



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.13.04.06-TDI

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

Ivan Bitar Fiuza de Mello

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Maria Pau-
lete Pereira Martins, aprovada em
05 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J5MKSL>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.13.04.06-TDI

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

Ivan Bitar Fiuza de Mello

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela Dra. Maria Paulete Pereira Martins, aprovada em 05 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J5MKSL>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Martins, Ivan Bitar Fiuza de.

M488c Climatologia e estudo de caso da turbulência de céu claro a partir de registros de aeronaves: análise de dados observacionais e de modelagem / Ivan Bitar Fiuza de Mello. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxviii + 128 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.13.04.06-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadora : Dr. Maria Paulete Pereira Martins.

1. Turbulência. 2. Turbulência de céu claro. 3. Aeronaves. 4. Meteorologia aeronáutica. I.Título.

CDU 551.551(203)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Clóvis Angeli Sansigolo



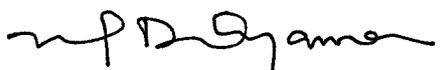
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Maria Paulete Pereira Martins



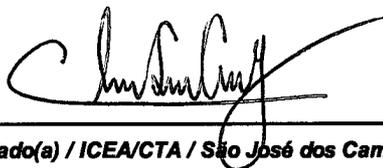
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Marcos Daisuke Oyama



Membro da Banca / IAE/DCTA / SJC Campos - SP

Dr. Cleber Souza Corrêa



Convidado(a) / ICEA/CTA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Ivan Bitar Fiuza de Mello**

São José dos Campos, 05 de Março de 2015

“Descubra a sua vocação e os resultados aparecerão.”

Ivan Bitar

A meus queridos pais por todas as palavras de determinação, motivação e coragem e a todas as pessoas que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve a meu lado me guiando, protegendo e me mostrando através da experiência da vida, que todos nós temos um propósito e um potencial para sermos e conseguirmos o que a ele nos reservou.

Agradeço especialmente a meus pais, por sempre estarem a meu lado em todos os momentos de tristeza, angústia, alegria, felicidade e superação e por me fazerem entender que sempre somos capazes de almejar algo na medida em que fazemos por merecer e compreendemos que com disciplina esforço e trabalho a vida nos presenteará com aquilo que um dia sonhamos em conseguir.

A minha família, minhas irmãs e a minha namorada Patrícia por sempre me apoiarem e torcerem pelo meu sucesso profissional.

Aos amigos Guilherme Kuze, Elaine Barreto e Luis Galván e a todos os outros bons amigos que tenho que sempre estiveram a meu lado me incentivando e me apoiando.

A minha orientadora Dra. Maria Paulete Pereira Martins, pela oportunidade, gentileza e colaboração, essenciais a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Dr. Marcos Oyama, Dr. Gilberto Fisch, Dr. Clovis Sansigolo e Dr. Cléber Souza pelo interesse, disposição e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e tutores da Aeronáutica, Capitão Fernando Gonçalves Brandão, Capitão Miguel Ângelo Vargas de Carvalho, Capitão Carlos Eduardo, Sargento Jonas, suboficial Roberto Tadeu, Tenente Chiquito pela grande oportunidade, orientação e disposição e aos colegas do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), Milton e Richard Mitsuo que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao Coronel Paulo Roberto Bastos de Carvalho do Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA) pela importante colaboração nesta pesquisa.

Aos colegas de doutorado do INPE, Fernando Oliveira e Felipe Marques e de mestrado Paulo Geovani do ITA pela importante ajuda e disposição nesta pesquisa.

Ao colega do Centro de Previsão e Estudos Climáticos André Lyra pela disposição e interesse.

Aos demais professores do curso de pós-graduação em meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelos ensinamentos durante o todo o curso de mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, onde encontrei a oportunidade de expandir minha formação profissional.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos utilizada durante a realização deste estudo.

RESUMO

No espaço aéreo brasileiro, inúmeras aeronaves em operação, são frequentemente afetadas por fenômenos ou condições meteorológicas adversas, causando impacto em parâmetros como segurança de voo, economia de combustível, atrasos nas chegadas e partidas, conforto aos passageiros etc. A ocorrência de turbulências de céu claro e seu consequente encontro pode ser citado como um exemplo de fenômeno meteorológico adverso que possui a característica de afetar o desempenho, segurança e eficiência de uma aeronave em operação. Esta pesquisa visa realizar inicialmente um estudo climatológico da turbulência de céu claro a partir de dados de reportes de aeronaves em voo objetivando elaborar análises temporais, sazonais e espaciais do fenômeno nas regiões de informação de voo de Curitiba e de Brasília. Prontamente, elabora-se um estudo de caso a partir de três reportes de turbulência de céu claro severa provenientes de reportes de aeronaves utilizando-se índices de turbulência com a finalidade de verificar qual possuem a melhor correlação para o caso. Para tal são utilizadas imagens de satélite, dados de radiossondagens, cartas meteorológicas SIGWX, cartas de vento, cartas de altitude, previsões do modelo WRF, índices de turbulência e registros de aeronaves. Os casos de CAT mais frequentes, ocorreram entre os meses de maio e outubro, no período outono/inverno e início da primavera, de intensidade leve e moderada, no horário entre 18 e 00 UTC entre 35 e 40 mil pés de altitude e em sua maior quantidade na FIR-CW. Perante os índices de turbulência utilizados neste trabalho foi verificado que o indicador Brown foi o que melhor representou a turbulência. O indicador Ellrod II representou de forma significativa o fenômeno perante o indicador Ellrod I que não obteve a mesma relevância em seus resultados. As informações geradas a partir desse estudo poderão ser utilizadas para se melhorar a prevenção de ocorrência de incidentes aeronáuticos, difundir e ampliar o entendimento e compreensão dos fenômenos meteorológicos aplicados ao campo da aviação e proporcionar maior segurança e conforto para a sociedade e para os pilotos que se utilizam do transporte aéreo como meio de trabalho ou de locomoção.

**CLIMATOLOGY AND CASE STUDY OF CLEAR SKY TURBULENCE FROM
AIRCRAFT RECORDS : OBSERVATIONAL AND MODELLING DATA
ANALYSIS**

ABSTRACT

In Brazilian airspace, numerous aircraft in operation are often affected by adverse weather conditions or phenomena, impacting on parameters such as flight safety, fuel economy, delays in arrivals and departures, passenger comfort etc. The occurrence of clear air turbulence can be cited as an example of adverse meteorological phenomenon that possesses the characteristic of affecting the performance, safety and efficiency of aircraft in operation. This research aims to initially conduct a climatological study of clear air turbulence from data of reports of aircraft in flight with the goal of developing temporal, seasonal and spatial analysis of the phenomenon in the flight information region of Curitiba and Brasilia. Promptly, a case of study is drawn from three clear of severe air turbulence reports from aircraft reports using turbulence indexes in order to verify which have the best correlation to the case. For this purpose are used satellite imagery, radiosonde data, weather charts SIGWX, wind charts, altitude charts, forecasts the WRF model, turbulence rates and aircraft records. The most frequently cases of CAT occurred between the months of May and October, during fall/winter and early spring, intensity of light and moderate, between the period of 18 and 00 UTC, between 35 and 40 thousand feet of altitude and its greater quantity in the FIR-CW. Given the turbulence indices used in this study it was found that the Brown indicator was the one witch best represented the turbulence. The Ellrod II indicator represented significantly the phenomenon before the Ellrod I indicator witch didn't have the same relevance in its results. The information generated from this study will be used to improve the prevention of occurrence of aircraft incidents, disseminate and expand the understanding and comprehension of meteorological phenomena applied to the field of aviation and provide greater comfort and safety for society and for pilots in which make use of air transport as a means of transportation or labor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Imagem mostrando o comportamento do escoamento do vento em um fluxo laminar e um fluxo turbulento.....	6
Figura 2.2 – Mapa de regiões com presença de turbulência sobre os Estados Unidos a partir de seu grau de intensidade para o dia 17 de fevereiro de 2014 válido para as 17 horas UTC entre os níveis de 10.000 a 45.000 pés de altitude.....	9
Figura 2.3 – Mapa elaborado a partir de reportes PIREPS contendo regiões com presença de turbulência sobre os Estados Unidos com seu grau de intensidade para o dia 19 de fevereiro de 2014 válido entre 17:19 e 18:38 UTC horas UTC.	12
Figura 2.4 - Resumo Gráfico da caracterização dos diversos tipos de turbulências encontradas e documentadas.	14
Figura 2.5 – Seção transversal de vento (em nós, linhas sólidas), temperatura do ar (° C, linhas tracejadas), tropopausa (linha sólida escura), núcleo da corrente de jato (linhas tracejadas espaçadas) e locais de CAT (linhas tracejadas espaçadas) para 1200 UTC em 18 de Setembro 1996 sobre a África do Sul (Villiers e Van Heerden, 2001).	18
Figura 2.6 – Nuvens formadas a partir de duas camadas de ar com altas velocidades de cisalhamento sujeitas à instabilidade Kelvin Helmholtz (Brooks Martner, NOAA / ETL, 2004).....	21
Figura 2.7 – 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 com a presença de CAT (Ellrod, 1989).....	24
Figura 3.1 – Mapa representativo da localização geográfica da FIR-BS e FIR-CW.	31
Figura 3.2 – Representação geográfica da região da FIR-BS na qual os pontos em negrito baseiam-se nos indicativos de aeroportos OACI.....	32
Figura 3.3 – Representação geográfica da região da FIR-CW na qual os pontos em negrito baseiam-se nos indicativos de aeroportos OACI.....	32
Figura 4.1 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB para os 1187 casos analisados da FIR-BS.....	42
Figura 4.2 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB para os 3402 casos analisados da FIR-CW.....	44
Figura 4.3 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de 46TURB para os 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	46

Figura 4.4 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 1167 casos analisados da FIR-BS.....	48
Figura 4.5 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 3447 casos analisados da FIR-CW.....	50
Figura 4.6 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	52
Figura 4.7 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPS de TURB para os 1164 casos analisados da FIR-BS.....	54
Figura 4.8 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPS de TURB para os 3462 casos analisados da FIR-CW.....	56
Figura 4.9 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPS de TURB para os 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	58
Figura 4.10 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPS de TURB para os 1159 casos analisados da FIR-BS.....	60
Figura 4.11 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPS de TURB para os 3426 casos analisados da FIR-CW.....	62
Figura 4.12 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPS de TURB para os 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	64
Figura 4.13 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPS de TURB para os 1151 casos analisados da FIR-BS.....	66
Figura 4.14 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPS de TURB para os 3448 casos analisados da FIR-CW.....	68
Figura 4.15 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPS de TURB para os 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	70
Figura 4.16 – Distribuição espacial de 157 AIREPS de TURB na FIR-BS (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de agosto de 2008 a março de 2014.....	72
Figura 4.17 – Distribuição espacial de 161 AIREPS de TURB na FIR-CW (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de janeiro de 2010 a março de 2014.....	73
Figura 4.18 – 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.....	74

Figura 5.1 – 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 ocorrido às 17:10 UTC, CAT SEV II ocorrido às 17:23 UTC e CAT SEV III ocorrido às 17:30 UTC para o dia 03 de junho de 2013.	76
Figura 5.2 – 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.....	77
Figura 5.3 – 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.	79
Figura 5.4 - 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).....	81
Figura 5.5 – 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.	82
Figura 5.6 - 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 do Campo de Marte em São Paulo.	83
Figura 5.7 – Corrente de Jato e vento (Kt) em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	85
Figura 5.8 – Geopotencial (m) e Vorticidade (10^{-5} s) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.....	87
Figura 5.9 – Geopotencial (m) e Vorticidade (10^{-5} s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.....	89
Figura 5.10 – Linhas de Corrente e Divergência (10^{-5} s) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.....	91
Figura 5.11 – Linhas de Corrente e Divergência (10^{-5} s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.....	93

Figura 5.12 – Velocidade Vertical (m/s) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	95
Figura 5.13 – Velocidade Vertical (m/s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	97
Figura 5.14 – 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.	99
Figura 5.15 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	101
Figura 5.16 – 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.	103
Figura 5.17 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 400 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	105
Figura 5.18 – 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.	107
Figura 5.19 – 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.	109
Figura 5.20 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	111
Figura 5.21 – 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.	113
Figura 5.22 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 400 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias de tipos de turbulência (NIL) nula, (LGT) leve, (MOD) moderada, (SEV) severa ou extrema e (Missing) sem reportes, obtidas através de reportes de pilotos (PIREPs) sobre a Coréia do Sul no período entre 2003 a 2004 e de 2006 a 2008.	8
Tabela 3.3.5 - Tabela representando o esquema de parametrizações adotadas nas simulações das previsões do modelo WRF.	39
Tabela 4.1 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 1187 casos analisados da FIR-BS.....	43
Tabela 4.3 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	47
Tabela 4.4 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 1167 casos analisados da FIR-BS.....	49
Tabela 4.5 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 3447 casos analisados da FIR-CW.	51
Tabela 4.6 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	53
Tabela 4.7 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 1164 casos analisados da FIR-BS.	55
Tabela 4.8 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 3462 casos analisados da FIR-CW.....	57
Tabela 4.9 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	59

Tabela 4.10 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 1159 casos analisados da FIR-BS.	61
Tabela 4.11 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 3466 casos analisados da FIR-CW.....	63
Tabela 4.12 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	65
Tabela 4.13 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 1151 casos analisados da FIR-BS.	67
Tabela 4.14 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 3448 casos analisados da FIR-CW.....	69
Tabela 4.15 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.....	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIREPS	Aircraft Reports (Reportes de Aeronaves)
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay (Dados Meteorológicos de Retransmissão de aeronaves)
AMS	American Meteorology Society (Sociedade Americana de Meteorologia)
ATS	Aeronautical Telecommunication Network (Rede de Telecomunicações Aeronáuticas)
ATIS	Automatic Terminal Information Service (Serviço de Informação Automática de Terminal)
AIRMET	Airman's Meteorological Information (Informação Meteorológica de Aviadores)
ARS	AIREP special (Reportes de aeronaves especial)
AWC	Aviation Weather Center (Centro Aeronáutico de Tempo)
CAT	Clear Air Turbulence (Turbulência de Céu Claro)
CB	Cumulonimbus
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ETA	Modelo ETA

FAA	Federal Aviation Administration (Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos)
FBL	Leve
FIR-BS	Região de Informação de de Brasília
FIR-CW	Região de Informação de de Curitiba
FL	Flight Level (Nível de)
FRT	Forte
GRADS	Grid Analysis and Display System (Sistema de Análise de Grade e Display)
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
JBN	Jatos de Baixos Níveis
KHI	Kelvin Helmholtz Instability (Instabilidade Kelvin Helmholtz)
LEV	Leve
METAR	Meteorological Aerodrome Report (Reporte Meteorológico de Aeródromo)
MOD	Moderada
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional de Oceano e Atmosfera dos Estados Unidos)
NTSB	National Transportation Safety Board (Departamento de Segurança do Transporte dos Estados Unidos)

OACI	Organização da Aviação Internacional
PIREPS	Pilot Reports (Reporte de Pilotos)
REDEMET	Rede de Meteorologia da Aeronáutica
SEV	Severa
SIGMET	Significant Meteorological Information (Informação Meteorológica Significativa)
SIGWX	Significant Weather Chart (Carta de Tempo Significativo)
TAF	Terminal Aerodrome Forecast (Previsão de Aeródromo Terminal)
TURB	Turbulence (Turbulência)
WRF	Weather Research and Forecasting (Modelo de Previsão e Pesquisa)
WS	Wind Shear (Tesoura de Vento)

LISTA DE SÍMBOLOS

C°	Graus Celsius
CVG	Convergência Horizontal
DEF	Deformação Horizontal
ETI	Ellrod Turbulence Index (Índice de Turbulência Ellrod)
f	Termo de Coriolis
FT	Feet (Pés)
hPa	HectoPascal
km	Quilômetro
km/h	Quilômetros por hora
kt	Knots (Nós)
T/1	Índice de Turbulência Ellrod I
T/2	Índice de Turbulência Ellrod II
UTC	Coordinated Universal Time (Tempo Universal Coordenado)
VWS	Vertical Wind-Shear (Wind-Shear Vertical)
∂u	Variação em derivada parcial da componente zonal do vento ($m.s^{-1}$)

∂v	Varição em derivada parcial da componente meridional do vento ($m.s^{-1}$)
∂z	Varição da altura (m)
Δu	Varição da componente zonal do vento ($m.s^{-1}$)
Δv	Varição da componente meridional do vento ($m.s^{-1}$)
Δz	Varição da altura entre um nível superior e um nível inferior (m)
∂V	Cisalhamento vertical do vento ($m.s^{-1}$)
∂z	Varição com a altura (m)

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 Objetivos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Teoria da Turbulência.....	5
2.2 O estudo da Turbulência na Meteorologia Aeronáutica.....	10
2.3 A classificação dos tipos de Turbulências.....	13
2.4 A definição da Turbulência de Céu Claro.....	17
2.5 Metodologias de detecção e previsão de Turbulências de Céu Claro.....	22
2.6 A Turbulência de Céu Claro no Brasil.....	24
2.7 Índices de Turbulência.....	26
2.8 Número de Richardson.....	26
2.9 Índices de Turbulência Ellrod.....	27
2.10 Índice Brown.....	28
3 DADOS E METODOLOGIA.....	31
3.1 Áreas de Estudo.....	31
3.2 Metodologia.....	33
3.2.1 Estudo climatológico dos dados AIREP de Turbulência.....	33
3.2.2 Estudo de Caso.....	33
3.3 Dados.....	37
3.3.1 Dados de Satélite.....	37
3.3.2 Dados de Radiossondagem.....	37
3.3.3 Cartas SIGWX.....	37
3.3.4 Cartas de Vento.....	38
3.3.5 Previsões do modelo WRF.....	38
3.3.6 Dados de Reanálise do ERA-INTERIM.....	39
4 RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO CLIMATOLÓGICO.....	41
4.1 Categorização climatológica dos AIREPs de CAT.....	41
4.2 Análise Temporal.....	42
4.3 Análise Sazonal.....	48

4.4	Análise dos Padrões de Intensidade.....	54
4.5	Análise dos Padrões de Horário de Ocorrência.....	60
4.6	Análise dos Padrões de Altitude.....	66
4.7	Análise dos Padrões de Localização Geográfica.....	72
5	RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO.....	75
5.1	Área de Estudo.....	76
5.2	Cenário sinótico.....	77
5.2.1	Análise sinótica a partir de dados de imagens de satélite.....	77
5.2.2	Análise sinótica de altitude.....	78
5.2.3	Análise sinótica de tempo significativo.....	80
5.2.4	Análise do perfil atmosférico.....	82
5.3	Análise das previsões do modelo WRF.....	84
5.4	Análise da Turbulência.....	98
5.4.1	Indicador de Turbulência Brown.....	98
5.4.2	Indicador de Turbulência Ellrod I.....	106
5.4.3	Indicador de Turbulência Ellrod II.....	108
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	117
6.1	Conclusões do trabalho.....	117
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estudos e pesquisas com ênfase em fenômenos meteorológicos de difícil previsibilidade como a turbulência de céu claro caracteriza-se de grande relevância e importância à sociedade e aos profissionais do ramo aéreo quanto ao caráter de seus objetivos tais como segurança, prevenção, planejamento e economia.

Os profissionais da aviação civil dispõem por rádio e tele-frequência, reportes e boletins meteorológicos disponibilizados por serviços aeronáuticos de meteorologia como o serviço ATIS, cartas TAF, METAR, SIGWX, comunicações com centros de controle aéreo, torres e reportes meteorológicos de outras aeronaves. Dentre os mecanismos acima citados cartas de vento em altitude também são disponíveis para fins de auxílio à navegação.

Atualmente, as aeronaves mais modernas, possuem um sistema de radar que possibilita aos pilotos identificar áreas de grande acumulado de chuva e até possivelmente gelo, essencial para previsões de regiões de turbulência e formação de gelo em aeronaves. Entretanto quando não há a presença de formações ou nuvens e o céu se encontra em condições de céu claro, outro tipo de turbulência não prevista pode estar presente, a turbulência de céu claro (CAT do inglês Clear Air Turbulence).

A turbulência de céu claro é conhecida no meio aeronáutico, como um perigo invisível aos pilotos, não detectada pelos radares a bordo de uma aeronave e sendo por si só responsável por muitos incidentes aeronáuticos reportados durante décadas na qual aeronaves sofreram danos estruturais e passageiros e tripulantes desde leves ferimentos até fatalidades. Segundo estatísticas da Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA), inúmeros boletins e reportes sobre turbulências provenientes de aeronaves em sobre todo o território americano estão atribuídos em grande parte a CAT. OVEREEM (2002) afirma que a maior causa para incidentes com passageiros em acidentes aeronáuticos não fatais está associada a CAT.

Sua definição se baseia, na explicação da presença de um determinado tipo de turbulência em grandes altitudes sem a presença de nuvens ou atividade convectiva (MOLARIN, 2013), portanto previsões e estudos de localidades propícias à ocorrência da turbulência contribuem de diversas formas para se prover segurança aos passageiros e profissionais do meio aéreo.

Entretanto, a dificuldade no estudo desse tipo de turbulência se resume nas pequenas escalas temporais e espaciais apresentando-se como um fenômeno de grande complexidade de previsão (ELLROD, 1989). Redes de balões meteorológicos ou sondas atmosféricas dificilmente garantem uma boa análise e previsão especialmente em regiões com pouca disponibilidade de estações e instrumentos. Entretanto, aeronaves militares, comerciais, privadas e científicas evidenciam-se como boas ferramentas de estudo da turbulência através de reportes e acúmulo de dados científicos em bem como estudos aplicados a saídas de modelos de previsão do tempo e índices de turbulência.

Eventos de turbulência de céu claro ocorridos em regiões da atmosfera com forte cisalhamento do vento a partir de ondas de montanhas, correntes de jato, topos de nuvens de tempestades ou áreas próximas à tropopausa oferecem grande risco a atividade aérea. O estudo desse distúrbio vem sendo discutido e estudado ao longo de muitos anos. Pesquisas provenientes da técnica de interpolação de dados de saídas de modelos, imagens de satélite, aeronaves instrumentadas e estudos climatológicos regionais podem ser utilizados como ferramentas de previsão e alertas tanto para aeronaves em voo como para centros de controle aéreo, torres de comando e institutos de previsão do tempo tendo como intuito difundir informações e conhecimento essenciais na previsão e análise do fenômeno.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo climatológico de caracterização e identificação de turbulências de céu claro a partir de dados de reportes de pilotos sobre as regiões de informação de de Brasília e Curitiba, elaborar uma análise de comparação entre parâmetros como localidade, sazonalidade, período, horário e intensidade da CAT e por final realizar um estudo de caso analisando dados meteorológicos, previsões de modelo e índices de turbulência.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste estudo são:

(i) Elaborar uma climatologia de identificação e caracterização da turbulência de céu claro sobre as regiões de informação de Brasília e Curitiba a partir de reportes de pilotos levando em análise os meses de maior frequência, sazonalidade, intensidade, localidade, nível de e o horário de ocorrência.

(ii) Realizar um estudo de caso da CAT extraído a partir de informações provenientes de reportes de aeronaves e compará-las com os dados meteorológicos, previsões do modelo WRF e índices de turbulência baseados em reanálises do ERA-Interim.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a revisão bibliográfica é apresentada no capítulo dois. No capítulo três foi descrito: a metodologia e os dados utilizados para o estudo climatológico e o estudo de caso; no capítulo quatro serão apresentados os resultados e a análise do estudo climatológico. No capítulo cinco será apresentada a análise e os resultados do estudo de caso. No capítulo seis serão apresentadas as conclusões do estudo elaborado e sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas se encontram na última sessão deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Teoria da Turbulência

O conceito de turbulência pode ser descrito como um movimento ou distúrbio atmosférico que se caracteriza pela mudança da direção e da velocidade do vento resultante das variações de pressão e temperatura que ocorrem na atmosfera produzindo assim, uma alteração no comportamento do escoamento das partículas presentes em uma massa de ar. Um determinado fluido possui variados tipos de constituintes em sua composição, dentre elas moléculas de oxigênio, nitrogênio, gelo, água etc. Quando intensas e gradativas variações de aquecimento ou resfriamento ocorrem em um determinado fluido que possui um escoamento linear, mudanças no gradiente de pressão e temperatura alteram o escoamento de suas partículas, na qual tendem a se comportar de forma caótica e não linear, originando um fluido turbulento. As constantes variações que afetam o escoamento das partículas de um fluido de característica turbulenta originam bruscos movimentos verticais ascendentes e descendentes atribuindo-se esse comportamento a turbulência.

De acordo com Souza (2011) a turbulência é um fenômeno contínuo, pois mesmo os menores vórtices transportadores de momentum, massa, calor e energia encontrados em escoamentos do tipo turbulentos se encontram como tipicamente muito maiores em relação à escala de comprimento molecular, caracterizando o escoamento turbulento como um movimento governado pelas equações de Navier-Stokes. Eiger (1989) ressalta que a vorticidade apresenta um papel fundamental na análise da turbulência, pois escoamentos turbulentos são sempre rotacionais.

O processo de transição da turbulência se baseia na instabilização do fluxo laminar resultante da amplificação de perturbações injetadas nos escoamentos por fontes diversas (Silveira Neto, 2002). Mathieu e Scott (2000) afirmam que com a elevação do número de Reynolds o termo convectivo não linear na equação de Navier-Stokes assume uma grande importância quando comparado com o termo de viscosidade e a tendência a instabilidade. Assim um elevado número de Reynolds se torna um pré-requisito para a produção da turbulência.

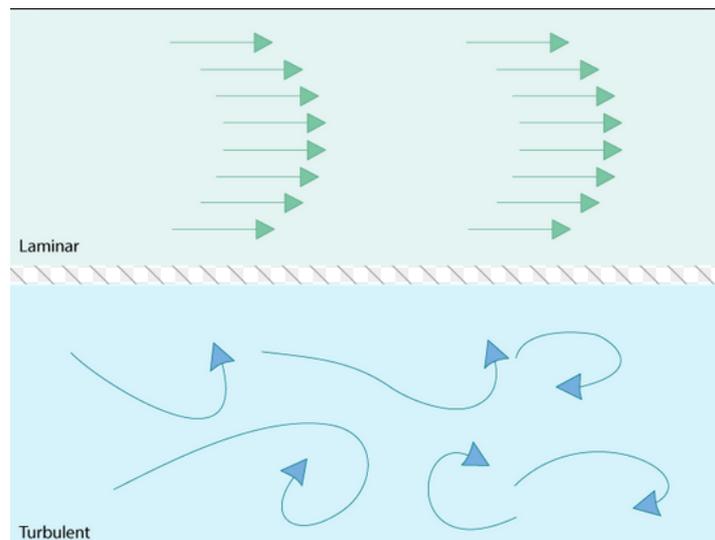


Figura 2.1 – Imagem mostrando o comportamento do escoamento do vento em um fluxo laminar e um fluxo turbulento

Fonte: Adaptada de Alex Jacobsen (2006).

De acordo com a *American Meteorology Society* (AMS) a turbulência é característica de flutuações irregulares que ocorrem no escoamento dos fluidos na qual uma ampla gama de escalas temporais e espaciais é evidenciada resultando em uma mistura eficiente de propriedades fluidas. Análises revelam que a energia cinética dos fluxos de turbulência das escalas espaciais maiores para escalas menores é transformada através de dissipação de viscosidade em energia térmica, portanto, para se manter a turbulência a energia cinética necessita ser fornecida a escalas maiores.

As escalas da turbulência são representadas pela ordem de grandeza das variáveis envolvidas no fenômeno tais como comprimento, tempo, velocidade, vorticidade e energia. Segundo Silveira Neto (2002) a turbulência é uma característica do escoamento e não do fluido, podendo ser classificada como um fenômeno altamente difusivo, dissipativo, rotacional, tridimensional, contínuo, imprevisível ocorrendo a partir de elevados valores no número de Reynolds que apresenta um largo espectro de energia.

Clark (1997) afirma que mecanismos de formação da turbulência provêm de interações com ondas de gravidade associadas com a topografia de uma determinada região e processos físicos e dinâmicos característicos do lugar. Segundo Lilly (1978) processos atmosféricos característicos de escoamentos turbulentos e não lineares associados com a propagação de ondas de grande amplitude são um exemplo de fatores físicos moduladores da turbulência.

Analisando outros aspectos da turbulência como magnitude, pode-se classificar o grau da intensidade do fenômeno em leve, moderado ou severo a partir de seu índice de severidade (WMO, 1969). Turbulências leves são os tipos mais comuns e encontrados ocasionando pequenas oscilações e suaves solavancos em aeronaves. Turbulências moderadas já podem ocasionar alterações no plano de como saídas do plano de altitude, velocidade e de rota da aeronave. As turbulências severas já podem provocar danos estruturais na aeronave, procedimentos emergências no plano de e imenso desconforto e susto aos passageiros e tripulantes. A partir de uma pesquisa realizada sobre a ocorrência de turbulências perante sua magnitude, um estudo de quatro anos foi realizado na Coreia do Sul levantando em análise a intensidade e frequência de turbulências encontradas por aeronaves como mostra a tabela 1 abaixo:

Tabela 2.1 – Categorias de tipos de turbulência (NIL) nula, (LGT) leve, (MOD) moderada, (SEV) severa ou extrema e (Missing) sem reportes, obtidas através de reportes de pilotos (PIREPs) sobre a Coréia do Sul no período entre 2003 a 2004 e de 2006 a 2008.

Turbulence intensity	No.	Percentage
NIL	4607	54.53
LGT	1646	19.48
MOD	248	2.94
SEV	7	0.08
Missing	1941	22.97
Total	8449	100.0

Fonte: Adaptada de Jung-Hoon Kim and Hye-Yeong Chun (2010).

Ondas de gravidade que se propagam para diferentes níveis da atmosfera, são mecanismos propulsores de formação da turbulência bem como os efeitos de aquecimento e resfriamento de parcelas de ar na qual regiões de forte cisalhamento do vento são criadas. Roach (1970), Reed e Hardy (1972) evidenciaram que turbulências severas encontradas em uma determinada parte da atmosfera são originadas através da formação de ondas atmosféricas e de regiões próximas a correntes de jato subtropicais. Mecikalski (2007) afirma que o fenômeno da turbulência é um distúrbio de microescala, que pode se estender de dezenas a centenas de metros.

Entretanto, com o avanço na utilização de imagens de satélite e radar, novas tecnologias foram desenvolvidas para identificação de regiões de tendência à formação da turbulência. Agregando saídas de modelos de previsão de tempo, dados observacionais e imagens de satélite, produtos de previsão e detecção de regiões de formação de turbulência podem ser desenvolvidos.

