre todo o território americano, estão relacionados, em grande parte, à CAT.

2. A DEFINIÇÃO DE CAT

A CAT pode ser definida como um tipo de turbulência que ocorre em grandes altitudes sem a presença de nuvens ou atividade convectiva (MOLARIN, 2013). Pode estar associada a regiões próximas do núcleo de correntes de jato, áreas de inversão térmica próxima à tropopausa, encontro de camadas de ar com velocidades e deslocamentos distintos, ondas de montanhas e regiões de forte cisalhamento do vento em altitude.



Figura 1 – Nuvens formadas a partir de duas camadas de ar com velocidades e deslocamentos distintos.

Fonte: Adaptada de Brooks Martner, NOAA / ETL (2004)

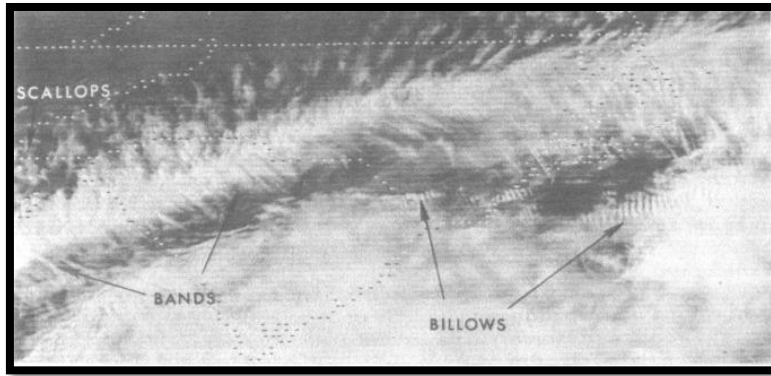


Figura 2 - Imagem do satélite GOES no canal do visível mostrando nuvens no formato de ondas (billows) e bandas de nuvens transversais (bands) com o objetivo de se analisar regiões de CAT.

Fonte: Adaptada de Ellrod (1989).

3. A TURBULÊNCIA DE CÉU CLARO NO BRASIL

Segundo alguns estudos e pesquisas relacionados à ocorrência da CAT no Brasil, destaca-se a presença da corrente de jato subtropical no país sobre os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, com maior frequência no período do inverno, quando ocorre a entrada de sistemas frontais mais intensos, provenientes da Argentina e do Chile.

Em alguns casos específicos de entrada de sistemas frontais de maior magnitude e intensidade, pode-se visualizar o deslocamento da corrente de jato subtropical para as regiões Centro-Oeste e Sudeste, tornando possível haver regiões com possibilidade de ocorrência de CAT sobre essas áreas. Outra região de notoriedade à formação da CAT pode ser evidenciada na confluência da corrente de jato polar com a corrente de jato subtropical brasileira, particularmente no sul da região Sul do Brasil, nos meses de inverno.

Outros tipos de CAT associados com ondas de montanha, nas regiões serranas dos estados do Sul e Sudeste, como também em áreas de mudança de topografia e altitude e atribuídos a topos e redondezas de nuvens de tempestades sobre a região da Zona de Convergência Intertropical, Zona de Convergência do Atlântico Sul e convecção local são também exemplos de dinâmicas de formação do fenômeno sobre o país.

Atualmente, no Brasil, reportes AIREPS, cartas de vento em altitude, cartas SIGWX, análises de imagens de satélite e de campos provenientes de saídas de modelos atmosféricos se apresentam como os meios e instrumentos mais utilizados para se analisar uma região com possibilidade da ocorrência da CAT.

Dentre dos trabalhos realizados no país sobre a CAT, podemos citar o estudo realizado por Lyra e Chou (2007), em que índices de turbulência foram calculados a partir de saídas do modelo regional ETA. A metodologia se baseava em confrontar as localidades de regiões turbulentas geradas a partir dos indicadores de turbulência com previsões extraídas de cartas SIGWX, fornecendo, assim, informações de identificação com maior precisão e certeza de possíveis áreas de probabilidade de ocorrência da CAT, ao se comparar os resultados com cartas de tempo significativo SIGWX, em um período de 48 a 72 horas de antecedência.

Segundo os resultados deste estudo, se foi constatado que, com até 72 horas de previsão, os indicadores de turbulência conseguiram indicar um sinal do fenômeno em relação a previsões subjetivas de 24 horas de antecedência, provenientes das cartas SIGWX.

Villela (2013) afirma que, segundo um estudo climatológico feito sobre a frequência de ocorrência da CAT a partir de dados AIREPS, sobre os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, entre os anos de 2001 e 2005, o mês de maio se apresentou como o período de maior de ocorrência do fenômeno, quando este se evidenciou com maior frequência, entre os níveis de 33 a 37 mil pés, destacando-se a estação do inverno como a mais frequente

4. CLIMATOLOGIA DA CAT NO BRASIL

A nova pesquisa aqui desenvolvida buscou ampliar os conhecimentos sobre o fenômeno e criar uma alternativa metodológica para o aperfeiçoamento de sua análise. Preliminarmente, foram analisados 5338 AIREPs de turbulência sobre a FIR-Brasília e Curitiba. Deste total de reportes, elaborou-se um controle de qualidade mediante o qual dados sem informação de data (571 dados), sem detecção de turbulência (62 dados), com registros de turbulência associadas à atividade convectiva identificados com códigos do tipo TURB CB ou TURB CB TOP (turbulência associada a nuvens Cumulo nimbus), TURB OVC (associados com turbulência em condições de tempo nublado, TURB CB ISOL (turbulência associada a nuvens cumulonimbus isoladas) e ICE (associadas à formação de gelo em aeronaves) (53 dados)), foram descartados, totalizando, ao final, 4652 dados a serem verificados estatisticamente.

Dentre esses dados, considerou-se os que continham a informação de data, horário e intensidade do fenômeno, porém sem informações de altitude. Dados com esta configuração foram utilizados a fim de se elaborar análises temporais, sazonais e por padrões de intensidade e horário de ocorrência, entretanto desconsiderados para análises de padrões de altitude. Outros dados analisados, que continham informação de data, horário e altitude, porém sem informações de intensidade da turbulência, foram considerados em vista de elaboração de análises temporais, sazonais e por padrões de horário e altitude, entretanto desconsiderados para análises de padrões de intensidade do fenômeno.

Tais opções metodológicas acima especificadas geraram diferenças quantitativas entre cada análise, em decorrência da ausência de informações nos dados.

Por fim, elaborou-se uma climatologia estatística da temporalidade, sazonalidade, análise dos padrões de altitude, horário de ocorrência, intensidade da turbulência e padrões de localização geográfica, que se configurou na principal contribuição resultante do estudo.

4.1 Análise Temporal

Trata-se do tópico da pesquisa que aborda as análises temporais dos AIREPs de CAT pertencentes à FIR-BS e FIR-CW.

