



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

VICENTE BATISTA RANGEL

**ANÁLISE ESPACIAL DAS AERONOTIFICAÇÕES DE TURBULÊNCIA  
ATMOSFÉRICA REPORTADAS NA REGIÃO DE INFORMAÇÃO DE VOO DE  
RECIFE ENTRE 2009 E 2018**

Recife

2020

VICENTE BATISTA RANGEL

**ANÁLISE ESPACIAL DAS AERONOTIFICAÇÕES DE TURBULÊNCIA  
ATMOSFÉRICA REPORTADAS NA REGIÃO DE INFORMAÇÃO DE VOO DE  
RECIFE ENTRE 2009 E 2018**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

**Área de concentração:** Dinâmica superficial e climática das paisagens naturais tropicais úmidas e semiáridas.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Ranyére Silva Nóbrega

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

R196a Rangel, Vicente Batista.  
Análise espacial das aeronotificações de turbulência atmosférica reportadas na região de informação de voo de Recife entre 2009 e 2018 / Vicente Batista Rangel. – 2020.  
124 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.  
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2020.  
Inclui referências.

1. Geografia. 2. Meteorologia em aeronáutica. 3. Espaço aéreo. 4. Navegação aérea. 5. Turbulência atmosférica. I. Nóbrega, Ranyére Silva (Orientador). II. Título.

910 CDD (22. ed.)

(BCFCH2020-148)

VICENTE BATISTA RANGEL

**ANÁLISE ESPACIAL DAS AERONOTIFICAÇÕES DE TURBULÊNCIA  
ATMOSFÉRICA REPORTADAS NA REGIÃO DE INFORMAÇÃO DE VOO DE  
RECIFE ENTRE 2009 E 2018**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em: 12/02/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profº. Dr. Ranyére Silva Nóbrega (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Hernani Löebler Campos (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Deivide Benicio Soares (Examinador Externo)  
Setentrional Consultoria Ambiental

Dedico a Deus a quem  
devo o milagre da vida...

## AGRADECIMENTOS

O livro do Eclesiástico em seu capítulo 51, versículo 15 diz: “*Eu louvarei o teu nome continuamente e o cantarei no meu agradecimento.*” Nessa perspectiva, penso que a gratidão seja uma das virtudes mais nobres do ser humano, pois, além de coragem, requer um aguçado senso de justiça. Em ordem cronológica, procurarei buscar a justiça agradecendo aos envolvidos direta e indiretamente neste projeto, exceto minha esposa a quem dedicarei as últimas linhas.

Primeiramente, Àquele que me deu o dom da vida e o livre arbítrio para fazer a minha história nesse mundo, meu Senhor Deus, representando a Santíssima Trindade.

Aos meus amados pais, Nair e Amaro, por terem me proporcionado todo o amor e afeto que um ser humano precisa para viver nesse mundo de forma pacífica e frutífera. Aqui na Terra vocês são meus anjos e protetores para o resto da vida. Amo com todo o meu amor.

Ao Primeiro Sargento, Giovanne, que, de forma voluntária e guiada por Deus, informou-me que havia um professor meteorologista no Curso de Geografia da UFPE, o qual se tornou posteriormente o meu orientador, Prof. Ranyére. Giovanne, se não fosse você, provavelmente demoraria muito mais tempo ou talvez não ingressasse no Mestrado aqui em Recife.

Ao meu orientador, que desde nossa primeira conversa, recebeu-me como se já me conhecesse, dono de uma simpatia, serenidade e um sorriso acolhedor necessários para que eu tivesse a certeza de que o caminho a ser trilhado era realmente este. Foi um enorme prazer trabalhar com o senhor, professor! Com o senhor aprendi que serenidade e sucesso caminham de mãos dadas.

À Kamilla que me deu carona para fazer a prova do Mestrado.

Ao Eduardo e Pablo da secretaria que sempre foram muito corteses comigo, dando as orientações de forma precisa nos assuntos administrativos.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) que me acolheu com carinho proporcionando totais condições para que eu desenvolvesse o meu trabalho.

Ao meu filho João, que dizia: “Papai, você vai de novo pra colinha? Não pode ir toda hora para a colinha não...”. Tão pequeno, não entendia o porquê que eu não podia continuar brincando com ele. Mas mal sabia ele que sua grande ajuda residia justamente aí, a sua vontade em ficar comigo. Filho, você foi um dos meus maiores motivadores!

Ao Ítalo, que no primeiro dia de aula, apresentou-me aos colegas mais chegados a ele como Larissa e Viviane e a colegas que me deram suporte técnico como o George e o Carlos.

Ao Wagner e ao Pacheco por atenderem às minhas solicitações de pedido de troca dos serviços para que eu pudesse cumprir as etapas previstas do curso.

Agradeço, em particular, ao Tenente-Coronel Nascimento, que procurou sempre que possível conciliar as necessidades da escala operacional com as minhas, um verdadeiro amigo!

Ao Ilton que, como Presidente da Associação de moradores do Conjunto Habitacional Brig. Haroldo Coimbra Veloso, entendeu minha atribulada rotina de mestrando e se sobrecarregou para não tumultuar ainda mais a vida do Vice-presidente, que por acaso era eu.

Ao Piter, que mesmo sem me conhecer, ajudou-me com a presteza de um amigo de infância nas análises sinóticas.

À Juliane, Mestre em Geografia pela UFPE, que, desde minha preparação para as provas do Mestrado até a minha apresentação de Defesa, sempre se mostrou muito solícita em me ajudar com os requisitos específicos da UFPE e do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE.

Agradeço ao Aderbal e ao Sydney que, mesmo sem nunca terem manuseado o Arc Gis, esforçaram-se para me ajudar.

Ao meu filho Vítor que me inspirava a cada sorriso pueril que dava quando eu olhava para ele e dizia: é o papai? Obrigado, meu filho caçula, esse projeto também é por sua causa!

Ao meu compadre e amigo de farda Sildiscley que com sua presteza e solícitude sempre esteve a postos para me ajudar.

Ao Comandante do CIMAER e aos colegas de trabalho que encontrei aqui no Rio de Janeiro pelas concessões, apoio e empatia nessa empreitada.

Àqueles e àquelas que mesmo longe me ajudaram com orações e incentivos de que tudo daria certo.

À minha amada companheira de todas as horas, minha esposa Débora, que mais uma vez após a demonstração de minha vontade em fazer o Mestrado, apoiou-me sem pestanejar, mesmo sabendo que não me teria por completo em muitas ocasiões. Durante todas as etapas do Mestrado, desde os enjoos causados pela gravidez, até os difíceis dias no primeiro ano de Rio de Janeiro, você foi impecável. À minha alma gêmea, zelosamente guardada por Deus para mim; com você vou até o fim, meu amor! Ele há de permitir!

“Mas quem é este, que até o vento e o mar lhe obedecem [...]”  
(BÍBLIA, 2005, p. 1074)

## RESUMO

A segurança das operações aéreas perpassa por uma série de serviços de navegação aérea, desempenhados por diversos profissionais, que interagem entre si constituindo o que se chama de Controle do Espaço Aéreo. A Meteorologia Aeronáutica é um desses serviços e os assessoramentos fornecidos pelos profissionais dessa área são decisivos para a tomada de decisão dos aeronavegantes. Sendo a turbulência atmosférica um dos fenômenos meteorológicos mais significativos para a aviação, realizou-se uma análise espacial desse fenômeno por meio da coleta das aeronotificações realizadas pelo transporte aéreo dentro da Região de Informação de Voo de Recife entre 2009 e 2018. Foram identificados os perfis gerais de concentração e sazonalidade dos reportes com intensidade de moderada a severa, uma vez que são os que podem causar impacto operacional na aviação. Em seguida, analisaram-se os sistemas meteorológicos em superfície e em altitude, de forma a encontrar cenários meteorológicos mais favoráveis a ocorrências de reportes. Identificaram-se também os posicionamentos predominantes dos sistemas meteorológicos encontrados em altitude, assim como a posição exata onde cada reporte ocorreu, ou seja, os pontos críticos de cada sistema analisado. Após isso, buscou-se verificar o tipo predominante das turbulências reportadas e a sazonalidade associada a cada tipo. Dessa forma, concluiu-se que, na Região de Informação de Voo de Recife, a maioria dos reportes de turbulência ocorreu sobre o estado da Bahia, tendo como fatores contribuintes o posicionamento e a sazonalidade dos sistemas meteorológicos envolvidos. Os setores 6, 10 e 14 foram os mais suscetíveis a reportes de turbulência no inverno, no outono e na primavera, respectivamente, e as aerovias mais impactadas foram S6 (UZ-20), S10 (UZ-17 e UZ-19) e S14 (UZ-1 e UZ-10). À superfície, sistemas frontais transientes no Atlântico Sul foram os mais presentes e, em altitude, cavados embebidos no Jato Subtropical e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis, foram os sistemas protagonistas nos dias de reportes. Para esses sistemas em altitude, o final do ramo ascendente e as bordas oeste, respectivamente, foram os pontos críticos encontrados. Quanto ao tipo da turbulência, as de ar claro predominaram no inverno.

Palavras-chave: Meteorologia Aeronáutica. Sistemas Frontais Transientes no Oceano Atlântico Sul. Cavados embebidos no Jato Subtropical. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis.