A *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) desenvolveu um produto que identifica sobre todo o território americano regiões de turbulência entre os níveis de 10.000 a 45.000 pés de altitude e seu grau de intensidade. As informações para este produto foram extraídas a partir de boletins provenientes de reportes de pilotos (PIREPs), imagens de satélite, radar e dados AIRMETs e SIGMETs disponibilizadas online e em tempo real em seu site como mostra a figura 2 abaixo:

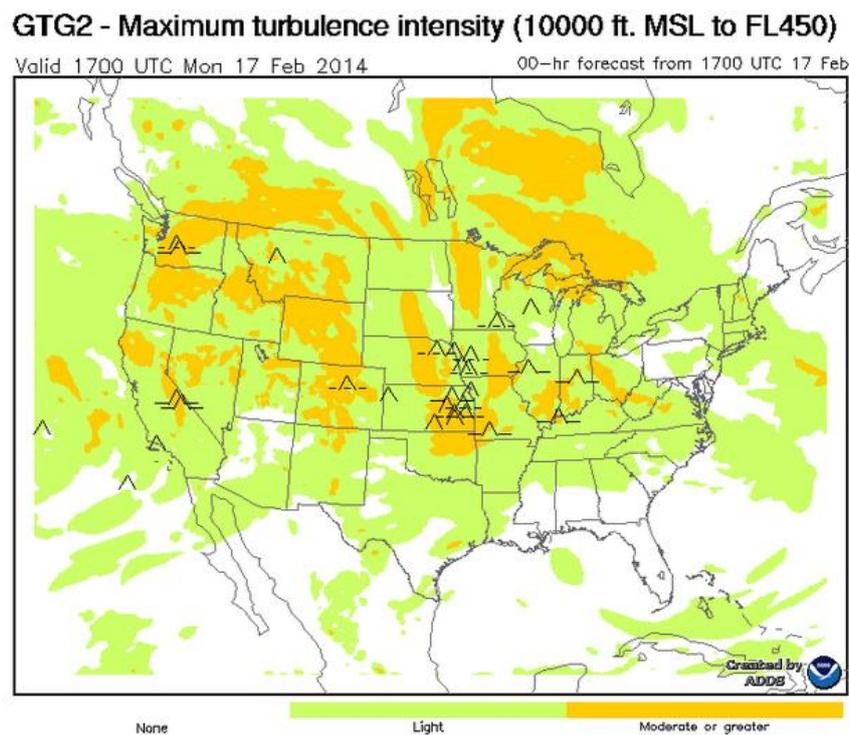


Figura 2.2 – Mapa de regiões com presença de turbulência sobre os Estados Unidos a partir de seu grau de intensidade para o dia 17 de fevereiro de 2014 válido para as 17 horas UTC entre os níveis de 10.000 a 45.000 pés de altitude.

Fonte: <http://aviationweather.gov/adds/turbulence/>

O Brasil possui em tempo real informações de reportes AIREPs, imagens de satélite e radares, cartas SIGWX, METAR, TAF e de vento em altitude. Essas informações quando combinadas poderiam nos ilustrar um mapa de regiões de ocorrência de turbulência sobre todo o território nacional e servir de aviso e alerta as pilotos que estão voando ou avaliando suas rotas antes da decolagem.

Lyra (2007) afirma que alguns indícios para a formação de áreas de turbulência podem ser encontrados através de imagens de satélite como a formação de nuvens em formato de onda na existência de intenso cisalhamento do vento entre duas camadas de uma determinada massa de ar com densidade estável e na visualização de regiões próximas a correntes de jato onde turbulências de céu claro podem estar presentes. Imagens de radar podem ser utilizadas para a identificação de nuvens de tempestade, gelo e significativo acumulado de precipitação produzindo assim informações de possíveis regiões de turbulências de origem convectivas. Dados observacionais e o mapeamento de uma determinada área podem ser úteis ao se analisar que épocas do ano, determinadas regiões estão mais suscetíveis à formação da turbulência e qual a influência da topografia no escoamento do vento.

2.2 O estudo da Turbulência na Meteorologia Aeronáutica

Alguns dos maiores impactos na aviação mundial ocasionados por condições meteorológicas adversas são atribuídos a acidentes aeronáuticos, atrasos nas operações de pousos e decolagens e desbalanço na economia de combustível (BROMLEY, 1977). Muitos fenômenos meteorológicos causadores de incidentes e agravantes no meio aéreo, podem estar relacionados à presença de turbulências de grande magnitude, presença de grande acumulado de gelo, cinzas vulcânicas em dispersão na atmosfera, “wind-shears”, “microbursts”, descargas elétricas, nevoeiros, dentre outros. No Brasil, o CENIPA elabora estatísticas e estudos na qual acidentes aéreos estão atribuídos a causas meteorológicas como formação de gelo em aeronaves, turbulências, wind-shears e baixa visibilidade.

Segundo Kaplan (2000) *National Transportation Safety Board* (NTSB), a turbulência é citada dentre um dos fatores meteorológicos adversos mais comuns no campo aeronáutico responsável pela maioria dos acidentes ou incidentes aeronáuticos sem fatalidades.

De acordo com Lester (1994) na aviação em geral, turbulências que ocorrem em uma escala de altitude de 10 a 10.000 metros de altitude que afetam diretamente aeronaves em voo são comumente nomeadas turbulências aeronáuticas.

Lane (2009) afirma que reportes meteorológicos de turbulência provenientes de aeronaves são de suma importância para o campo aéreo, pois possuem o papel de alertar e prevenir pilotos e controladores a procurarem alternativas de maior segurança tendo em vista as operações aéreas.

Um método proposto por Sharman (2006) e utilizado por Jung-Hoon Kim em 2010, propõe que para avaliar as incertezas entre dados terrenos e de altitude sobre a identificação de áreas com a presença de turbulência, pode-se comparar reportes de intensidades de turbulências com dados provenientes de reportes PIREPs com uma escala espacial de 50 km horizontalmente e 150 metros verticalmente e uma escala de 10 minutos.

Segundo Schwartz (1996) potenciais incertezas nos dados provenientes de reportes PIREPs tendo em vista regiões com potencial de ocorrência de turbulência e sua intensidade, apresentam-se como importantes aspectos a serem detalhadamente analisados quando há o interesse em reproduzir estudos e estatísticas tendo em foco a turbulência. A experiência dos pilotos ao classificarem uma turbulência através de seu grau de severidade e localização por meio dos reportes, pode apresentar diferenças numa escala de tempo de 10 a 100 segundos por quilômetros da atual localização observada comparando-se com medidas em superfície (CORNMAN, 2004).

Em regiões de turbulência os pilotos se utilizam de reportes para classificar a intensidade da turbulência em uma escala de 0 a 8, sendo o nível 0, sem registros de turbulência, nível 1, turbulência muito leve, nível 2, turbulência leve, nível 3, turbulência de leve para moderada, nível 4, turbulência moderada, nível 5, turbulência de moderada para severa, nível 6, turbulência severa, nível 7, turbulência severa a extrema e nível 8, turbulência extrema. Na figura 3 um reporte de pilotos PIREPS é apresentado indicando possíveis regiões de turbulência sobre os Estados Unidos para o dia 19.02.2014 válido entre as 17:19 e 18:38 UTC.

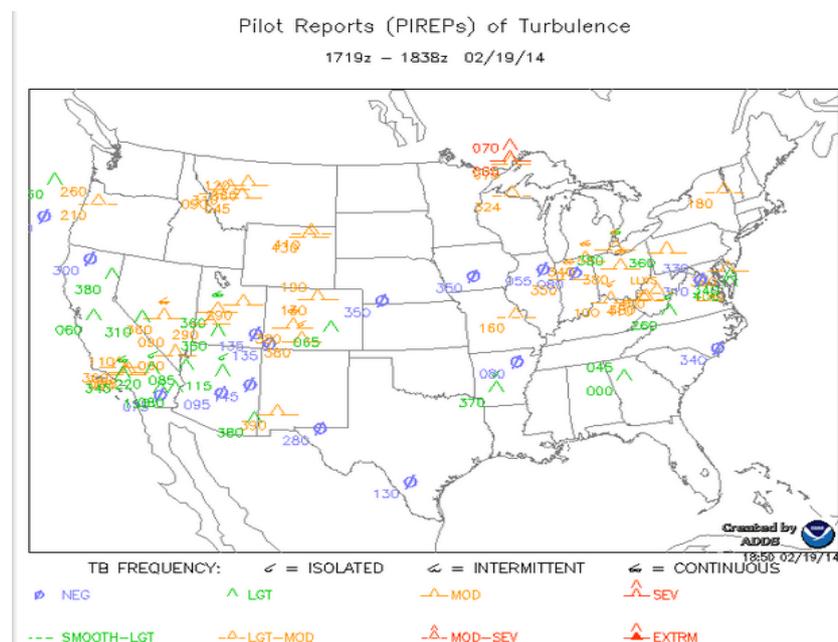


Figura 2.3 – Mapa elaborado a partir de reportes PIREPS contendo regiões com presença de turbulência sobre os Estados Unidos com seu grau de intensidade para o dia 19 de Fevereiro de 2014 valido entre 17:19 e 18:38 UTC horas UTC.

Fonte: <http://aviationweather.gov/adds/pireps/displaypireps>

2.3 A classificação dos tipos de Turbulências

Segundo Lane (2009) o entendimento entre o fator fonte e a turbulência ainda não é de grande compreensão para os cientistas até os dias atuais, entretanto a análise de diferentes tipos de distribuições de escalas espaciais e temporais de eventos de turbulências encontra-se de grande auxílio para a elaboração de estatísticas e probabilidades de comparação entre o evento e sua origem. Utilizando um modelo numérico de previsão de meso-escala e comparando simulações extraídas de regiões de turbulência com reportes de aeronaves, Lane (2009), evidenciou que a turbulência está intimamente interligada a processos de larga-escala e características do escoamento do vento a partir da topografia local.

Wolff e Sharman (2008), afirmam que estudos de eventos de turbulências em diferentes localidades são essenciais para prover informações e dados sobre o fenômeno e sua região de ocorrência objetivando a elaboração de alertas e prognósticos para centros de controle aéreo e aeronaves em voo visando questões como segurança, economia e conforto. Comparando-se dados de reportes de turbulência provenientes de aeronaves com características provenientes de análises extraídas de modelos numéricos de previsão, Wolff e Sharman (2008) evidenciaram que turbulências de intensidade moderada a severa do tipo intra-nuvem ocorrem em uma escala vertical entre 4 a 6 km de altitude enquanto turbulências associadas a condições de céu claro ocorrem em uma escala entre 9 a 11 km de altitude.

No estudo dos diversos tipos de turbulência existentes, inúmeros trabalhos e pesquisas foram realizados com o objetivo de se estudar e analisar os principais fatores responsáveis pela sua origem e formação. Dentre eles, podemos citar o estudo de Lilly (1971) e Clark (2000) sobre turbulências do tipo orográficas, Ellrod e Knapp (1992) sobre turbulências de céu claro decorrentes de correntes de jato e Pantley e Lester (1990) sobre turbulências decorrentes de nuvens convectivas.

Keller (1983), Pantley e Lester (1990) evidenciaram através de estudos realizados sobre a severidade de sistemas tempestuosos que nuvens convectivas do tipo cumulonimbus com grande desenvolvimento vertical são os principais mecanismos moduladores de turbulências de origem convectiva.

Eitls (1987) afirma que nuvens convectivas geradoras de turbulências desse tipo são mecanismos de formação do de wind-shears (WS) ou cortantes do vento, tendo como origem correntes descendentes de vento intensas conhecidas como “downdrafts“ que quando muito intensos originam os “macro“ e “microbursts“, resultando em uma estatística de inúmeros acidentes aeronáuticos.

A figura 4 exemplifica através de um resumo gráfico a caracterização dos variados tipos de turbulências estudadas e documentadas neste capítulo, dentre elas a turbulência de céu claro associada com ondas de montanhas, corrente de jato, topo e proximidades de nuvens de tempestades, turbulência do tipo térmica e mecânica em baixos níveis e turbulência convectiva:

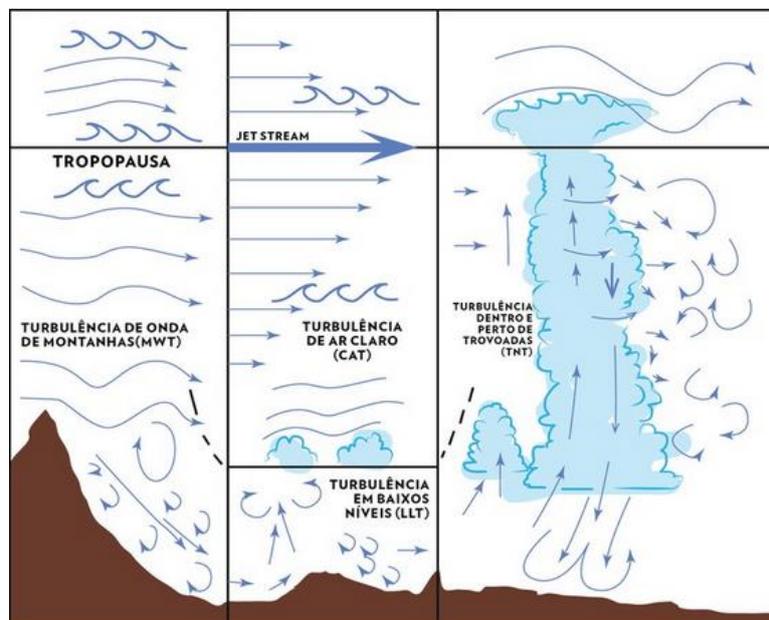


Figura 2.4 - Resumo Gráfico da caracterização dos diversos tipos de turbulências encontradas e documentadas.

Fonte: Adaptada de Villela (1998).

Pesquisas e trabalhos publicados revelam que turbulências convectivas são decorrentes de intensas oscilações verticais de correntes ascendentes e descendentes na presença de intenso cisalhamento vertical e horizontal do vento. Sistemas frontais podem também gerar turbulências do tipo convectivas ou tipo frontais na presença de bandas de forte nebulosidade e de nuvens convectivas de topos altos e frios.

Segundo Burnham (1970) bruscas mudanças no comportamento das correntes de vento evidenciam-se como mecanismos propulsores desse tipo de turbulência em áreas próximas a tempestades severas ou dentro de nuvens com grande desenvolvimento vertical. As distribuições sazonais possuem notável relevância ao se analisar o comportamento da atmosfera perante as diferentes taxas de aquecimento e resfriamento de acordo com cada estação do ano fornecendo-se uma análise dos tipos de formações meteorológicas mais frequentes de cada época do ano.

Segundo Wolff e Sharman (2008) incidentes aeronáuticos decorrentes de turbulências convectivas sobre o Texas e a Florida nos Estados Unidos, apresentavam um período de maior ocorrência na primavera e no verão onde os gradientes de aquecimento e umidade são mais intensos do que em outras épocas do ano. Vinnichenko (1980) afirma que as turbulências convectivas não somente ocorrem próximas ou abaixo de sistemas convectivos, mas também no topo desses sistemas onde fortes correntes verticais estão presentes.

Esse tipo de turbulência de topo de nuvens de tempestades é ocasionalmente imprevisível pelos pilotos em quando o radar interno da aeronave não está em modo correto resultando em incidentes com passageiros e tripulantes segundo pesquisa da NTSB na década de 80. Com o uso de tecnologia de radares nas aeronaves mais modernas, procedimentos de desvio de rota, mudança de nível de e diminuição de velocidade de cruzeiro se encontram como procedimentos de segurança de importante relevância na aviação.

Não somente nuvens densas ou de tempestades são geradoras de turbulências, outros estudos e trabalhos apontam que variações de temperatura e pressão próximas à superfície podem ser fatores de geração de turbulências térmicas. Esse distúrbio meteorológico existe quando intensos bolsões de ar quente ascendentes são gerados a partir de um forte aquecimento diferencial da superfície criando uma região com intensos fluxos turbulentos.

Turbulências mecânicas também ocorrem próximas à superfície, pois se originam através da dispersão do fluxo do vento por meio de barreiras artificiais como edifícios, torres ou morros afetando aeronaves que se deslocam a baixa altitude.

Lilly (1971), Clark (2000) e Doyle (2005) afirmam que um determinado tipo de turbulência pode ser evidenciado através da relação entre a topografia de terrenos geográficos instáveis e acentuados com a camada atmosférica acima presente, originando mecanismos de formação de turbulências orográficas produzidas por ondas de montanhas. Segundo Lilly e Kennedy (1973) a instabilidade de ondas orográficas e sua consequente quebra são importantes fatores de iniciação desse tipo de turbulência. Regiões que apresentam terrenos topográficos elevados como as Montanhas Rochosas nos Estados Unidos, a cadeia de montanhas dos Andes na América do Sul e os Alpes na Europa, são descritas como localidades de inúmeros reportes de turbulências produzidas pela quebra de ondas de montanha (LANE, 2009).

Outro tipo de turbulência de grande importância, em especial para a aviação geral, são as esteiras de turbulência, em inglês “Wake Turbulence”. Esse distúrbio atmosférico ocorre durante pousos, decolagens e em quando intensos redemoinhos e vórtices que podem chegar até 300 km/h são produzidos na ponta da asa de aviões dependendo do tamanho e peso da aeronave em questão. Segundo estudos da FAA, essas esteiras ocorrem quando o fluxo de ar que passa abaixo da asa de uma aeronave é conduzido em torno da ponta da asa para a região acima da asa através da diferença de pressão maior abaixo da asa e menor acima da asa, criando assim um rastro de esteiras de turbulência.

Segundo Ellrod e Knapp (1992) regiões próximas a correntes de jato podem se encontrar propícias a existência de turbulências de céu claro. Esse tipo de distúrbio atmosférico se classifica como um dos maiores desafios em termos de detecção e previsão no meio meteorológico e aeronáutico até os dias de hoje, contabilizando inúmeros incidentes no meio aéreo e de grande perplexidade de entendimento. A seguir com maiores detalhes a CAT será evidenciada e documentada.

2.4 A definição da Turbulência de Céu Claro

Condições atmosféricas de céu claro na atmosfera podem estar associadas com diversos fatores meteorológicos como regiões de subsidência do ar, presença de massas de ar estáveis, pré-entrada de sistemas frontais, nuvens cirrus locais e regiões nas quais correntes de jato estão presentes. Entretanto tais condições podem ser o anúncio para uma possível presença de uma turbulência de céu claro.

A partir de estudos sobre as correntes de jato na qual integram a circulação global do planeta e da criação de sistemas mundiais de observações com balões meteorológicos e a evolução da aviação com aeronaves voando em altitudes mais elevadas, tornou-se possível detectar regiões de forte cisalhamento do vento próximas a áreas de encontro entre duas massas de ar que apresentavam direções e velocidades de deslocamento distintas. Nessas localidades em grandes altitudes, intensas e abruptas perturbações e oscilações eram presenciadas em condições de céu claro, na qual se foi denominado o nome de CAT.

Segundo Villela (1998), regiões de forte turbulência podem ser encontradas nas proximidades do núcleo da corrente de jato onde os ventos podem chegar até 205 km/h, próximas a tropopausa inclinada acima do núcleo, na frente da corrente de jato por baixo do núcleo e no lado de baixa pressão do núcleo. Variações do vento na corrente de jato podem apresentar uma variação na vertical de 35 km/h em 1000 metros e na horizontal de 125 km/h em 100 km vital para pilotos e aviadores analisarem que rotas possuem condição de serem mais ou menos seguras e econômicas e conseqüentemente quais possam estar sujeitas a presença da CAT (MIRAPALHETE, 2004).

A Figura 5 abaixo aborda um reporte de CAT ilustrado no estudo de Villiers e Van Heerden, 2001), na qual áreas de probabilidade da existência da CAT se encontram próximas a corrente de jato e a tropopausa.

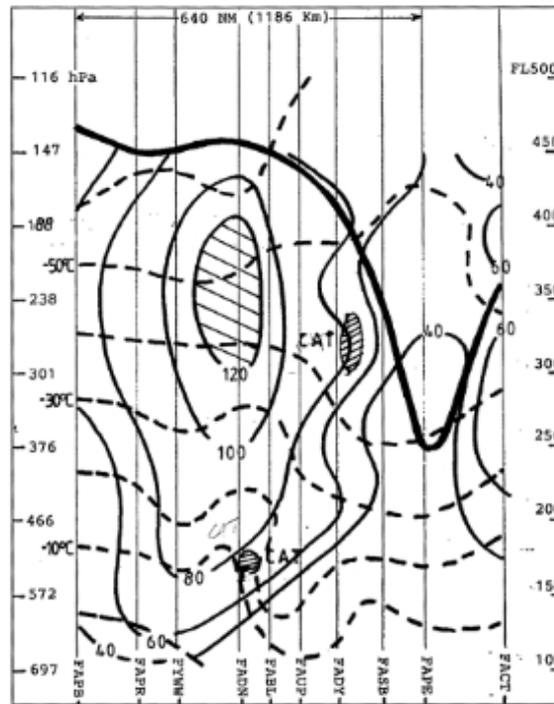


Figura 2.5 – Seção transversal de vento (em nós, linhas sólidas), temperatura do ar ($^{\circ}$ C, linhas tracejadas), tropopausa (linha sólida escura), núcleo da corrente de jato (linhas tracejadas espaçadas) e locais de CAT (linhas tracejadas espaçadas) para 1200 UTC em 18 de Setembro 1996 sobre a África do Sul
 Fonte: Adaptada de Villiers e Van Heerden (2001).

As turbulências de céu claro associadas a correntes de jato em altitude se caracterizam por serem turbulências invisíveis, pois acontecem na ausência de formação de nuvens, entretanto outras escalas de CAT estão associadas com circulações secundárias de processos convectivos como microbursts e a macroburts. De acordo com Molarin (2013) a CAT pode ser definida como uma turbulência não convectiva, em áreas sem a presença de nuvens na troposfera e fora da camada limite planetária. Overeem (2002) afirma que uma turbulência de céu claro está associada a uma variedade de movimentos de flutuações irregulares em uma atmosfera de céu claro em grandes altitudes.

Segundo Beckwith (1971) turbulências de origem não convectiva e sem relação com processos mecânicos característicos das camadas de fricção da camada limite planetária podem ser aplicadas na definição da CAT. Lester (1994) afirma que a média de tempo contínua na qual uma aeronave voa em um trecho de contendo CAT de intensidade leve ou maior, é em torno de 16 minutos e a média contínua no tempo de em um trecho de CAT com intensidade severa ou extrema é de alguns poucos minutos.

Pela característica de difícil detecção e identificação, a CAT é reportada na maioria dos casos através de reportes de aeronaves em no formato de dados AIREPS, PIREPS e AMDAR. Os dados fornecem a localidade, dia, horário e nível de no qual se presenciou a turbulência. Vale ressaltar que a CAT provoca efeitos em maior magnitude em aeronaves de pequeno porte em relação às de maior porte.

Em termos de magnitude, a CAT é medida e classificada a partir do grau de severidade em leve moderada ou severa dependendo dos danos e das alterações na dinâmica de de uma determinada aeronave (MOLARIN, 2013).

Através de observações realizadas, inúmeros casos de CAT estão associados com correntes de jato e ondas de gravidade em regiões montanhosas. A CAT pode ser formada através de diversos fatores, dentre eles o aumento no cisalhamento do vento vertical e horizontal e intensos “wind-shears” em grandes altitudes na qual o vento aumenta significativamente de velocidade com a distancia.

De acordo com Lester (2001) e Keller (1990) a CAT pode resultar de ondas atmosféricas produzidas por fortes cisalhamentos decorrentes de fortes ventos que cruzam o topo de tempestades do tipo CB. Outros tipos de ondas atmosféricas associadas a ciclones extratropicais, vórtices ciclônicos e ondas curtas também são fontes de formação da CAT. Lester (1994) afirma que a CAT e regiões de cristas em altos níveis estão conectadas através de diversos fatores físicos e meteorológicos, pois apresentam um forte cisalhamento do vento e estabilidade atmosférica nas duas situações. Overeem (2002) afirma que um grande número de reportes de CAT está associado a regiões de pequenas dimensões verticais com grande cisalhamento vertical do vento e camadas termicamente estáveis denominadas de frente interna ou zona baroclínica.

Segundo Mancuso (1969) em determinados locais da atmosfera associados a frentes em altos níveis e na região da tropopausa, a existência da CAT está associada a correntes de jato e regiões de cristas e cavados bem definidas. Nos níveis médios, algumas turbulências de céu claro podem estar associadas com correntes de vento produzidas por cadeias de montanhas ou regiões de forte cisalhamento do vento.

O entendimento da topografia local de uma região aliada a estudos dos ventos predominantes se revela um importante método de estudo da CAT de origem orográfica. Villela (1998) afirma que a CAT originada por ondas de montanha, acontece quando uma onda estacionária com correntes verticais acentuadas é formada a partir de uma forte corrente de ar estável que se desloca perpendicularmente a uma crista montanhosa no lado de sotavento.

Segundo o Meteorological Office College (1997) as dimensões de uma CAT são de uma área horizontal de 80 a 500 quilômetros ao longo da direção do vento e de 20 a 100 quilômetros transversal ao fluxo do vento. As dimensões verticais variam entre 500 e 1000 metros. Bakker (1993) afirma que o tempo de vida de uma CAT varia entre 30 minutos a um dia. Em termos de altitude, a CAT pode ser encontrada entre os níveis de 20 a 60 mil pés de altura, sendo mais comuns entre 30 a 60 mil pés de altitude.

De acordo com Hopkins (1977) a CAT apresenta dois importantes mecanismos de formação. O primeiro mecanismo se relaciona a ondas produzidas por barreiras naturais como cadeias de montanhas ou terrenos acidentados e o segundo mecanismo se relaciona a presença de nuvens na forma de ondas decorrentes da instabilidade Kelvin-Helmholtz (KHI) podendo ocorrer em camadas estáveis com um intenso cisalhamento vertical do vento. Hopkins (1977) afirma que esses mecanismos são mais intensos durante período do inverno onde os gradientes de temperatura e as variações na velocidade do vento são maiores.

Venkatesh (2013) afirma que grande parte das análises teóricas considera a CAT como resultado de um determinado tipo de KHI provenientes de camadas de grande cisalhamento na atmosfera. Atlas (1970) observou que a formação, crescimento e quebra de uma onda Kelvin-Helmholtz apresentava semelhanças quando comparadas a observações feitas em fluxos no cisalhamento do vento em um laboratório evidenciando-se que essa quebra estava interligada a turbulência.

De acordo com Venkatesh (2013) a KHI se caracteriza por ser uma instabilidade linear na interface horizontal de duas correntes de ar que possuem densidades e velocidades distintas visualizadas a partir de nuvens em formato de onda como mostra a figura 6 abaixo:



Figura 2.6 – Nuvens formadas a partir de duas camadas de ar com altas velocidades de cisalhamento sujeitas à instabilidade Kelvin Helmholtz.

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

2.5 Metodologias de detecção e previsão de Turbulências de Céu Claro

A dificuldade na previsão e identificação de regiões com a presença de uma CAT está nas pequenas dimensões espaciais e temporais do fenômeno e por se classificar como um distúrbio atmosférico de micro-escala. Segundo Bass (1999), a CAT associada a ondas de montanhas em regiões montanhosas pode apresentar maior confiabilidade de previsão por meio da visualização da presença de nuvens lenticulares e nuvens no formato de ondas, entretanto outros tipos de CAT associadas a regiões próximas a tropopausa, correntes de jato ou frentes e cavados em altos níveis são de alta imprevisibilidade.

Segundo Ellrod (1989) a CAT apresenta rápidas mudanças em suas características através do tempo que normalmente não são detectadas pela rede de observação em grandes altitudes, dificultando assim, a previsão da uma possível CAT.

No meio aeronáutico, as previsões de CAT são relatadas por meio de reportes de aeronaves que estiveram na região da turbulência e repassadas para as cartas SIGWX, porém pela CAT ser um fenômeno de microescala e apresentar bruscas mudanças em seu comportamento e suas características, podendo se dispersar em uma rápida escala espacial, as cartas nem sempre trazem um bom acerto na previsão de uma CAT. Avisos de WS de baixa altitude associado a condições de céu claro e avisos de aeródromo também são realizados pelos centro de previsão da aeronáutica.

Lester (1994) afirma que as probabilidades de previsão de se encontrar áreas de CAT são muito pequenas mesmo com um bom conhecimento do previsor sobre fenômenos de grande escala que podem estar influenciando na formação da turbulência. Dependendo da latitude da região em análise as previsões de CAT podem se tornar mais de menor ou menor complexidade de previsão.

Saídas de modelos numéricos de previsão do tempo, análises de índices de turbulência, imagens de satélite e o acompanhamento sinótico de sistemas meteorológicos se encontram dentre as principais ferramentas utilizadas na previsão de turbulência do tipo CAT.

Segundo Ellrod e Knapp (1992) índices de turbulência não necessariamente possuem uma grande confiabilidade quando aplicados a saídas de modelo de previsão do tempo com o intuito de se detectar a CAT, entretanto apresentam aos previsores uma boa probabilidade de se encontrar regiões que possuem ou não uma significativa probabilidade de ocorrência de fortes turbulências.

Com o avanço da tecnologia em radares, um sistema de radar que se utiliza da técnica de radiação ultravioleta a laser em ondas curtas está sendo desenvolvido pela NASA em parceria com instituições tecnológicas da Alemanha para detecção de turbulências CAT baseado no tempo de retorno da emissão de um laser de volta a sua origem. Através do tempo calculado de retorno do laser, o espalhamento das moléculas de aerossóis e as oscilações de velocidade do vento perante o sinal emitido traduzem a possibilidade da existência da turbulência. Outra ferramenta utilizada para detecção de áreas com probabilidade de ocorrência de CAT se baseia na análise de variâncias provenientes de radares Doppler.

Imagens de satélite também são capazes de fornecer um bom indicativo de se detectar regiões com a presença de CAT apesar do uso da tecnologia do sensoriamento remoto ser de difícil previsibilidade (KNOX, 2001). Segundo Overeem (2002) assinaturas provenientes de imagens de satélite no canal do vapor d'água, visível e infravermelho estão associadas com grande parte da formação e decorrência da CAT na qual bandas de nuvens cirrus transversais à direção do vento estão presentes. De acordo com Ellrod (2000), a presença de nuvens transversais próximas à região do jato subtropical indica grande magnitude no cisalhamento vertical e horizontal do vento, características associadas à possível presença da CAT.

A presença de nuvens no formato de ondas pode também ser um indicativo de uma CAT a partir da presença da instabilidade Kelvin-Helmholz. Bandas transversais de nuvens e nuvens no formato de ondas são bons indicadores de CAT, pois apesar de diferirem em escala espacial, apresentam características em comum como nuvens cirrus e nuvens de níveis médios em sua composição atmosférica estando perpendicular a direção do vento como mostra a figura 7.

A figura abaixo apresenta uma imagem de satélite de identificação de áreas de possível presença de uma CAT:

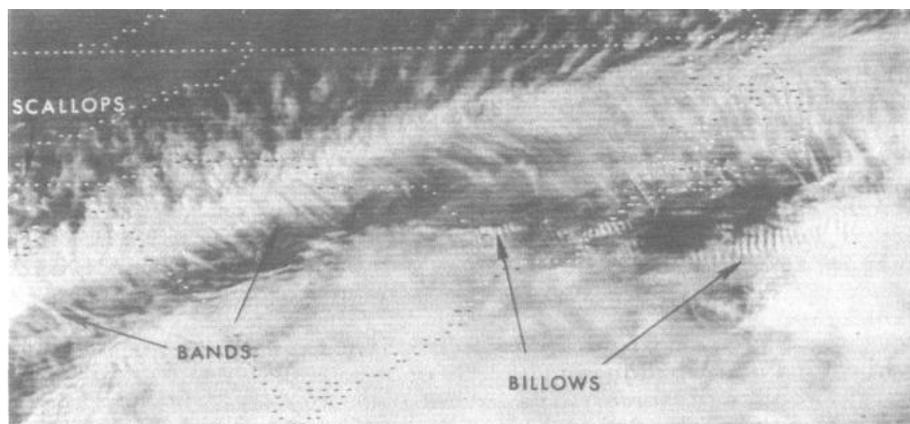


Figura 2.7 – Imagem do satélite GOES no canal do visível mostrando nuvens no formato de ondas (billows) e bandas de nuvens transversais (bands) com o objetivo de se analisar regiões com a presença de CAT.

Fonte: Adaptada de Ellrod (1989).

2.6 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, no qual ocorre à 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 de possibilidade de ocorrência de CAT sobre essas áreas. Outra região de notoriedade de formação de uma CAT pode ser evidenciada na confluência da corrente de jato polar com a corrente de jato subtropical brasileira, sobre o 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 exemplos de outras 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 encontram-se como os meios e instrumentos mais utilizados para se analisar uma região com possibilidade da ocorrência da CAT.