A distribuição temporal ao longo dos anos analisados dos 4589 AIREPs de CAT, da FIR-BS e d FIR-CW apresentados pela Figura 4.3, permitiu mostrar dois máximos nos meses de maio e junho (totalizando 24,6 % dos reportes), sendo o mês de maio o mais significativo com 12,4% dos reportes. Os dois mínimos se apresentam nos meses de fevereiro e dezembro (totalizando 8,5% dos reportes), sendo o mês de fevereiro o menos significativo em quantidade de reportes com 4,2%. No período de maio a outubro houve a ocorrência de aproximadamente 67,9% dos reportes de AIREPs de CAT.

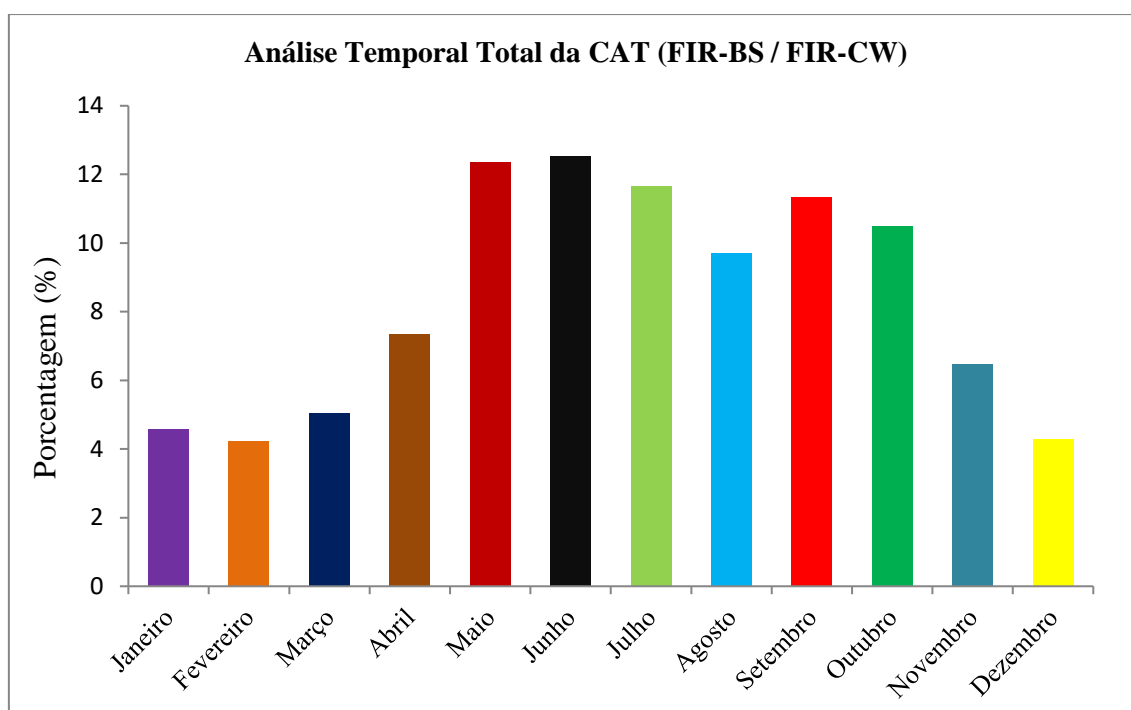


Figura 3 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB, relativamente aos 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

4.2 Análise Sazonal

Aqui, a abordagem recai sobre as análises sazonais dos AIREPs de CAT, pertencentes à FIR-BS e FIR-CW.

Analisando-se a sazonalidade dos 4614 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW, apresentado pela Figura 4.6, destacou-se destacar o inverno como a estação do ano mais significativa para a ocorrência da CAT, com 33,1% dos casos reportados. Durante a estação do verão, constatou-se apenas 13,6% dos casos, apresentando-se como o período menos significativo para o reporte do distúrbio.

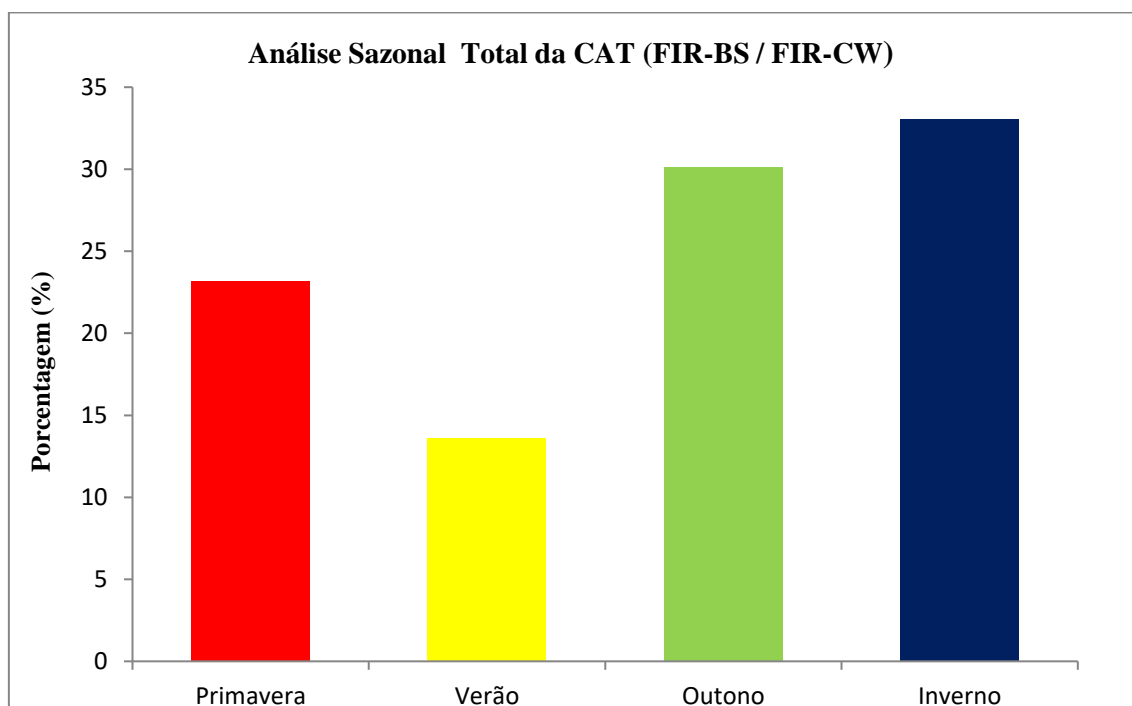


Figura 4 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB, relativamente aos 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

4.3 Análise dos Padrões de Intensidade

Objetiva analisar os registros dos AIREPs de CAT pertencentes a FIR-BS e FIR-CW segundo os padrões de intensidade.

Como verificado na Figura 4.9, dentre os 4626 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW, a maior quantidade dos casos mostrou-se de intensidade leve (LEV/FBL) e moderada (MOD), totalizando 86,4%. Os casos de intensidade severa, em que se consideram os mais perigosos e impactantes às aeronaves, corresponderam, tão somente, a 2,7% dos reportes.