## ABSTRACT

The safety of air operations goes through a series of air navigation services, performed by several professionals, who interact with each other constituting what is called Airspace Control. Aeronautical Meteorology is one of these services and the advisories provided by professionals in this area have an important role in supporting airmen activities. Since atmospheric turbulence is one of the most significant meteorological phenomena for aviation, a spatial analysis of this phenomenon was performed through the collection of aeronotifications reported by air transport within the Flight Information Region of Recife between 2009 e 2018. The general profiles of concentration and seasonality of the reports with moderate to severe intensity were identified, since they are the ones that can cause operational impact in the aviation. Then, surface and altitude meteorological systems were analyzed, in order to find more favorable meteorological scenarios for reporting occurrences. The predominant positions of the meteorological systems found at altitude were identified, as well as the exact position where each report occurred, i.e., the critical points of each system analyzed. After that, the predominant type of turbulence reported and the seasonality associated with each type were verified. Thus, it was concluded that the majority of turbulence reports occurred in the state of Bahia, having as contributing factors the positioning and seasonality of the meteorological systems involved. Sectors 6, 10, and 14 were the most susceptible to turbulence reports in winter, fall and spring, respectively, and the most impacted airways were S6 (UZ-20), S10 (UZ-17 and UZ-19) and S14 (UZ-1 and UZ-10). On the surface, transient frontal systems in the South Atlantic Ocean were the most present and, at altitude, Troughs embedded in the Subtropical Jet and Cyclonic Vortexes at High Levels, were the main systems in the reporting days. For these altitude systems, the end of the ascending branch and the western edges, respectively, were the critical points found. As for the type of the turbulence, the clear air turbulences have prevailed in winter.

Keywords: Aeronautical Meteorology. Transients Frontal Systems in the South Atlantic Ocean. Troughs embedded in Subtropical Jet Stream. Upper Level Cyclonic Vortices.

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1 –  | Demonstração dos principais custos envolvidos na operação de uma companhia aérea .....   | 23 |
| Figura 2 –  | Representação do Espaço Aéreo Brasileiro .....   | 32 |
| Figura 3 –  | Representação das quatro Regiões de Informação de Voo do SISCEAB e seus respectivos CINDACTA's .....   | 34 |
| Figura 4 –  | Posicionamento dos anticiclones no período de verão (a) e (b) posicionamento dos anticiclones no período de inverno .....                                  | 46 |
| Figura 5 –  | Massas de ar com características diferentes.....   | 48 |
| Figura 6 –  | Circulação Global (a) e posição geográfica da Corrente de Jato (b) .....   | 49 |
| Figura 7 –  | Diagrama esquemático do padrão de divergência associado com o sistema cavado/crista do Jato em altos níveis e o padrão de convergência em superfície ..... | 51 |
| Figura 8 –  | Representação da sazonalidade da Correntes de Jato Subtropical e Polar .....   | 52 |
| Figura 9 –  | Representação esquemática de uma onda frontal .....  | 53 |
| Figura 10 – | Representação da distribuição da nebulosidade associada a uma frente fria e a corrente de jato .....   | 54 |
| Figura 11 – | Exemplo de configuração espacial tipo “Y”, formada por ZCAS, VCAN e AB .....   | 56 |
| Figura 12 – | Representação dos limites da FIR-RE .....  | 65 |
| Figura 13 – | Tabulação das informações das AIREP's .....  | 66 |
| Figura 14 – | Representação setorizada da FIR-RE.....  | 69 |
| Figura 15 – | Representação esquemática das Cartas Sinóticas de Altitude.....  | 71 |
| Figura 16 – | Tabulação dos sistemas meteorológicos à superfície e em altitude .....   | 72 |
| Figura 17 – | Tabulação do posicionamento e dos pontos críticos dos sistemas meteorológicos em altitude .....  | 74 |
| Figura 18 – | Tabulação dos tipos das turbulências .....   | 76 |
| Figura 19 – | Plotagem dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE entre 2009 e 2018 .....  | 78 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figura 20 – | Plotagem dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE setorizada entre 2009 e 2018 .....  | 79  |
| Figura 21 – | Plotagem dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE e as aerovias com os maiores números de reportes .....  | 80  |
| Figura 22 – | Plotagem sazonal dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE .....   | 84  |
| Figura 23 – | Plotagem sazonal dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE (verão) .....   | 87  |
| Figura 24 – | Plotagem sazonal dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE (outono) .....  | 88  |
| Figura 25 – | Plotagem sazonal dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE (inverno) .....   | 89  |
| Figura 26 – | Plotagem sazonal dos reportes de turbulência atmosférica de intensidade moderada e severa na FIR-RE (primavera) .....   | 90  |
| Figura 27 – | Exemplo de configuração predominante de um cavado embebido no Jato Subtropical atuando sobre o Espírito Santo .....   | 98  |
| Figura 28 – | Exemplo de configuração predominante de VCAN atuando sobre o Oceano Atlântico Norte .....   | 100 |
| Figura 29 – | Carta de vento e isotacas em 300 hPa mostrando um alongado cavado, no Hemisfério Norte, e as áreas mais suscetíveis a CAT (a) Áreas prováveis de CAT a jusante de cavados em altitude (b). Áreas prováveis de CAT a montante de cavados em altitude (c) ..... | 102 |
| Figura 30 – | Área crítica de uma Corrente de Jato no Hemisfério Norte .....  | 103 |
| Figura 31 – | Distribuição bivariada entre os tipos de turbulência e as estações do ano .....   | 104 |
| Figura 32 – | Carta Sinótica de Superfície das 1800Z do dia 23.11.18 .....  | 107 |
| Figura 33 – | Carta Sinótica de Altitude das 1800Z do dia 23.11.18 .....  | 108 |
| Figura 34 – | Carta Sinótica de Altitude das 1800Z com a localização do reporte severo .....  | 109 |
| Figura 35 – | Atuação do Jato Subtropical sobre a faixa centro-leste da Bahia   |     |

e o local exato de um dos reportes de turbulência moderada entre o FL330 e o FL370, em 250 hPa, segundo modelo numérico do tempo GFS na plataforma nullschool (a) e modelo numérico do tempo ECMWF da plataforma Windy (b)..... 110

Figura 36 – Imagem de Satélite realçada IR das 1800Z do dia 23.11.18 ..... 112

## LISTA DE TABELAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabela 1 – | Categorização da intensidade da turbulência .....  | 61 |
| Tabela 2 – | Classificação da intensidade da turbulência segundo o AMDAR .                                    | 63 |
| Tabela 3 – | Perfil quantitativo e sazonal dos reportes de turbulência atmosférica nos setores da FIR-RE..... | 82 |
| Tabela 4 – | Quantitativos e porcentagens das variáveis analisadas no estudo...                               | 91 |
| Tabela 5 – | Distribuição bivariada entre cenário sinótico à superfície, em altitude e estação .....          | 92 |
| Tabela 6 – | Distribuição bivariada entre pontos críticos, estação e localização do sistema em altitude ..... | 96 |
| Tabela 7 – | Distribuição bivariada entre pontos críticos, estação e localização do sistema em altitude ..... | 99 |

## LISTA DE SIGLAS

|            |  |
|------------|--|
| AB         | Alta da Bolívia  |
| ACC        | Centro de Controle de Área                                   |
| AMDAR      | Aircraft Meteorological Data Relay                           |
| ANAC       | Agência Nacional de Aviação Civil                            |
| AIREP      | Aircraft Report  |
| AL         | Atmosfera Livre  |
| APP        | Centro de Controle de Aproximação                            |
| ATM        | Air Traffic Management                                       |
| ARS        | AIREP Especial   |
| ASPS       | Alta Subtropical do Pacífico Sul                             |
| BancoOPMET | Banco Internacional de Dados Operacional de Meteorologia     |
| BNDES      | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social         |
| Cb         | Cumulonimbus   |
| CELMET     | Célula Regional de Meteorologia                              |
| CENIPA     | Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos |
| CGNA       | Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea                   |
| CINDACTA   | Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo |
| CLP        | Camada Limite Planetária                                     |
| CLA        | Camada Limite Atmosférica                                    |
| CMV        | Centro Meteorológico de Vigilância                           |
| CMV-RE     | Centro Meteorológico de Vigilância de Recife                 |
| CONAC      | Conferências Nacionais da Aviação Comercial                  |
| DTCEA      | Destacamento de Controle do Espaço Aéreo                     |
| DECEA      | Departamento de Controle do Espaço Aéreo                     |
| DEPV       | Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo                    |
| DOU        | Diário Oficial da União                                      |
| DR         | Diretoria de Rotas Aéreas                                    |
| EACEA      | Estação de Apoio ao Controle do Espaço Aéreo                 |
| ENOS       | El Niño-Oscilação Sul  |
| FAA        | Federal Aviation Administration                              |
| FAB        | Força Aérea Brasileira                                       |