Dentre trabalhos realizados sobre a CAT no país, podemos citar o estudo realizado por Lyra e Chou (2007) na qual 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. Dentre os resultados deste estudo, se foi constatado que com até 72 horas de previsão os indicadores de turbulência conseguiram indicar um sinal de turbulência em relação a previsões subjetivas de 24 horas 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 na qual se evidenciou com maior frequência entre os níveis de 33 a 37 mil pés, destacando o período de inverno como o mais frequente.

2.7 Índices de Turbulência

Objetivando um método de detecção e previsão de CAT, índices de turbulência foram criados e desenvolvidos para atender tal finalidade. Dulton (1980) afirma que índices de CAT são baseados em campos encontrados a partir de modelos numéricos de previsão do tempo expressando a probabilidade de encontro ou não de uma CAT. De acordo com (Lyra, 2007), esses índices estão baseados em parâmetros atmosféricos como estabilidade estática e cisalhamento vertical e horizontal do vento, avaliando-se assim valores acima ou abaixo de seus limiares quanto à presença de uma possível CAT.

Dentre os índices de turbulência existentes podemos citar o Número de Richardson, os Índices de Turbulência Ellrod I e II e o Índice Brown baseados em diversos parâmetros físicos, atmosféricos e dinâmicos como o cisalhamento vertical e horizontal do vento, deformação e convergência horizontal, vorticidade absoluta dentre outros.

2.8 Número de Richardson

O Escoamento ou fluxo do vento numa camada ou massa de ar estaticamente estável torna-se turbulento através da magnitude do cisalhamento do vento. Segundo Mahoney (2000) teorias e observações têm mostrado que a instabilidade KHI, possível cenário para a presença da CAT, ocorre quando o número de Ri apresenta pequenos valores. Evidencia-se que quando o Ri apresenta pequenos valores, condições favoráveis para a existência da turbulência podem ser levadas em consideração (Drazin; Reid, 1981; Dutton; Panofsky, 1970; Kronebach, 1964).

Através da estabilidade dinâmica existente, o número de Richardson (Ri) torna-se um importante parâmetro para se analisar uma atmosfera propícia a ocorrência da turbulência. Lyra (2007) afirma que parâmetros associados ao número de Richardson como estabilidade estática e o cisalhamento vertical do vetor horizontal do vento são parâmetros dinâmicos que possuem a finalidade de alterar parâmetros da estrutura vertical da atmosfera para produção da turbulência e da CAT.

Segundo Sutton (1953), é comumente assumido que a turbulência existe em determinadas condições atmosféricas quando o número de $Ri < 1$. De acordo com Endlich (1964), pequenos valores de Ri , poderiam ser atribuídos ao desenvolvimento da turbulência assim como poderiam estar relacionados a regiões com presença ou não do fenômeno. Em um estudo realizado, Endlich (1964) afirma que apesar da taxa de variação do vento se encontrar estável em uma zona turbulenta o maior cisalhamento verificado causou ao número de Ri estar próximo ao valor de 0,5.

Lyra (2007) afirma que a correlação entre Ri extraídos de sondagens de ar superior e reportes de CAT é muito pequena devido à baixa resolução vertical dos dados de sondagens de ar superior. Para uma melhor correlação entre o número de Ri e a presença de CAT, aeronaves militares e de pesquisa possuem tecnologia e instrumentos a bordo para melhor adaptar e desenvolver futuros estudos entre índices de turbulências e CAT.

2.9 Índices de Turbulência Ellrod

Ellrod e Knapp (1992) criaram dois significativos índices de turbulência muito utilizados no meio científico militar e civil para o cálculo de regiões propensas à formação da turbulência. Ambos apresentaram um método de previsão de CAT baseados na produção de termos cinéticos, dentre eles o cisalhamento vertical do vento, deformação horizontal e convergência horizontal. Segundo Molarin (2013) os índices criados por Ellrod e Knapp (1992) possuem sua origem na relação entre o vento térmico e a equação da frontogênese para definir a probabilidade de existir turbulência.

Analisando-se o estudo realizado por Lyra (2007) ao se utilizar o índice Ellrod a partir de saídas do modelo ETA para fins de previsão de um estudo de CAT, os termos do indicador em análise, tais como deformação horizontal, cisalhamento e estiramento foram os que apresentaram maior importância, considerando assim, o indicador de turbulência Ellrod a partir de sua eficácia como um bom índice de representação da turbulência.

Segundo Ellrod e Knapp (1992) o índice de turbulência Ellrod ($TI2$) baseado nas simplificações da equação frontogênica, depende principalmente do gradiente de temperatura potencial, deformação e convergência horizontal. De acordo com Lyra (2007), o índice ($TI2$), baseado no cálculo do produto do cisalhamento vertical do vento (VWS) pela soma da deformação horizontal (DEF) e convergência horizontal (CVG) é muito utilizado pelo Aviation Weather Center (AWC) pertencente a NOAA para detectar regiões de turbulência nos Estados Unidos.

2.10 Índice Brown

Segundo Roach (1970) o índice Brown pode ser atribuído à simplificação da equação de tendência do número de Richardson. Roach (1970) afirmou que se processos de deformação em escala sinótica reduzem o número de Ri ao longo de uma camada abaixo de seu valor crítico, a resultante da turbulência tende a aumentar o número de Ri na camada em análise. Evidencia-se que o fator turbulência, irá decair ao menos que o número de Ri possa ser mantido abaixo de seu valor crítico pelos processos de deformação.

De acordo com Buss (2005) a expressão para a dissipação de energia foi derivada assumindo-se que a turbulência (aumentando-se o número de Ri ao longo da camada) funciona contra os processos de deformação (reduzindo-se o número de Ri ao longo da camada), portanto, o resultado líquido se baseia em que o número de Ri em toda a camada é atribuído a um pequeno valor limite.

Lyra (2007) afirma que para deduzir a equação da tendência do número de Ri, Roach (1970) definiu que a turbulência tipo CAT, deveria ser representada pela descontinuidade do vento e temperatura no plano vertical pela deformação por cisalhamento e estiramento.

A partir do estudo de Lyra (2007), os termos do índice Brown tais como deformação horizontal, cisalhamento e estiramento foram os que também apresentaram maior importância, apresentando-se o indicador Brown como um bom índice de representação da turbulência levando-se em análise o seu desempenho.

A simplificação desse índice se utiliza em algumas relações empíricas a relação do vento térmico e o vento gradiente como aproximação do vento horizontal. Segundo Lyra (2007), após Brown (1973) remover os termos efeitos de flutuação na orientação do vetor cisalhamento do vento a equação do índice de turbulência Brown foi deduzida.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Áreas de Estudo

Foram definidas neste trabalho, a Região de Informação de de Brasília (FIR-BS) e a Região de Informação de de Curitiba (FIR-CW) como as áreas de estudo e análise. Ambas as regiões foram escolhidas, por concentrarem grande parte do tráfego aéreo brasileiro e por apresentarem características de localização, características físicas e atmosféricas de possuírem áreas de formação e desenvolvimento de potenciais turbulências de céu claro perante outras regiões no país. Outras regiões de informações de voo como as controladas pelo CINDACTA III (Recife) e CINDACTA IV (Manaus) podem também ser avaliadas para futuros estudos.

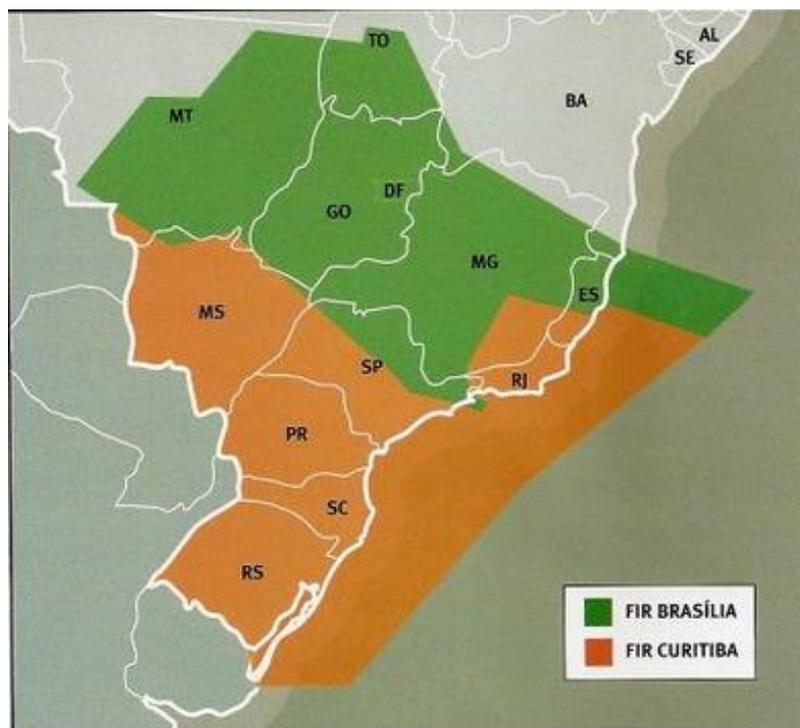


Figura 3.1 – Mapa representativo da localização geográfica da FIR-BS e FIR-CW.

Fonte: DECEA (2014)

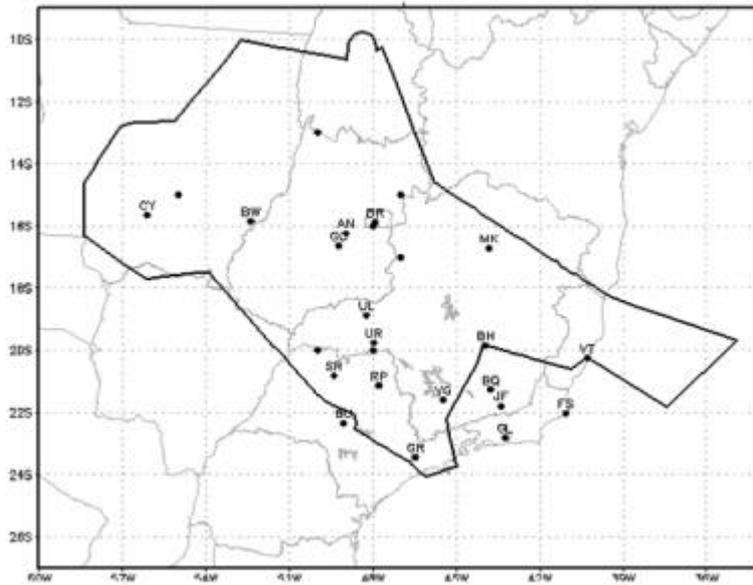


Figura 3.2 – Representação geográfica da região da FIR-BS na qual os pontos em negrito baseiam-se nos indicativos de aeroportos OACI.

Fonte: REDEMET (2013)

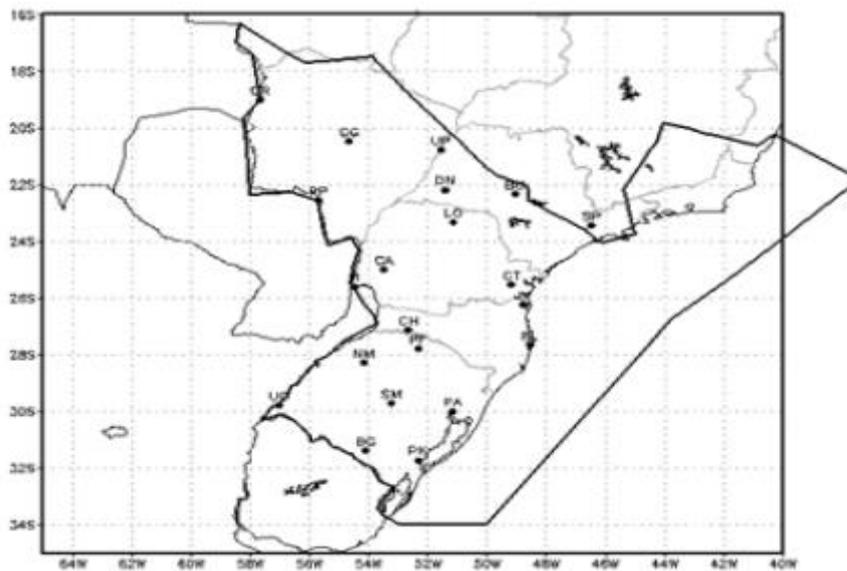


Figura 3.3 – Representação geográfica da região da FIR-CW na qual os pontos em negrito baseiam-se nos indicativos de aeroportos OACI.

Fonte: REDEMET (2013)

3.2 Metodologia

3.2.1 Estudo climatológico dos dados AIREP de Turbulência

O objetivo principal desta pesquisa se baseia em realizar uma climatologia da CAT para os anos de 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 até abril de 2014 a partir de dados de registros de aeronaves AIREPS. Vale ressaltar que regiões onde não existam aeronaves em podem também se encontrar como áreas de presença do fenômeno, portanto poderá existir CAT em determinada localidade e não haver s para termos de registro, portanto o estudo realizado baseia-se em regiões onde existem aeronaves em . Para a realização deste trabalho, foram estudados e avaliados 5338 dados AIREPS de turbulência adquiridos junto ao DECEA/Brasília na qual parâmetros como localização geográfica, horário de ocorrência, nível de altitude, período do ano, sazonalidade e intensidade do fenômeno foram considerados. Cada dado AIREP foi destinado primeiramente a sua região de ocorrência dentro da FIR-CW ou FIR-BS para uma análise espacial. Em seguida uma análise temporal e sazonal foi realizada para determinar o horário, mês e a estação do ano de ocorrência e por final uma análise dos padrões de intensidade e altitude. Gráficos de distribuição de frequência serão elaborados para fins de comparação e análise dos parâmetros em questão verificados.

3.2.2 Estudo de Caso

Para a análise de três casos de CAT severa sobre duas aeronaves da companhia Azul Linhas Aéreas e uma aeronave da companhia Tam Linhas Aéreas para o dia 03 de junho de 2013 as 17:12 UTC, 17:26 UTC e 17:36 UTC sobrevoando regiões próximas, foram levados em consideração os seguintes parâmetros e análises:

1. Análise Sinótica;
2. Análise de imagens de satélite;
3. Análise de dados de radiossondagem;
4. Cartas SIGWX;
5. Cartas de Vento;
6. Previsões do modelo WRF;
7. Aplicação dos índices de turbulência Ellrod I e II e índice Brown calculados a partir da extração de suas variáveis provenientes de informações de dados de reanálise do ERA-Interim. Perante os valores e limiares extraídos dos cálculos, pode-se comparar com os parâmetros de verificação de regiões com a presença ou não da turbulência.

Índice Ellrod I:

O índice de turbulência Ellrod (TI1) é calculado através do produto da deformação horizontal com razão entre o cisalhamento vertical do vento com a altura.

$$TI1 = DEF \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.1)$$

Na qual TI1 é atribuído ao Índice de Turbulência Ellrod (TI1), DEF é a deformação, ∂V o cisalhamento vertical do vento e ∂z a variação com a altura.

O Índice de Turbulência Ellrod (TI2) pode ser exemplificado através de equação dois como abaixo mostrada na qual ∂V é atribuída ao cisalhamento vertical do vento, ∂z a variação com a altura, DEF a deformação horizontal e CVG a convergência horizontal.

Índice Ellrod II:

$$TI2 = (DEF + CVG) \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.2)$$

Outra forma de se definir o Índice de Turbulência Ellrod (TI2) pode ser também exemplificada através de equação três abaixo na qual o índice é calculado através do produto do cisalhamento vertical do vento (VWS) pela soma da deformação horizontal (DEF) e convergência horizontal (CVG), sendo u atribuído a componente zonal do vento, v atribuído a componente meridional do vento e z a variação com a altura.

$$ETI = VWS \times (DEF+CVG) \quad (3.3)$$

$$\text{Sendo:} \quad VWS = \frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z} \quad (3.4)$$

$$\text{Sendo:} \quad CVG = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Sendo:} \quad DEF = \left[\left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right]^2 + \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Índice Brown:

$$\Phi_m = \sqrt{\underbrace{0,3 x \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right)^2}_1 + \underbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2}_2 + \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2}_3} \quad (3.7)$$

Na qual u , é atribuída a componente zonal do vento, v a componente meridional do vento, f é definido como o termo de coriolis, O termo 1 é atribuído a vorticidade absoluta, o termo 2 é a deformação por cisalhamento e o termo 3 seria a deformação por estiramento. Segundo Lyra (2007) quanto maior a valor do índice de turbulência Brown maior a probabilidade da existência de CAT.

3.3 Dados

3.3.1 Dados de Satélite.

Foram obtidas para este estudo, imagens do satélite geostacionário GOES-13 provenientes do banco de dados de imagens de satélite da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A partir dos dados do GOES-13, foram adquiridas imagens no canal 4 do infravermelho e no canal do infravermelho-realçada para as 17:30 UTC do dia 03 de junho de 2013.

3.3.2 Dados de Radiossondagem.

Foram utilizados os perfis de direção e velocidade do vento para as 00 e 12 UTC do dia 03 de junho de 2013 a partir de dados obtidos através do lançamento de radiossondas por parte das estações meteorológicas de altitude localizadas no Aeroporto Internacional Afonso Pena em Curitiba e no Aeroporto do Campo de Marte em São Paulo. Os respectivos dados foram obtidos junto a Universidade de Wyoming nos Estados Unidos.

3.3.3 Cartas SIGWX

As cartas SIGWX foram obtidas junto à Rede de Meteorologia da Aeronáutica (REDEMET) para o nível de 25 mil pés (FL250) correspondentes a 7500 metros para os dias 02 e 03 de junho as 18 UTC e do nível de 25 mil pés até 63 mil (FL250 - FL630 entre 7500 e 18.900 metros de altitude) para o dia 04 de junho de 2013 as 18 UTC.

3.3.4 Cartas de Vento

As cartas de vento em altitude foram adquiridas junto a Rede de Meteorologia da Aeronáutica (REDEMET), representando a direção e velocidade do vento no nível FL240 (24.000 pés) equivalente a 7.200 metros de altitude e FL300 (30 mil pés) equivalente a 9000 metros de altitude baseadas no dia 02 de junho de 2013 as 18 UTC válidas até as 18 UTC do dia 03 de junho de 2013 e para o dia 03 de junho de 2013 as 18 UTC válidas até as 18 UTC do dia 04 de junho de 2013 no nível de 24 e 30 mil pés.

3.3.5 Previsões do modelo WRF

Utilizou-se previsões de 48 horas do modelo WRF na versão 3.4.1 adquiridas junto ao ICEA para o dia 03 de junho de 2013 as 00, 12 e 18 UTC na região sudeste. Os dados de reanálise do modelo possuem uma resolução espacial de 2 grades aninhadas, sendo a primeira de 18 km e a segunda de 6 km, com grade centrada em (lat -24.79, lon -48.60), resolução vertical de 21 níveis verticais de pressão, resolução temporal de 3 horas, pontos de grade de 2 x=294 e y=252, timestep grade 1=108 grade 2= 36, condições de contorno e inicialização do GFS de 0,5° de resolução temporal de 3 horas, 111 variáveis e dados de topografia pertencente ao arquivo geog.tar obtidos através de mapeamento por satélite na qual contém categorias compatíveis com as da United States Geological Survey (USGS) descritos nos arquivos VEGPARM.TBL e SOILPARM.TBL localizados no diretório run do modelo WRF (Carvalho et al. 2013). Por final utilizou-se o seguinte esquema de parametrizações:

Tabela 3.3.5 - Tabela representando o esquema de parametrizações adotadas nas simulações das previsões do modelo WRF.

Parâmetro	Parametrização
Microfísica	WSM3 (Hong, Dudhia and Chen, 2004 MWR)
Radiação de Onda Longa	RRTM (Mlawe et.al 1997m JGR)
Radiação de Onda Curta	Dudhia (Dudhia, 1989, JAS)
Camada Superfície	MM5 similaridade (Paulson et al., 1970)
Processos de Superfície	Noah-LSM (Chen e Dudhia, 2001)
Camada Limite Planetária	Yonsei University (Hong, Noh; Dudhia, 2006)
Convecção Rasa e Profunda	Kain-Fritsch (Kain; Fritsch, 1990; 1993)

Os dados obtidos possuem o objetivo de analisar os campos de linhas de corrente e divergência do vento em 200 e 500 hpa, corrente de jato e vento em 250 hPa, geopotencial e vorticidade em 200 e 500 hPa, Turbulência de Céu Claro (Ellrod II) em 200, 250 e 400 hpa, Turbulência de Céu Claro (Brown) em 200, 250 e 400 hPa e campos de velocidade vertical em 200 e 500 hPa para as 00, 12 e 18 UTC do dia 03 de junho de 2013.

3.3.6 Dados de Reanálise do ERA-INTERIM

Foram utilizados dados de Reanálise do ERA-INTERIM com resolução temporal de 6 horas e resolução espacial de 1,5° x 1,5° cobrindo a América do Sul, com 3 níveis na vertical (250,300 e 350 hpa), utilizando-se os parâmetros da altura geopotencial e a componente zonal (u) e meridional (v) do vento.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO CLIMATOLÓGICO

4.1 Categorização climatológica dos AIREPs de CAT

Preliminarmente, foram analisados 5338 AIREPs de turbulência sobre a FIR-Brasília e Curitiba. Desse total de reportes, elaborou-se um controle de qualidade na qual dados sem informação de data (571 dados), sem detecção de turbulência (62 dados), com informações 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 cumulo-nimbus isoladas) e ICE (associadas à formação de gelo em aeronaves) (53 dados)) foram descartados, totalizando 4652 dados a serem verificados estatisticamente.

Dentre esses dados, consideram-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 a fim de se elaborar análises temporais, sazonais e por padrões de horário e altitude, entretanto desconsiderados para análises de padrões de intensidade do fenômeno.

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

Por final, elaborou-se uma climatologia estatística da temporalidade, sazonalidade, análise dos padrões de altitude, horário de ocorrência intensidade da turbulência.

4.2 Análise Temporal

Neste tópico da pesquisa, são discutidas as análises temporais dos AIREPs de CAT pertencentes à FIR-BS e FIR-CW.

A distribuição temporal ao longo dos anos analisados dos 1187 AIREPs de CAT da FIR-BS apresentados pela Figura 4.1 permitiu mostrar dois máximos nos meses de junho e julho (totalizando 29 % dos reportes), sendo o mês de junho o mais significativo com 16,4% dos reportes sendo esse mês o de transição do outono para o inverno onde ocorrem grandes gradientes de temperatura e inicia-se a entrada de sistemas frontais mais fortes com a presença da corrente de jato. Os dois mínimos se apresentam nos meses de fevereiro e março (totalizando 6,4% dos reportes), sendo o mês de março o menos significativo em quantidade de reportes com 2,9%. No período de maio a setembro houve a ocorrência de aproximadamente 63% dos reportes de AIREPs de CAT.

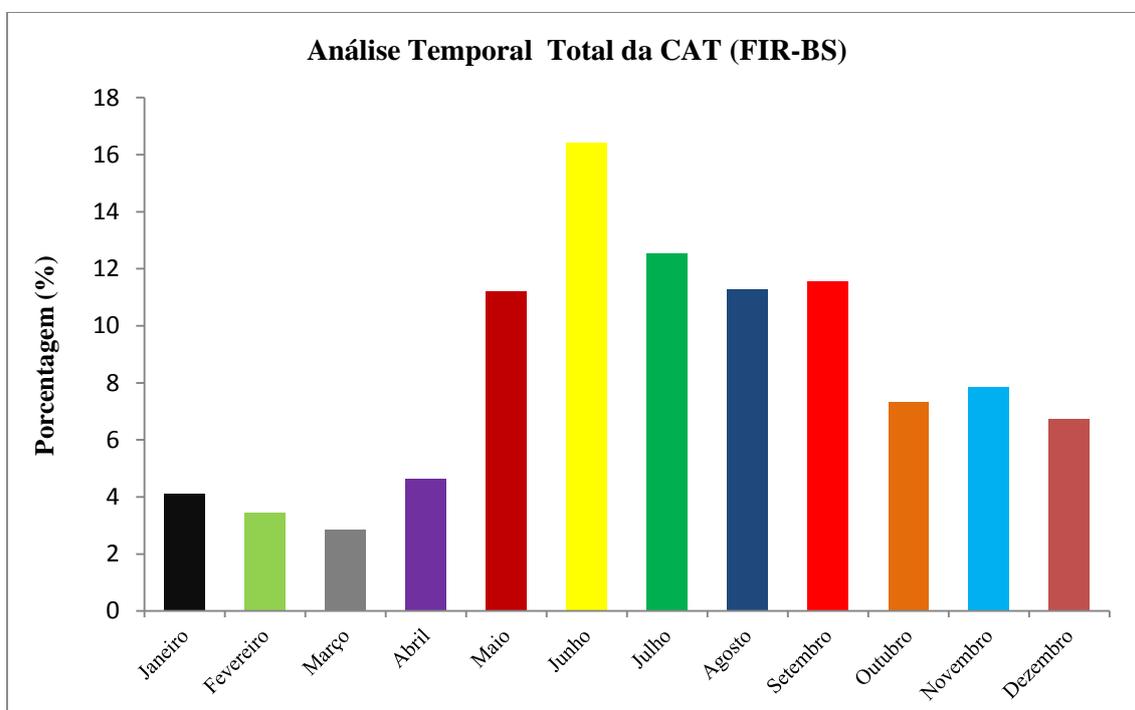


Figura 4.1 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB para os 1187 casos analisados da FIR-BS.

A tabela 4.1 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 1187 casos analisados da FIR-BS.

Tabela 4.1 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 1187 casos analisados da FIR-BS.

Análise Temporal Total da CAT (FIR-BS)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Janeiro	49	4,1
Fevereiro	41	3,5
Março	34	2,9
Abril	55	4,6
Mai	133	11,2
Junho	195	16,4
Julho	149	12,6
Agosto	134	11,3
Setembro	137	11,5
Outubro	87	7,3
Novembro	93	7,8
Dezembro	80	6,7
TOTAL	1187	100,0

A distribuição temporal ao longo dos anos analisados dos 3402 AIREPs de CAT da FIR-CW apresentados pela Figura 4.2 permitiu mostrar dois máximos nos meses de maio e outubro (totalizando 24,4 % dos reportes), sendo o mês de maio o mais significativo com 12,8% dos reportes. Os dois mínimos se apresentam nos meses de fevereiro e dezembro (totalizando 7,9% dos reportes), sendo o mês de dezembro o menos significativo em quantidade de reportes com 2,9%. No período de maio a outubro houve a ocorrência de aproximadamente 67,3% dos reportes de AIREPs de CAT. Perante o ciclo anual observamos um comportamento bimodal. O primeiro pico se explica na transição do outono para o inverno onde ocorrerem fortes gradientes de temperatura e a entrada de sistemas frontais mais intensos na região. O segundo pico se atribui a transição do inverno para a primavera onde ocorrem significativos gradientes de temperatura, entrada de jatos de baixos níveis (JBN) e a formação de CAT próximos a regiões montanhosas e a formação de Complexos Convectivos de Meso-Escala (CCM) podendo ocasionar CAT de topo e proximidades desses sistema.

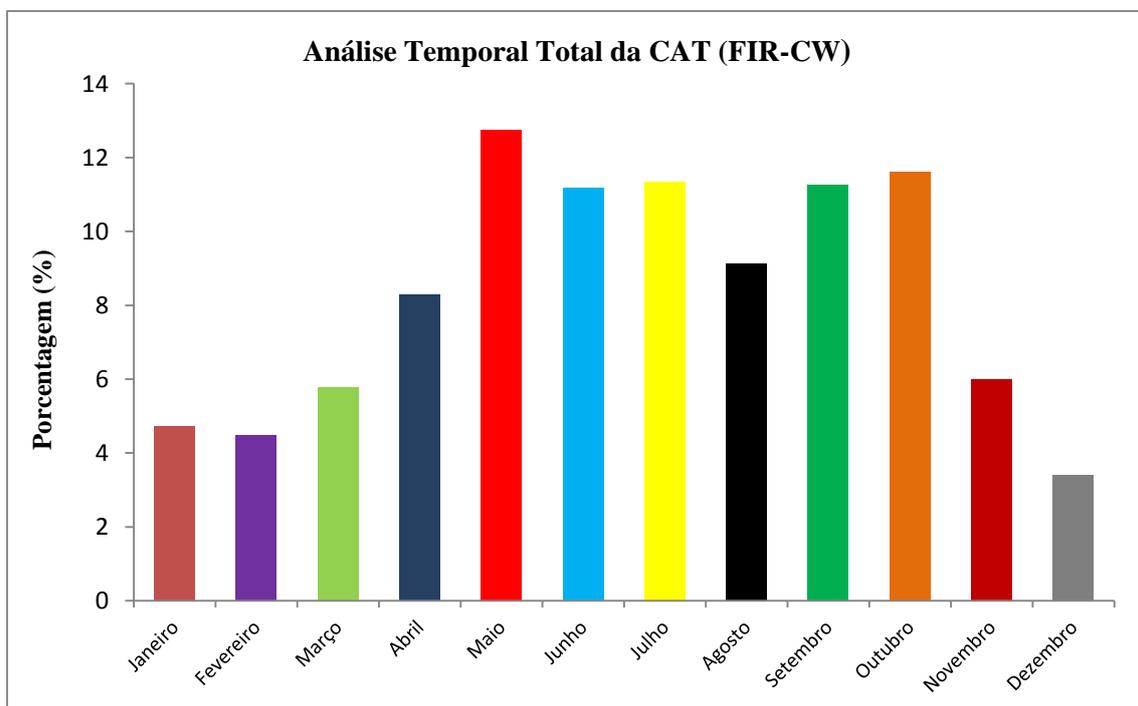


Figura 4.2 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB para os 3402 casos analisados da FIR-CW.

A tabela 4.2 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 3402 casos analisados da FIR-CW.

Análise Temporal Total da CAT (FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Janeiro	161	4,7
Fevereiro	153	4,5
Março	197	5,8
Abril	282	8,3
Maio	434	12,8
Junho	380	11,2
Julho	386	11,3
Agosto	311	9,1
Setembro	383	11,3
Outubro	395	11,6
Novembro	204	6,0
Dezembro	116	3,4
TOTAL	3402	100,0

A distribuição temporal ao longo dos anos analisados dos 4589 AIREPs de CAT da FIR-BS e 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.

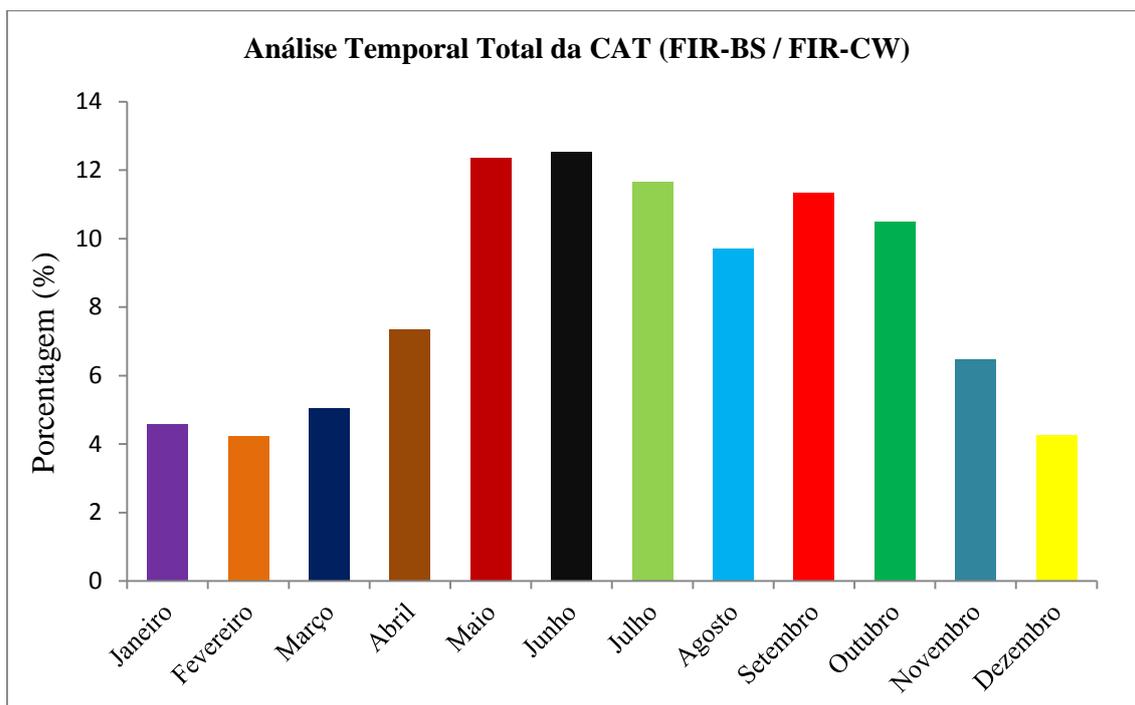


Figura 4.3 – Distribuição de frequências relativas por mês do ano dos AIREPS de TURB para os 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

A tabela 4.3 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Tabela 4.3 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por mês do ano para o total de 4589 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Análise Temporal Total da CAT (FIR-BS / FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Janeiro	210	4,6
Fevereiro	194	4,2
Março	231	5,1
Abril	337	7,4
Maio	567	12,4
Junho	575	12,2
Julho	535	11,6
Agosto	445	9,7
Setembro	520	11,4
Outubro	482	10,6
Novembro	297	6,5
Dezembro	196	4,3
TOTAL	4589	100,0

4.3 Análise Sazonal

Nessa seção da pesquisa, são discutidas as análises sazonais dos AIREPs de CAT pertencentes à FIR-BS e FIR-CW.