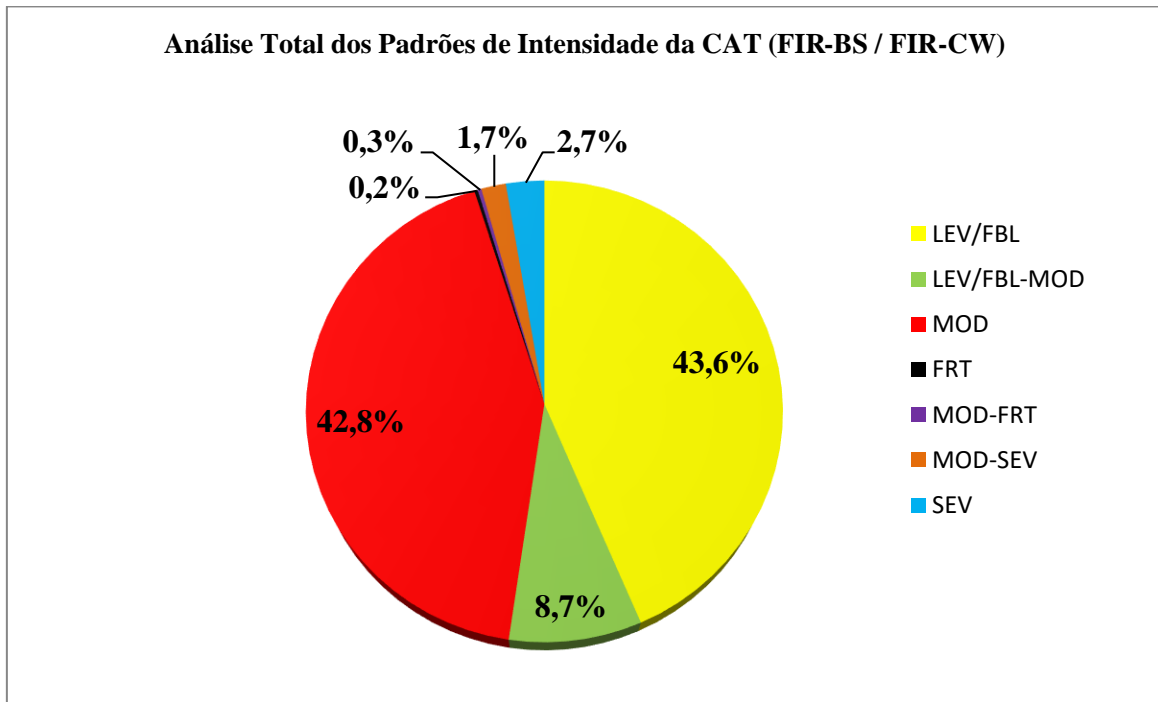


Figura 5 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPs de TURB para os 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

4.4 Análise dos Padrões de Horário de Ocorrência

Envolve a abordagem das análises dos AIREPs de CAT pertencentes a FIR-BS e FIR-CW segundo os padrões de horário de ocorrência.

A distribuição horária dos 4585 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW é representada pela Figura 4.12. Observe-se que a maior quantidade dos casos foi reportada entre 18 e 00UTC, enquanto que, entre 06 e 12UTC constatou-se a menor ocorrência do fenômeno.

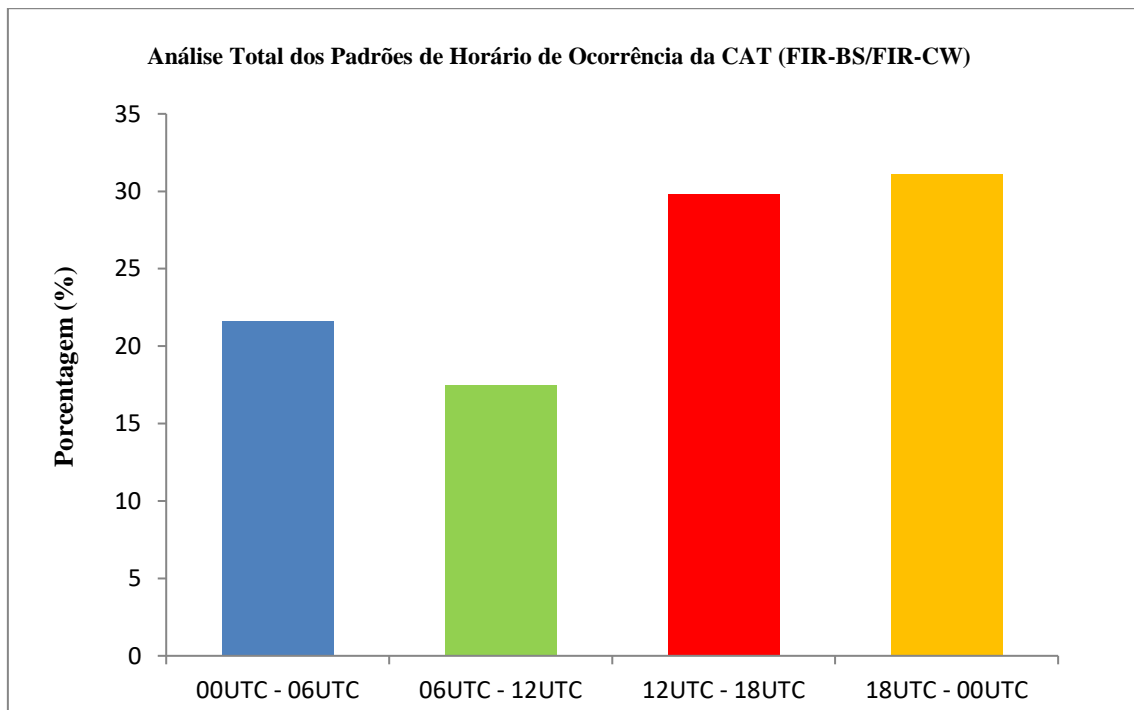


Figura 6 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPs de TURB para os 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

4.5 Análise dos Padrões de Altitude

Os padrões de altitude são aqui relacionados às dos AIREPs de CAT, pertencentes a FIR-BS e FIR-CW.

Considerada a altitude de ocorrência dos 4599 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW, tal qual como apresentado na figura 4.15, verifica-se verificar que 55,8% dos casos foram reportados entre 35 a 40 mil pés de altitude (aproximadamente entre 10.500 a 12 mil metros de altitude). Os níveis entre 30 e 40 mil pés de altitude (9.000 a 12.000 metros de altitude) revelam-se como as faixas de altitude mais significativas para o reporte do fenômeno totalizando 82,2% dos casos. Apesar desta constatação, há ainda que se considerar que os pousos e decolagens se apresentam como as etapas de voo mais arriscadas para as aeronaves.