|          |  |
|----------|--|
| FL       | Flight Level                                       |
| FIR-RE   | Região de Informação de Voo de Recife              |
| GEE      | Gases de Efeito Estufa                             |
| hPa      | Hectopascal  |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística    |
| INPE     | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais          |
| ICAO     | Internacional Civil Aviation Organization          |
| INFRAERO | Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária |
| IVAO     | International Virtual Aviation Organization        |
| JBN      | Jatos de Baixos Níveis                             |
| NEB      | Nordeste Brasileiro                                |
| NW       | Noroeste   |
| PIB      | Produto Interno Bruto                              |
| PIREP    | Pilot Report                                       |
| REDEMET  | Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica     |
| SE       | Sudeste  |
| SITAR    | Sistemas Integrados de Transporte Aéreo Regional   |
| SISCEAB  | Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro     |
| TWR      | Torre de Controle                                  |
| VCAN     | Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis                |
| UFPE     | Universidade Federal de Pernambuco                 |
| WMO      | World Meteorological Organization                  |
| ZCIT     | Zona de Convergência Intertropical                 |
| ZCAS     | Zona de Convergência do Atlântico Sul              |
| ZPS      | Zona de Precipitação Subtropical                   |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS .....</b>                              | <b>25</b> |
| 2.1          | OBJETIVO GERAL .....   | 25        |
| 2.2          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 25        |
| <b>3</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                     | <b>26</b> |
| 3.1          | O TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO .....                                    | 26        |
| 3.2          | A HISTÓRIA DO TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO .....                        | 28        |
| 3.3          | O CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO .....                            | 31        |
| 3.4          | O GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO AÉREO BRASILEIRO .....                      | 36        |
| 3.5          | A CLIMATOLOGIA .....   | 37        |
| 3.6          | A METEOROLOGIA .....   | 40        |
| <b>3.6.1</b> | <b>A meteorologia aeronáutica no SISCEAB .....</b>                     | <b>41</b> |
| 3.6.1.1      | O Centro Meteorológico de Vigilância de Recife .....                   | 42        |
| 3.6.1.2      | Mensagem de informação operacional e meteorológica .....               | 43        |
| 3.7          | PRINCIPAIS SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES NA FIR-RE                  | 45        |
| <b>3.7.1</b> | <b>Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) .....</b>                  | <b>45</b> |
| <b>3.7.2</b> | <b>Corrente de Jato .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>3.7.3</b> | <b>Frente Fria .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>3.7.4</b> | <b>Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis .....</b>                       | <b>54</b> |
| <b>3.7.5</b> | <b>Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) .....</b>              | <b>57</b> |
| 3.8          | A TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA .....  | 58        |
| <b>3.8.1</b> | <b>Turbulência Convectiva .....</b>                                    | <b>60</b> |
| <b>3.8.2</b> | <b>Turbulência de Ar Claro .....</b>                                   | <b>61</b> |
| <b>3.8.3</b> | <b>Magnitude da Turbulência .....</b>                                  | <b>62</b> |
| <b>4</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                       | <b>64</b> |
| 4.1          | ABORDAGEM TEÓRICO-METODOLÓGICA .....                                   | 64        |
| 4.2          | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....                                 | 64        |
| 4.3          | COLETA DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA NA<br>FIR-RE .....      | 65        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Seleção dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE .....</b> | <b>67</b> |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| 4.4   | ANÁLISE ESPACIAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA NA FIR-RE .....  | 68         |
| 4.4.1 | <b>Identificação da distribuição espacial e do perfil geral de concentração dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE. De posse da localização geográfica exata de cada reporte e das coordenadas limítrofes da FIR-RE, as quais foram fornecidas pelo CINDACTA III, utilizou-se o software ArcGIS, versão 10.3 para iniciar a análise espacial desses reportes .....</b> | <b>68</b>  |
| 4.4.2 | <b>Identificação do perfil sazonal de concentração dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE .....</b>  | <b>69</b>  |
| 4.4.3 | <b>Verificação dos sistemas meteorológicos presentes nos dias de reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE .....</b>  | <b>70</b>  |
| 4.4.4 | <b>Verificação dos cenários meteorológicos relacionados aos dias de reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE .....</b>   | <b>72</b>  |
| 4.4.5 | <b>Identificação dos posicionamentos e dos pontos críticos dos sistemas meteorológicos em altitude que estiveram diretamente relacionados aos reportes .....</b>  | <b>73</b>  |
| 4.4.6 | <b>Verificação dos tipos de turbulência atmosférica ocorridos na FIR-RE ..</b>  | <b>75</b>  |
| 5     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>76</b>  |
| 5.1   | PERFIL ESPACIAL DAS TURBULÊNCIAS ATMOSFÉRICAS REPORTADAS NA FIR-RE .....  | 76         |
| 5.1.1 | <b>O perfil sazonal das turbulências atmosféricas reportadas na FIR-RE ...</b>  | <b>83</b>  |
| 5.2   | SISTEMAS METEOROLÓGICOS, CENÁRIOS E OS TIPOS DAS TURBULÊNCIAS ASSOCIADOS AOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICAS NA FIR-RE .....   | 91         |
| 5.2.1 | <b>Sistemas meteorológicos à superfície associados aos reportes .....</b>   | <b>92</b>  |
| 5.2.2 | <b>Sistemas meteorológicos em altitude associados aos reportes .....</b>  | <b>94</b>  |
| 5.2.3 | <b>Cenários meteorológicos predominantes nos dias dos reportes .....</b>  | <b>95</b>  |
| 5.2.4 | <b>Posicionamento dos principais sistemas meteorológicos em altitude presentes nos dias de reporte .....</b>  | <b>96</b>  |
| 5.2.5 | <b>Pontos críticos dos sistemas meteorológicos diretamente associados aos reportes .....</b>  | <b>101</b> |
| 5.2.6 | <b>Os tipos das turbulências associadas aos reportes .....</b>  | <b>104</b> |

|       |  |            |
|-------|--|------------|
| 5.3   | ESTUDO DE CASO DO DIA 23.11.2018 ..... | 105        |
| 5.3.1 | <b>Justificativa</b> .....             | <b>105</b> |
| 5.3.2 | <b>Análise sinótica</b> .....          | <b>106</b> |
| 6     | <b>CONCLUSÕES</b> .....                | <b>113</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....               | <b>115</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Para que o conhecimento seja produzido, o *desvio* se torna, se não a mais; uma das mais importantes molas propulsoras para tal. Seguindo esse raciocínio, transcrevendo um trecho de Walter Benjamin que traduz essa dependência:

Sinal secreto: transmite-se oralmente uma frase de Schuler. Todo conhecimento, disse ele, deve conter um mínimo de contrassenso, como os antigos padrões de tapete ou de frisos ornamentais, onde sempre se pode descobrir, nalgum ponto, um desvio insignificante de seu curso normal. Em outras palavras: o decisivo não é o prosseguimento de conhecimento em conhecimento, mas o salto que se dá em cada um deles. É a marca imperceptível da autenticidade que os distingue de todos os objetos em série fabricados segundo um padrão (BENJAMIN, 1993, p. 264).

Mas para que esse *desvio* seja decodificado como um fértil caminho para a construção do saber, esse processo perpassa pelas sensações/percepções. Como fundamento, produz-se o conhecimento sensorial, ou seja, a matéria-prima do pensamento. Ao se refletir sobre a realidade, concomitantemente, cria-se uma imagem sensorial desse mundo, com base na qual o homem começa a adquirir consciência, a conhecer os fenômenos da realidade; identificando, neles, propriedades, relações, origens, efeitos, etc. Tudo isso, torna-se possível graças ao desenvolvimento da linguagem, quando o sensorial dado passa a ser representado por meio de palavras, de ideias (ABRANTES; MARTINS, 2007).

Nessa dialética entre relações e efeitos, a turbulência atmosférica se encontra atrelada a quatro importantes pilares da aviação: a segurança, o meio ambiente, a economia e o gerenciamento do tráfego aéreo. Ter a turbulência como objeto de estudo e dentro de um escopo que envolve o Nordeste Brasileiro (NEB) é desafiador e relevante, tanto pelo fato dos parques trabalhos, quanto pelos impactos de diferentes naturezas e magnitudes que podem ser gerados.

Nesse contexto, o *desvio*, ou a motivação para a presente pesquisa fora um acidente aeronáutico que tivera como fator contribuinte a turbulência atmosférica. No dia 02 de setembro de 2013, uma aeronave da TAM (PT-MVL), que partira de Madri com destino a Guarulhos, fora acometida por turbulência severa causando lesões de leve a graves em 15 pessoas, sendo 3 delas integrantes da tripulação, conforme relatório A-158/CENIPA/2013 do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Relatos de passageiros, à época, confirmaram o quão assustador foram aqueles poucos segundos em que a turbulência atuara, sendo suficientes para arremessar pessoas contra o teto da aeronave e umas sobre as outras.

Registros de acidentes aeronáuticos nacionais e internacionais disponibilizados por órgãos competentes apontam que a meteorologia é um significativo fator contribuinte para as

estatísticas do setor. No Brasil, segundo dados disponibilizados no relatório estatístico de SANTOS *et al.* (2018), entre 2008 e 2017, dos 716 relatórios publicados de acidentes aeronáuticos, 81 tiveram como fator contribuinte condições meteorológicas adversas.

Em um contexto global, o histórico da *Aviation Safety Network* aponta que, desde a década de 1930 até 2019, dos 641 acidentes aéreos que tiveram como causa contribuinte a meteorologia, a turbulência atuara em quase 15% dos episódios, ou ainda, como o segundo fenômeno meteorológico que mais contribuiu para acidentes do transporte aéreo na fase do voo em que a aeronave se encontrara em voo de cruzeiro, ou seja, nivelada.

Esses registros de acidentes, aliados aos poucos estudos realizados no Brasil sobre turbulência atmosférica no NEB, e os fatores econômicos e ambientais atrelados a esse fenômeno respaldam a pertinência da temática. Vale ressaltar que o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) conduz o Programa *SIRIUS*, o qual se encontra fundamentado em recomendações da *International Civil Aviation Organization* (ICAO) que estabelece, por meio do emprego de soluções de alta tecnologia, capacitação de recursos humanos; promoção da redução dos custos operacionais e a evolução do Sistema de Gerenciamento do Tráfego Aéreo Brasileiro de forma ambientalmente sustentável (BRASIL, 2019f).

Principalmente a partir da segunda metade do século XX, foi imputada às emissões de CO<sub>2</sub> uma relação direta entre os fenômenos naturais extremos, como por exemplo, tsunamis, terremotos, derretimento de calotas polares, furacões e enchentes com o aquecimento global; levando instituições ambientais internacionais a focarem em pesquisas que têm como fonte emissora o transporte aéreo com o objetivo de mitigar os impactos dessas emissões ao meio ambiente (ROCHA, 2012).

Nesse contexto, o estabelecimento da plataforma CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), pela ICAO, para redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), denota uma ação efetiva de combate às mudanças climáticas globais e sinaliza uma oportunidade ímpar para precificar o carbono para diferentes alternativas tecnológicas de controle do espaço aéreo (BRASIL 2019b).

Storer, Williams e Grill (2018) defendem que as mudanças climáticas acarretam alterações na alta troposfera, justamente onde as aeronaves se encontram niveladas, em voo de cruzeiro. Nessa faixa da atmosfera, há um acréscimo do gradiente de temperatura entre o equador e os polos, causando como resposta direta a ocorrência de vento termal, que por sua vez implica aumento do cisalhamento vertical e turbulência nas latitudes médias. Além disso, esses ventos termais mais intensos geram impactos econômicos à medida que, ao incidirem diretamente sobre a aeronave, acabam por alterar seu tempo de voo.

Para estudos relacionados aos movimentos atmosféricos, Santoso e Stull (1998) consideram a atmosfera com pelo menos duas camadas onde o movimento do ar se comporta distintamente: a Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA) e a Atmosfera Livre (AL).