Analisando a sazonalidade dos 1167 AIREPs de CAT da FIR-BS apresentado pela Figura 4.4 permitiu-se destacar o inverno como a estação do ano mais significativa para ocorrência da CAT com 37% dos casos reportados. Durante a estação do verão constatou-se apenas 12,2% dos casos apresentando-se como o período menos significativo para o reporte do distúrbio em decorrência de sistemas frontais menos intensos e em menor quantidade, menores gradientes de temperatura e a presença de regiões mais atribuídas a formações convectivas. Portanto a ocorrência da CAT se apresenta com maior frequência durante o outono/inverno e início da primavera.

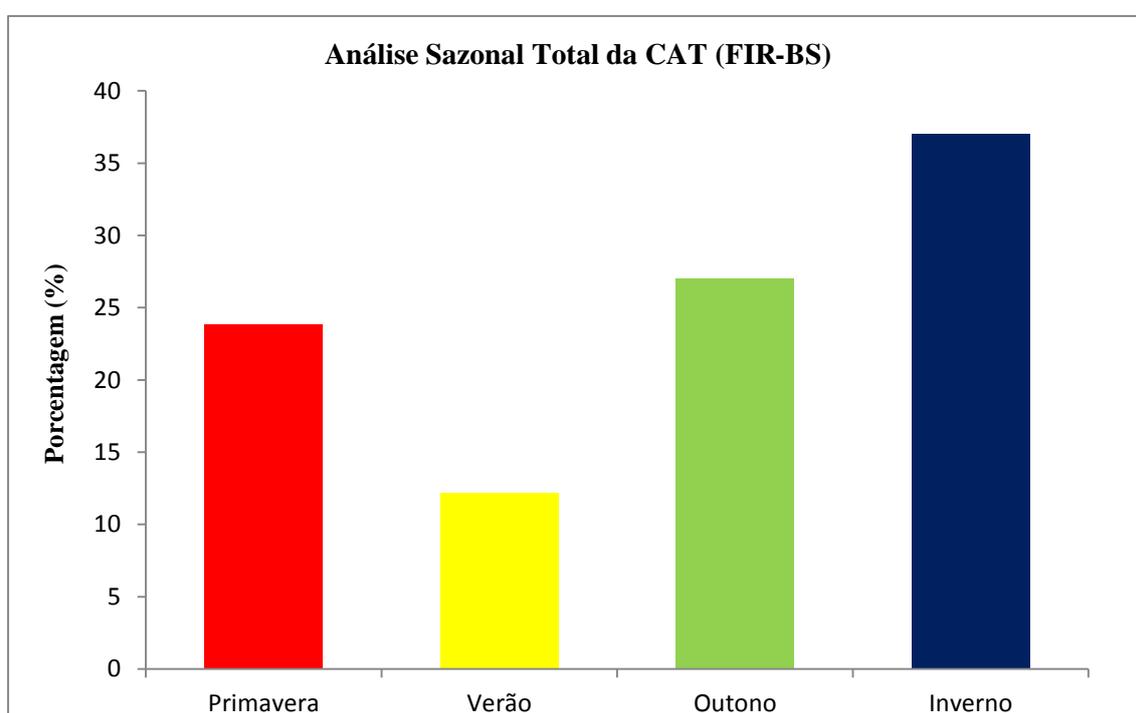


Figura 4.4 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 1167 casos analisados da FIR-BS.

A tabela 4.4 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 1167 casos analisados da FIR-BS.

Tabela 4.4 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 1167 casos analisados da FIR-BS.

Análise Sazonal Total da CAT (FIR-BS)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Primavera	278	23,8
Verão	142	12,2
Outono	315	27,0
Inverno	432	37,0
TOTAL	1167	100,0

Analisando a sazonalidade dos 3447 AIREPs de CAT da FIR-CW apresentado pela Figura 4.5 permitiu-se destacar o inverno como a estação do ano mais significativa para ocorrência da CAT com 31,7% dos casos reportados. A estação do outono apresentou também uma significância perante o a quantidade de reportes com 31,2% dos casos analisados. Durante a estação do verão constatou-se apenas 12,2% dos casos, apresentando-se como o período menos significativo para o reporte do distúrbio.

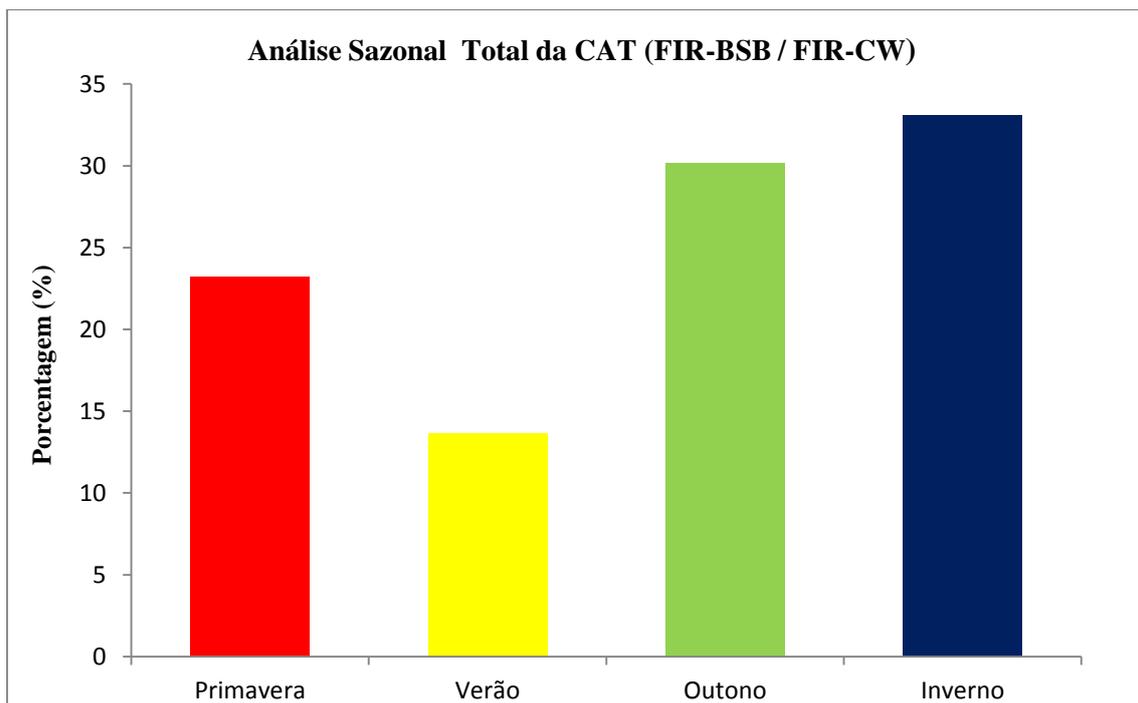


Figura 4.5 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 3447 casos analisados da FIR-CW.

A tabela 4.5 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 3447 casos analisados da FIR-CW.

Tabela 4.5 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 3447 casos analisados da FIR-CW.

Análise Sazonal Total da CAT (FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Primavera	792	23,0
Verão	486	14,1
Outono	1076	31,2
Inverno	1093	31,7
TOTAL	3447	100,0

Analisando a sazonalidade dos 4614 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW apresentado pela Figura 4.6 permitiu-se destacar o inverno como a estação do ano mais significativa para 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.

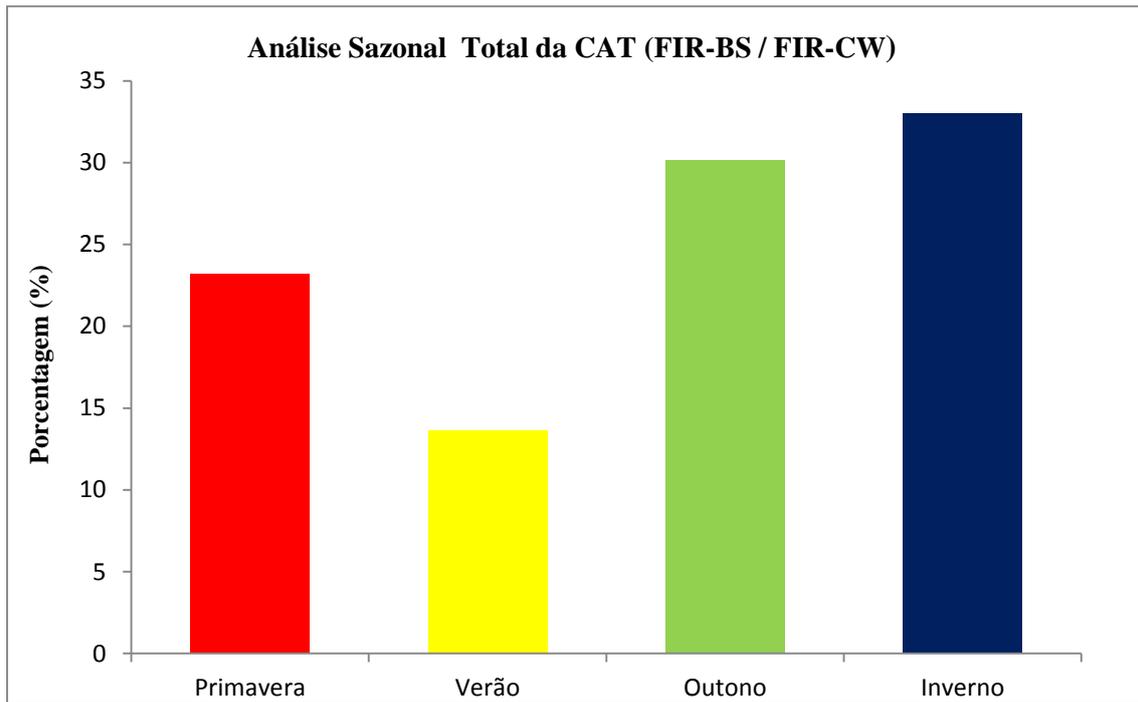


Figura 4.6 – Distribuição de frequências relativas por estação do ano dos AIREPS de TURB para os 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

A tabela 4.6 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Tabela 4.6 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por estação do ano para o total de 4614 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Análise Sazonal Total da CAT (FIR-BS / FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
Primavera	1070	23,2
Verão	628	13,6
Outono	1391	30,1
Inverno	1525	33,1
TOTAL	4614	100,0

4.4 Análise dos Padrões de Intensidade

Neste tópico, são discutidas as análise dos AIREPs de CAT pertencentes a FIR-BS e FIR-CW segundo os padrões de intensidade.

Como verificado na Figura 4.7, dentre os 1164 AIREPs de CAT da FIR-BS, a maior quantidade dos casos mostrou-se de intensidade leve (LEV/FBL) e moderada (MOD) totalizando 94,3%. Os casos de intensidade severa na qual se consideram os mais perigosos e impactantes as aeronaves corresponderam a 3,6% dos reportes.

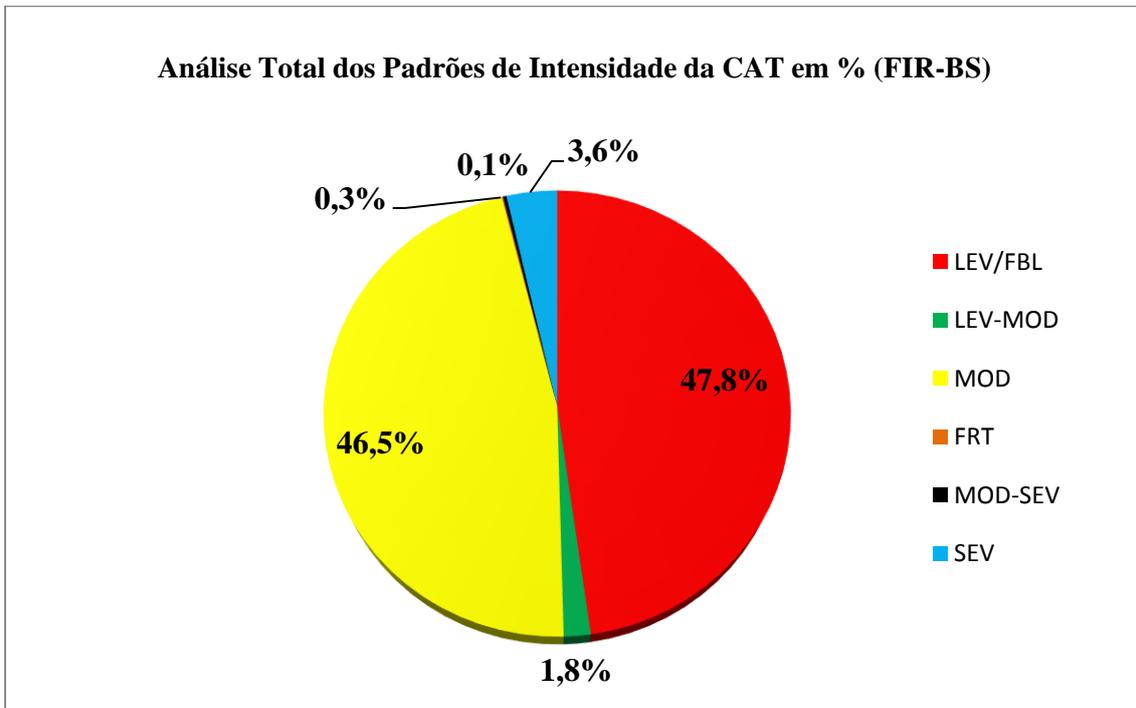


Figura 4.7 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPs de TURB para os 1164 casos analisados da FIR-BS.

A tabela 4.7 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 1164 casos analisados da FIR-BS.

Tabela 4.7 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 1164 casos analisados da FIR-BS.

Análise Total dos Padrões de Intensidade da CAT (FIR-BS)		
	Número de Reportes	Porcentagem
LEV/FBL	556	47,8
LEV-MOD	21	1,8
MOD	541	46,5
FRT	1	0,1
MOD-SEV	3	0,3
SEV	42	3,6
TOTAL	1164	100,0

Como verificado na Figura 4.8, dentre os 3464 AIREPs de CAT da FIR-CW, a maior quantidade dos casos mostrou-se de intensidade leve (LEV/FBL) e moderada (MOD) totalizando 83,7%. Os casos de intensidade severa na qual considera-se os mais perigosos e impactantes as aeronaves corresponderam a 2,4% dos reportes.

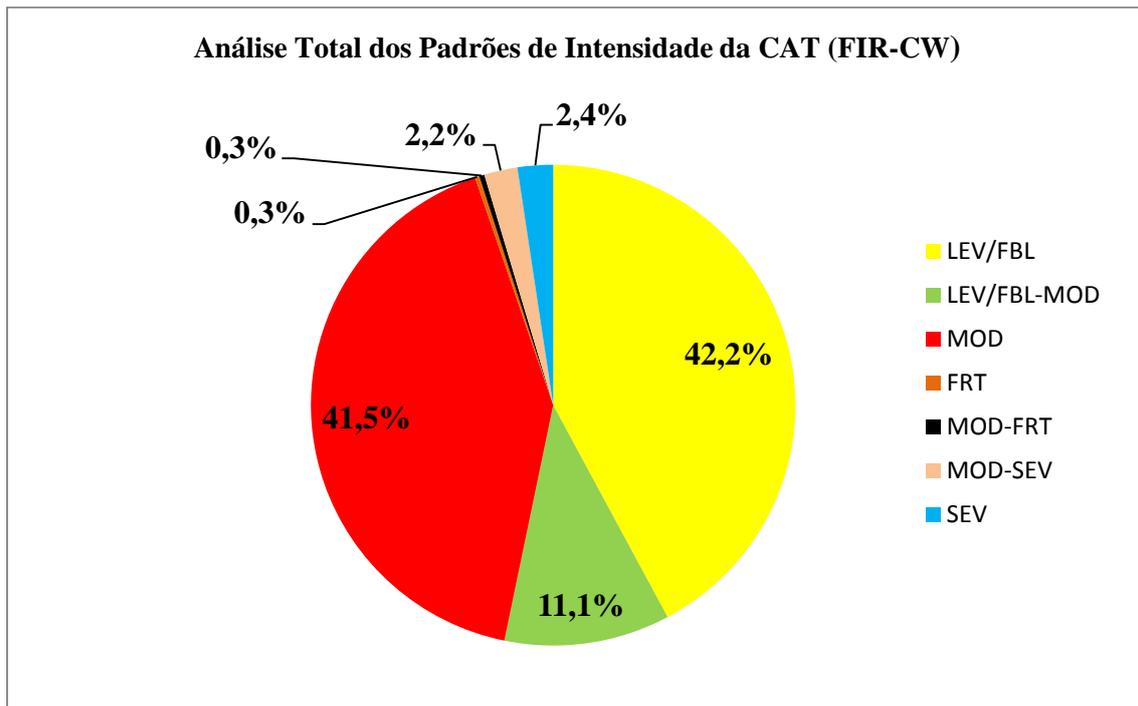


Figura 4.8 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPs de TURB para os 3462 casos analisados da FIR-CW.

A tabela 4.8 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 3462 casos analisados da FIR-CW.

Tabela 4.8 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 3462 casos analisados da FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Intensidade da CAT (FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
LEV/FBL	1460	42,2
LEV/FBL-MOD	383	11,1
MOD	1438	41,5
FRT	10	0,3
MOD-FRT	12	0,3
MOD-SEV	77	2,2
SEV	82	2,4
TOTAL	3462	100,0

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 na qual se consideram os mais perigosos e impactantes as aeronaves corresponderam a 2,7% dos reportes.

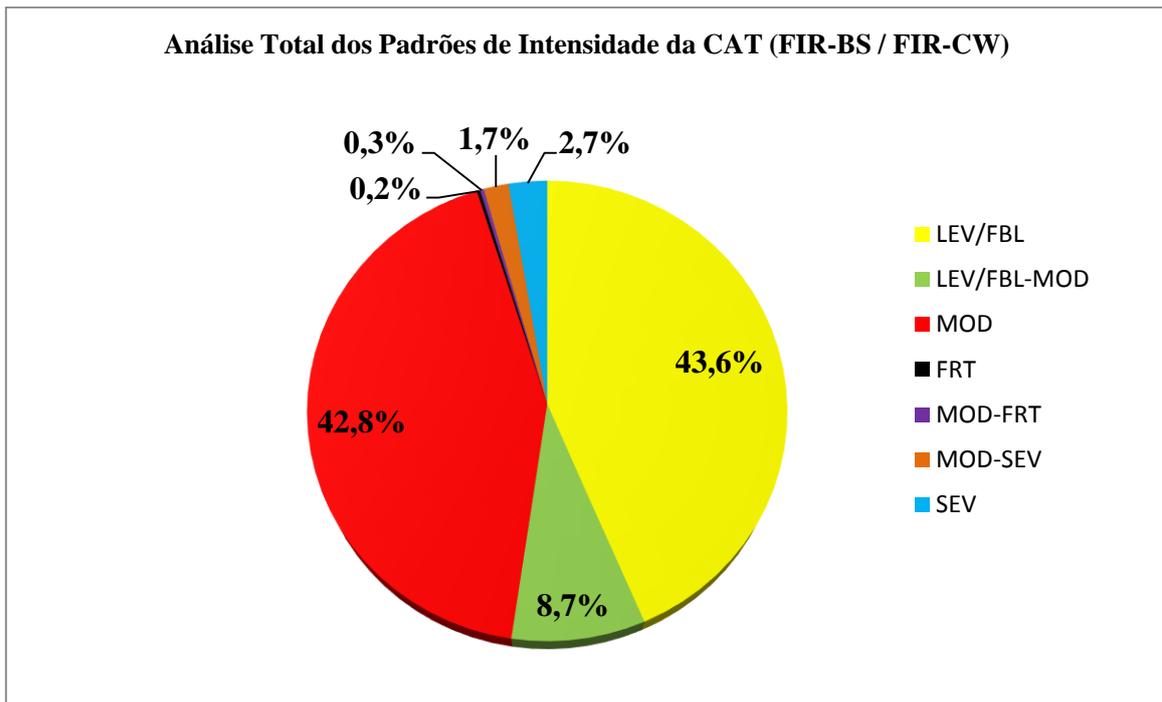


Figura 4.9 – Distribuição de frequências relativas do grau de intensidade dos AIREPs de TURB para os 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

A tabela 4.9 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Tabela 4.9 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por grau de intensidade para o total de 4626 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Intensidade da CAT (FIR-BS / FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
LEV/FBL	2016	43,6
LEV/FBL-MOD	404	8,7
MOD	1979	42,8
FRT	11	0,2
MOD-FRT	12	0,3
MOD-SEV	80	1,7
SEV	124	2,7
TOTAL	4626	100,0

4.5 Análise dos Padrões de Horário de Ocorrência

Nesse tópico da pesquisa, são discutidas as análise dos AIREPs de CAT pertencentes a FIR-BS e FIR-CW segundo os padrões de horário de ocorrência.

A distribuição horária dos 1159 AIREPs de CAT da FIR-BS é apresentada pela Figura 4.10. Observa-se que a maior quantidade dos casos foi reportada entre 18 e 00 UTC em decorrência do maior fluxo de trafego aéreo nesse período e, portanto, maior probabilidade de reporte da turbulência, enquanto entre 06 e 12 UTC constatou-se a menor quantidade dos casos onde o fluxo de trafego aéreo é menor.

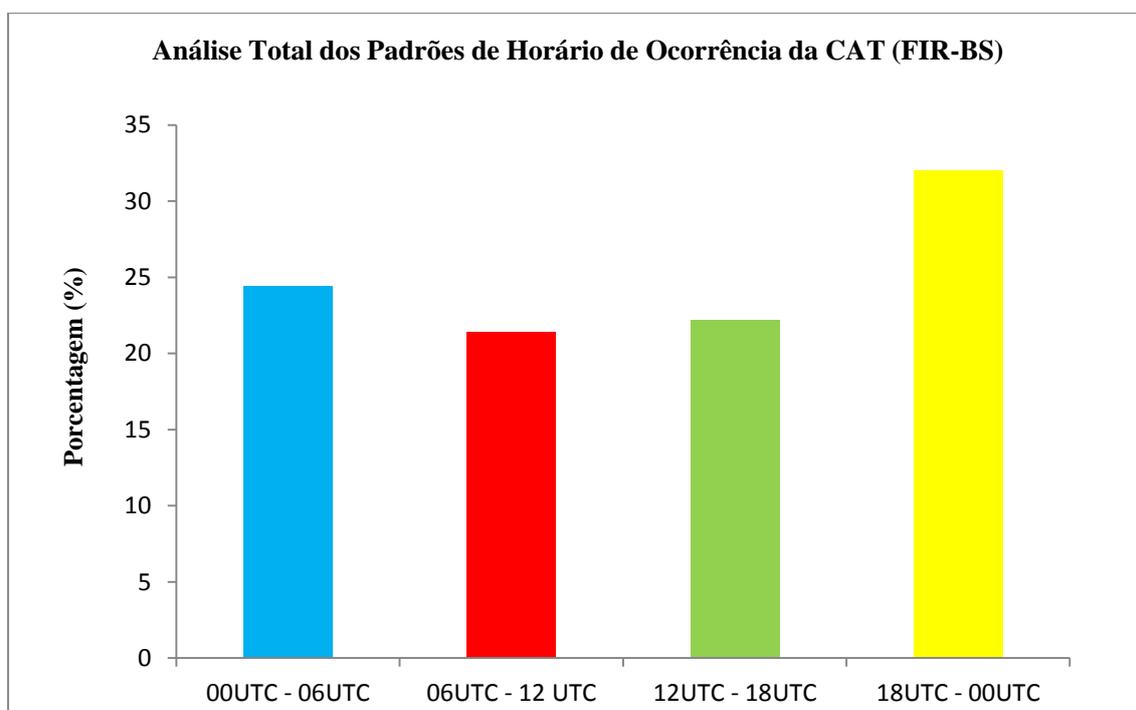


Figura 4.10 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPs de TURB para os 1159 casos analisados da FIR-BS.

A tabela 4.10 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 1159 casos analisados da FIR-BS.

Tabela 4.10 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 1159 casos analisados da FIR-BS.

Análise Total dos Padrões de Horário de Ocorrência da CAT (FIR-BS)		
	Número de Reportes	Porcentagem
00UTC - 06UTC	283	24,4
06UTC - 12UTC	248	21,4
12UTC - 18UTC	257	22,2
18UTC - 00UTC	371	32,0
TOTAL	1159	100,0

A distribuição horária dos 3426 AIREPs de CAT da FIR-CW é apresentada pela Figura 4.11. Observa-se que a maior quantidade dos casos foi reportada entre 12 e 18UTC em decorrência desse período se caracterizar como o de maior fluxo de trafego aéreo, enquanto entre 06 e 12UTC constatou-se a menor quantidade dos casos caracterizando-se como o de menor fluxo de trafego aéreo.

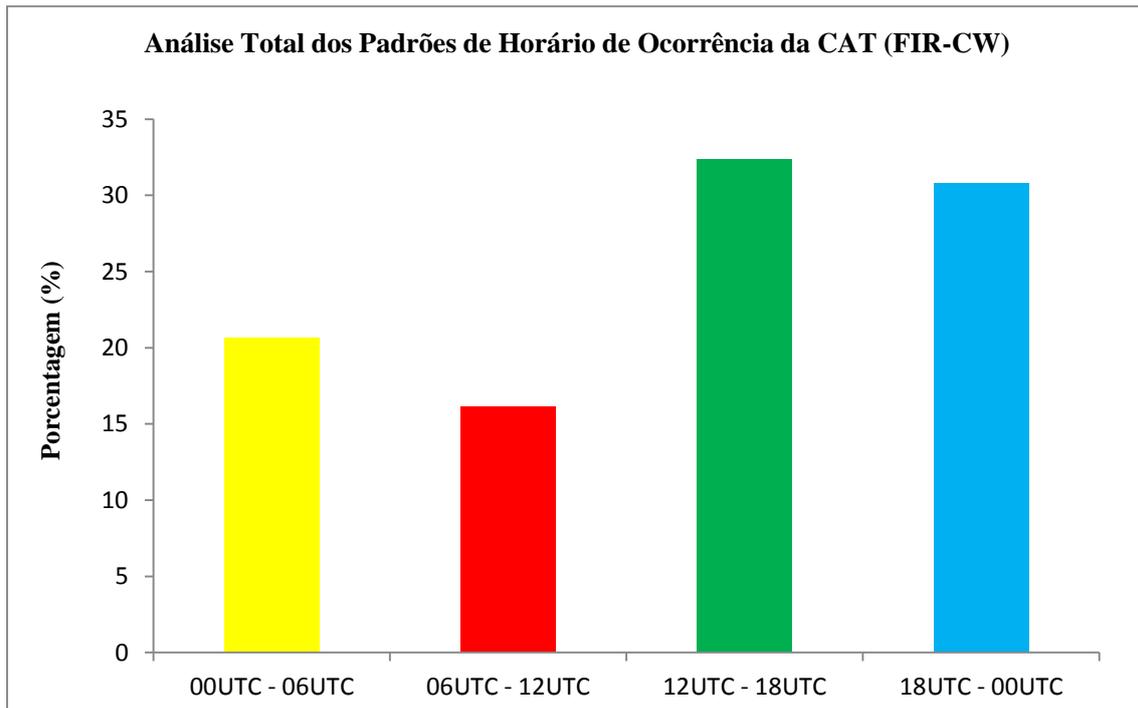


Figura 4.11 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPs de TURB para os 3426 casos analisados da FIR-CW.

A tabela 4.11 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 3426 casos analisados da FIR-CW.

Tabela 4.11 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 3466 casos analisados da FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Horário de Ocorrência da CAT (FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
00UTC - 06UTC	707	20,6
06UTC - 12UTC	553	16,1
12UTC - 18UTC	1110	32,4
18UTC - 00UTC	1056	30,8
TOTAL	3426	100,0

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

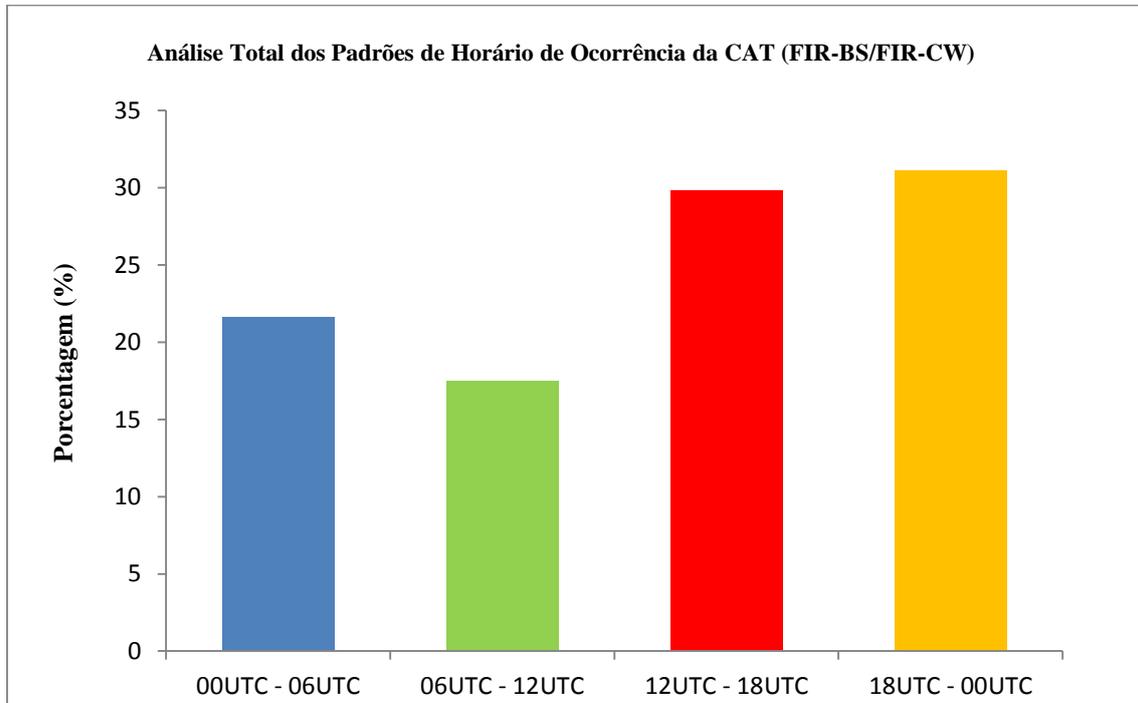


Figura 4.12 – Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPs de TURB para os 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

A tabela 4.12 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Tabela 4.12 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por horário de ocorrência para o total de 4585 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Horário de Ocorrência da CAT (FIR-BS / FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
00UTC - 06UTC	990	21,6
06UTC - 12UTC	801	17,5
12UTC - 18UTC	1367	29,8
18UTC - 00UTC	1427	31,1
TOTAL	4585	100,0

4.6 Análise dos Padrões de Altitude

Nessa seção, são discutidas as análise dos AIREPs de CAT pertencentes a FIR-BS e FIR-CW segundo os padrões de altitude.