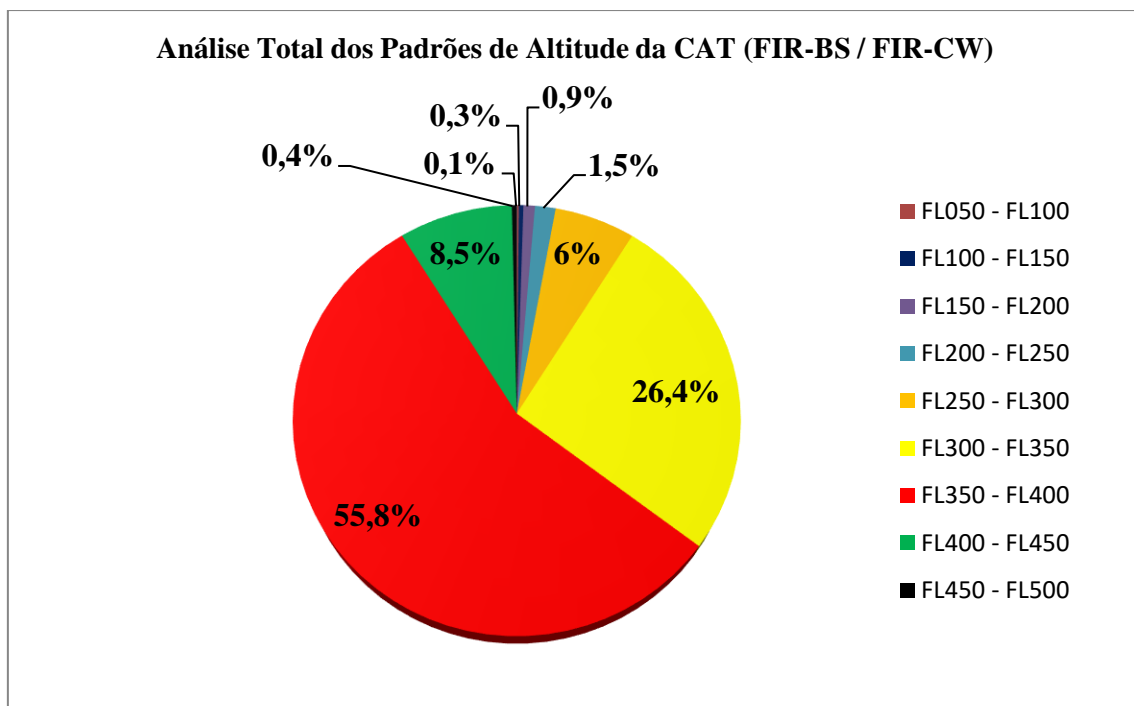


Figura 7 – Distribuição de frequências relativas do nível de vôo (altitude) dos AIREPs de TURB para os 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

4.6 Análise dos Padrões de Localização Geográfica

Esta referência tem por base a somatória dos AIREPs da FIR-BS e FIR-CW, totalizando 318 AIREPs entre agosto de 2008 e março de 2014 (Figura 4.18).

Considerados os 318 AIREPs de CAT analisados da FIR-BS e FIR-CW (Figura 4.18) observa-se espacialmente uma grande quantidade de reportes em regiões de rotas de maior tráfego aéreo, particularmente entre os aeroportos de Brasília, do Galeão, Guarulhos, Congonhas, Confins, Afonso Pena e Salgado Filho. Muitos desses reportes ocorrem em aerovias entre aeroportos de grande movimento no país e, em menor quantidade, entre e aeroportos de grande movimento e os aeroportos de menor movimento. Essas áreas de onde se originam muitos desses reportes se encontram no centro-sul do Brasil, onde existem regiões de relevo mais acentuado, entrada de frentes frias e, conseqüentemente, presença do jato subtropical, condições todas essas favoráveis à formação da CAT.

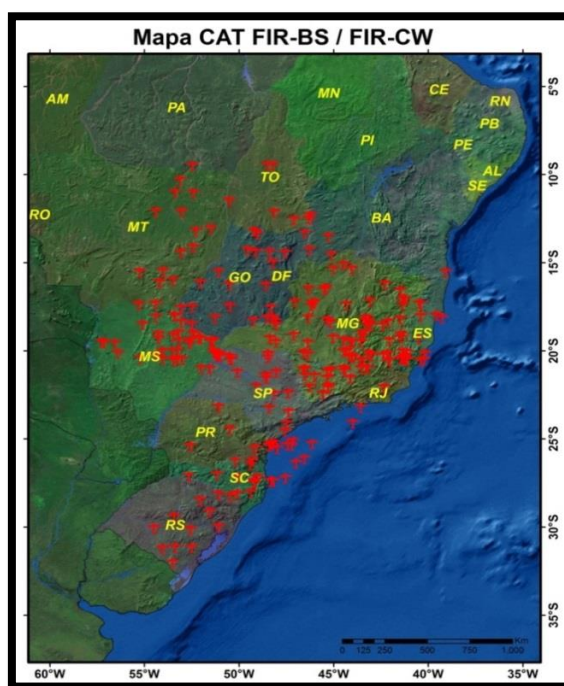


Figura 8 – Distribuição espacial de 318 AIREPS de TURB na FIR-BS e FIR-CW (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de agosto de 2008 a março de 2014.

5. ESTUDO DE CASO BRASILEIRO

No dia 03 de junho de 2013, uma aeronave do tipo Airbus-A320, da Tam Linhas Aéreas, e duas aeronaves do tipo Embraer-190, da Azul Linhas Aéreas, às 17:12, 17:26 e 17:36 UTC, voando em uma faixa de altitude entre 26 e 30 mil pés (aproximadamente entre 7.900 e 9.000 metros de altitude), reportaram enfrentar uma CAT de intensidade severa. Apesar dos reportes de turbulência por parte dos centros de controle do espaço aéreo, AIREPs, cartas de vento em altitude e cartas de tempo significativo, a precisão no meio aeronáutico não é alta. As aeronaves neste estudo de caso, enfrentaram um evento de CAT de grande severidade, não detectado previamente pelos radares e instrumentos a bordo.

Neste evento relatado, foram verificados: a região de análise do caso, o cenário sinótico atuante, dados do satélite GOES-13, cartas de vento em altitude, cartas de tempo significativo, perfis de radiossondagem, análise das previsões do modelo WRF e a aplicação dos índices de turbulência Brown, Ellrod I e Ellrod II.