A CLP é definida como a faixa que vai da superfície até, no máximo, 2 a 3 km de altura, dependendo da hora do dia. Na média, ela atinge aproximadamente 1 km ou 3.000 pés (na aviação a altitude é fornecida em unidades “pés”), sendo este limite estabelecido por uma inversão de temperatura.

Ela possui em torno de 10% da massa da atmosfera e dentro dela o escoamento do ar sofre os efeitos do atrito com as diferentes superfícies, fato que a caracteriza como uma região bastante turbulenta. Sua espessura está diretamente relacionada com a rugosidade e temperatura da superfície. Considera-se como CLA a região acima da CLP, onde os processos são basicamente dominados por sistemas de larga escala.

Além das características relacionadas à massa e ao escoamento do ar dentro dessas duas camadas da atmosfera, características relacionadas à composição do ar merecem destaque por interferirem diretamente na densidade e no grau de estabilidade da atmosfera. Manahan (2000) ressalta que, além do Nitrogênio e do Oxigênio, há gases presentes na atmosfera terrestre cuja razão de mistura, em volume, muda significativamente no tempo e no espaço. Eles são chamados de gases variáveis e alguns são substratos das emissões de aeronaves como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o monóxido de carbono (CO).

Nessa perspectiva, as melhorias no gerenciamento do tráfego aéreo denotam, conforme Brasil (2019d), o conceito *Air Traffic Management* (ATM), preconizado pela ICAO, referindo-se, além de tecnologias de navegação aérea e previsão meteorológica, a uma série de procedimentos coordenados que, em conjunto, propiciam maior eficiência nas operações de tráfego. Tais medidas têm como resultado a diminuição no consumo de combustível e redução das emissões de GEE.

Assim, otimizar o espaço aéreo é alocar no mesmo volume de espaço aéreo o maior número possível de aeronaves, sem comprometer a segurança operacional. Segundo Brasil (2018c), as aeronaves eram obrigatoriamente separadas verticalmente a uma distância de 2.000 pés. Atualmente, essa separação se reduz para 1.000 pés entre os níveis de voo 29.000 pés (FL290) e 41.000 pés (FL410), configurando o que se chama de Separação Vertical Mínima Reduzida (RVSM).

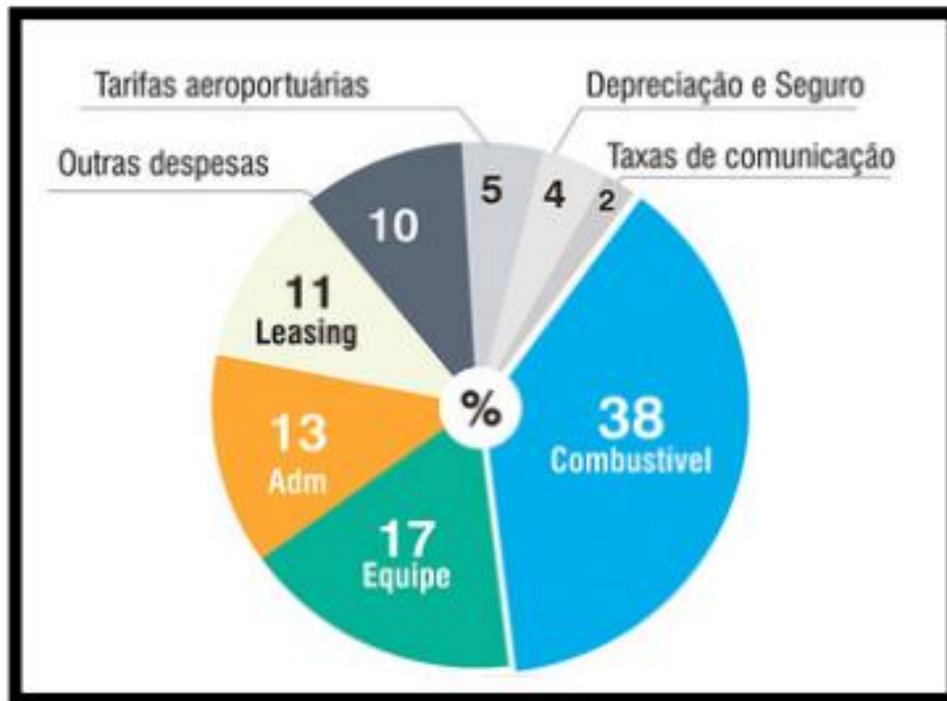
Porém, para que esse tipo de navegação seja possível, além de aeronaves com modernos sistemas altimétricos a bordo, as condições de estabilidade da atmosfera devem ser adequadas, ou seja, condições favoráveis à ocorrência de turbulência impedem esse tipo de navegabilidade e conseqüentemente os ganhos operacionais, ambientais e econômicos associados ficam comprometidos.

Em cenários com previsão ou presença efetiva de turbulência, os pilotos solicitam mudança de nível de voo de forma a se afastarem da condição atmosférica hostil. Assim, a condição ótima de voo previamente planejada se desfaz, implicando voos em camadas mais densas, com mais arrasto; ensejando maiores custos adicionais de combustível e, conseqüentemente, aumento das emissões de gases fruto da combustão dos motores.

Dessa forma, percebe-se que a meteorologia é um dos fatores que impactam diretamente no custo operacional do transporte aéreo assim como nas emissões associadas. Segundo Brasil (2019e) as informações meteorológicas devem ser fornecidas às tripulações para o planejamento do voo, planejamento antes da decolagem e para o replanejamento em voo. Nesse sentido, da superfície até níveis estratosféricos, as informações meteorológicas disponibilizadas servirão para a definição da melhor rota e/ou da mais pertinente e eficiente manobra evasiva a ser tomada, visando à eficiência, à economia e à segurança do voo.

Com relação aos impactos econômicos para o transporte aéreo, Moreira (2011) cita que a componente mais impactante no custo direto operacional de uma empresa aérea é o consumo de combustível, podendo alcançar, por vezes, cerca de 50%. Corroborando com esses dados, o autor cita estudo da Federação das Indústrias do Paraná no qual discrimina esses custos e enfatiza que o gasto com combustível define a logística diária de uma companhia aérea, sendo determinante para o cancelamento ou surgimento de rotas (Figura 1).

**FIGURA 1- DEMONSTRAÇÃO DOS PRINCIPAIS CUSTOS ENVOLVIDOS NA OPERAÇÃO DE UMA COMPANHIA AÉREA**



Fonte: FIEP (2015)

Ainda sobre essas questões, Castillo (2007) propõe que a logística, em sua dimensão geográfica, pode ser definida como conjunto de competências de três tipos: infraestruturais, institucionais e estratégicas. Tais competências, reunidas em determinado subespaço, podem conferir fluidez e competitividade aos agentes econômicos e aos circuitos espaciais produtivos. Sendo assim, a logística atua na relação existente entre os modos racionais de transporte e distribuição e as normas e demais características de cada território, visando a propiciar uma melhor fluidez aos bens materiais.

Assim, a meteorologia é parte fundamental dessa engrenagem envolvendo o gerenciamento eficiente do tráfego aéreo em todo o mundo, tanto no que diz respeito às fases do voo abarcando as rotas (voo nivelado), quanto às fases do voo que compreendem a aproximação e a subida.

Convém pontuar que a presente pesquisa focalizará suas análises nas turbulências reportadas em rota, ou seja, na fase de voo em que a aeronave se encontra nivelada, onde geralmente o aeronavegante sintoniza a frequência do Serviço de Radiodifusão VOLMET e transmite o código AIREP, o qual contém informações meteorológicas e operacionais encontradas durante o voo, para o Centro Meteorológico de Vigilância (CMV).

A presente pesquisa investigou o seu objeto de estudo, a turbulência atmosférica, por meio da coleta de dados das AIREP's armazenadas no Banco Internacional de Dados Operacionais de Meteorologia (Banco OpMET) e disponíveis no portal da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

De posse dos dados fornecidos pelas AIREP's, foi realizada uma análise espacial desses reportes, primeiramente, identificando as concentrações e suas sazonalidades; os sistemas meteorológicos em superfície e em altitude e, posteriormente, o posicionamento e os pontos críticos dos sistemas diretamente associados aos reportes. Após isso, foram analisados os tipos das turbulências reportadas e suas respectivas sazonalidades, finalizando assim a análise espacial dos reportes de turbulência atmosférica ocorridos na FIR-RE entre 2009 e 2018.

Assim, poder-se-á agregar valor ao processo de previsão da turbulência atmosférica na FIR-RE, contribuindo com os previsores e gerentes de fluxo do tráfego aéreo, por meio de subsídios para a tomada de decisão; com a economia e com o meio ambiente, por meio da opção por rotas mais eficientes; com a comunidade científica, uma vez que os estudos são parcos envolvendo turbulência atmosférica no NEB e com a sociedade como um todo, por meio do aumento da segurança operacional do transporte aéreo no Brasil.

## 2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Realizar uma análise espacial dos reportes de turbulência atmosférica, de intensidade moderada e severa, ocorridos na FIR-RE entre 2009 e 2018, de forma a fornecer subsídios para análise de cenário e tomada de decisão de previsores e de gerentes de fluxo do tráfego aéreo que atuam na FIR-RE.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar a distribuição espacial dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE.
- ✓ Verificar os principais sistemas meteorológicos associados aos reportes de turbulência na FIR-RE.
- ✓ Identificar os posicionamentos predominantes e os pontos críticos dos sistemas associados aos reportes.
- ✓ Conhecer o perfil quantitativo e sazonal dos tipos das turbulências atmosféricas reportadas.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 O TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO

A aviação civil se transformou em um dos maiores negócios do mundo e, também, em um dos setores mais dinâmicos, que traduz diretamente as grandes transformações da mobilidade dos ciclos de negócios do mundo globalizado, pois responde quase que imediatamente às políticas conjunturais. Entre 1960 e 2000, o setor cresceu cerca de 9% ao ano, índice superior ao Produto Interno Bruto (PIB) de alguns países industrializados - cerca de 6% para os 20 países mais ricos nos últimos 40 anos (ROCHA, 2006).