Tendo em análise a altitude de ocorrência dos 1151 AIREPs de CAT da FIR-BS como apresentado na figura 4.13, permitiu-se verificar que 62,8% 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) encontram-se como as faixas de altitude mais significativas para o reporte do fenômeno totalizando 86,6% dos casos.

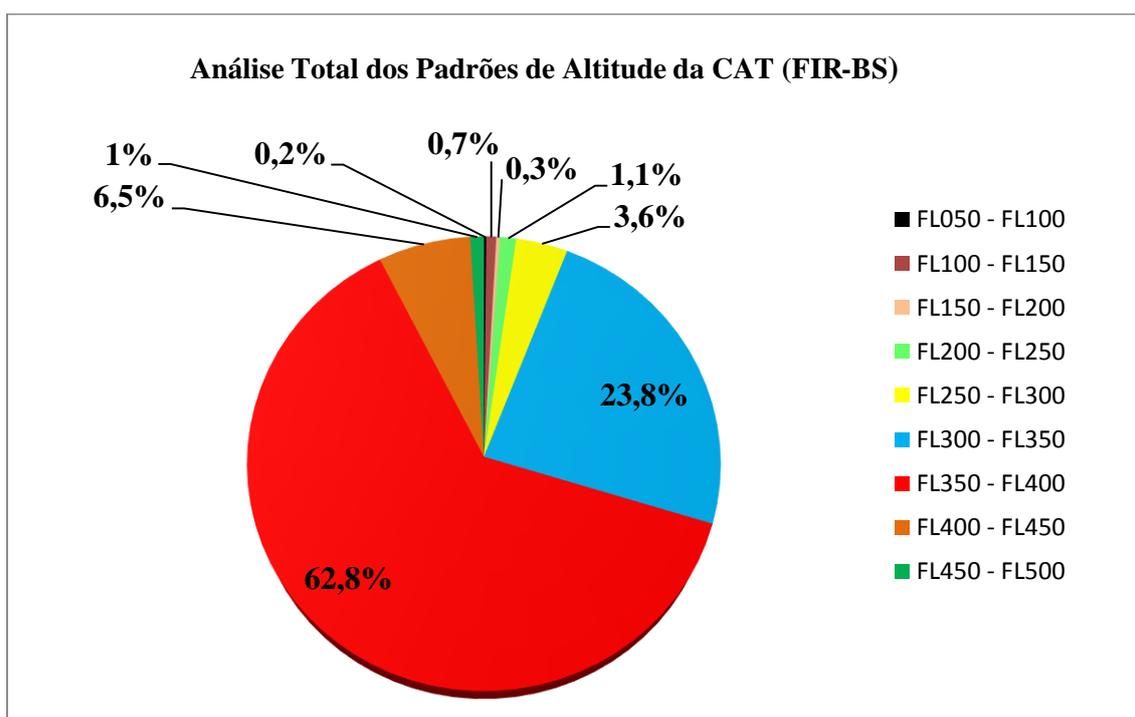


Figura 4.13 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPs de TURB para os 1151 casos analisados da FIR-BS.

A tabela 4.13 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 1151 casos analisados da FIR-BS.

Tabela 4.13 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 1151 casos analisados da FIR-BS.

Análise Total dos Padrões de Altitude da CAT (FIR-BS)		
	Número de Reportes	Porcentagem
FL050 - FL100	2	0,2
FL100 - FL150	8	0,7
FL150 - FL200	3	0,3
FL200 - FL250	13	1,1
FL250 - FL300	42	3,6
FL300 - FL350	274	23,8
FL350 - FL400	723	62,8
FL400 - FL450	75	6,5
FL450 - FL500	11	1,0
TOTAL	1151	100,0

Tendo em análise a altitude de ocorrência dos 3448 AIREPs de CAT da FIR-BS como apresentado na figura 4.14, permitiu-se verificar que 55% 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) encontram-se como as faixas de altitude mais significativas para o reporte do fenômeno totalizando 83% dos casos.

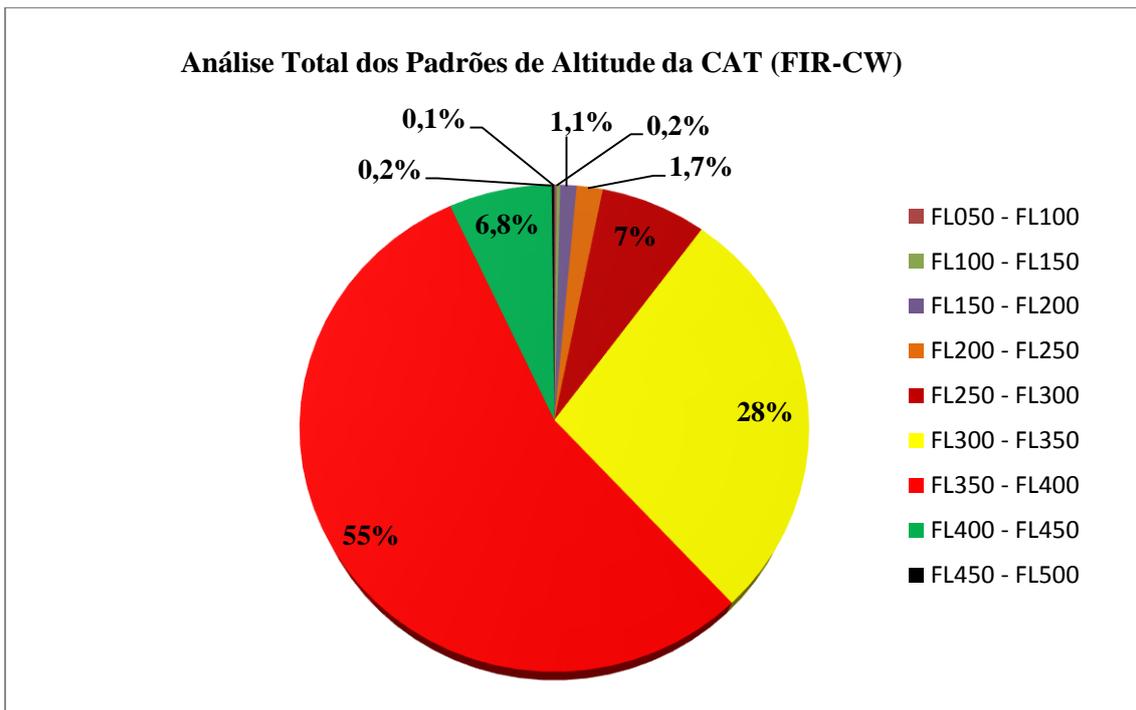


Figura 4.14 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPs de TURB para os 3448 casos analisados da FIR-CW.

A tabela 4.14 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 3448 casos analisados da FIR-CW.

Tabela 4.14 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 3448 casos analisados da FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Altitude da CAT (FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
FL050 - FL100	4	0,1
FL100 - FL150	8	0,2
FL150 - FL200	37	1,1
FL200 - FL250	59	1,7
FL250 - FL300	240	7,0
FL300 - FL350	965	28,0
FL350 - FL400	1896	55,0
FL400 - FL450	233	6,8
FL450 - FL500	6	0,2
TOTAL	3448	100,0

Tendo em análise a altitude de ocorrência dos 4599 AIREPs de CAT da FIR-BS e FIR-CW como apresentado na figura 4.15, permitiu-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) encontram-se como as faixas de altitude mais significativas para o reporte do fenômeno totalizando 82,2% dos casos. Apesar desta análise os pousos e decolagens se encontram como as etapas de voo mais arriscadas para as aeronaves.

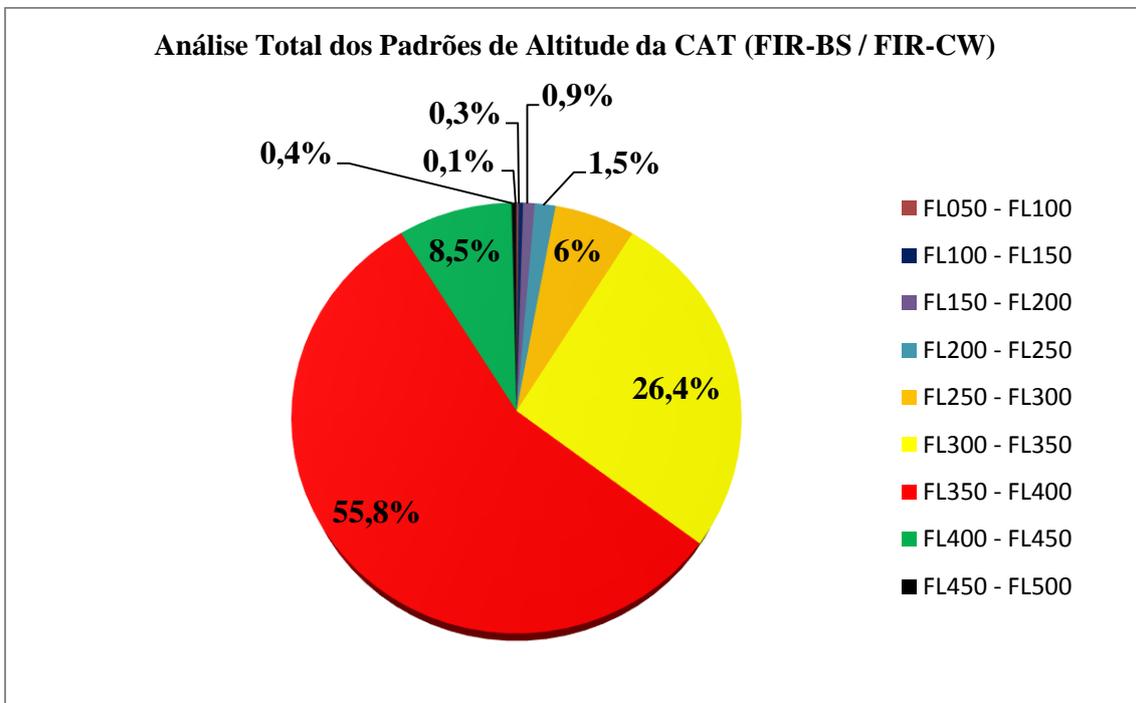


Figura 4.15 – Distribuição de frequências relativas do nível de (altitude) dos AIREPs de TURB para os 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

A tabela 4.15 abaixo resume o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Tabela 4.15 – Tabela apresentando o número de reportes (dados) AIREPs de TURB com sua respectiva porcentagem por nível de (altitude) para o total de 4599 casos analisados da FIR-BS e FIR-CW.

Análise Total dos Padrões de Altitude da CAT (FIR-BS / FIR-CW)		
	Número de Reportes	Porcentagem
FL050 - FL100	6	0,1
FL100 - FL150	16	0,3
FL150 - FL200	40	0,9
FL200 - FL250	72	1,5
FL250 - FL300	282	6,0
FL300 - FL350	1239	26,4
FL350 - FL400	2619	55,8
FL400 - FL450	308	8,5
FL450 - FL500	17	0,4
TOTAL	4599	100,0

4.7 Análise dos Padrões de Localização Geográfica

Nesta seção aborda-se a distribuição espacial de 157 AIREPs da FIR-BS entre agosto de 2008 a março de 2014 (Figura 4.16), 161 AIREPs da FIR-CW entre janeiro de 2010 a março de 2014) (Figura 4.17) e uma somatória dos AIREPs da FIR-BS e FIR-CW totalizando 318 AIREPs entre agosto de 2008 e março de 2014 (Figura 4.18)

Dentre os 157 AIREPs de CAT analisados da FIR-BS (Figura 4.16) observa-se especialmente uma grande quantidade de casos próximos a regiões de relevo mais acentuado como no centro-leste do estado de São Paulo, sul, leste e centro do estado de Minas Gerais, sobre o estado de Goiás e leste do estado do Mato Grosso. Esse padrão possui relação com regiões de maior tráfego aéreo, aeroportos mais movimentados e regiões montanhosas ou de entrada do jato subtropical.

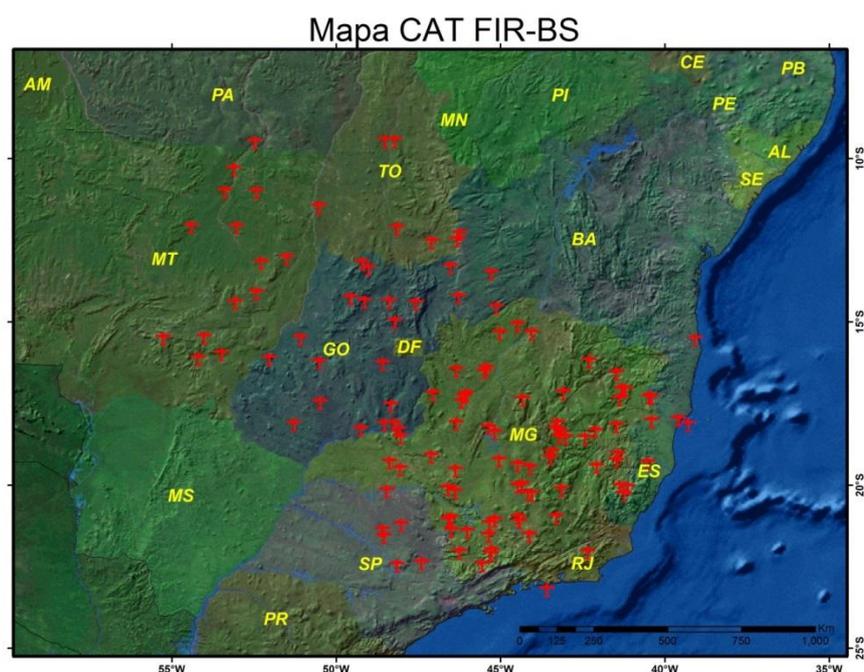


Figura 4.16 – Distribuição espacial de 157 AIREPS de TURB na FIR-BS (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de agosto de 2008 a março de 2014.

Dos 161 AIREPs de CAT analisados da FIR-CW (Figura 4.17) observa-se especialmente uma grande quantidade de casos em regiões como no centro e nordeste do estado de Mato Grosso do Sul, sul do estado de Minas Gerais, sobre a costa no leste dos estados do Paraná e Santa Catarina, sul do estado de São Paulo e centro e sul do estado do Rio Grande do Sul. Esse padrão possui relação com regiões de rotas de maior tráfego aéreo, regiões de relevo mais acentuado ou com latitudes onde há a entrada do jato subtropical na retaguarda de sistemas frontais onde se verifica a existência de reportes de CAT dentro da banda de nebulosidade de tal.

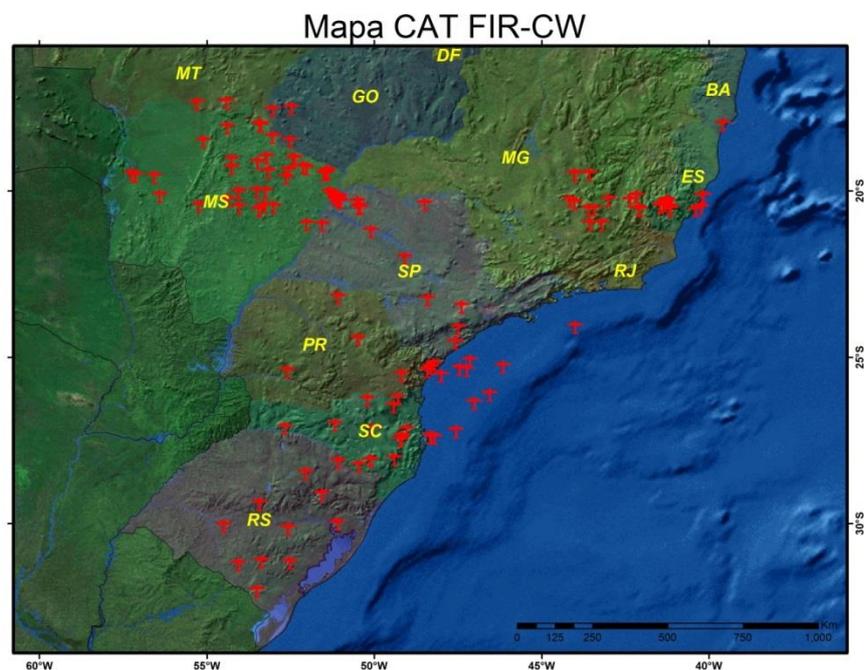


Figura 4.17 – Distribuição espacial de 161 AIREPS de TURB na FIR-CW (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de janeiro de 2010 a março de 2014.

Totalizando 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 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 aeroportos de menor movimento. Essas áreas de onde se provêm muitos desses reportes se encontram no centro-sul do Brasil onde existem regiões de relevo mais acentuado, entrada de frentes frias e consequentemente do jato subtropical, condições essas, favoráveis à formação da CAT.

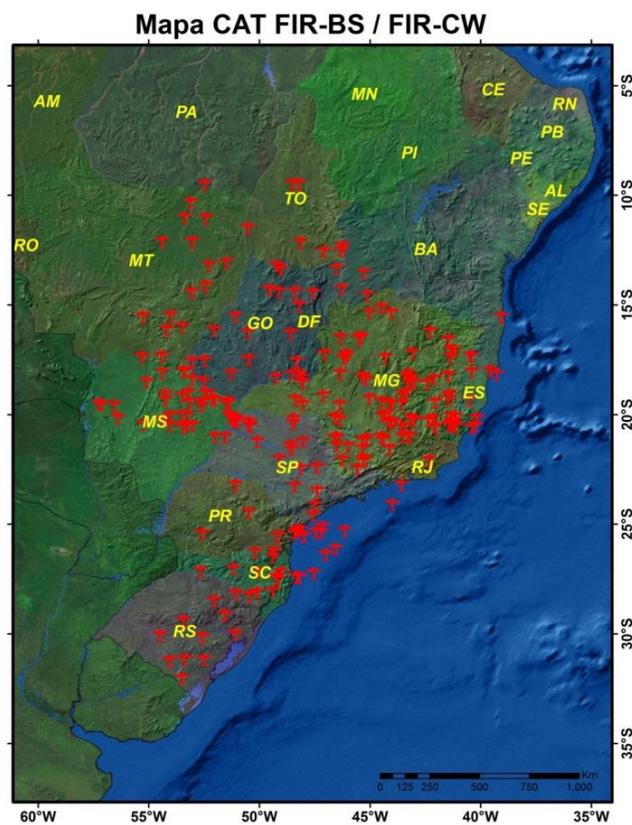


Figura 4.18 – Distribuição espacial de 318 AIREPS de TURB na FIR-BS e FIR-CW (indicados pelos pontos em vermelho), considerando sua localização geográfica para o período de agosto de 2008 a março de 2014.

5 RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

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 as 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 informes de turbulência por parte de torres de controle, centros de controle do espaço aéreo, AIREPs de outras aeronaves em , cartas de vento em altitude e de tempo significativo, o informe de uma CAT no meio aeronáutico não possui alta precisão. Por conseguinte as aeronaves neste estudo de caso enfrentaram um evento de CAT de grande severidade não detectadas pelos radares e instrumentos a bordo.

Neste capítulo são 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 Brown, Ellrod I e Ellrod II. Os objetivos desse estudo se baseiam em construir o cenário sinótico associado ao evento e demonstrar a eficiência e eficácia das previsões de CAT do modelo WRF e dos índices de turbulência aplicados para este caso.

5.1 Área de Estudo

A área de estudo, foi determinada para se observar e analisar a região onde ocorreram os três reportes de CAT de intensidade severa ao sul da cidade de Santos descrito por CAT SEV I (lat 24° 35' S, lon 46° 37' W), a sudoeste da cidade de Curitiba descrito por CAT SEV II (lat 25° 43' S, lon 49° 46' W) e a sul-sudoeste da cidade de São Paulo descrito por CAT SEV III (lat 23° 54' S, lon 47° 46' W).

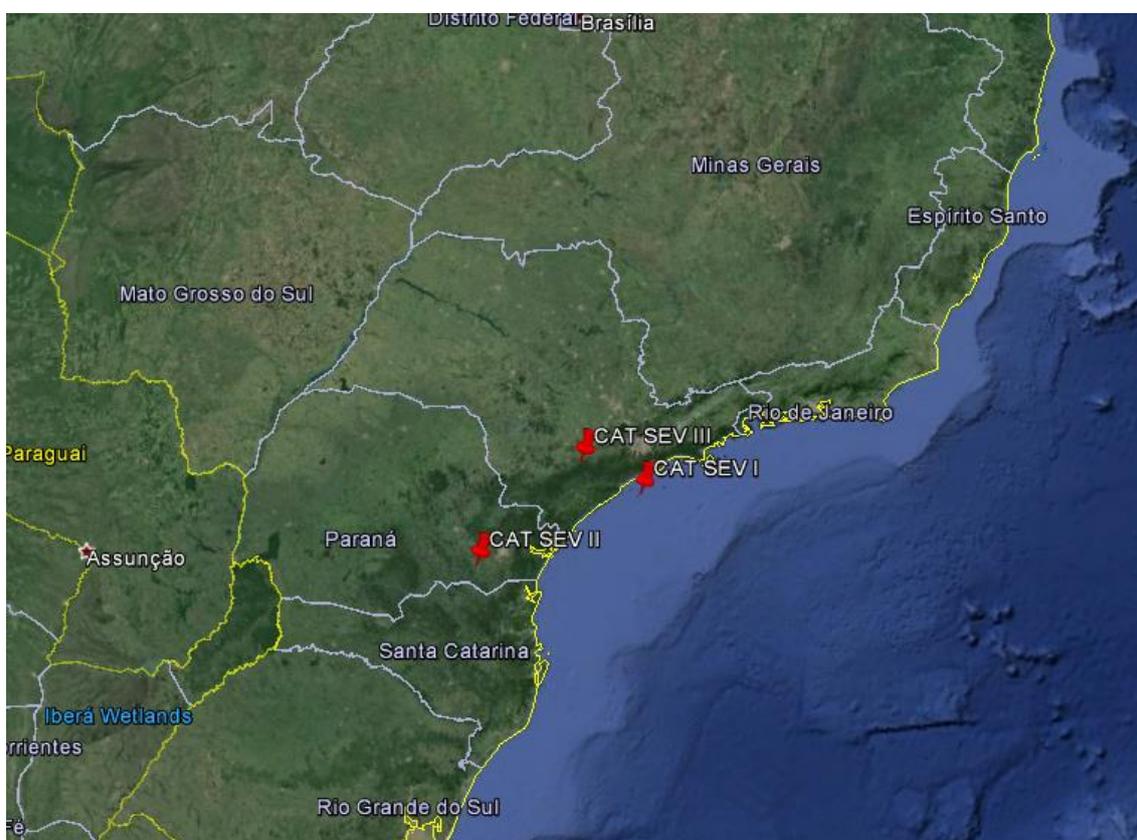


Figura 5.1 – Mapa ilustrando a região do estudo de caso destacando os três casos de detecção de turbulência de céu claro severa através dos ponteiros vermelhos descritos por CAT SEV I ocorrido às 17:12 UTC, CAT SEV II ocorrido às 17:26 UTC e CAT SEV III ocorrido às 17:36 UTC para o dia 03 de junho de 2013.

5.2 Cenário sinótico

5.2.1 Análise sinótica a partir de dados de imagens de satélite

Os recortes das imagens do satélite GOES-13 no canal do infravermelho 4 (Figura 5.2a) e do infravermelho realçada (Figura 5.2b) retratadas no horário de ocorrência do caso, mostram que a área circundada de vermelho onde decorreu-se o evento pertencente a FIR-CW, se encontra como uma região pós-frontal após a passagem de uma forte frente fria na presença da corrente de jato subtropical. As imagens revelam situação de pouca nebulosidade com presença de nuvens cirrus pós-frontais e condições de céu claro para a região de ocorrência deste evento.

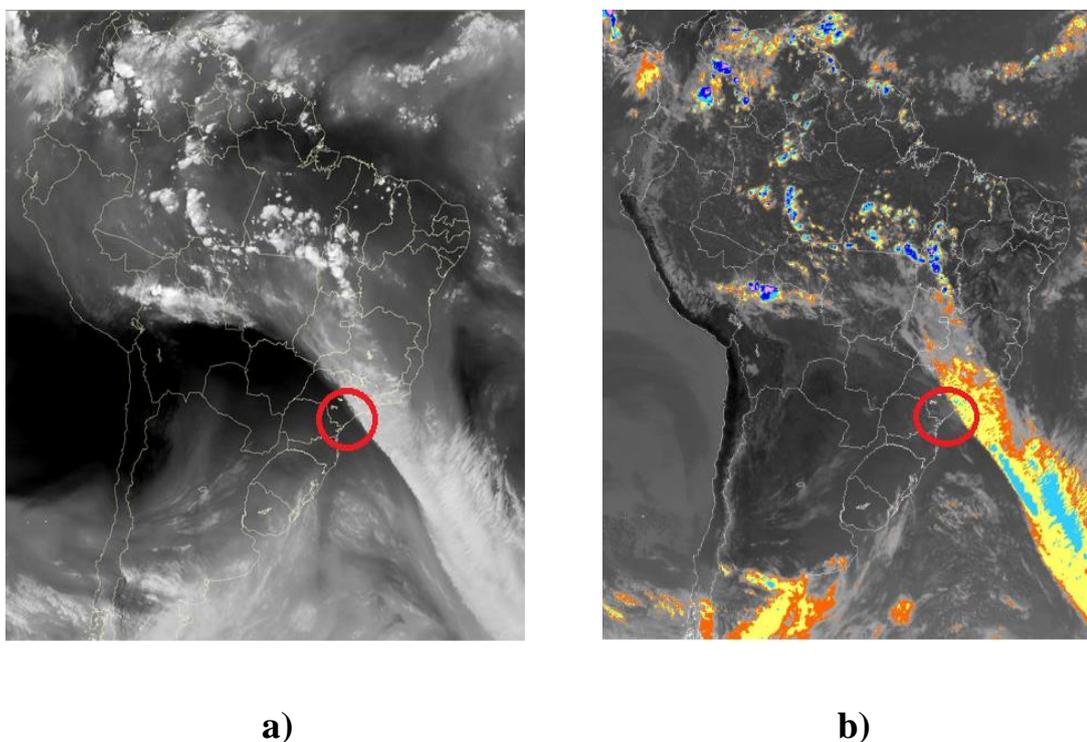
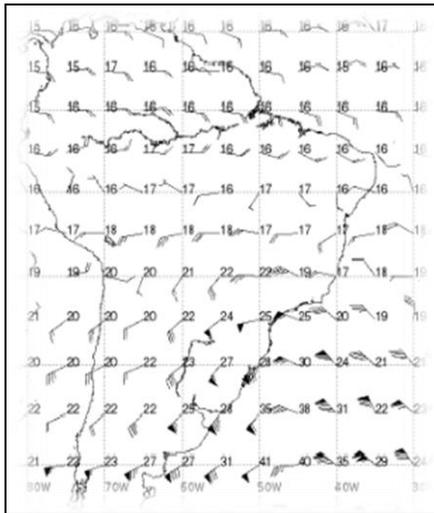


Figura 5.2 – Imagem de satélite no canal do vapor d'água (a) e no canal do infravermelho-realçada (b) para as 17:30 UTC do dia 03 de junho de 2013. O círculo em vermelho indica a região dos três casos de CAT severa.

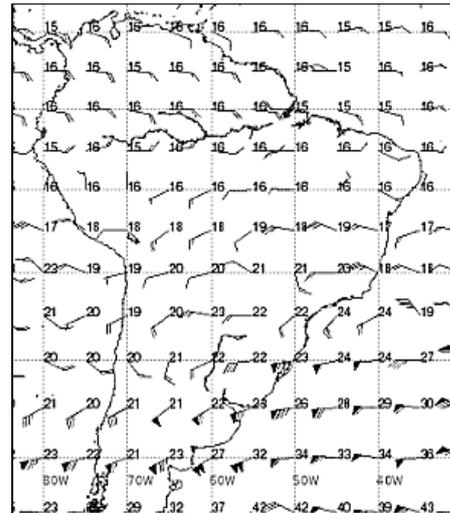
Fonte: (a) e (b) – INPE (2013)

5.2.2 Análise sinótica de altitude

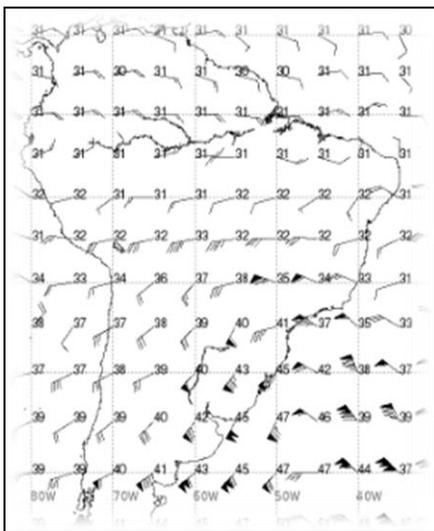
A análise dos campos de direção e velocidade do vento provenientes das cartas de altitude (Figura 5.3, a e b) para o dia 02 de junho de 2013 as 18 UTC, nos indicam uma situação frontal com forte cisalhamento do vento sobre o sul do Brasil e advecção fria vinda da Argentina e do Uruguai. Para o dia 03 de junho de 2013 as 18 UTC, as cartas de altitude (Figura 5.3, c e d) nos indicam uma região pós-frontal sobre a região sul do Brasil com forte advecção fria, grande intensidade na velocidade do vento e acentuada curvatura na direção do mesmo em decorrência do núcleo da corrente de jato subtropical estar presente sobre a região deste evento.



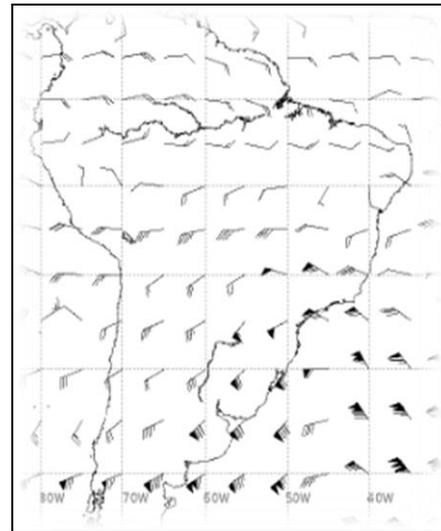
a)



b)



c)



d)

Figura 5.3 – Cartas de vento em altitude representando a direção ($^{\circ}$) 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.

Fonte: REDEMETS (2014)

5.2.3 Análise sinótica de tempo significativo

Analisando a carta SIGWX para o dia 02 de junho de 2013 as 18UTC (Figura 5.4a), observa-se uma ampla faixa de nebulosidade associada à frente fria, a presença da corrente de jato subtropical na retaguarda do sistema frontal e a alta subtropical a oeste do jato. A figura 5.4b para o dia 03 de junho as 18 UTC representa o dia e horário do evento. Podemos analisar neste dia o deslocamento do sistema frontal com sua banda de nebulosidade para o oceano e em sua retaguarda uma inclinação mais acentuada no ângulo de curvatura do jato, ressaltando uma área de turbulência reportada a 24 mil pés de altitude na região sul do Brasil. Para o dia 04 de junho de 2013 as 18 UTC representadas pela figura 5.4c, a frente fria encontra-se mais deslocada para o meio do oceano apresentando uma região de turbulência reportada na região do jato sobre o oceano a 41 mil pés de altitude.