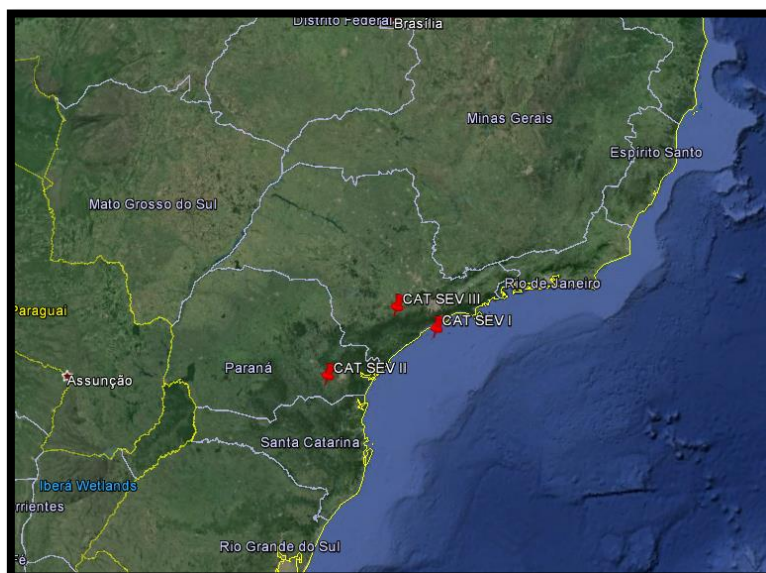
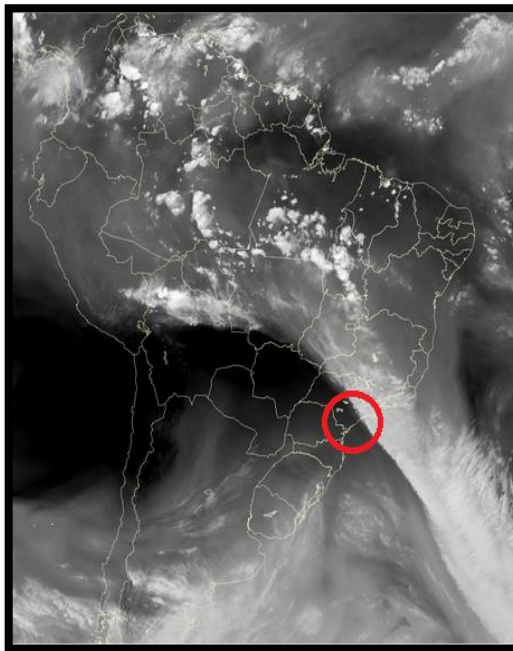
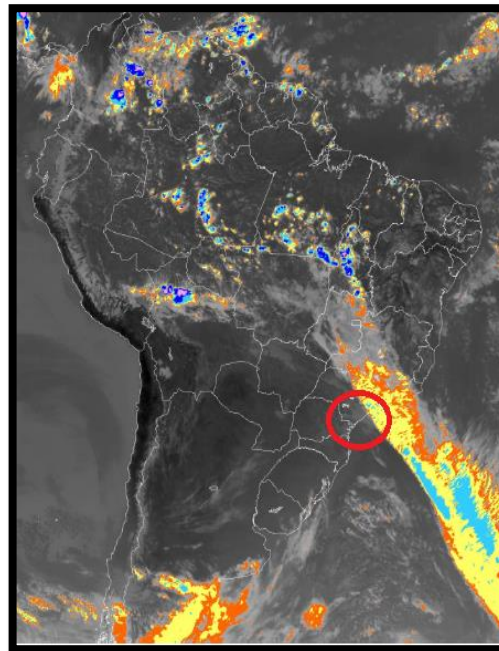


Figura 9 – Mapa ilustrando a região do estudo de caso destacando os três casos de detecção de turbulência de céu claro severa através dos ponteiros vermelhos descritos por CAT SEV I, ocorridos às 17:12 UTC; CAT SEV II, ocorrido às 17:26 UTC; e CAT SEV III, ocorrido às 17:36 UTC para o dia 03 de junho de 2013



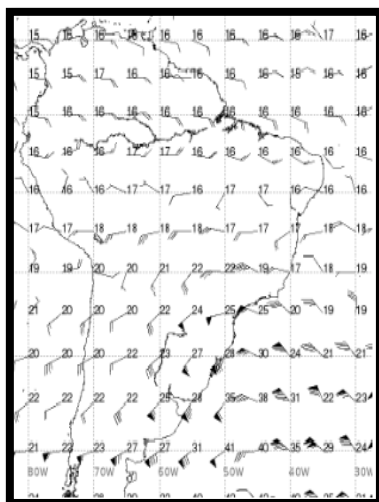
a)



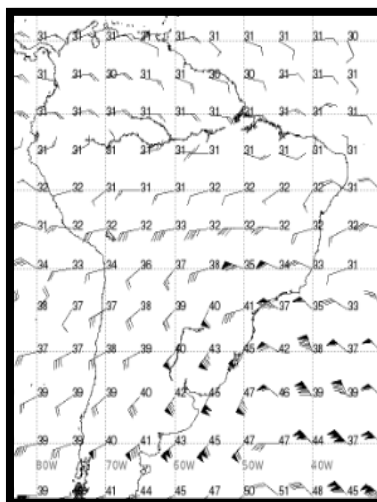
b)

Figura 10 – Imagem de satélite no canal do vapor d’água (a) e no canal do infravermelho-realçada (b) para as 17:30 UTC do dia 03 de junho de 2013. O círculo em vermelho indica a região dos três casos de CAT severa.

Fonte: (a) e (b) – INPE (2013)



a)



b)

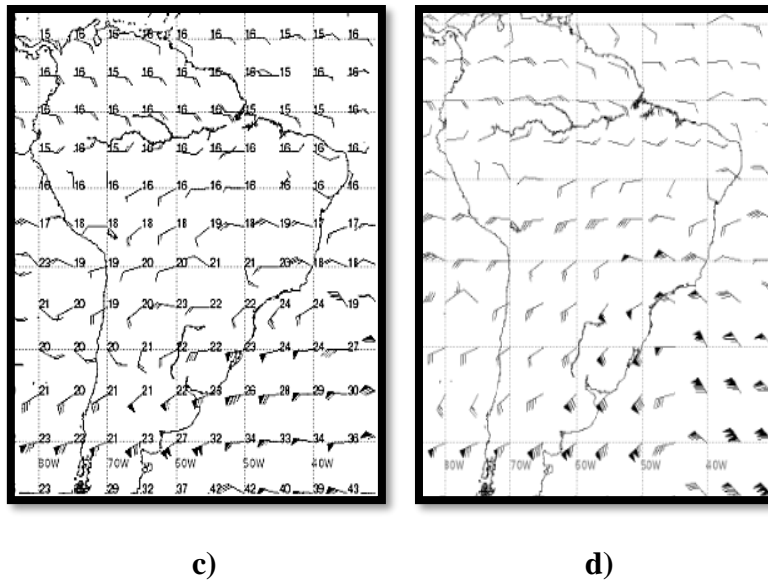


Figura 11 - Cartas de vento em altitude representando a direção (°) e velocidade do vento (Kt) no nível de 24 mil pés (a) e 30 mil pés (b) baseadas no dia 02 de Junho de 2013 as 18UTC válidas até as 18UTC do dia 03 de Junho de 2013 e para o nível de 24 mil pés (c) e 30 mil pés (d) baseadas no dia 03 de Junho de 2013 as 18UTC válidas até as 18UTC do dia 04 de Junho de 2013. (REDEMET).