ANAC (2018) mostra crescimento do setor aéreo brasileiro referente ao número de decolagens após cinco anos seguidos de queda. O relatório aponta para 967 mil voos regulares e não regulares no mercado doméstico e internacional, representando uma alta de 2,8% em relação ao ano anterior.

Com mais de oito milhões de quilômetros quadrados, uma rede de transporte rodoviária deficitária e o quase abandono do transporte ferroviário e hidroviário, o Brasil tem no transporte aéreo um importante elemento de integração. Segundo Ministério da Infraestrutura (2018), a frota brasileira conta com 22 mil aeronaves, sendo uma das maiores do mundo.

A infraestrutura de transporte aéreo também figura como uma das melhores, e os padrões operacionais e de segurança de voo são equivalentes aos padrões da América do Norte e Europa. Apesar de o setor aéreo entre 2012 e 2017 ter apresentado uma ligeira queda no número de decolagens, o referido anuário mostra também uma recuperação do setor em 2018, denotando uma retomada no modal aéreo na fatia do mercado de passageiros e cargas.

No mercado brasileiro, segundo BNDES (2001), entre 1990 e 2008, foram realizadas mais de 50 milhões de viagens aéreas com aproximadamente 130 milhões de passageiros ao ano e para médio e longo prazo (até 2030), mais de 310 milhões de pessoas, por ano, estarão voando no Brasil.

O referido estudo acrescenta que as ligações aéreas domésticas representam não só um importante meio clássico de interconexão entre cidades, mas também o braço, em escala nacional, da conectividade do território com os fluxos internacionais, sobretudo de pessoas. Elas agregam a movimentação de caráter doméstico com aquela oriunda do sistema internacional, desde que realizem uma conexão nos aeroportos brasileiros.

IBGE (2010) afirma que as aglomerações urbanas formam uma hierarquia a partir dos serviços que oferecem, e as viagens aéreas refletem/ diretamente sua capacidade de atrair para si os consumidores, os encontros de negócios e os turistas. Em um contexto de crescente

popularização da aviação comercial, as conexões aéreas representam um indicador do relacionamento entre os centros urbanos, propiciando, de maneira cada vez mais acessível, o transporte aéreo a longas distâncias.

O Instituto ressalta ainda que os fluxos derivados do transporte aéreo fornecem, assim, uma geografia da estrutura da rede urbana, uma vez que constituem um instrumento de realização das interações espaciais entre as cidades, influenciando diretamente na decisão sobre a escolha, por exemplo, da sede de determinada empresa, assim como suas atividades de gerenciamento e logística.

Rangel (2005) ressalta que ao analisar o processo industrial e o progresso ao longo da história do Brasil, percebe-se uma redistribuição da população; uma ampliação da oferta de melhores condições de trabalho e produção; maior distribuição da riqueza social e de seu modo de apropriação; do conhecimento da quantidade e da qualidade do capital e da técnica necessária ao processo produtivo.

Nesse sentido, o autor acrescenta que o processo de desenvolvimento é alcançado quando uma ampla divisão social do trabalho e o suprimento de mão-de-obra para as novas indústrias passam a acontecer em função do aumento da produtividade do trabalho.

Nessa perspectiva histórica, Anderson (1979) defende que o papel do transporte aéreo brasileiro pode ser examinado, no contexto do “milagre econômico” brasileiro, como um dos mais bem-sucedidos esforços nacionais após a Segunda Guerra Mundial. Segundo Santos e Silveira (2002), fixos geram fluxos, que por sua vez impelem novos fixos, estabelecendo uma relação contínua e dialética.

Nesse contexto, os referidos autores remetem à década de 1970, onde foram construídos dois dos mais expressivos aeroportos brasileiros: o de Guarulhos, em São Paulo e Tancredo Neves, em Belo Horizonte; contribuindo assim para que o setor de transporte aéreo alcançasse um dos mais importantes patamares da economia nacional, uma vez que seus reflexos atingem diversos setores da sociedade.

Conforme Confederação Nacional de Transportes ou CNT (2015), devido à complexidade do sistema de transporte aéreo, os efeitos gerados pelo desempenho do segmento sobre a economia podem ser diretos, ao estimular a atividade econômica que não haveria sem o transporte aéreo; indiretos, mediante a demanda por insumos de outros setores produtivos e induzidos, quando a renda gerada se traduz em incremento de demanda para outros setores.

Seguindo esse raciocínio, a evolução do transporte aéreo está intimamente relacionada ao crescente número de rotas aéreas nacionais e internacionais. Castro; Gomes e Correia (1995) citam que os fluxos pressupõem a existência de redes, tendo como primeira propriedade a

conexidade, a qual, ao possibilitar conexão aos elementos constitutivos, acaba por solidarizá-los.

Para o estabelecimento desse emaranhado aéreo, além de toda a infraestrutura aeroportuária pertinente, devem ser levados em consideração aspectos naturais, como: condições meteorológicas e climáticas; condições de terreno; repartição dos rios e lagos; disposição das costas; a vegetação e os recursos humanos, econômicos e comerciais necessários. (ALBITRECCIA, 1931 *apud* MOACIR, 1941).

Avançando para as características desse modal viário, Bettini (2007) ressalta a existência de um efeito potencializador, proporcionado ao coletivo atendido pelo serviço de transporte aéreo regular, de estímulo à realização de negócios e de turismo, ou ainda, funcionando como elemento de elevada importância para a própria integração nacional.

Ao delimitar o escopo dessa pesquisa para a FIR-RE, ou seja, pesquisar sobre o transporte aéreo em uma determinada região do país, acaba-se por categorizar regionalmente a aviação. Assim, passa-se a ter um aspecto de discussão política, evidenciando que o mesmo se origina no âmbito da escala.

Santos (2009) defende que se vivencia constantemente um mosaico de subespaços que abrange toda a superfície da Terra e cujo desenho é fornecido pelo curso da história, ou seja, a escala deixa de ser uma noção geométrica para ser condicionada pelo tempo.

Como mola propulsora na dinâmica do espaço geográfico, o transporte aéreo, segundo Santos e Silveira (2002), passou a ganhar crescente protagonismo na economia nacional, principalmente em virtude dos vultosos aumentos da demanda (nacional e internacional) de aeronaves e passageiros nas três últimas décadas. Nessa simbiose, constata-se que é condição indispensável a interdisciplinaridade na análise do setor aéreo.

Nesse sentido, Novaes e Souza (2019) são enfáticos ao pontuarem que pelo fato de o transporte aéreo apresentar grande relevância histórica para o desenvolvimento e a integração do território brasileiro, justifica-se o olhar da Geografia para a aviação.

### 3.2 A HISTÓRIA DO TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO

Após o término da Primeira Guerra Mundial, algumas empresas aéreas da Europa e dos Estados Unidos iniciaram a expansão de suas rotas aéreas internacionais. A implantação da primeira rota aérea envolvendo o Brasil foi estabelecida em 1924 pela *Aéropostale*, uma empresa de serviços postais francesa, fomentada pela crescente demanda dos serviços aéreos. Com relação ao protagonismo brasileiro em um voo, destaca-se a presença do piloto brasileiro

Francisco Lopes Nunes na tripulação francesa, em janeiro de 1925, na rota Rio de Janeiro - Buenos Aires (SIMÕES, 2003).

Segundo Moacir (1941), em 1927, no Rio Grande do Sul, foi criada a VARIG (Empresa de Viação Aérea Rio Grandense), iniciando o tráfego de algumas linhas regionais. Com o surgimento do Correio Aéreo Militar (CAM) e do Correio Aéreo Naval (CAN), em 1930, várias rotas para o interior do Brasil surgiram e serviram como integração das linhas aéreas costeiras.

Em 1941, com a criação do Ministério da Aeronáutica, houve a unificação do Correio Aéreo Militar (mantido pelo Exército Brasileiro) com o Correio Aéreo Naval (mantido pela Marinha do Brasil), surgindo o Correio Aéreo Nacional (CAN), com o objetivo precípuo de integrar as diversas regiões do país, permitindo a atuação do governo em regiões e em comunidades de difícil acesso, em especial às indígenas, refletindo relevante papel social. Outra importante contribuição do CAN, segundo Simões (2003), foi o eminente papel nas relações internacionais do Brasil com seus vizinhos na América do Sul.

Com o advento das aeronaves turboélices e a jato, no final da década de 1960 e início da década de 1970, iniciou-se uma nova fase da evolução do setor da aviação civil. Com a renovação da frota por meio da introdução de aeronaves mais modernas e de maior porte, as empresas priorizaram rotas envolvendo cidades de maior expressão econômica, cujo mercado fosse compatível com a oferta, levando a uma expressiva redução da rota em relação às décadas de 1940 e 1950. Assim, de um total de 335 cidades nas quais houvera oferta de serviço aéreo em 1958; somente 92 continuaram a dispor desse serviço em 1975 (CASTRO; LAMY, 1993).

A despeito de algumas vantagens relacionadas à aviação regional, essa acaba por ocupar uma posição pouco atrativa, pois reúne diversos aspectos operacionais desfavoráveis. De acordo com Bettini (2007), a aviação regional apresenta três peculiaridades bem complexas em relação aos seus custos: pequenas distâncias em seus trechos de viagens (apesar de ser uma de suas características); limitações das condições da demanda e a existência de modais substitutos que, embora sejam mais lentos; possuem, por vezes, um custo mais atrativo.

Conforme defende Novaes e Souza (2019), ao se falar em regionalização, cria-se, automaticamente, um elo com a Geografia, uma vez que a região é, de qualquer forma, um fenômeno geográfico.

De acordo com Silva (1995), a região faz parte do conjunto de categorias fundamentais do conhecimento geográfico, sendo posterior à categoria território, porque a região é o território já ocupado e onde se desenvolveu uma organização do espaço, estabelecendo assim um modo de vida. Santos (2009) afirma que a região está ligada intrinsecamente com a funcionalização do mundo, possibilitando que seja percebido empiricamente.