5.2.4 Análise do perfil atmosférico

A estação meteorológica de altitude do Aeroporto Afonso Pena em Curitiba se encontrava próxima a localidade de 1 dos 3 eventos do estudo de caso, localizada a 66 km do evento representado por CAT II evidenciado na Figura 5.3.

O perfil atmosférico do Aeroporto Afonso Pena em Curitiba, plotado no diagrama Skew- T log p para o dia 03 de junho as 00 UTC é representado pela Figura 5.5a. Analisando o perfil do vento, parâmetro mais relevante no estudo deste evento, podemos observar ventos de forte intensidade na camada entre 400 hPa e 250 hPa (camada em análise para o evento) com cisalhamento vertical oscilando entre 75 a 120 kts, condição de forte cisalhamento do vento em altitude. Para o mesmo dia as 12 UTC representado pela Figura 5.5b, o perfil do vento é observado com maior intensidade nas camadas mais inferiores e com menor intensidade entre 400 e 250 hPa oscilando de 45 a 100 kts.

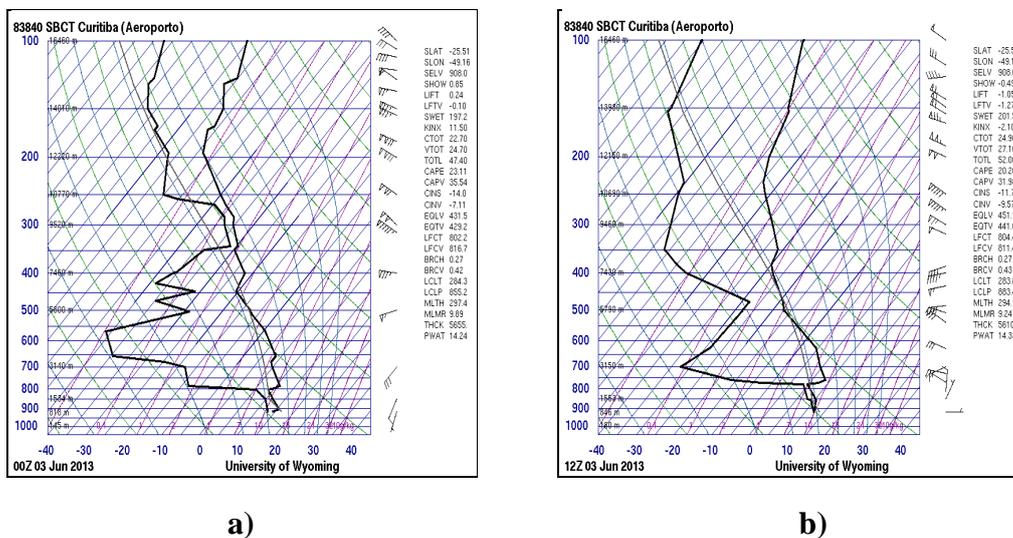


Figura 5.5 – Diagrama Skew T-logp mostrando os perfis de temperatura (C°), ponto de orvalho (C°) e de direção (°) e velocidade do vento (Kt) para as 00 UTC (a) e 12 UTC (b) do dia 03 de junho de 2013 a partir de dados obtidos através do lançamento de radiossondas no Aeroporto Internacional Afonso Pena em Curitiba.

Fonte: Universidade de Wyoming (a) e (b) (2014)

A estação meteorológica de altitude do Aeroporto do Campo de Marte se encontrava próxima a localidade de 2 dos 3 eventos do estudo de caso, localizada a 109 km do evento representado por CAT I e a 125 km do outro evento representado por CAT III, ambas evidenciadas na Figura 5.3.

O perfil atmosférico do Aeroporto do Campo de Marte, plotado no diagrama Skew- T log p para o dia 03 de junho as 00 UTC é representado pela Figura 5.5a. Observando o perfil do vento, podemos analisar ventos de intensidade moderada na camada entre 400 hPa e 250 hPa (camada em análise para o evento) com cisalhamento vertical oscilando em torno de 45 a 85 kts. Para o mesmo dia as 12 UTC representado pela Figura 5.5b, o perfil do vento é observado com maior intensidade nas camadas mais superiores com um cisalhamento vertical na camada entre 400 e 250 hPa oscilando de 60 a 110 kts.

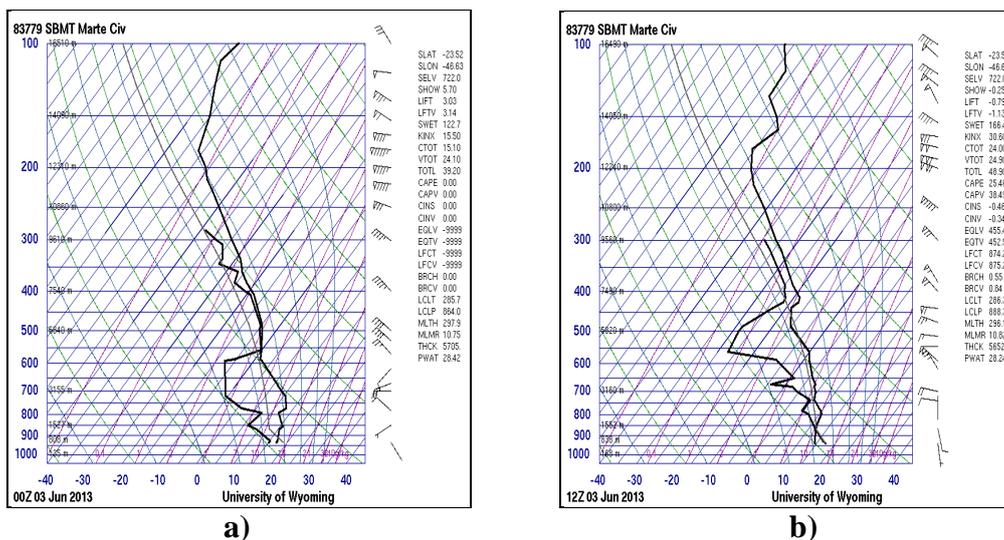


Figura 5.6 - Diagrama Skew T-logp mostrando os perfis de temperatura (C°), ponto de orvalho (C°) e de direção ($^{\circ}$) e velocidade do vento (Kt) para as 00 UTC (a) e 12 UTC (b) do dia 03 de junho de 2013 a partir de dados obtidos através do lançamento de radiossondas no Aeroporto do Campo de Marte em São Paulo.

Fonte: Universidade de Wyoming (a) e (b) (2014)

5.3 Análise das previsões do modelo WRF

Nesta seção, foram extraídas para o dia do evento, previsões do modelo WRF para as 00, 12 e 18 UTC com o objetivo de se analisar os campos de geopotencial e vorticidade em 200 e 500 hpa, corrente de jato em 250 hpa, linhas de corrente e divergência em 200 e 500 hpa e velocidade vertical em 200 e 500 hpa.

Analisando as previsões de posicionamento e intensidade da corrente de jato no nível de 250 hpa as 00 UTC (Figura 5.7a), o modelo previu o jato sobre os estados de Santa Catarina e Paraná com a magnitude do vento variando entre 110 e 140 kts. As 12 UTC (Figura 5.7b), verificamos o deslocamento do jato para nordeste em direção ao oceano, apresentando uma banda sobre os estados de São Paulo e norte do Mato Grosso do Sul variando entre 100 e 110 kts no quesito magnitude do vento. As 18 UTC (Figura 5.7c), horário próximo ao do evento, o modelo simulou a posição do jato sobre o oceano com uma pequena banda do mesmo ao sul do estado de São Paulo sobre o oceano.

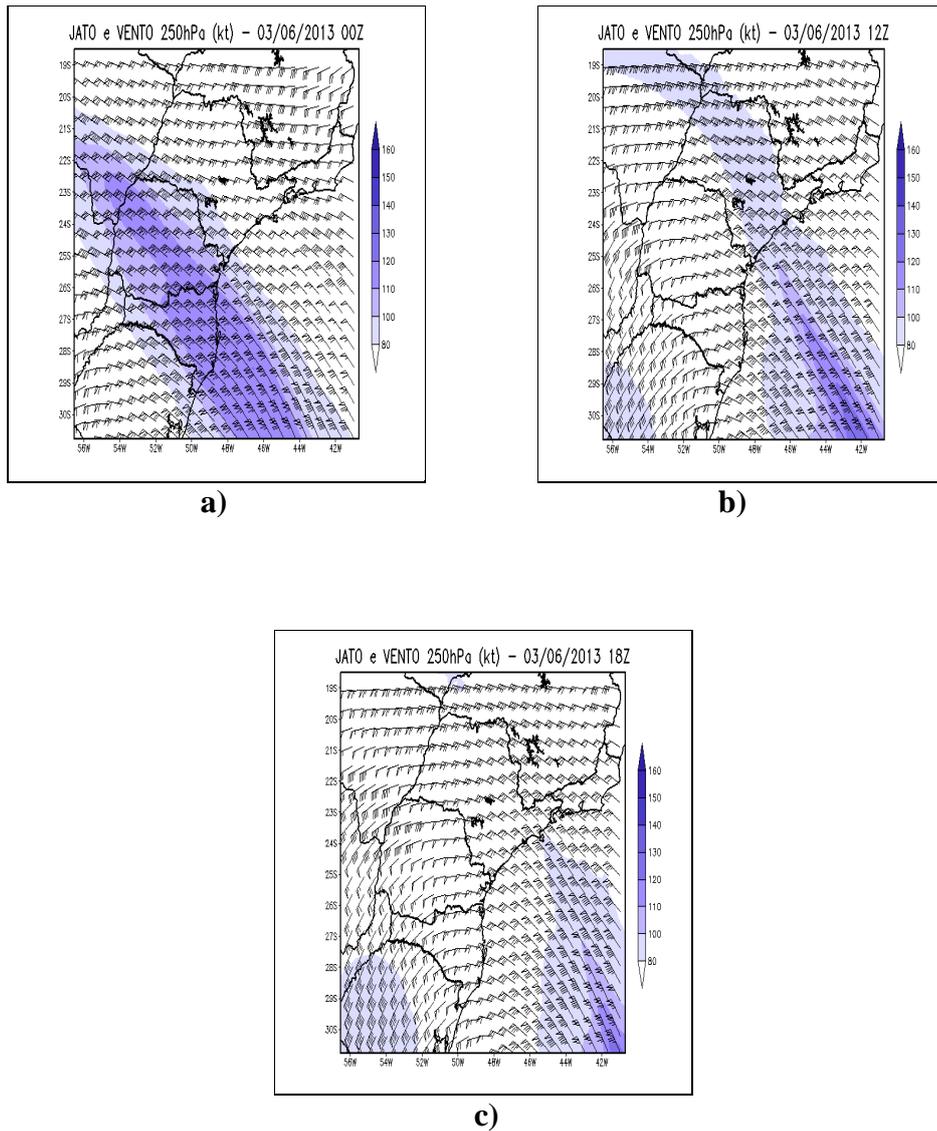


Figura 5.7 – Corrente de Jato e vento (Kt) em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

A análise do campo de geopotencial e vorticidade no nível de 200, as 00 UTC (Figura 5.8a), verifica-se um máximo de vorticidade ciclônica representado por valores negativos sobre o estado do Rio Grande do Sul e a Bacia do Prata, regiões de máximo de vorticidade anticiclônica representados por valores positivos no nordeste do estado do Paraná e estado de São Paulo a partir das previsões do modelo. Sobre o centro do estado do Paraná e nordeste do estado de Santa Catarina regiões com máximo de vorticidade e sem vorticidade indicam a possibilidade de áreas com turbulência em decorrência do jato. Nas regiões ao sul do estado de Minas Gerais, oeste do estado do Espírito Santo e norte do estado do Rio de Janeiro observam-se áreas de contraste de vorticidade ciclônica e sem vorticidade, regiões de indicação de turbulência devido à orografia local. As 12 UTC (Figura 5.8b), com o deslocamento da banda frontal, o modelo simulou um máximo de vorticidade ciclônica sobre o estado de São Paulo, leste do estado do Paraná e a leste da costa da Região Sul do Brasil sobre o oceano. As 18 UTC (Figura 5.8c) uma região de confluência entre máximos de vorticidade ciclônica e sem vorticidade sobre o nordeste do estado do Paraná e ao sul do estado de São Paulo é prevista pelo modelo, condições indicando áreas com possivelmente ocorrência de turbulência em decorrência do jato na retaguarda da frente fria.

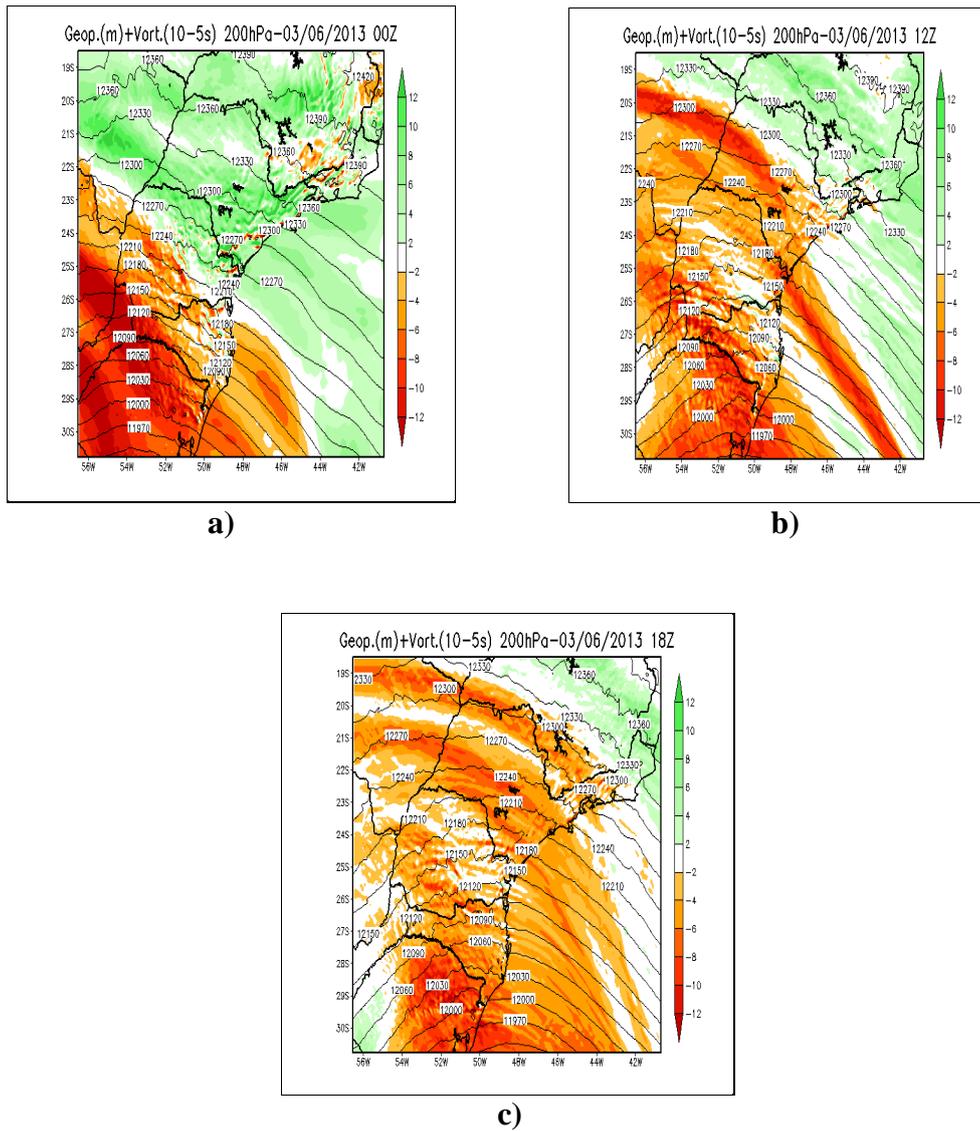


Figura 5.8 – Geopotencial (m) e Vorticidade (10^{-5} s) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

Verificando o campo de geopotencial e vorticidade no nível de 500, as 00 UTC (Figura 5.9a), o modelo previu um máximo de vorticidade ciclônica representado por valores negativos sobre o sudoeste do estado do São Paulo e sudeste do estado do Mato Grosso do Sul. As 12 UTC (Figura 5.9b), verificamos o deslocamento da banda frontal com máximo de vorticidade ciclônica sobre o estado de São Paulo. As 18 UTC (Figura 5.9c) observa-se uma região de confluência entre máximos de vorticidade ciclônica representados por valores negativos e sem vorticidade destacados em branco sobre o nordeste do estado do Paraná e ao centro-sul do estado de São Paulo, condições de análise indicando áreas com possivelmente presença de turbulência em decorrência do jato presente na região.

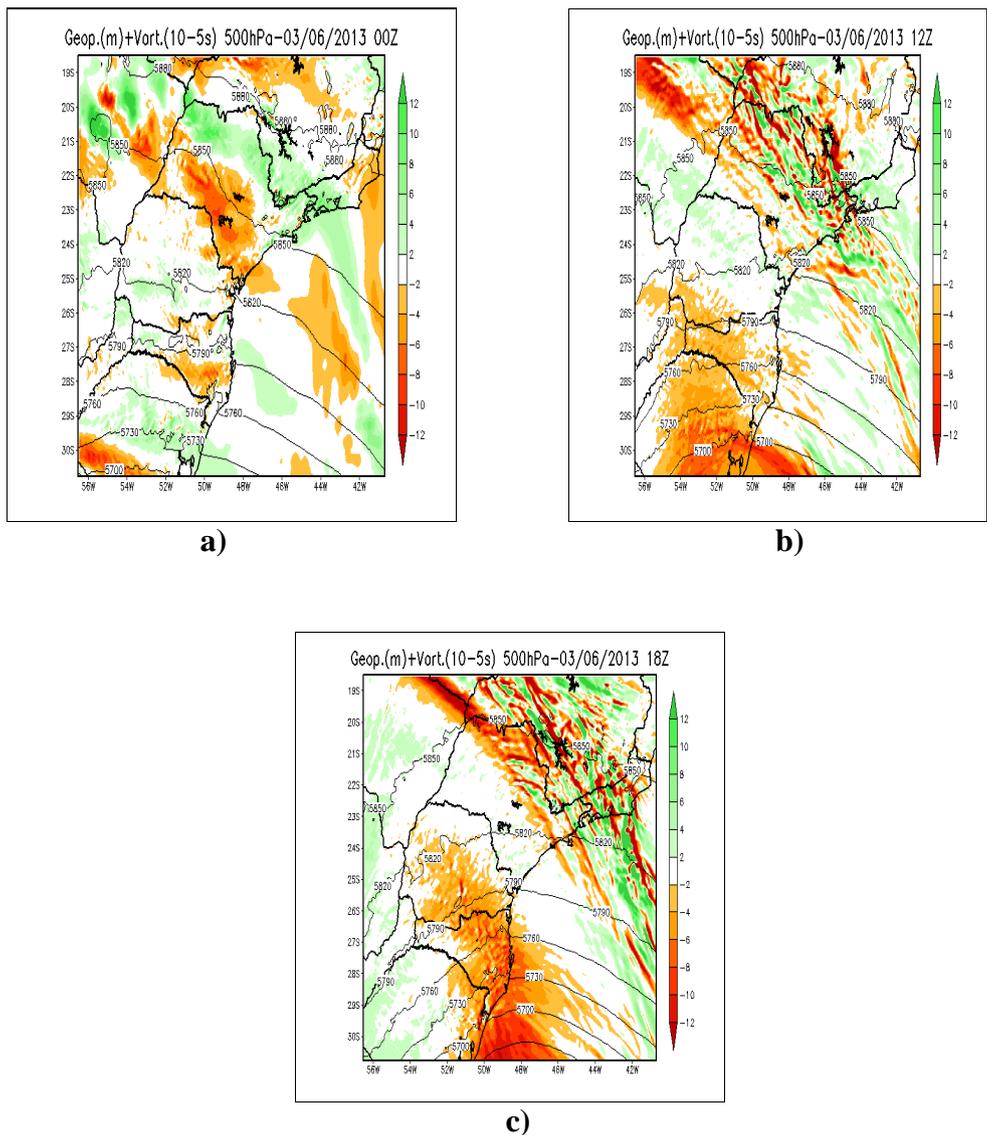


Figura 5.9 – Geopotencial (m) e Vorticidade (10^{-5} s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

Observando o campo de linhas de corrente e divergência em 200 hpa as 00 UTC (Figura 5.10a), o modelo simulou uma banda de divergência destacado por valores positivos sobre o estado do Paraná, sudoeste do estado de São Paulo e regiões de convergência destacado por valores negativos a leste e nordeste desses estados. As 12 UTC (Figura 5.10b), observamos a entrada do sistema frontal sobre o estado do Paraná com regiões de máxima divergência e máxima convergência próximas de onde se encontrava o sistema frontal. As 18 UTC (Figura 5.10c), observamos uma região de convergência sobre o oeste e sudoeste do estado de São Paulo onde se posicionava a frente fria e ao sudoeste dessa região, uma banda de divergência sobre o estado do Paraná, condição da presença do jato que se encontrava na retaguarda do sistema frontal.

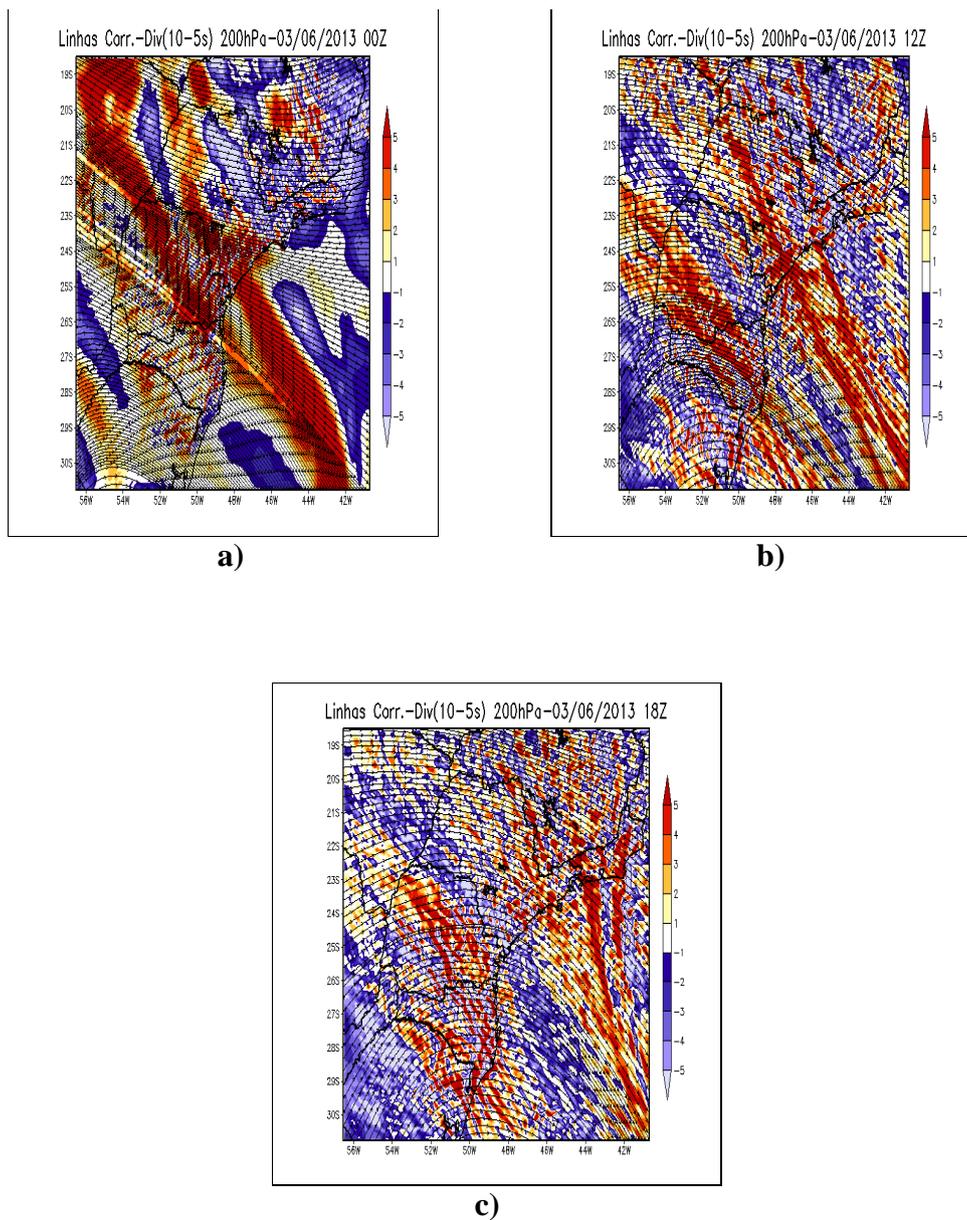
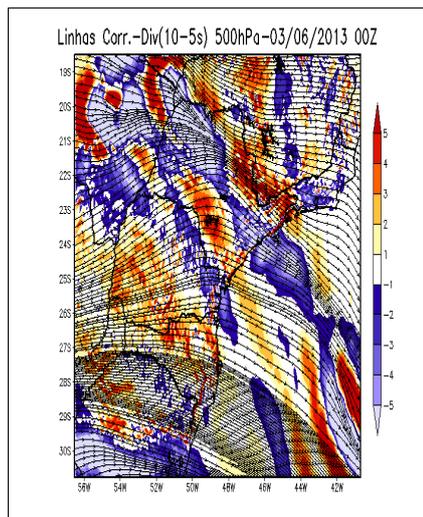
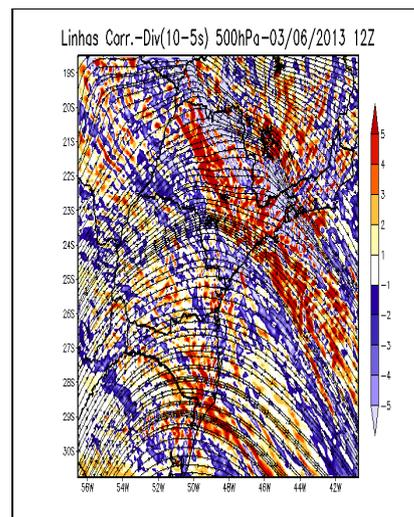


Figura 5.10 – Linhas de Corrente e Divergência ($10^{-5}s$) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.
 Fonte: ICEA (2014)

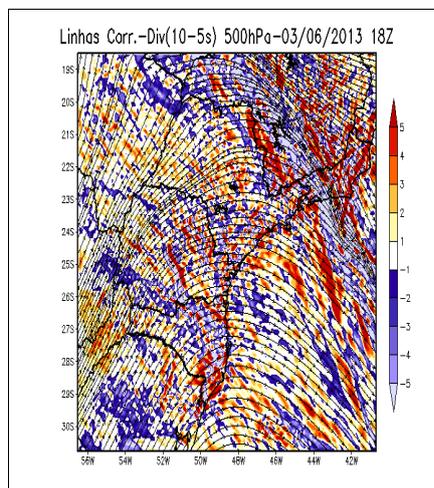
Analisando o campo de linhas de corrente e divergência em 500 hpa as 00 UTC (Figura 5.11a), observamos um centro de máxima divergência destacado por valores positivos sobre o sudoeste e nordeste do estado de São Paulo e bandas de convergência destacadas por valores negativos entre esses dois máximos no centro do estado e na divisa com o estado do Paraná a partir das simulações do modelo. As 12 UTC (Figura 5.11b), observamos uma banda de divergência sobre o centro do estado de São Paulo e em sua retaguarda uma banda de convergência associada à presença do sistema frontal ao nordeste do estado do Paraná e sul do estado de São Paulo. As 18 UTC (Figura 5.11c), com o deslocamento da frente fria para nordeste, o modelo destacou uma extensa área de máximos de divergência e convergência sobre o estado do Paraná e de São Paulo e a presença do jato na retaguarda do sistema frontal identificado pela banda de divergência em vermelho.



a)



b)



c)

Figura 5.11 – Linhas de Corrente e Divergência (10^{-5} s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

Verificando os campos de velocidade vertical em 200 hpa as 00 UTC (Figura 5.12a), o modelo previu uma região de divergência com valores positivos em evidência na região do evento, sobre o nordeste do estado do Paraná e centro-sul do estado de São Paulo. As 12 UTC (Figura 5.12b), observamos áreas com valores negativos indicando regiões de convergência sobre o local do evento. As 18 UTC (Figura 5.12c), visualizamos sobre a mesma região, um contraste de valores positivos de divergência e negativos de convergência indicando áreas de turbulência pós-frontais na presença do jato sobre a região.

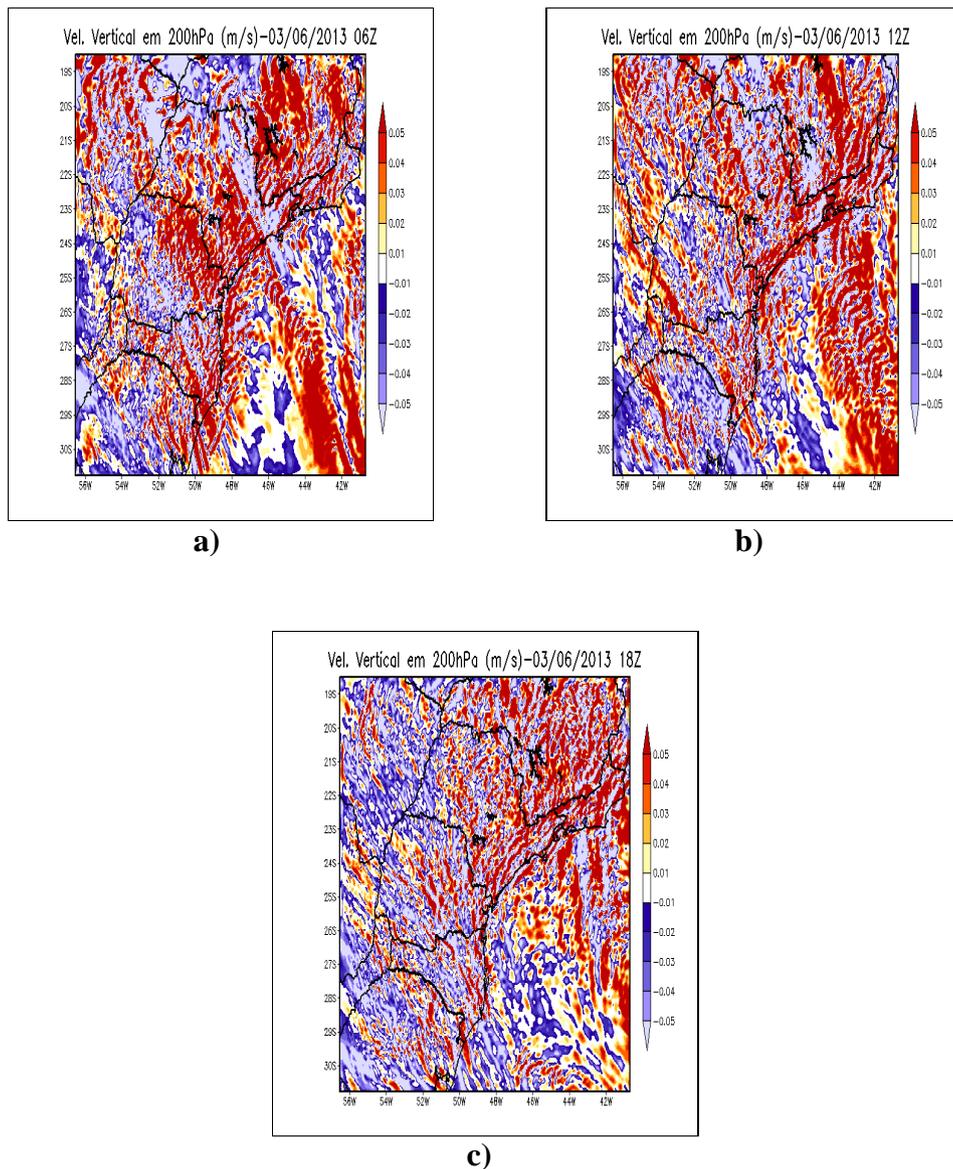


Figura 5.12 – Velocidade Vertical (m/s) em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

Visualizando os campos de velocidade vertical em 500 hpa as 00 UTC (Figura 5.13a), o modelo retratou uma pequena banda de divergência sobre o estado de São Paulo entre duas bandas de convergência na mesma região. As 12 UTC (Figura 5.13b), com a chegada da frente fria sobre a região, observamos uma faixa de convergência indicando a condição de presença do sistema frontal. As 18 UTC (Figura 5.13c), visualizamos sobre a mesma região, uma variação entre valores positivos de divergência e negativos de convergência indicando áreas de turbulência na presença do jato sobre essa região.