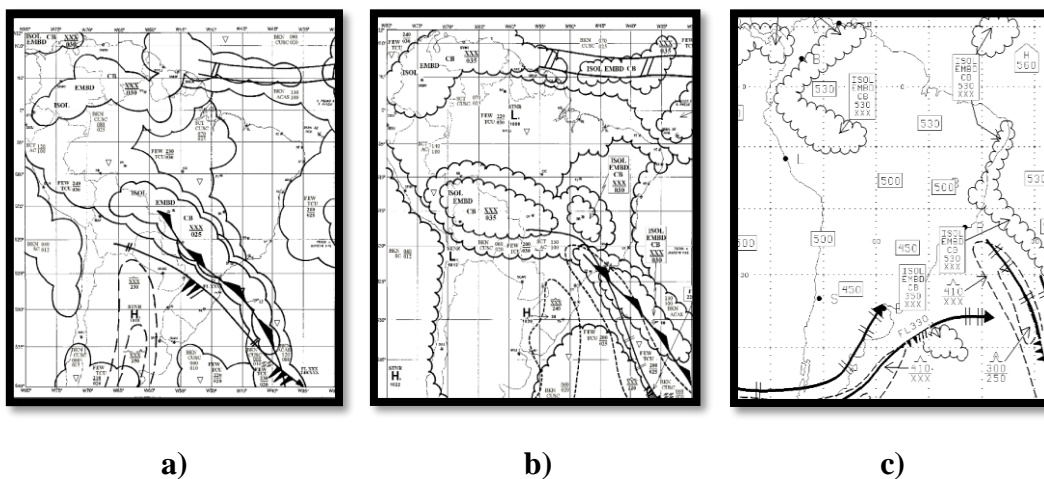
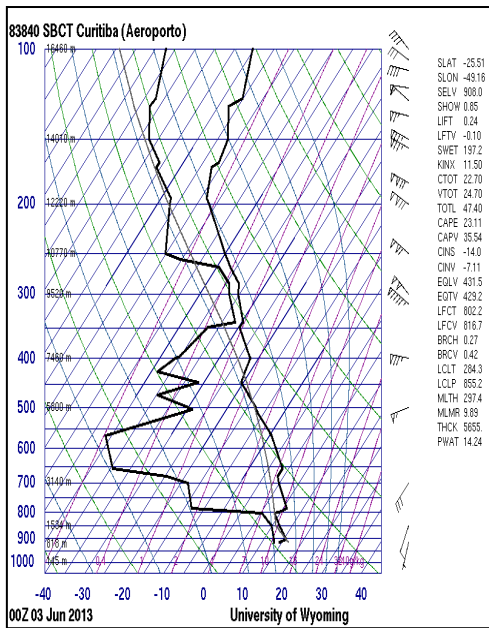
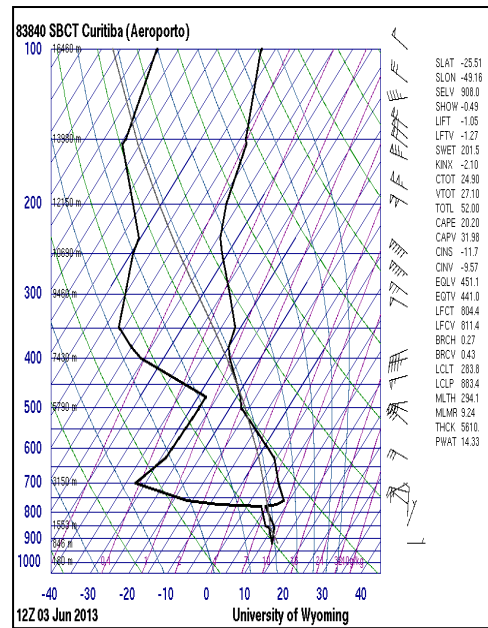


Figura 12 - Cartas SIGWX no nível de 25 mil pés para os dias 02 (a) 03 de Junho (b) as 18 UTC e no nível de 25 mil até 63 mil pés para o dia 04 de Junho de 2013 as 18 UTC (c). (REDEMET).

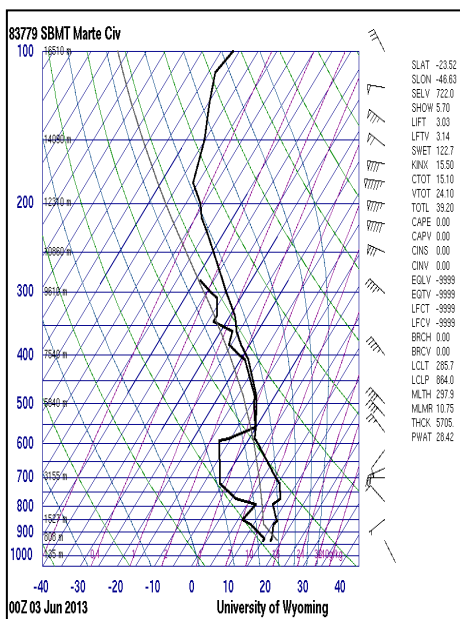


a)

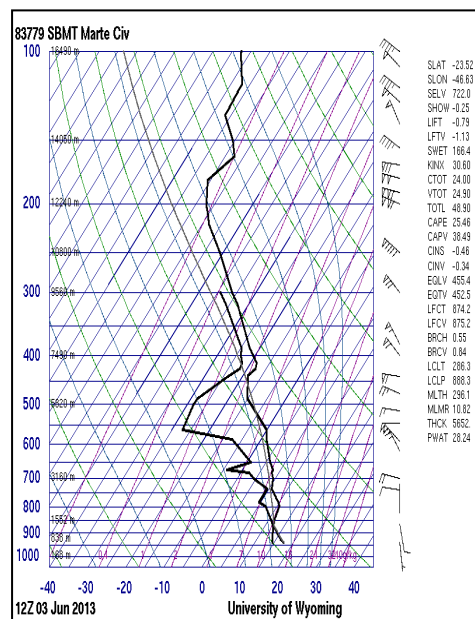


b)

Figura 13 - Diagrama Skew T-logp mostrando os perfis de temperatura (C°), ponto de orvalho (C°) e de direção (°) e velocidade do vento (Kt) para as 00 UTC (a) e 12 UTC (b) do dia 03 de Junho de 2013 a partir de dados obtidos através do lançamento de radiossondas no Aeroporto Internacional Afonso Pena em Curitiba.



a)



b)

Figura 14 - Diagrama Skew T-logp mostrando os perfis de temperatura (C°), ponto de orvalho (C°) e de direção ($^{\circ}$) e velocidade do vento (Kt) para as 00 UTC (a) e 12 UTC (b) do dia 03 de Junho de 2013 a partir de dados obtidos através do lançamento de radiossondas no Aeroporto do Campo de Marte em São Paulo.

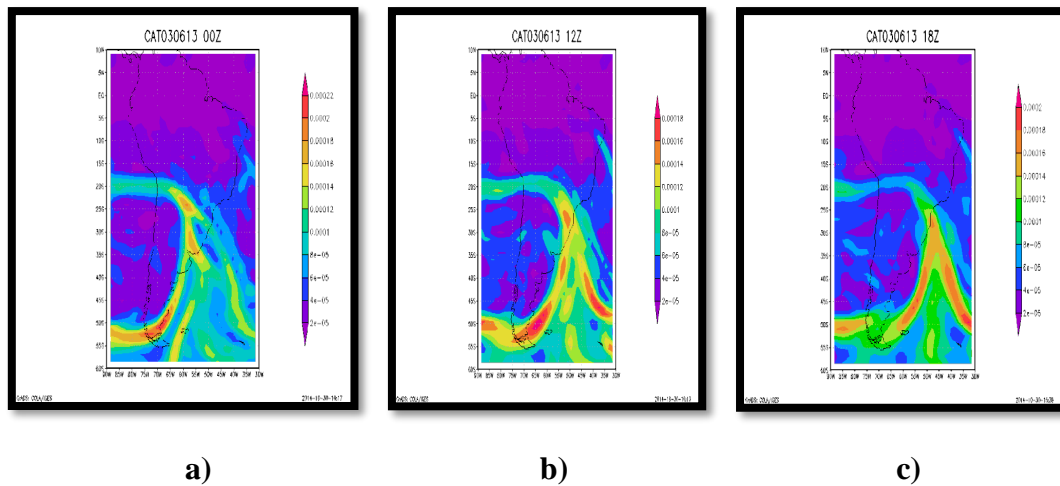


Figura 15 - Indicador de Turbulência Brown ($10^{-5} s^{-1}$) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS em 300 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de Junho de 2013.