Com o intuito de mitigar as dificuldades encontradas pelo setor aéreo, o governo e as companhias estreitaram o diálogo por meio das Conferências Nacionais da Aviação Comercial (CONAC). Uma das mais destacadas ações originadas dessas conferências, foi, sem dúvida, a criação dos Sistemas Integrados de Transporte Aéreo Regional (SITAR), que tinham como intuito tornar viável a constituição de uma malha aeroviária que alcançasse regiões de médio e baixo fluxo. Assim, esse período se caracterizou por um regime de regulamentação o qual visou à universalização do transporte aéreo ao longo do território nacional (RAGAZZO, 2006).

No início do século XXI, conforme BNDES (2001), o governo brasileiro adotou medidas político-econômicas de forma a proporcionar maior competitividade ao setor aéreo, estabelecendo diretrizes, as quais categorizariam as empresas aéreas por tipos de voos, isto é, internacional, nacional e regional. Essa ação em conjunto com o Ministério da Defesa, induziu a um processo de fusão entre companhias aéreas, conduzindo o setor aéreo a um novo patamar.

Assim, de um mercado incipiente, surgido na década de 20, com regulação praticamente inexistente, em menos de um século, o país vivenciou uma grande revolução no setor aéreo, principalmente nos últimos 20 anos, com empresas competitivas e com marco regulatório bem definido, contando, inclusive, com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), criada em 2005, para regulamentar o setor aéreo nacional.

Nos anos subsequentes, no mercado brasileiro, foram realizadas mais de 50 milhões de viagens por ano, com crescimento de 10% ao ano entre 2003 e 2008, materializando a democratização do setor, por meio da inclusão de passageiros menos abastados (MCKINSEY e COMPANY, 2010).

Com esse vultoso crescimento, o setor de transporte aéreo se tornou um dos expoentes da economia nacional, pois apresenta significativos reflexos em vários setores da sociedade. Pacheco (2004) destaca que a migração para as áreas urbanas e o crescimento das periferias, o congestionamento derivado da crescente motorização, a desigual oportunidade no acesso aos bens e serviços e a preocupação ambiental; trouxeram novas questões para a área dos transportes e também para a Geografia.

Nesse contexto, o autor reforça a importância do fator “transporte” nas explicações sobre a organização do espaço geográfico, agora no sentido do deslocamento de algo ou alguém de uma origem a um destino, encontra terreno fértil de desenvolvimento nas ciências sociais e humanas. O transporte aéreo tem, nessa altura, algum significado nas abordagens geográficas e passa a ser objeto de reflexões que associam o seu traçado com as alterações econômicas e demográficas dos espaços.

Para que essa organização espacial, motivada pelo transporte aéreo, seja possível, é indispensável que a infraestrutura aeroportuária e os serviços relacionados ao controle do espaço aéreo sejam desempenhados de acordo com os rígidos padrões internacionais recomendados pelas autoridades do setor.

### 3.3 O CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

Após o início da Segunda Guerra Mundial, o setor aéreo despontou como protagonista nas ações militares. Nesse sentido, o governo brasileiro identificou que para uma efetiva participação brasileira no conflito, seria indispensável a unificação dos serviços aéreos, que até então eram prestados pela Marinha e pelo Exército brasileiro. Dessa forma, fora criado o Ministério da Aeronáutica em 1941, a qual abarcou a aviação do Exército Brasileiro e da Marinha Brasileira (BRASIL, 2018a).

A criação do Ministério da Aeronáutica, além de unificar as ações militares referentes ao setor aéreo, teve como objetivos precípuos a regulamentação do setor, o desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária e da indústria aeronáutica nacional e das escolas de formação de mão de obra especializada. Seguindo essa perspectiva, em 1942, foi criada a Diretoria de Rotas Aéreas (DR) com a missão de desenvolver a infraestrutura e a segurança da navegação aérea, possibilitando acordos internacionais com diversos países (BRASIL, 2018a).

Ainda segundo BRASIL (2018a), em 1944, com a criação da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), a aviação experimentou grande avanço regulamentar, exigindo que os países signatários se ajustassem às recomendações internacionais. A partir disso, com a constante reestruturação das atividades aéreas, o Ministério da Aeronáutica sentiu a necessidade de setorizar os serviços de proteção ao voo, de acordo com as demandas reinantes e as futuras.

Dessa forma, foi criado o Serviço Regional de Proteção ao Voo de São Paulo, sendo a DR substituída pela Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo (DEPV). Em continuidade a essas ações, foi implantado o Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo (CINDACTA I), materializando assim uma metodologia muito peculiar de se efetuar a atividade de controle de tráfego; integrando o controle de tráfego militar destinado à defesa aérea com o controle da aviação civil geral.

Esse controle do espaço aéreo brasileiro, conforme FAB (2018b) abarca uma área territorial e oceânica as quais totalizam 22 milhões de km<sup>2</sup>, sendo, dessa forma, a Força Aérea Brasileira, a responsável, por delegação do Estado Brasileiro, pela vigilância e controle em toda essa extensão, a qual se encontra representada na Figura 2.

A parte continental, a qual corresponde a 8.538.000 km<sup>2</sup>, são desempenhadas as atividades de Controle, Defesa, Integração e Busca e Salvamento. Na Zona Econômica Exclusiva (3.539.919 km<sup>2</sup>), a qual abarca o trecho oceânico mais próximo à costa brasileira mais os arquipélagos e reservas sob responsabilidade do Estado Brasileiro, desempenham-se as atividades de Controle, Defesa e Busca e Salvamento. E a área oceânica, compreendendo 9.922.081 km<sup>2</sup> e contígua à Zona Econômica Exclusiva, que, por acordos internacionais, o Estado Brasileiro tem o dever de manter as atividades de Controle e de Busca e Salvamento. (FAB, 2018b).

**FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO**



Fonte: Força Aérea Brasileira (2018b)

Vale ressaltar que a atividade de controle diz respeito à responsabilidade da FAB pelo controle de voos no espaço aéreo brasileiro; a atividade de Defesa trata da garantia da soberania do espaço aéreo; a atividade de Integração utiliza vetores (aeronaves militares) com o escopo precípua de proporcionar apoio humanitário, ações cívico-sociais, transporte de pessoas, de suprimento e de órgãos por meio do transporte aéreo militar e a atividade de Busca e Salvamento, que como o próprio nome sugere, remete às ações de resgate.

Convém ainda pontuar que, segundo acordos internacionais, o limite oriental, sul, norte e ocidental dessa imensa área abarcam, respectivamente, o meridiano de 10°W, a latitude de 34°S, a latitude de 07°N e as fronteiras terrestres do Brasil com os países vizinhos da América do Sul (BRASIL 2018d).

Para que a atividade de controle, nessa extensa área, pudesse ser efetivada com a eficiência que a atividade aérea exige, o Comando da Aeronáutica, em 1988, criou o

CINDACTA III, sediado na cidade do Recife, tendo como missão exercer a vigilância e o controle da circulação aérea geral, bem como das aeronaves que têm por missão a manutenção da integridade do espaço aéreo brasileiro na sua área de responsabilidade (BRASIL, 2018a).

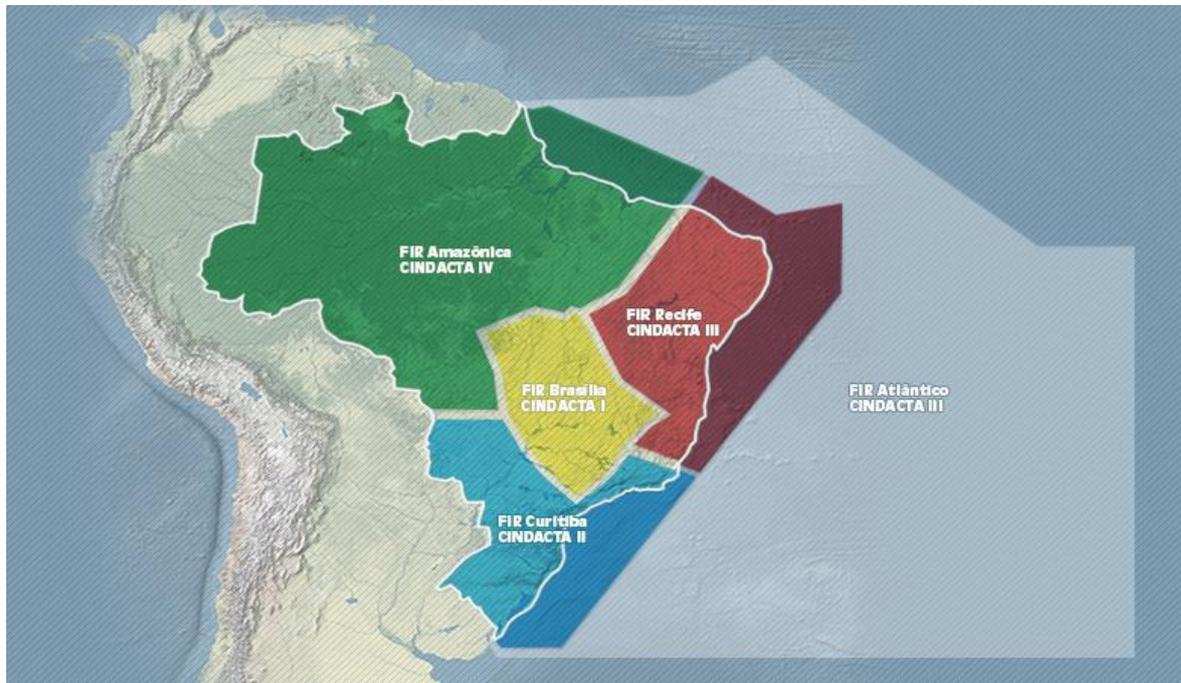
Essa área sob a responsabilidade do CINDACTA III totaliza 13,5 mil quilômetros quadrados e compreende a Região de Informação de Voo de Recife - FIR-RE, a qual abarca os estados do NEB e uma parte dos estados do Tocantins, de Minas Gerais e do Espírito Santo. O restante, abarcando toda a área oceânica após a Zona Econômica Exclusiva é denominada Região de Informação de Voo do Atlântico - FIR-AO (BRASIL, 2018d).