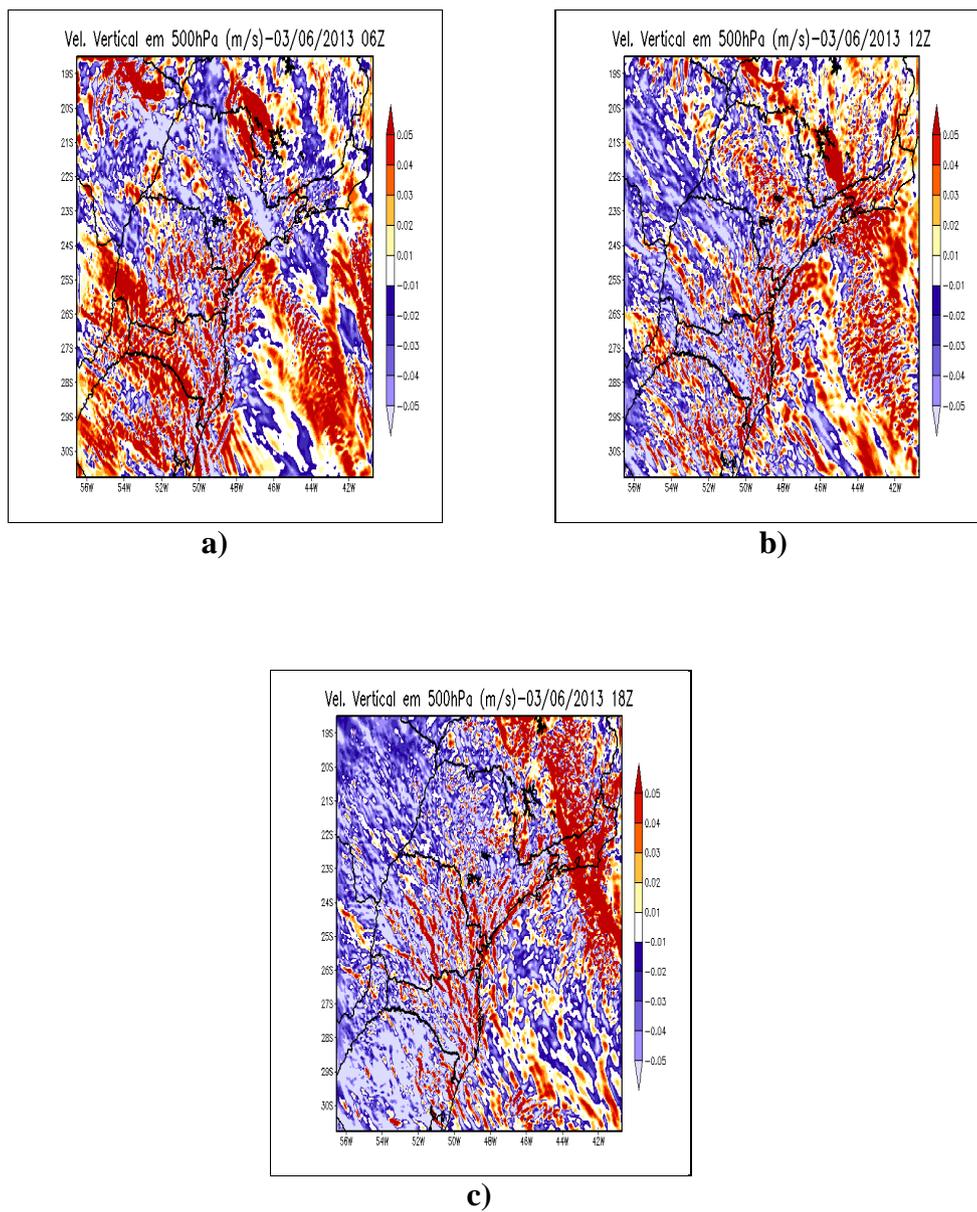


Figura 5.13 – Velocidade Vertical (m/s) em 500 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

5.4 Análise da Turbulência

Nesta seção são apresentados os índices de turbulência Brown, Ellrod I e Ellrod II calculados a partir de reanálises do ERA-INTERIM e previsões do modelo regional WRF para o evento dia 03 de junho de 2013. Os seguintes resultados são comparados e verificados para fins de análise.

5.4.1 Indicador de Turbulência Brown

O indicador de turbulência Brown foi inicialmente calculado a partir de dados de reanálise do ERA-INTERIM no programa GRADS. Cada termo perante a equação do indicador foi configurada adequadamente para se extrair resultados contundentes perante a turbulência em análise. Os termos foram devidamente analisados e verificados para o dia 03 de Junho de 2013, na qual consistiu o dia do evento. Quanto maior forem os valores do indicador de turbulência Brown, maior será a probabilidade de ocorrer turbulência e quanto menor ou mais negativos forem os valores menor probabilidade de ocorrência de turbulência.

No dia 03 de junho de 2013 em 300 hpa as 00 UTC (Figura 5.14a), o índice apresentou valores de turbulência mais intensos de $16 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ sobre o Paraguai e Uruguai associados à região frontal se deslocando a nordeste em direção a região do evento. As 12 UTC (Figura 5.14b), com o avanço do sistema frontal para a região sul do Brasil, a região de valores máximos de turbulência se encontrava sobre o estado de Santa Catarina e sul do estado do Paraná com valores de $14 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. As 18 UTC (Figura 5.14c), com o deslocamento da frente fria para o oceano e parte da região Sudeste, o indicador apresentou uma área de máximo principal entre 14 e $16 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ coincidindo com a região do evento. Portanto, o índice apresentou boa representatividade perante a turbulência tendo o termo de vorticidade absoluta como de grande importância e relevância dentre os outros termos.

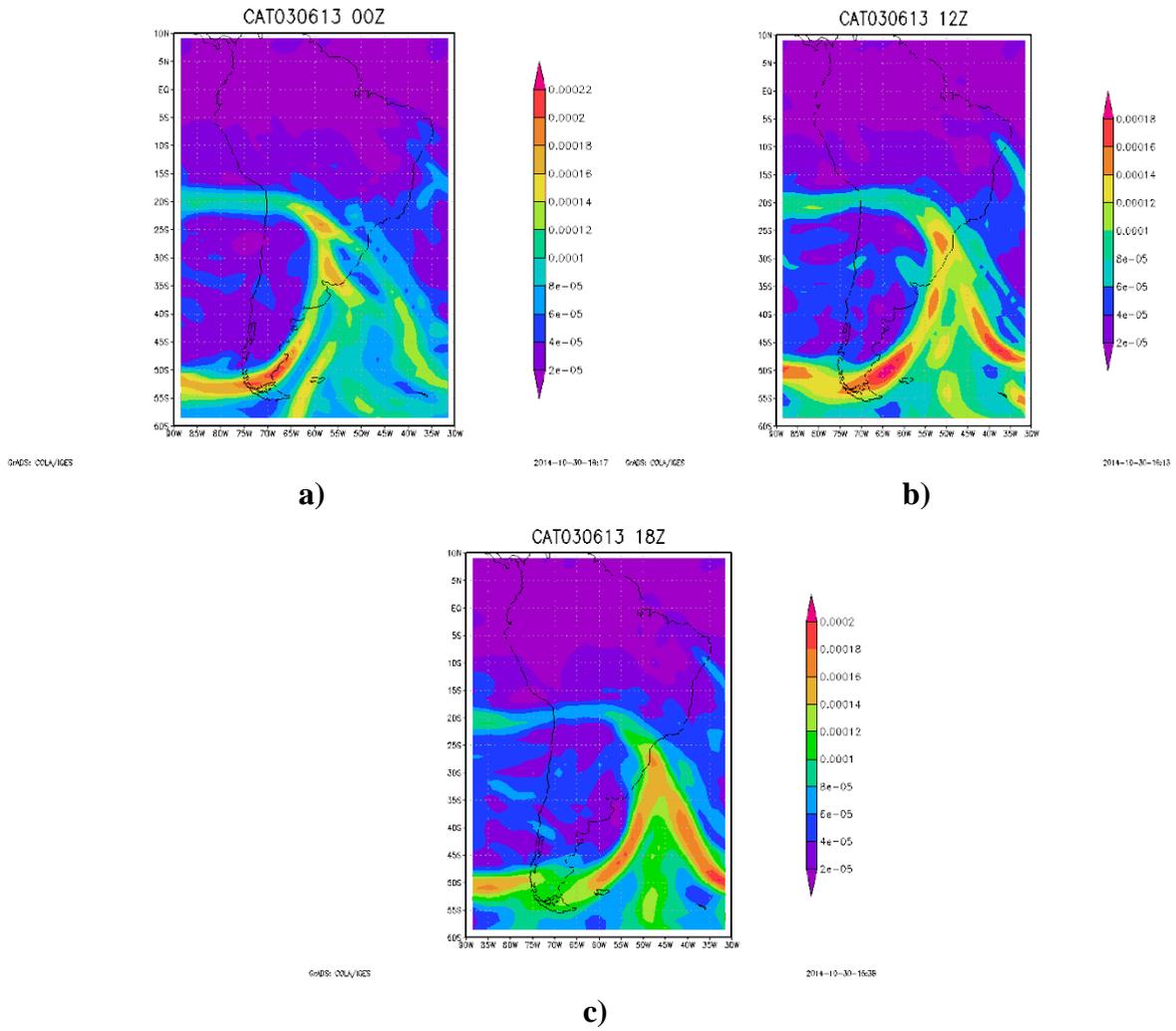


Figura 5.14 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS em 300 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

O indicador de turbulência Brown foi também calculado a partir de previsões do modelo regional WRF nos níveis de 200, 250 e 400 hpa para o dia 03 de junho de 2013 as 00, 12 e 18 UTC.

Para as 00 UTC do dia 03 de junho no nível de 200 hpa (Figura 5.15a) o modelo retratou regiões de turbulência com máximos valores de $12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ sobre o Paraguai, norte do estado do Rio Grande do Sul e oeste do estado de Santa Catarina. As 12 UTC (Figura 5.15b) com o deslocamento do sistema frontal sobre a região sul do Brasil o modelo simulou uma extensa faixa de turbulência com valores de $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a leste da costa da Região Sul, sobre o estado de São Paulo e centro do Mato Grosso do Sul e sobre os estados do Rio Grande do Sul e oeste do estado de Santa Catarina, condição associada à região do jato em altitude. As 18 UTC (Figura 5.15c) o modelo captou pequenas áreas de turbulência de valores de $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ sobre a região do evento, condição associada a corrente de jato que se encontrava na retaguarda do sistema frontal sendo bem representada e indicada pela previsão do modelo.

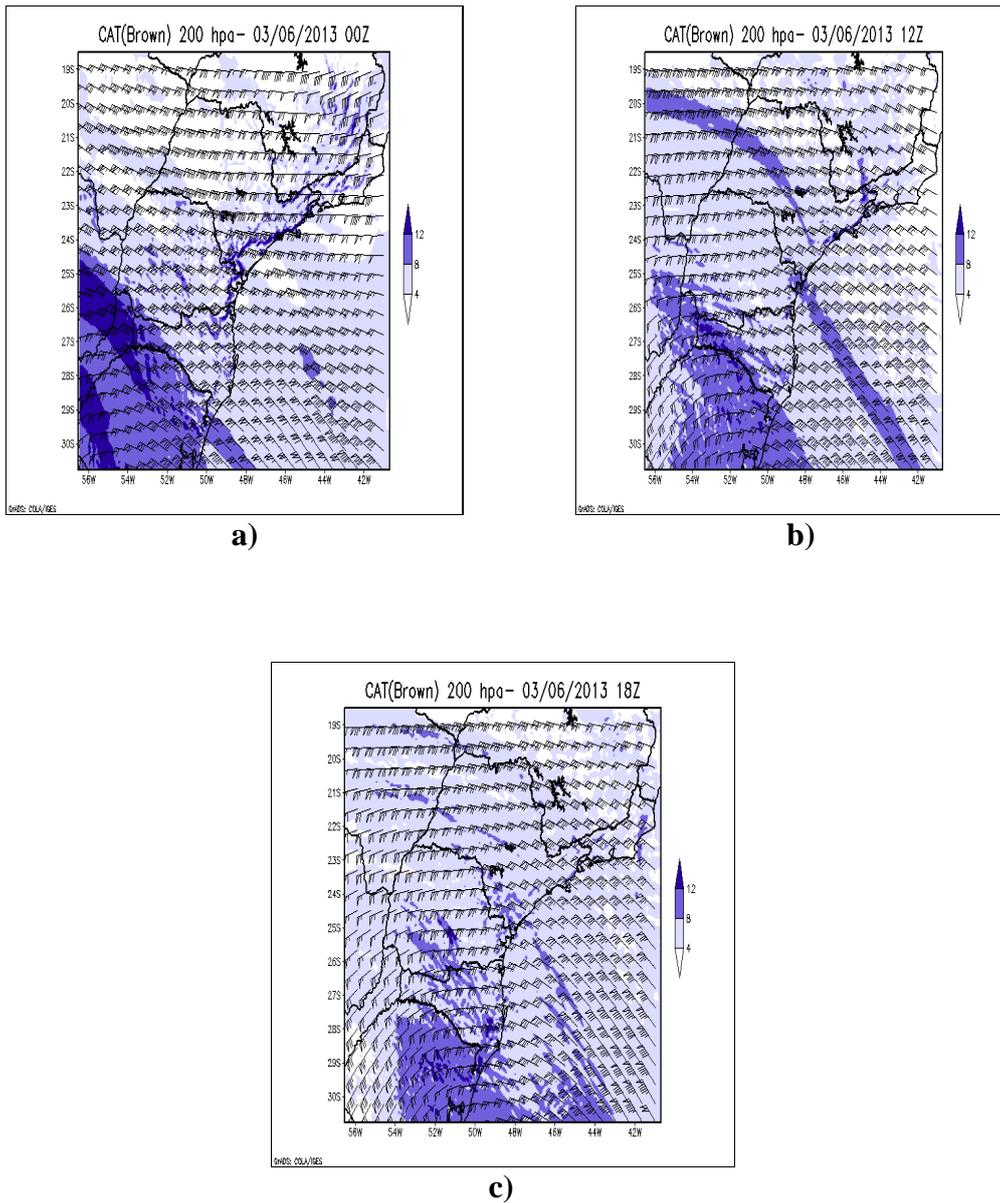


Figura 5.15 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

No dia 03 de junho as 00 UTC no nível de 250 hpa (Figura 5.16a) o modelo previu regiões de turbulência com máximos valores de $12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ sobre o Paraguai, parte da Argentina e toda porção norte e nordeste do estado do Rio Grande do Sul. As 12 UTC (Figura 5.16b) com o avanço para nordeste do sistema frontal sobre a região sul do Brasil o modelo simulou uma extensa faixa de turbulência com valores de $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ sobre o oceano, oeste e sul do estado de São Paulo, centro do estado do Mato Grosso do Sul e com máximos valores de $12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ no sul do estado de São Paulo e leste do estado do Paraná. As 18 UTC (Figura 5.16c) o modelo também previu áreas de turbulência de valores de $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ na região do evento, condição também associada à presença do jato na retaguarda da frente fria, representando de forma coerente a turbulência assim como também no nível de 200 hpa (Figura 5.15c).

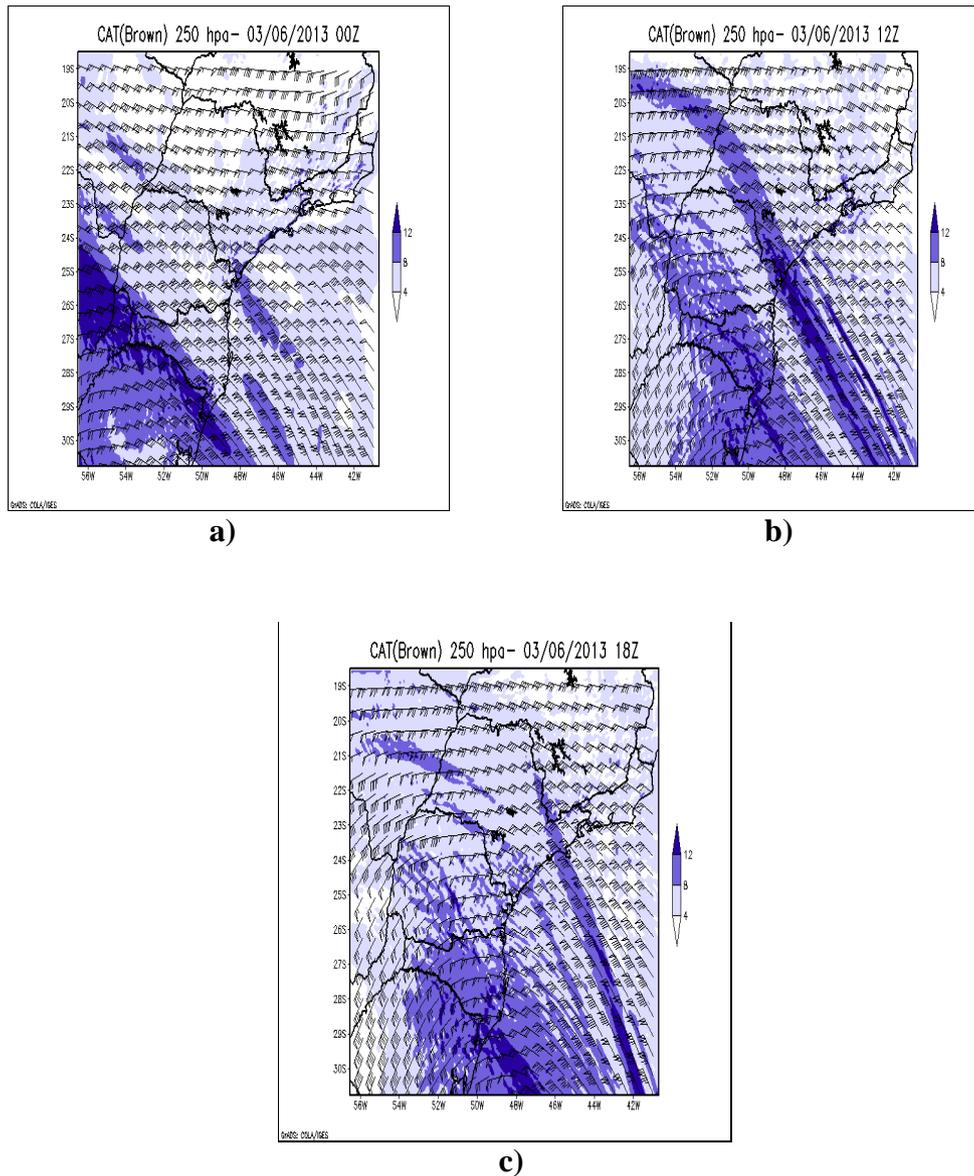


Figura 5.16 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

No nível de 400 hpa no dia 03 de junho de 2013 as 00 UTC (Figura 5.17a), o modelo não representou regiões de turbulência significativas sobre a região Sul e Sudoeste do Brasil com alguns valores oscilando em torno de $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na região do evento. As 12 UTC (Figura 5.17b), a partir do deslocamento do sistema frontal a nordeste, observamos regiões de máximos valores de $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na parte sudoeste e oeste do estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul, condição associada regiões de turbulência em decorrência ao posicionamento da frente fria. As 18 UTC (Figura 5.17c) o modelo previu áreas de turbulência de valores intensos de $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ sobre a região do evento de 2 dos 3 reportes de CAT severa, procedendo uma boa representatividade na previsão turbulência.

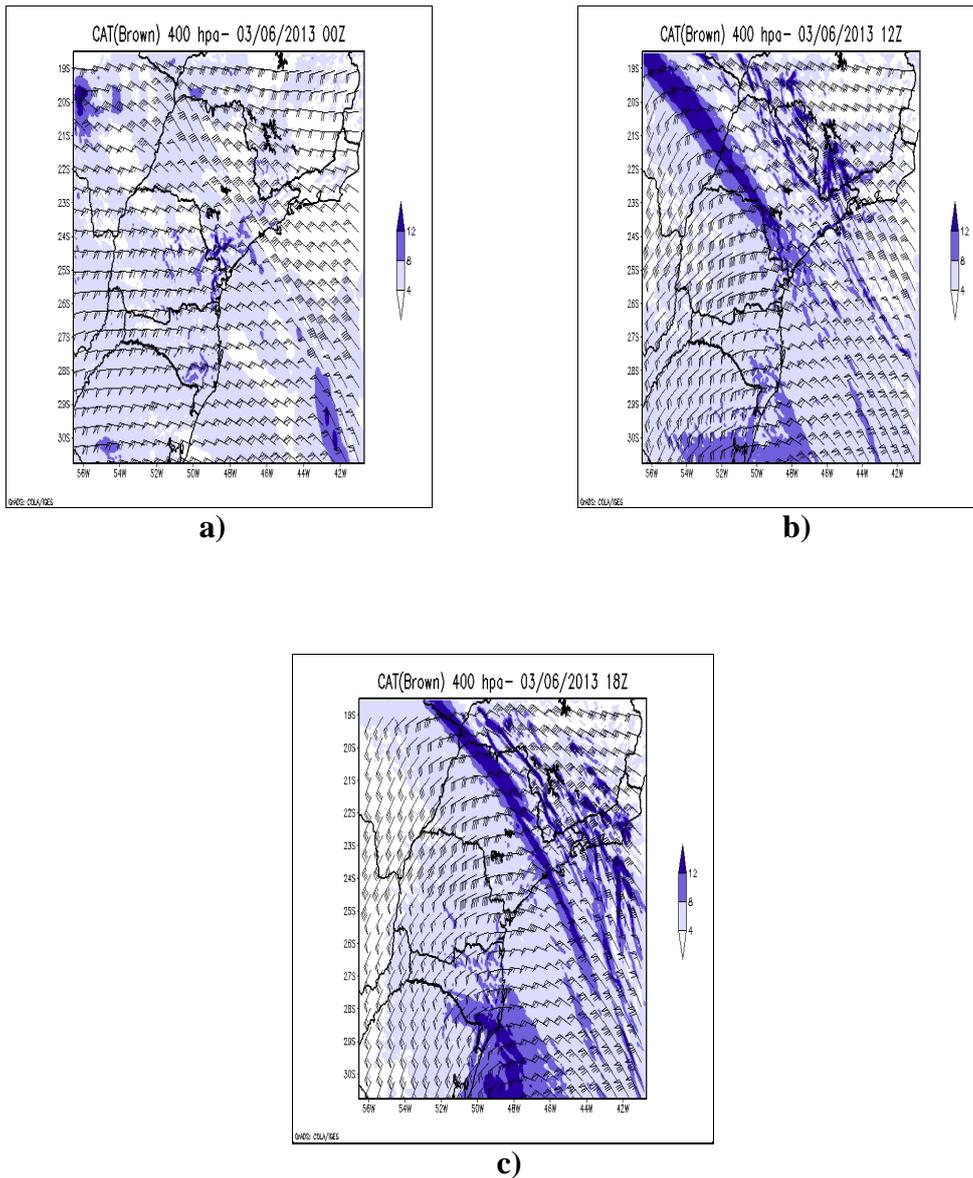


Figura 5.17 – Indicador de Turbulência Brown (10^{-5} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 400 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

5.4.2 Indicador de Turbulência Ellrod I

O indicador de turbulência Ellrod I foi calculado a partir de dados de reanálise do ERA-INTERIM no programa GRADS. Cada termo da equação do indicador foi devidamente analisado e rodado para o dia 03 de junho de 2013. Nesse indicador, quanto maior forem os valores, maior será a probabilidade de ocorrer turbulência e quanto menor ou mais negativos forem os valores menor probabilidade de ocorrência de turbulência. O modelo de previsão regional WRF se utiliza do indicador de turbulência Ellrod II para fins de previsão de CAT, portanto o indicador Ellrod I é discutido neste tópico somente por meio das simulações no programa GRADS.

No dia 03 de junho de 2013 entre os níveis de 250 e 350 hpa as 00 UTC (Figura 5.18a), o índice representou valores de turbulência na ordem de $0,6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre o centro da Região Sul do Brasil e valores na faixa de $0,4 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ em uma extensa faixa sobre a Região Sul e parte da Sudeste do Brasil. As 12 UTC (Figura 5.18b) observa-se uma região de valores máximos de turbulência de $0,8 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ a $10 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre a área do evento na parte nordeste do estado do Paraná, assim como também áreas de divergência na região próxima aos máximos de turbulência. As 18 UTC (Figura 5.18c), com o deslocamento do sistema frontal para o oceano, o indicador apresentou uma área de turbulência menos intensa de valores $0,6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre a região do evento onde se encontrava o jato. Para este índice os resultados apresentaram redução do indicador Ellrod I perante as condições reais do caso, entretanto o posicionamento da turbulência associada ao sistema frontal esta evidente.

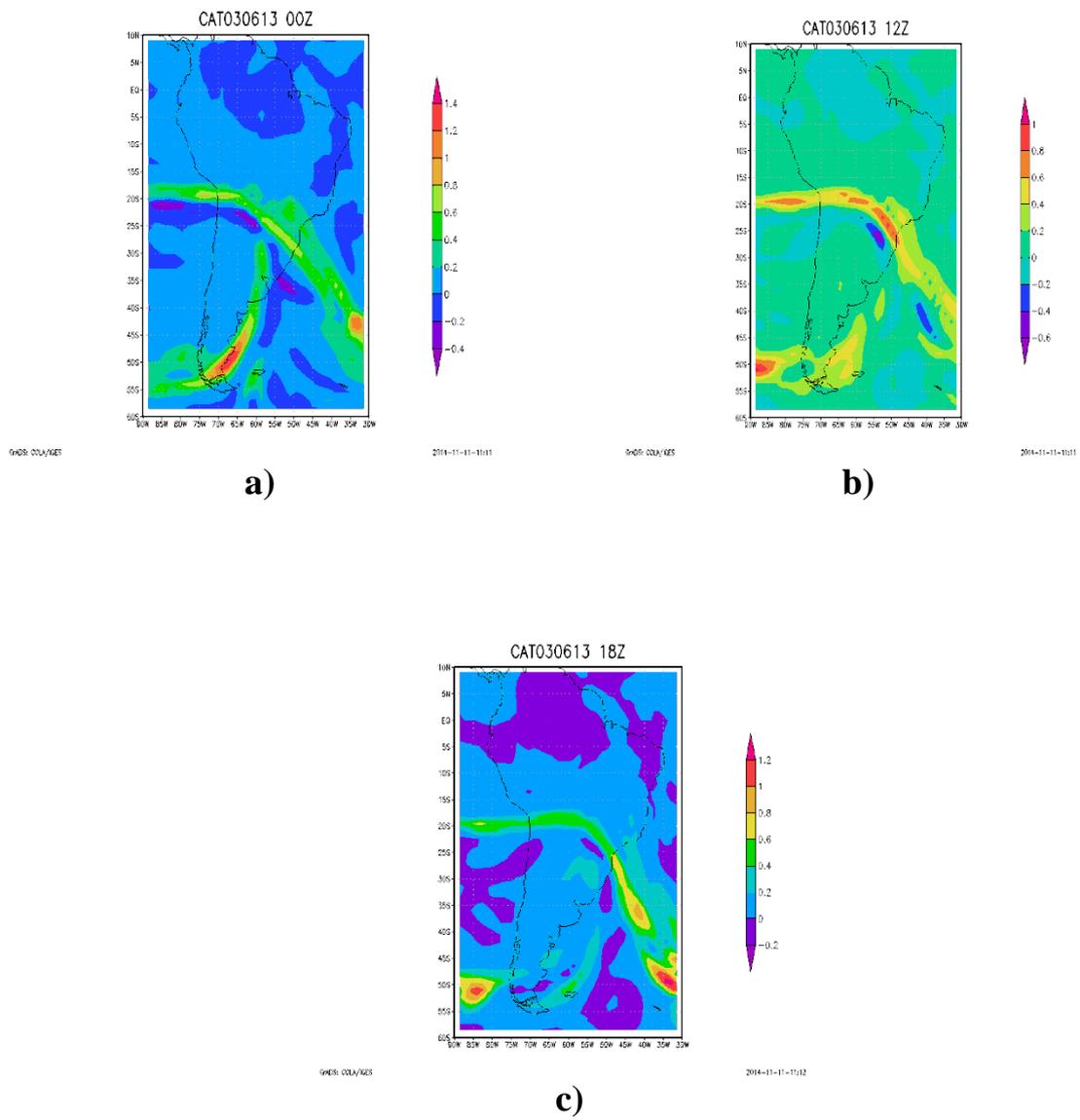


Figura 5.18 – Indicador de Turbulência Ellrod I (10^{-6} s^{-1}) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS entre 250 e 350 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

5.4.3 Indicador de Turbulência Ellrod II

O indicador de turbulência Ellrod II também foi calculado a partir de dados de reanálise do ERA-INTERIM no programa GRADS. Cada um dos termos da equação do indicador foi configurado e analisado visando os resultados para o dia 03 de junho de 2013. Se utilizando do mesmo parâmetro referente ao indicador Ellrod I, no indicador Ellrod II quanto maior forem os valores, maior será a probabilidade de ocorrer turbulência e quanto menor ou mais negativos forem os valores menor probabilidade de ocorrência de turbulência.

No dia 03 de junho de 2013 entre os níveis de 250 e 350 hpa as 00 UTC (Figura 5.19a), uma extensa faixa indicando regiões de turbulência sobre a região Sul do Brasil e parte do Paraguai e norte da Argentina foi apresentada pelo indicador com valores na ordem de $0,6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ a $0,8 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$. Para as 12 UTC (Figura 5.19b) observa-se uma região de valores máximos de turbulência de $0,6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ a $0,8 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre a área do evento coincidindo com as simulações do indicador Ellrod I (Figura 5.18b) para o mesmo horário. As 18 UTC (Figura 5.19c), com o deslocamento do sistema frontal para a região Sudeste, o indicador representou regiões de turbulência de acordo o posicionamento do sistema sobre essas áreas. Na região do evento, nota-se uma área de turbulência mais intensa com valores de $0,6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ a $0,8 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$, condição associada à presença da corrente de jato. Os resultados obtidos para este indicador apresentaram boa representação perante as condições reais do evento.