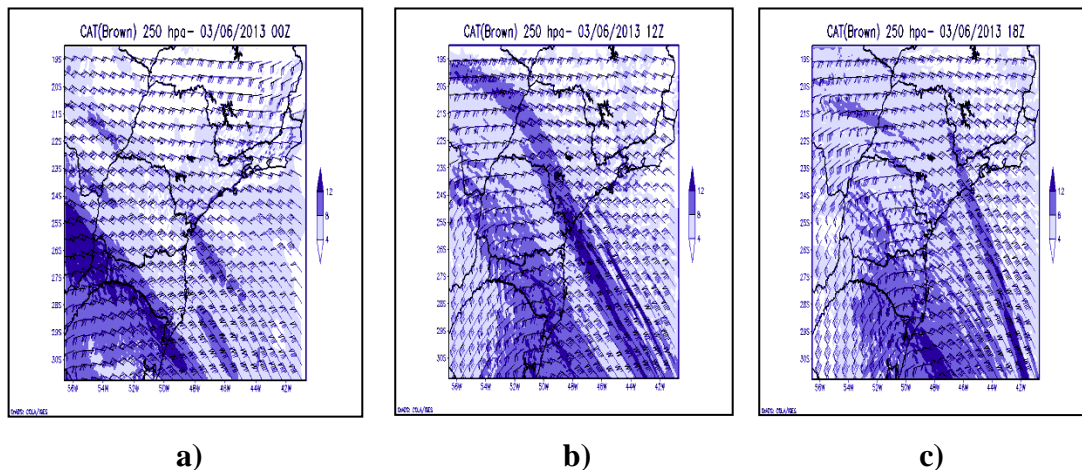


Figura 16 - Indicador de Turbulência Brown ($10^{-5} s^{-1}$) a partir de previsões do modelo WRF em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de Junho de 2013. (ICEA).

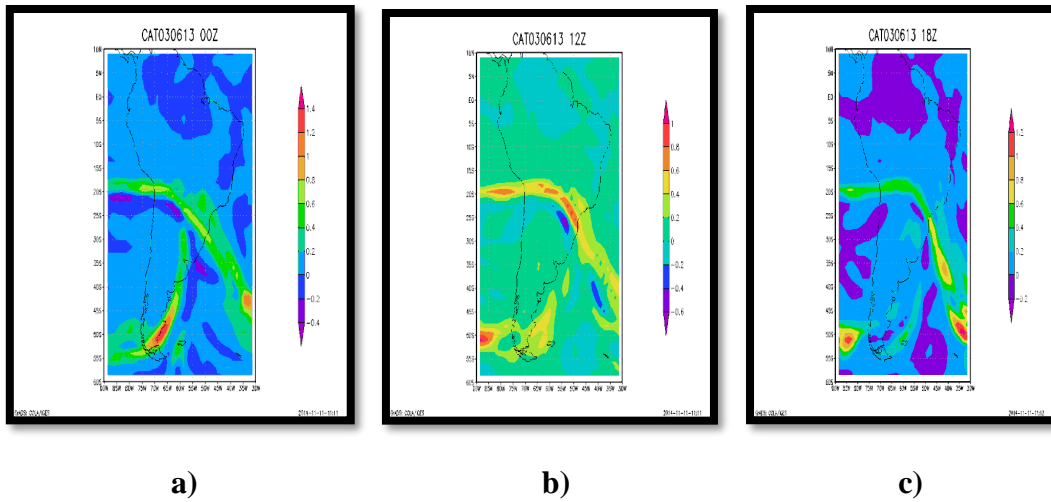


Figura 17 – Indicador de Turbulência Ellrod I (10^{-6} s^{-1}) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS entre 250 e 350 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de Junho de 2013.

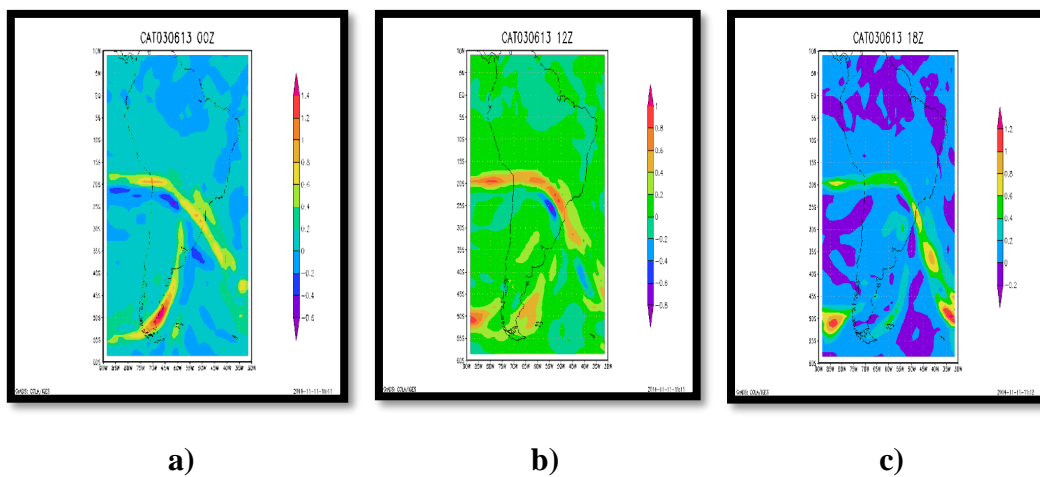


Figura 18 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS entre 250 e 350 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de Junho de 2013.