Em 2001, visando à eficiência na gestão dos serviços de navegação aérea, foi criado o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), sediado no Rio de Janeiro. Esse Departamento, segundo Decreto nº6.834, de 30 de abril de 2009, alterado pelo Decreto nº7.069, de 20 de janeiro de 2010, tem por finalidade planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas com o controle do espaço aéreo brasileiro (BRASIL, 2018a).

Convém pontuar que, segundo Brasil (2016b), as atividades de controle do espaço aéreo compreendem os seguintes serviços: Tráfego Aéreo, Informações Aeronáuticas, Comunicações, Navegação e Vigilância, Meteorologia Aeronáutica, Cartografia e de Busca e Salvamento.

Como órgão central de gestão, Rocha (2012) acrescenta que o DECEA é composto de recursos humanos, infraestrutura e equipamentos, cooperando em conjunto para garantir a segurança, a regularidade e a rapidez do transporte aéreo nacional. É responsável pelo controle estratégico e sistêmico do espaço aéreo brasileiro, o que demanda mão de obra especializada, tecnologias de última geração, pesquisa, planejamento e gestão com seus cinco elos regionais: os CINDACTA's I, II, III e IV (Brasília, Curitiba, Recife e Manaus, respectivamente); cada qual com uma Região de Informação de Voo (FIR) sob sua responsabilidade e o Serviço Regional de Proteção ao Voo de São Paulo (SRPV-SP), conforme representado na Figura 3.

**FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DAS QUATRO REGIÕES DE INFORMAÇÃO DE VOO DO SISCEAB E SEUS RESPECTIVOS CINDACTA'S**



Fonte: Brasil (2018b)

Subordinados operacionalmente aos CINDACTA's, Estações de Apoio ao Controle do Espaço Aéreo (EACEA), como o próprio nome sugere, dão suporte à navegação aérea por meio de antenas e equipamentos de auxílio à navegação aérea. Além delas, os Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo (DTCEA) são técnica e estrategicamente dispostos dentro da área de responsabilidade de cada CINDACTA, abarcando todo o território nacional, incluindo áreas fronteiriças (ROCHA, 2012).

O autor acrescenta ainda que, dependendo de sua classe, categoria e classificação, os DTCEA podem possuir o serviço de controle de tráfego aéreo, com Torre de Controle (TWR) e Centro de Controle de Aproximação (APP), assim como todos os serviços e recursos humanos necessários para essas atividades; ou podem se restringir a operação, manutenção, gerenciamento e salvaguarda de Radar de tráfego aéreo e/ou meteorológico.

Todo esse sistema, segundo Brasil (2019c), abarcando os auxílios à navegação aérea, Radar, manutenção e inspeção desses equipamentos, centros de controle, torres de controle de aeródromos, estações de telecomunicações, estações e centros meteorológicos e os recursos humanos; compõem o que se chama de Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB).

Esse Sistema tem como objetivo proporcionar regularidade, segurança e eficiência do fluxo de tráfego nos aeroportos e no espaço aéreo, abrangendo as seguintes atividades: Controle de Tráfego Aéreo, Telecomunicações Aeronáuticas e auxílios à navegação aérea, Meteorologia Aeronáutica, Cartografia, Informações Aeronáuticas, Busca e Salvamento, Inspeção em voo, coordenação e fiscalização de ensino técnico específico e supervisão de fabricação, reparo, manutenção e distribuição de equipamentos terrestres de auxílio à navegação aérea (BRASIL, 2019c).

No espaço aéreo brasileiro, ocorrem diuturnamente movimentos de aeronaves comerciais, militares, aviação geral, balões meteorológicos, sondas, drones, atividades de paraquedismo, asas-deltas e, eventualmente, operações envolvendo lançamento de foguetes. Por possuírem características e natureza peculiares, o planejamento e as ações são customizados para cada tipo de usuário, pois utilizam diferentes faixas desse espaço aéreo. Esse processo requer a concepção e implantação de órgãos de controle de tráfego, equipamentos de auxílio à navegação e ao pouso, RADAR, recursos de telecomunicações e capacitação e especialização de pessoal para exercer essas atividades com a qualidade exigida e requerida pelo usuário (ROCHA, 2012).

Segundo o que caracteriza o BRASIL (2016a), três conceitos balizam a organização do espaço aéreo: espaço aéreo controlado; espaço aéreo não controlado e espaço aéreo condicionado. Como o próprio nome sugere, o espaço aéreo controlado envolve movimentos aéreos que são controlados por um órgão de tráfego aéreo e os pilotos são conduzidos (vetorados) pelo controlador de tráfego aéreo. Esses espaços são caracterizados pela presença de Aerovias (Airways – AWY), Área de Controle Terminal (TMA), e Zonas de Controle (CTR).

O espaço aéreo não controlado é aquele em que as aeronaves voam em ambiente sujeito às regras do ar pré-estabelecidas, porém, sem a intervenção direta do controlador de tráfego aéreo fornecendo orientações. Nesse caso, são fornecidos somente os serviços básicos de informação de voo e de alerta. Já o espaço aéreo condicionado é aquele que recebe classificações especiais conforme a demanda e especificidades, podendo ser: restrito, proibido e perigoso (BRASIL, 2016a).

Ainda com relação ao espaço aéreo controlado, convém ressaltar que o órgão de controle responsável pelas ações dependerá da fase do voo. A Torre de Controle fornece serviço de controle de tráfego aéreo de aeródromo, ou seja, para as aeronaves que se encontram nos procedimentos de aproximação, táxi ou decolagem.

Durante a subida, a Torre orienta a aeronave a chamar a frequência do APP, que controlará a aeronave até ultrapassar a altitude de 15.000 pés. Em seguida, passa o tráfego para

o Centro de Controle de Área (ACC), que conduzirá a aeronave durante todo o voo nivelado até atingir a mesma altitude de 15.000 pés durante o procedimento de descida. Nesse ponto, o APP da localidade de destino assume o controle até o ponto em que a aeronave cruze os auxílios que balizam a aproximação para o pouso e, após contato visual com a pista, a TWR assume o controle das fases de aterrissagem, táxi e estacionamento. (BRASIL, 2016a).

No que se refere ao escopo dessa pesquisa, todas as aeronaves que reportaram turbulência estiveram niveladas, logo, sendo controladas pelo ACC-RE, localizado no CINDACTA III, assim como assessoradas, no que tange à meteorologia aeronáutica, pelo Centro Meteorológico de Vigilância de Recife (CMV-RE), também localizado no CINDACTA III.

Na fase de planejamento do voo ou no planejamento antes da decolagem, os aeronavegantes tem acesso às mensagens de vigilância e previsão expedidas pelo CMV-RE diretamente na internet, por meio do portal da REDEMETS; ou, por telefone, diretamente com o CMV-RE e, durante o voo, o assessoramento ocorre por meio do serviço de Radiodifusão VOLMET, localizado no CMV-RE. Assim, as aeronaves ao sintonizarem a frequência do VOLMET conseguirão obter o assessoramento, em tempo real, para que, havendo necessidade, possam efetuar um replanejamento do seu voo (BRASIL 2019e).

Além das atividades e normas relacionadas diretamente ao controle do tráfego aéreo, um dos pilares relacionados à aviação e que são sensíveis à ocorrências de turbulência é o gerenciamento do tráfego aéreo, que perpassa por ações de planejamento em diferentes escalas temporais.

### 3.4 O GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO AÉREO BRASILEIRO

Um dos objetivos do SISCEAB é a eficiência do fluxo de tráfego nos aeroportos e no espaço aéreo, ou seja, assegurar equilíbrio entre a capacidade de atendimento do SISCEAB e a demanda dos voos no país. Para tal, torna-se imperioso conhecer as especificidades das diferentes fases do voo: aeronaves em rota, durante os procedimentos de aproximação e no pátio dos aeroportos.

Para que esse gerenciamento do tráfego aéreo brasileiro estivesse alinhado com as normas e recomendações da ICAO, foi criada, em 2005, o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea - CGNA (BRASIL, 2018a). Com o abrupto crescimento da atividade aeronáutica nas duas últimas décadas, o CGNA surgiu como a solução para se gerenciar o fluxo aéreo no espaço aéreo e nos aeroportos, mudando de patamar o controle e o gerenciamento do

tráfego aéreo brasileiro, por meio de rotas mais eficientes (rapidez e economia) sem perder de vista a segurança das operações aéreas.

Como integrante do Sistema de Aviação Civil, o CGNA é o responsável pela análise das intenções de voo das aeronaves e do comprometimento da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária (em coordenação com a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO e ANAC); com o objetivo de harmonizar o fluxo do tráfego aéreo brasileiro, ou seja, garantir que o tempo do ir e vir do usuário que optou pelo transporte aéreo esteja em conformidade com o que lhe foi prometido no momento da compra (ROCHA, 2012).

Em função da democratização do transporte aéreo ocorrida principalmente na primeira década do século XXI, o referido autor cita ainda que a capacidade da infraestrutura aeronáutica passou a ser variável muito sensível para se gerenciar adequadamente o fluxo do tráfego aéreo. Uma aeronave não pode partir de um determinado local em direção a outro, sem a certeza de que terá uma vaga no pátio de destino para promover o desembarque dos passageiros. Para isso, há a necessidade de adoção de ações as quais consistem em três fases de planejamento: a estratégica, com antecedência de mais de 24 horas; a pré-tática, referente às últimas 24 horas e a de operações táticas que ocorrem no mesmo dia.

Tendo como referência o horário das operações correntes, as operações táticas se iniciam, normalmente, com antecedência de seis horas, acompanhando cada voo até o seu encerramento. Essas ações irão influenciar diretamente no tempo de voo e, conseqüentemente, no consumo de combustível e nas emissões de CO<sub>2</sub> envolvidas. Isso permite atender ao objetivo de aumentar a capacidade, eficiência e flexibilidade das operações aeronáuticas, interferindo diretamente no tempo de voo das aeronaves no espaço aéreo nacional (BRASIL, 2010).

Para que esse gerenciamento e ações relacionadas a essa atividade sejam eficientes, conhecer o comportamento dos fenômenos meteorológicos que possam impactar nessas decisões se torna indispensável. Dessa forma, a climatologia figura como uma das ferramentas de apoio necessárias ao planejamento de longo e médio prazo.