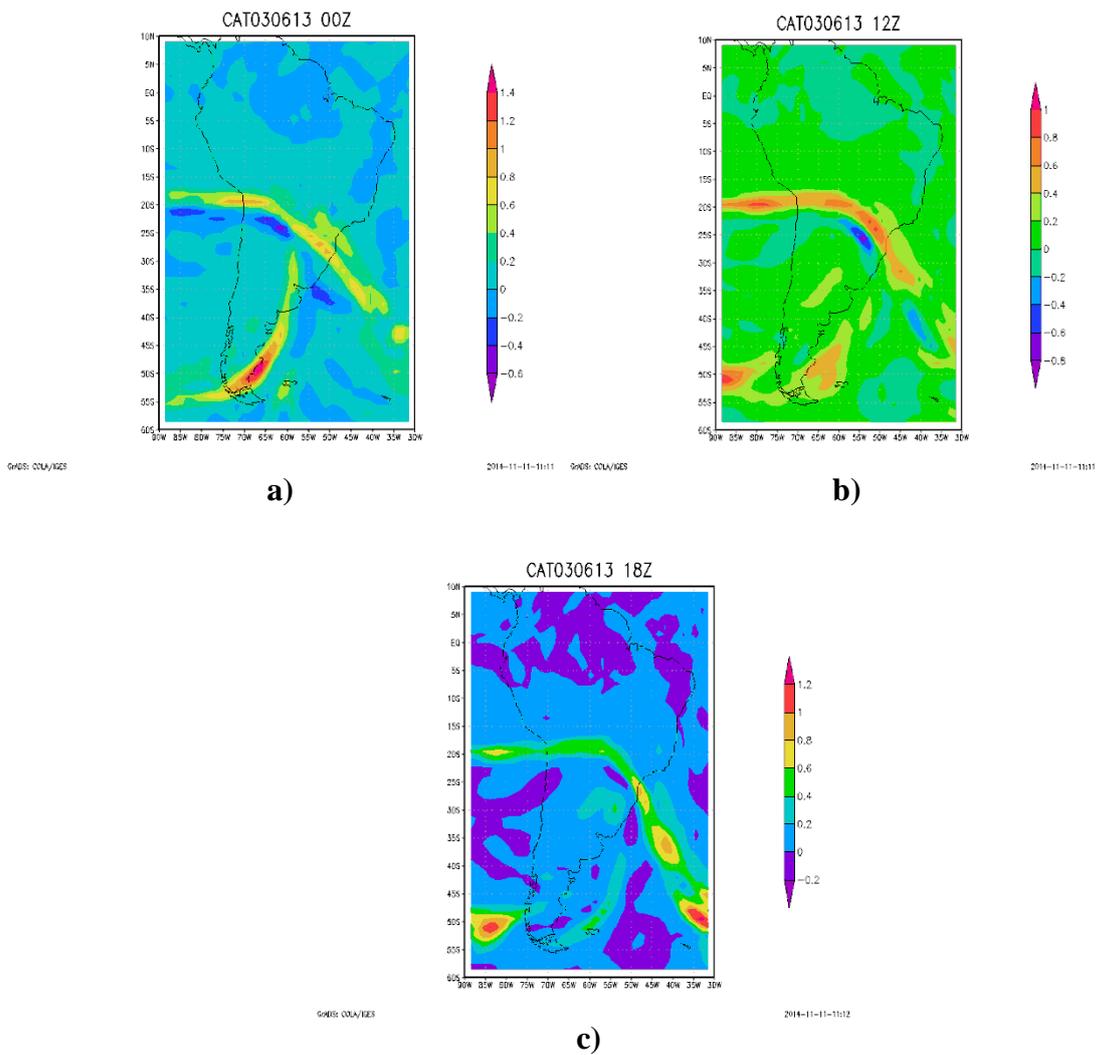


Figura 5.19 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) elaborado a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM simulado no GRADS entre 250 e 350 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

O indicador de turbulência Ellrod II também calculado a partir de previsões do modelo regional WRF nos níveis de 200, 250 e 400 hpa para o dia 03 de junho de 2013 as 00, 12 e 18 UTC.

No dia 03 de junho no nível de 200 hpa as 00 UTC (Figura 5.20a), regiões de turbulência com máximos valores de $12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ foram apresentadas na porção norte e nordeste do estado do Paraná e extremo oeste do estado de São Paulo, bem como também em parte da região Sudeste em áreas de topografia acentuada como o sudeste do estado de Minas Gerais. As 12 UTC (Figura 5.20b), o modelo representou regiões de forte turbulência ao sul sobre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As 18 UTC (Figura 5.20c) o modelo previu áreas de turbulência de valores de $12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ também sobre a mesma região sobre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina perante as simulações das 12 UTC, não representando áreas de turbulência sobre a região do evento.

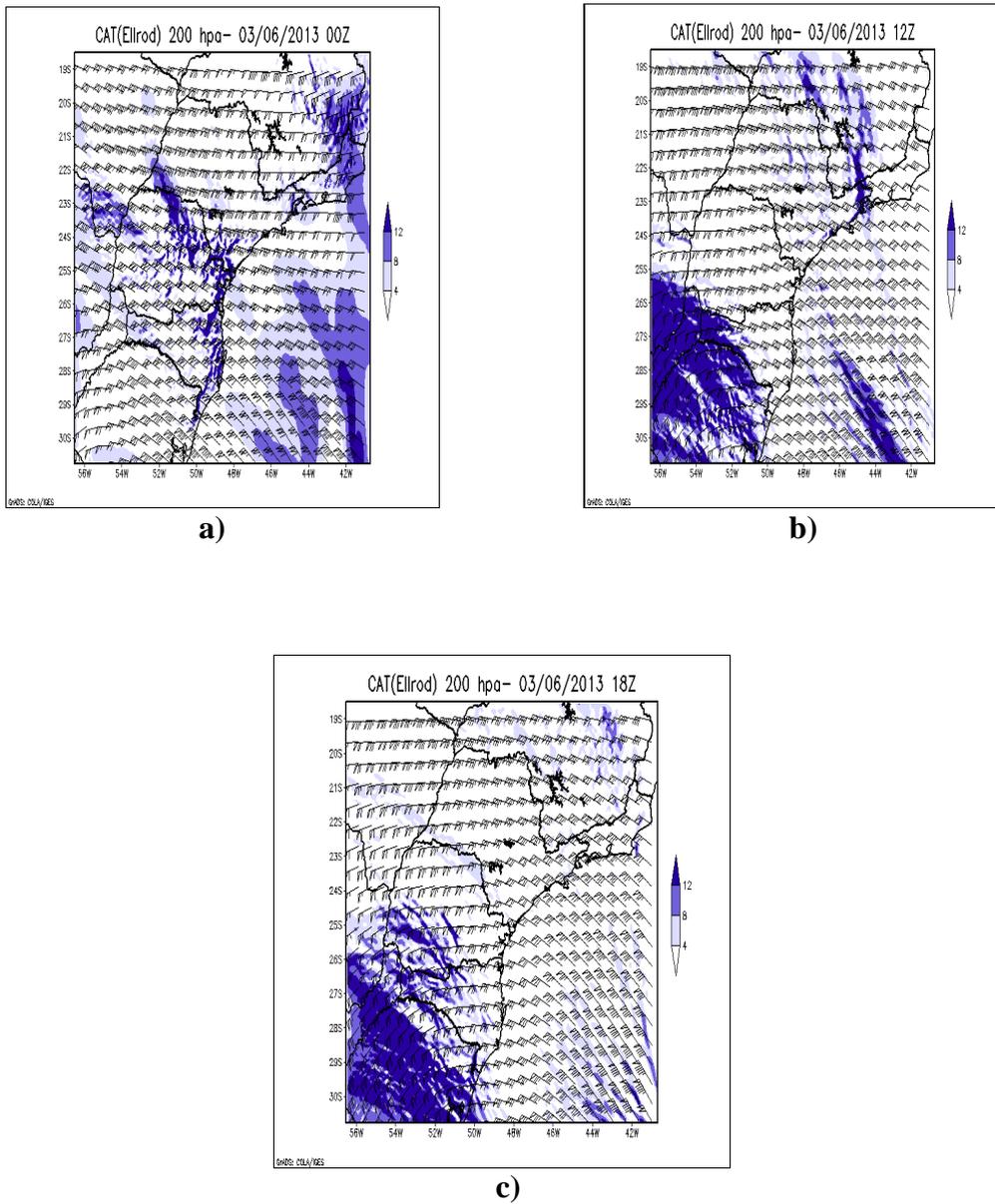


Figura 5.20 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 200 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

No dia 03 de junho no nível de 250 hpa as 00 UTC (Figura 5.21a), o modelo previu extensas regiões de turbulência com máximos valores de $12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre o nordeste do estado do Paraná, estado de São Paulo e sobre o oceano, representando bem a chegada do sistema frontal sobre essas regiões. As 12 UTC (Figura 5.21b), regiões de forte turbulência foram representadas sobre o leste do estado de São Paulo em decorrência do posicionamento da frente fria. Sobre os estados do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e oeste do estado do Paraná observamos áreas de turbulência de grande intensidade associadas com a presença do jato na retaguarda do sistema frontal nessas regiões. As 18 UTC (Figura 5.21c) o modelo simulou áreas de turbulência de valores de $12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre a Região Sul do Brasil em decorrência da corrente de jato, porém abaixo da região do evento.

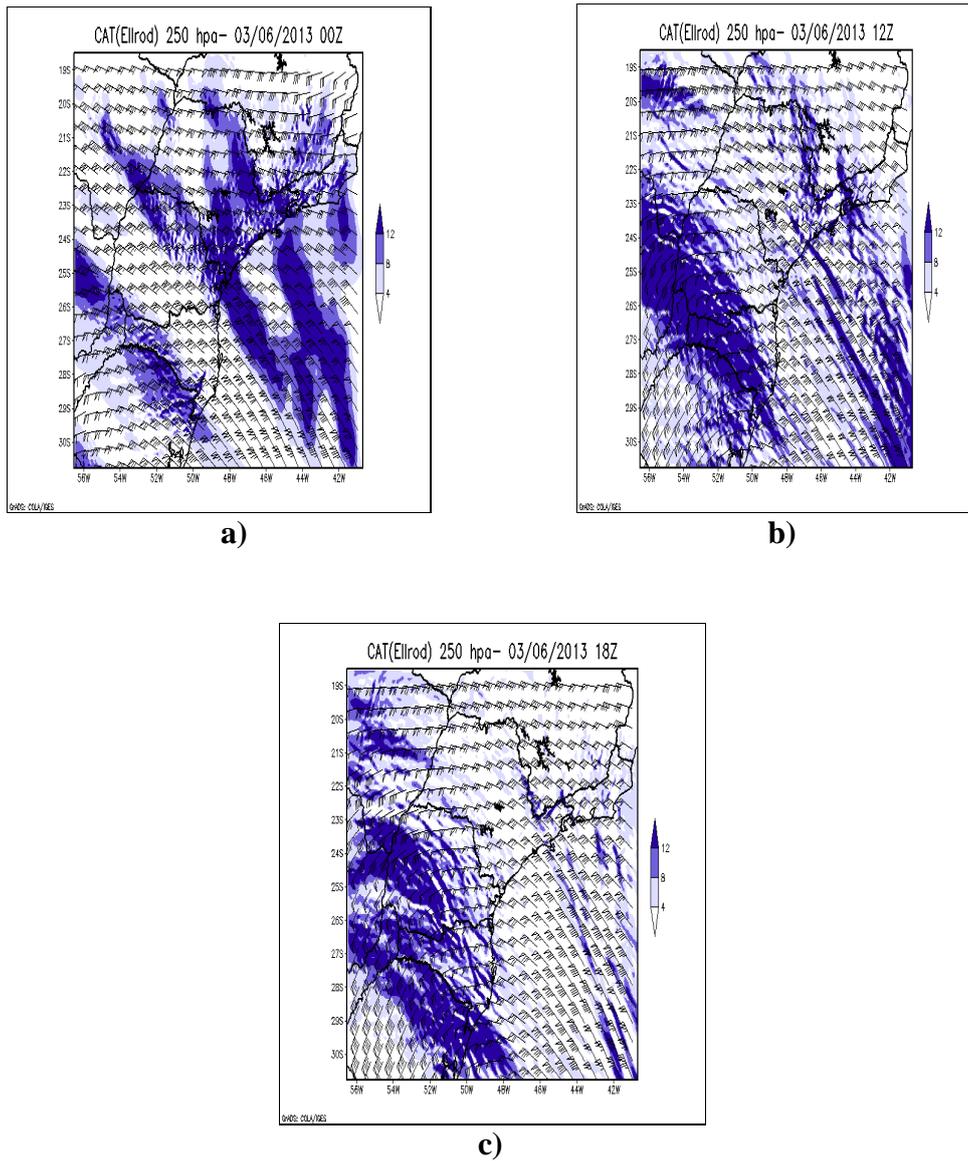


Figura 5.21 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 250 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

No nível de 400 hpa no dia 03 de junho de 2013 as 00 UTC (Figura 5.22a), o modelo previu regiões de forte turbulência com máximos valores em torno de $12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ sobre os estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina em decorrência do sistema frontal que se encontrava sobre essas regiões. As 12 UTC (Figura 5.22b), áreas de turbulência de grande intensidade se localizavam sobre a extensa faixa onde o sistema frontal estava atuando e em sua retaguarda uma região de turbulência associada com o jato. As 18 UTC (Figura 5.22c) o modelo simulou áreas de turbulência de máximos valores de $12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ também sobre as regiões onde a frente fria atuava. Na região do evento, 2 de 3 casos foram bem representados perante a localidade das áreas de forte turbulência do modelo e a área onde foram reportados.

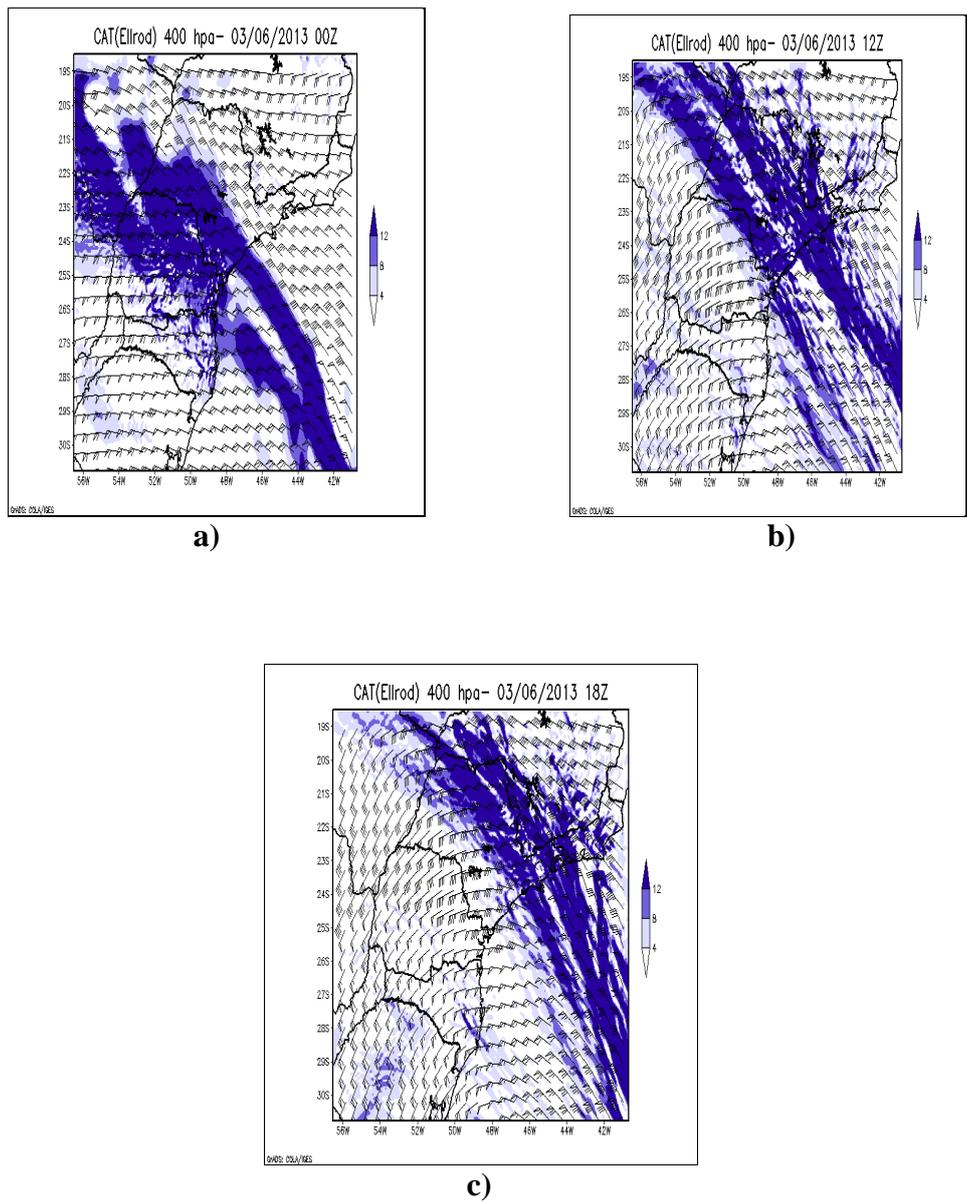


Figura 5.22 – Indicador de Turbulência Ellrod II (10^{-6} s^{-1}) a partir de previsões do modelo WRF em 400 hpa as 00UTC (a), 12UTC (b) e 18UTC (c) para o dia 03 de junho de 2013.

Fonte: ICEA (2014)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões do trabalho

Nesta pesquisa, eventos de CAT assimilados por aeronaves comerciais, militares e executivas foram estudados e a elaboração de uma climatologia estatística perante os parâmetros e informações disponíveis nos dados foi empregada considerando as FIR-BS e FIR-CW como as regiões do espaço aéreo brasileiro das quais os reportes foram provenientes.

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

Analisando os reportes de CAT perante o período do ano, evidenciou-se que no período do inverno foram reportados 33,1% de todos os casos. O período outono/inverno foi responsável por 63,2 % dos eventos da FIR-BS e FIR-CW.

Avaliando os eventos de acordo com a 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 mostrou que entre 18 e 00 UTC foi reportada a maior quantidade de eventos em um espaço de tempo de 6 horas. Analisando um espaço de tempo maior, foi evidenciado que entre 12 e 00 UTC ocorreu a maior frequência de reportes sendo que esse período é caracterizado como o de maior densidade de tráfego aéreo no país na chegada e saída de inúmeros entre aeroportos de grande movimento como Brasília, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Os AIREPs mostraram que foram reportados eventos de CAT em diferentes níveis de altitude, entretanto constou-se que 55,8% dos casos foram reportados entre 35 a 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 casos analisados.

As rotas aéreas entre os aeroportos de maior movimento do país concentraram a maior quantidade de reportes de ocorrência de CAT, como também nos horários de maior densidade de tráfego aéreo, sendo essa uma importante característica das duas regiões em análise nesse 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.

Neste trabalho, também foi elaborado um estudo de caso severo, ocorrido na FIR-CW nas quais 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 verificado 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 que não obteve a mesma relevância em seus resultados. Observou-se que nas regiões próximas ao sistema frontal e a corrente de jato, os três indicadores apresentaram boa coerência, apresentando-se como resultados de suma importância para detectar possíveis áreas com possibilidade de ocorrência da CAT. As cartas SIGWX também apresentaram uma razoável concordância perante com os indicadores quanto às regiões de probabilidade de ocorrência da turbulência. Evidencia-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 a partir dos 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 encontram como boas ferramentas de previsão e análise. Tais dados quando extraídos podem ser confrontados com cartas SIGWX para melhor auxiliar os centros de previsão da aeronáutica e aos pilotos quanto ao planejamento das rotas aéreas perante questões de segurança, conforto e economia.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugerem-se:

- a) Testar a aplicação de outros tipos de parametrizações em versões diferentes do modelo WRF com objetivo de analisar o desempenho dos índices de turbulência.
- b) Elaborar um estudo de comparação da eficiência dos índices de turbulência quando simulados no modelo regional ETA e no modelo regional WRF.
- c) Realizar outros estudos de caso de CAT comparando previsões de modelo com cartas SIGWX.
- d) Verificar através da localidade geográfica de reportes AIREPs a que tipos de sistemas meteorológicos ou aspectos físicos a formação da CAT esta relacionado em outras regiões no Brasil.
- e) Utilizar observações, previsões de WS e avisos de aeródromos no estudo de turbulências em condições de céu claro próximas a superfície.

f) Realizar estudos sobre fenômenos associados a turbulências em baixa altitude em decorrência deste perfil se definir como de maior risco a aeronaves em pouso e decolagem em aeroportos de grande movimento.

g) Realizar estudos com técnicas multivariáveis (análise de clusters) sobre a CAT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS, D.; METCALF, J. I.; RICHTER, J. H.; GOSSARD, E. E. Birth of ‘CAT’ and Microscale Turbulence. **J. Atmospher. Sci.** v.27, n.6, p.903–913, 1970.

BAKKER, H. **Drie objectieve indices voor clear-air turbulence nader bekeken**
Koninklijk: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), 1993.
Technische rapporten; TR-160, KNMI, de Bilt. ISBN 9036920477.

BASS, E. J. Turbulence assessment and decision making on the flight deck and in the cabin. In: DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE, 18., 1999, St. Louis.
Proceedings... St. Louis, MO: IEEE, 1999a. 4.A.4-1 - 4.A.4-8.

BECKWITH, W. B. The effect of weather on the operations and economics of air transportation today. **Bulletin of the American Meteorological Society.** v.52, p.863-868, 1971.

BROMLEY, E. Jr. Aeronautical meteorology: progress and challenges — today and tomorrow. **Bulletin of the American Meteorological Society.** v.58, p.1156-1160, 1977.

BROOKS, M. **Fluent news applied computational fluid dynamics.** NOAA / ETL, 2004.

BROWN, R. New indices to locate clear air turbulence. **Meteorological Magazine.** v.102, p.347-361, 1973.

BURNHAM, J. Atmospheric gusts – a review of the results of some recent research at the Royal Aircraft Establishment. **Monthly Weather Review.** v.98, p.723-734, 1970.

BUSS, S.; JAGER, E.; SCHMUTZ, C. Evaluation of turbulence forecasts with the aLMo. **Bundesamt fur Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.** [S.l.]: MeteoSchweiz, 2005.

CARVALHO, M. A. V.; ARAUJO, R. T. A Instalação do Sistema de Modelagem Numérica WRF no ICEA. **Aeroespaço**. Rio de Janeiro-RJ, p.25 - 26, 2013.

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. **Monthly Weather Review**. v.129, p.569-585, 2001.

CLARK, T. L.; HALL, W. D.; KERR, R. M.; MIDDLETON, D. L.; RADKE, F. M.; RALPH, P. J.; NIEMAN, P, J.; LEVINSON, D. Origins of aircraft-damaging clear-air turbulence during the 9 December 1992 Colorado downslope windstorm. **J. Atmos. Sci.** v.57, p.1105-1131, 2000.

CLARK, T. L.; KELLER, T.; COEN, J.; NEILLEY, P.; HSU, H.-M.; HALL, W. D. Terrain-induced turbulence over Lantau Island: 7 June 1994 Tropical Storm Russ case study, **J. Atmos, Sci.** v.54, p.1795-1814, 1997.

CORNMAN, L. B.; MEYMARIS, G.; LIMBER, M. An update on the FAA Aviation Weather Research Program's in situ turbulence measurement and report system. Preprints, 11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, **American Meteorology Society**. P.4.3, 2004.

DOYLE, J. D.; SHAPIRO, M. A.; JIANG, Q.; BARTELS, D. L. Large-amplitude mountain waves breaking over Greenland. **J. Atmos. Sci.** v.62, p.3106-3126, 2005.

DRAZIN, P.G.; REID, W. H. **Hydrodynamic Stability**. Cambridge. pp.527, 1981.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **J. Atmos. Sci.** v. 46, p.3077-3107, 1989.

DUTTON, J.; PANOFSKY, H. A. Clear Air Turbulence: A mystery may be unfolding. **J. Atmo. Sci.** v.167, p.937-944, 1970.

DUTTON, M. J. O. Probability Forecasts of clear air turbulence based on numerical model output. **Meteorological Magazine**. v.109, p.293-310, 1980.

EIGER, S. **Modelos de escoamentos turbulentos**. Viamão, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. p.85-155, 1989.

EITLS, M. D. Low Altitude Wind Shear Detection with Doppler Radar. **Journal of Climate and Applied Meteorology**. v. 26, p. 96-106, Issue 1 January 1987.

ELLROD, G.; KNAPP, D. An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. **Weather. Forecasting**. v.7, p.150-165, 1992.

ELLROD, G. P. Satellite images provide valuable information supplement to the aviation meteorologist, **ICAO Journal**. v.55, n.2, p.6-10, 2000.

ENDLICH, R. M. The mesoscale structure of some regions of clear air turbulence. **J. Appl. Meteor.** v.3, p.261-276, 1964.

HONG, S.-Y.; DUDHIA, J.; CHEN, S.-H. A revised approach to ice-microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **Monthly Weather Review**. v.132, n.1, p.103-120, 2004.

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly Weather Review**. v. 134, p. 2318–2341, 2006.

HOPKINS, R. H. **Forecasting techniques of clear-air turbulence including that associated with mountain waves**. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO), 1977. No. 482, technical note no. 155.

JUNG-HOON, KIM.; HYE-YEONG, CHUN. **Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea**. Seoul, South Korea: Yonsei University, Department of Atmospheric Sciences , 2010.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **J. Atmos. Sci.** v. 47, n. 23, p. 2748-2802, 1990.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. Convective parameterization for mesoscale Models. The Kain-Fritsch Scheme, in meteorological monographs. **Amer. Meteor. Soc.** v. 24, n. 46, Chapter 16, 1993.

KELLER, J. L.; Clear air turbulence as a response to meso and synoptic-scale dynamic processes. **Monthly Weather Review.** v.118, p.2228-2242, 1990.

KNOX, J. A. The breakdown of balance in low potential vorticity regions: evidence from a clear air turbulence outbreak. Preprint Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics Meeting. **American Meteorological Society.** Breckenridge, Colorado, P2.4-P.2.72, June 2001.

KAPLAN, M. L.; LIN, Y. L.; RIORDAN, A. J.; LUX, K. M.; HUFFMAN, A. W. Observational and numerical simulation-derived factors that characterize turbulence accident environments preprints. In: AMS CONFERENCE ON AEROSPACE RANGE AND AERONAUTICAL METEOROLOGY, 9., 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando:AMS, 2000. p.476-481.

KELLER, J. L. Clear air turbulence as a response to meso-and-synoptic-scale dynamics process. **Mon. Wea. Rev.** v.118, p.2228-2242, 1990.

KRONEBACH, G. W. An automated procedure for forecasting clear-air turbulence. **J. App. Met.** v.3, p.119-125, 1964.

LANE, T. P.; DOYLE, J. D.; SHARMAN, R. D.; SHAPIRO, A. M.; WATSON, C. D. Statistics and dynamics of aircraft encounters of turbulence over Greenland. **Monthly. Weather. Review.** v.137, p.2687-2702, 2009.

LESTER, P. F. **Turbulence**: a new perspective for pilots. [S.l.]: Jeppesen Sanderson, 1994. p.212.

LILLY, D. K. Turbulence in troposphere and stratosphere. In: FAA SYMPOSIUM ON TURBULENCE, 1971, Washington, D. C. **Proceedings...** Washington: FAA,1971.

LILLY, D. K.; KENNEDY, P. J. Observations of stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation. **J. Atmos. Sci.** v.30, p.1135-1152, 1973.

LILLY, D. K. A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave. **J. Atmos. Sci.** v.35, p.59-77, 1978.

LYRA, André de Arruda.; CHOU, Sin Chan.; DERECZYNSKI, 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.

MANCUSO R. L.; ENDLICH, R. M. **Monthly Weather Review**. v.97, p.527-533, Issue 8 (August 1969).

MATHIEU, J.; SCOTT, J. **An introduction to turbulent flow**. Cambridge: University Press, 2000. ISBN 0-521-77538-8 (pbk), 57066-2 (hc), p.368.

MECIKALSKI, J. R.; BERENDES, T. A.; FELTZ, W. F.; BEDKA, K. M.; bedka, S. T.; MURRAY, J. J.; WIMMERS, A. J.; MINNIS, P.; JOHNSON, D.; JULIE, H.; BERNSTEIN, E.; PAVOLONIS, M.; WILLIAMS, E. Aviation Applications for Satellite-Based Observations of Cloud Properties, Convection Initiation, In-Flight Icing, Turbulence, and Volcanic Ash. **Bull. Amer. Meteor. Soc.** v.88, p.1589–1607, 2007.

METEOROLOGICAL OFFICE COLLEGE. **Forecaster's reference book**. Bracknell:The Met. Office, 1997. MET.O.1023,

MIRAPALHETE, A. C. R.; LIMA, D. C.; FOSTER, P. R. P. Estudo Preliminar do Cisalhamento sobre Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2004.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, v.102, n. D14, p. 16663-16682, 1997.

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

MAHONEY, J. L.; BROWN, B. G. **Forecaster assessment of turbulence algorithms - a summary of results for the winter 2000 study**. [S.l.]: FAA Aviation Weather Research Program Turbulence Product Development Team, 2000.

OVEREEM, A. **Verification of clear-air turbulence forecasts**. [S.l.]: KNMI, 2002. Technisch report, 2002.

PANTLEY, K. C.; LESTER, P. F. Observations of severe turbulence near thunderstorm tops. **J. Appl. Meteor.** v.29, p.1171-1179, 1990.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**. v. 9, p.857-861, 1970.

REED, R. J.; Hardy, K. R. A case study of persistent, intense clear air turbulence in an upper level front zone. **J. Appl. Meteor.** v.11, p.541-549, 1972.

REITER, E. R. The nature of clear air turbulence: a review. In: SYMPOSIUM ON CLEAR AIR TURBULENCE AND ITS DETECTION, ORGANIZED AND SPONSORED BY THE FLIGHT SCIENCES LABORATORIES, 1968, Seattle,

Washington. Proceedings... New York: Flight Sciences Laboratory, Boeing Scientific Research Laboratories, The Boeing Company Plenum, 1969. p.19-34.

ROACH, W. T. On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.** v.96, p.413-429, 1970.

SCHWARTZ, B. The quantitative used of PIREPs in developing aviation near thunderstorms tops. **J. Appl. Meteor.** v.29, p.1171-1179, 1996.

SHARMAN, R.; TEBALDI, G. W.; WOLFF, J. An integrated approach to mid-and upper level turbulence forecasting. **Weather. Forecasting.** v.21, p.268-287, 2006.

SILVEIRA, N. A. FREIRE, A. P. S.; MENUT, P. P. P.; SU, J. Turbulence: Proceeding of the First Spring School in Transition and Turbulence. **Fluidez Turbulence Fundamentals.** ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

SOUZA, J. F. A.; OLIVEIRA, L. R. Uma Revisão sobre a Turbulência e sua Modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica.** v.29, n.1, p.21-41, 2011.

SUTTON, O. G. **Micrometeorology.** New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1953. 333p.

VENKATESH, T. N.; MATTHEW, J. The problem of clear air turbulence: Changing perspectives in the understanding of the phenomenon. **Indian Academy of Sciences, Sadhana,** v.38, parte 4, p.707-722, 2013.

TODD P. L.; DOYLE, J. D.; SHARMAN, R. D.; SHAPIRO, M. A.; WATSON, C. D. Statistics and dynamics of aircraft encounters of turbulence over Greenland. **Monthly Weather Review.** v.137, p.2687-2702, Issue 8 (August 2009).

Disponível em: doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009MWR2878.1>.

VILLELA, R. J. Perigo invisível. **Aero Magazine.** ano 5, n.54, p.34-35, nov.1998.

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).

VILLIERS, M. P.; HEERDEN, J. V. Clear air turbulence over South Africa. **Meteorol. Appl.** v.8, p.119-126, 2001.

VINNICHENKO, N. K.; PINUS, N. Z. SHMETER. S. M.; SHUR, G. N. Turbulence in Free Atmosphere, second edition. **Consultants Bureau.** p. 310,1980.

WOLFF, J. K.; SHARMAN, R. D. Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States. **J. Appl. Meteor. Climatology.** v.47, p.2198-2214. 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Forecasting Techniques of clear air turbulence including that associated with mountain waves**,1969. Technical Note, n. 155.