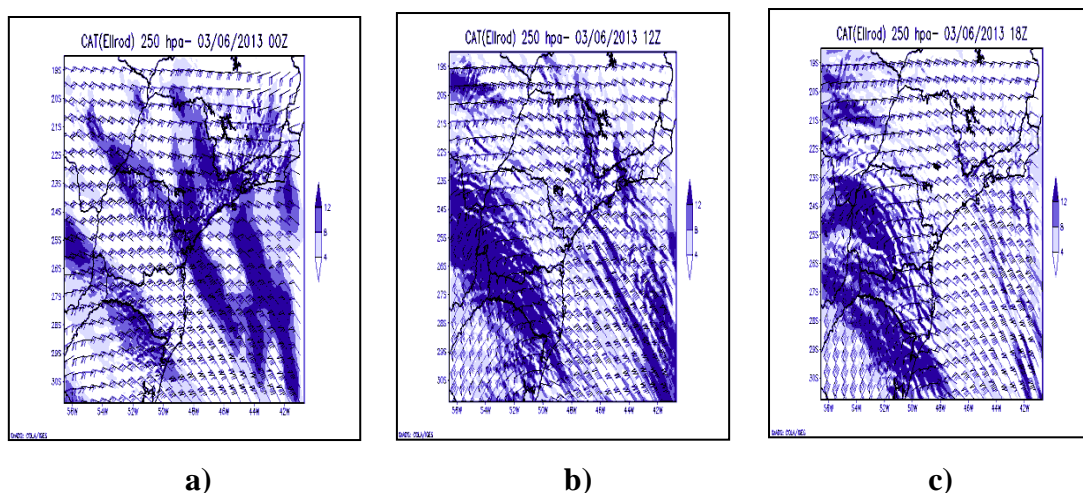


Figura 19 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de Junho de 2013. (ICEA).

6. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Eventos de CAT assimilados por aeronaves comerciais, militares e executivas foram estudados ao longo da investigação, e a elaboração de uma climatologia estatística, perante os parâmetros e informações disponíveis nos dados, foi empregada no curso do estudo, considerando-se as FIR-BS e FIR-CW como as regiões do espaço aéreo brasileiro cujos reportes foram provenientes.

A verificação dos AIREPs demonstrou que aproximadamente 24,6% dos eventos de CAT ocorreram nos meses de maio e junho, e aproximadamente 67,9% desses nos meses de maio a outubro. Vale ressaltar que essas porcentagens de casos verificados provem das duas regiões de análise citadas (FIR-BS e FIR-CW).

Analisando-se os reportes de CAT relativamente aos períodos do ano, ficou evidenciado que no inverno foram registrados 33,1% de todos os casos. A estação do outono/inverno foi responsável por 63,2% dos eventos da FIR-BS e FIR-CW.

No que diz respeito à intensidade da CAT, 86,4% dos casos se mostraram de intensidade leve e moderada e somente 2,7%, se mostram ser de intensidade severa.

A análise dos AIREPs relevou que entre 18 e 00 UTC ocorreu a maior quantidade de eventos, em um espaço de tempo de 6 horas. Considerando um espaço de tempo maior, ficou evidenciado que, entre 12 e 00 UTC, dá-se a maior frequência de

reportes, sendo que esse período é caracterizado como o de maior densidade de tráfego aéreo no país, com a chegada e saída de inúmeros voos entre aeroportos de grande movimento, como Brasília, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Os AIREPs evidenciaram que foram reportados eventos de CAT em diferentes níveis de altitude, sendo que 55,8% dos casos foram reportados entre 35 e 40 mil pés de altitude. A camada entre 30 e 40 mil pés destacou-se como a de maior quantidade de reportes, com 82,2% de todos os eventos analisados.

As rotas aéreas entre os aeroportos de maior movimento do país concentraram a maior quantidade de reportes de ocorrência de CAT, da mesma forma que os horários de maior densidade de tráfego aéreo, constituindo-se, tais ocorrências, em importante característica das duas regiões objeto do estudo. A FIR-CW apresentou a maior quantidade de reportes (74,1%), porcentagem que resulta na relação com sistemas frontais e, conseqüentemente com a entrada da corrente de jato na região em maior frequência e intensidade perante a FIR-BS.

O desenvolvimento da investigação também se defrontou com um caso severo, ocorrido na FIR-CW, oportunidade em que foram calculados os indicadores de turbulência Brown, Ellrod I e Ellrod II a partir de dados de reanálise do ERA-INTERIM, assim como também previsões do modelo regional WRF, utilizadas para fins de análise e comparação. Os indicadores acima descritos foram avaliados para o evento do dia 03 de junho de 2013, confrontando-se os dados de reanálise do ERA-INTERIM, previsões do modelo WRF, campos gerados a partir de dados observacionais e imagens de satélite.

Para o caso analisado, foi constatado que o indicador de turbulência Brown foi o que melhor representou a turbulência, sendo que o indicador Ellrod II também representou o fenômeno de forma significativa perante o indicador Ellrod I, o qual, a seu turno, não obteve a mesma relevância em seus resultados.

Observou-se que nas regiões próximas ao sistema frontal e à corrente de jato, os três indicadores apresentaram boa coerência, caracterizando-se como resultados de suma importância para detectar possíveis áreas com possibilidade de ocorrência da CAT. As cartas SIGWX, à sua vez, apresentaram uma razoável concordância perante com os indicadores no que respeita às regiões de probabilidade de ocorrência da turbulência. Evidenciou-se que no nível de 250 e 400 hPa, as previsões de CAT simuladas no modelo WRF apresentaram maior concordância ao caso estudado perante o nível de 200 hPa, tomando-se por base os índices Brown e Ellrod II.

Constatou-se em determinadas simulações de CAT que o modelo WRF adiantou de 5 a 6 horas a área de presença da turbulência perante a área e o horário do estudo de caso, como visualizadas nas simulações do índice Brown e Ellrod II em 250 e 400 hpa.

Apesar da previsão da CAT ainda não apresentar uma alta precisão quanto à localidade e altitude específica de ocorrência do fenômeno, o uso de previsões de modelo e dados de reanálise para se simular a turbulência se apresentam como boas ferramentas de previsão e análise. Tais dados, quando corretamente extraídos, podem ser confrontados com cartas SIGWX, permitindo um melhor auxílio aos centros de previsão da aeronáutica e aos pilotos, no que concerne ao planejamento das rotas aéreas perante a questões de segurança, conforto e economia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROOKS, M. **Fluent News Applied Computational Fluid Dynamics**. NOAA / ETL, 2004.

ELLROD, G.P., An index for clear air turbulence based on horizontal deformation and vertical windshear. Preprints, Third Intl . Conf on the Aviation Weather System, Anaheim, California, Amer, Meteor. Soc., 339-344. 1989.

Federal Aviation Administration (FAA). Disponível em:
<<http://www.asias.faa.gov/i/2003-2007weatherrelatedaviationaccidentstudy.pdf>>.
Acesso: set.2016.

LYRA, André de Arruda.; CHOU, Sin Chan.; DEREZYNSKI, Claudine. Pereira. Indicadores de turbulência a partir de previsões do modelo regional ETA. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**. v. 22, n.2, p. 161-182, 2007.

MOLARIN, K. Case study of CAT over the North Atlantic Ocean. **Department of Meteorology Stockholm University**, May 28, 2013.

Tahoe Nuggets. Wind Triggers Record Flight. Disponível em:
<http://thestormking.com/tahoe_nuggets/Nugget_208/nugget_208.html>. Acesso:
nov.2017.

VILLELA, R. J. Turbulência Inesperada. **Aero Magazine**. edição 233, Out/2013.
Disponível em: [//aeromagazine.uol.com.br/artigo/turbulencia-inesperada_1156.html](http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/turbulencia-inesperada_1156.html).