### 3.5 A CLIMATOLOGIA

O conceito de Climatologia remonta à Grécia Antiga onde os Gregos já faziam inventários climáticos separando e classificando as regiões em zonas: tórridas, temperadas e frígidas. Ao longo de toda a história, conhecer o clima, instintivamente, sempre esteve ligado a questões de sobrevivência da espécie e por um longo período dessa história, a Meteorologia e a Climatologia permaneceram atreladas a um só ramo do conhecimento no estudo da atmosfera terrestre (RIBEIRO, 1993).

Um divisor de águas no estudo do tempo e do clima pode ser entendido como o período compreendido entre os séculos XV e XVII. Foi justamente no Renascimento, período marcado por grandes revoluções no campo tecnológico e mercantil (Mercantilismo – representando a ruptura do Homem com a natureza), que a Ciência da Atmosfera passou a ganhar importância e apresentou grande desenvolvimento (STEINKE, 2012).

O autor cita ainda que esse período foi proficuamente valoroso, devido principalmente ao advento de instrumentos como termômetro e o barômetro, às descobertas astronômicas, ao estabelecimento de leis e à busca pela relação entre os fenômenos; definindo o início da meritocracia capitalista.

A sistematização do conhecimento científico, seguindo princípios lógicos e metodológicos, deu-se na Europa entre os séculos XVIII e XIX, e, pelas influências positivistas e Iluministas, contribuíram para algumas definições acerca das Leis da Natureza, capitaneadas por Isaac Newton e por Leis que regeriam o Estado (Direito); definindo um período de fragmentações do conhecimento. Dutra Gomes e Vitte (2013) ressaltam que justamente na metade desse período, expressou-se em Alexander Von Humboldt a crise existencial do espírito do Homem moderno frente aos questionamentos e reflexões oriundas dos séculos anteriores.

Nesse contexto de embate entre o racional e o sentimental, segundo apontam Mendonça e Danni - Oliveira (2007) o estudo da atmosfera pela Meteorologia ficou pertencendo ao campo das ciências naturais, sendo sua competência o estudo dos fenômenos isolados da atmosfera e do tempo atmosférico.

Ayoade (2007) aponta que o estudo da atmosfera vem mudando ao longo dos tempos, em especial no final do século XX e início do século XXI, ou melhor, mais precisamente nos últimos trinta anos, onde a ciência se pautou em modelos matemáticos. Segundo esse autor, a climatologia tradicional é predominantemente cartográfica, ou seja, alicerçada por mapas de médias ou gráficos que mostram variações diurnas e sazonais e diferenças espaciais nos valores dos elementos climáticos.

Essa abordagem apresenta deficiências por não ter caráter explicativo, negligenciando, por exemplo, as interações, isto é, os mecanismos de *feedback* que operam na atmosfera. Ainda nessa perspectiva histórica, o autor considera que a moderna climatologia surge como alternativa para mitigar as deficiências da climatologia tradicional. Assim, além de descrever os fenômenos atmosféricos, procura explicá-los, satisfazendo assim a demanda de uma sociedade cada vez mais crítica e uma crescente evolução nos processos de coleta e análise de dados.

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007) o surgimento da climatologia como um campo do conhecimento científico com identidade própria, deu-se algum tempo depois da sistematização da meteorologia. Voltada ao estudo da espacialização dos elementos e dos fenômenos atmosféricos e sua evolução, a climatologia se integra como uma subdivisão da Meteorologia e da Geografia, a qual estuda o espaço geográfico a partir da integração da sociedade com a natureza.

Castro, Gomes e Correia (1995) defendem que o espaço geográfico ora pode estar associado a uma porção específica da superfície da Terra identificada, ora pela natureza, ou ainda por um modo particular de como o Homem ali imprime as suas marcas, sendo assim um referencial de localização.

Pédelaborde (1970) considera que sendo a Climatologia um dos ramos da Geografia Física, tem como escopo o estudo dos caracteres da atmosfera em contato com a superfície terrestre e a distribuição espacial desses caracteres. Por outro lado, ao se estudar esses caracteres assim como sua distribuição espacial, por consequência, influenciam diretamente a vida humana.

Dessa forma, relaciona-se também com a Geografia Humana e Biológica e pela natureza dos elementos que analisa, encontra suas bases na meteorologia, que por sua vez, debruça-se sobre o registro e a medição desses fenômenos a fim de se determinar as condições físicas sob as quais foram produzidos (ZAVATTINI, 2002).

O diálogo entre a Climatologia e a Meteorologia envolve, inevitavelmente, segundo Ayoade (2007), os geógrafos quanto à aplicabilidade de cada uma delas. Isso perpassa pelas definições de conceitos como tempo e clima e da própria meteorologia. No que tange à ciência da atmosfera, a meteorologia está relacionada ao estado físico, dinâmico e químico da atmosfera e suas interações entre eles e a superfície terrestre subjacente.

Desse modo, para a Meteorologia se faz necessário a distinção entre tempo e clima. Aquele pode ser definido como o estado médio da atmosfera numa dada porção de tempo e em determinado lugar. Por outro lado, entende-se que o clima é a síntese do tempo num dado lugar durante um período de aproximadamente 30 a 35 anos (AYOADE 2007).

Para uma melhor compreensão dos diferentes climas do Planeta, os estudos em Climatologia são estruturados, segundo Mendonça e Danni – Oliveira (2007), a fim de evidenciar os elementos climáticos (temperatura, umidade e pressão) e os fatores geográficos do clima (latitude, altitude, maritimidade, continentalidade, vegetação e as atividades humanas).

Araki *et al.* (2012), ao relatar a história da classificação climática de São Paulo, evidencia que, a partir da década de 1940, com a fundação do IBGE e com a participação de geógrafos das Universidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, o Sudeste do Brasil foi privilegiado com inúmeras classificações climáticas.

A partir da década de 1950, observa-se uma significativa amplitude nos estudos, ou seja, se antes o foco era a região Sudeste do Brasil, a partir de então, começaram a atingir latitudes mais baixas, como o NEB. Andrade (1952), ao estudar os ventos de Recife, pode ser um dos exemplos dessa marcha científica rumo às menores latitudes.

Ao estudar a climatologia de um sistema ou fenômeno meteorológico para se entender determinada característica de uma região, o diálogo com a meteorologia se torna natural e inevitável, tornando oportuna uma contextualização dessa ciência.

### 3.6 A METEOROLOGIA

A meteorologia é uma ciência multidisciplinar, logo, complexa. Suas raízes ancestrais situam-se nas inquietações pré-históricas do Homem em sua constante luta pela sobrevivência frente à imprevisibilidade dos fenômenos naturais. Os grandes desafios enfrentados por nossos ancestrais foram sendo mitigados ao longo da história, uma vez que a sociedade humana precisava se antecipar aos dilúvios e às estiagens, intuir as mudanças da natureza, compreender o ciclo das estações, decifrar o movimento dos astros; sendo um lento movimento em busca da maior permanência possível neste planeta (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

Dessa forma, sem a ambição de abarcar os diversos meandros que envolvem a relação entre a meteorologia e o homem, convém pontuar alguns importantes marcos quando se deseja contextualizar a meteorologia na história da humanidade.

Os climas do passado, objeto da Paleoclimatologia, apresentam considerável variabilidade, perpassando pela extinção dos dinossauros (entre 80 e 60 milhões de anos atrás); formação das primeiras camadas de gelo no continente Antártico (em torno de 35 milhões de anos atrás) e formação das camadas de gelo do Ártico (nos últimos 5 milhões de anos). Segundo Silva Dias (2006), o tempo envolvido nesse resfriamento é muito maior que os primeiros vestígios do Homem no planeta (7-8 milhões de anos atrás), assim como do próprio povoamento na Europa (um milhão de anos atrás).

Após essa breve explicação de escala temporal, ao se olhar nos últimos 10-20 mil anos, período em que a civilização apresentou crescimento e evolução de forma mais marcante; diversas influências do clima em eventos históricos desse período puderam ser relatadas, como

por exemplo, as guerras e migrações. Silva Dias (2006) cita o congelamento do Estreito de Bering como fator indispensável para a migração para as Américas cerca de 12 mil anos AC.

Com esse movimento, o referido autor acrescenta que civilizações primitivas se desenvolveram e com ela culturas muito peculiares surgiram, sendo criados muitos mitos ligados aos fenômenos naturais, muitos sendo atribuídos a deuses e deusas, os quais eram passados de geração em geração. Ao longo dos últimos séculos, a curiosidade que tais fenômenos naturais sempre despertaram levou o homem a desenvolver técnicas objetivas de medição para melhor interpretá-los e prevêê-los.

Nessa perspectiva, destacaram-se a invenção do termômetro, atribuída a Galileu por volta de 1590; assim como todas as descobertas atribuídas às ciências naturais e exatas durante os séculos XVI ao XXI, as quais perpassam pela Revolução Industrial, pela ampliação das redes de observação sinótica (terrestre e marinha), pelo avanço quantitativo e qualitativo da tecnologia satelital e de RADAR; até se atingir o cenário atual da previsão do tempo com modelos numéricos de previsão de tempo e clima cada vez mais precisos e com menores resoluções (VIANELLO e ALVES, 2012).

Nesse contexto, em uma sociedade cada vez complexa e consciente de que precisa viver de forma mais sustentável, uma grande demanda para a meteorologia se apresenta em vários setores da sociedade, envolvendo disponibilidade e qualidade de água, qualidade do ar, saúde pública, produção de alimentos, segurança e defesa civil. Dentro dessa gama de demandas, a segurança é o alvo precípuo de um dos ramos de aplicação da meteorologia: a meteorologia aeronáutica.

### **3.6.1 A meteorologia aeronáutica no SISCEAB**

Brasil (2019a) afirma que a informação meteorológica é vital para a segurança das operações aéreas. Qualquer intenção de voo deve vir acompanhada de um planejamento o qual inclui a meteorologia como indispensável variável. A segurança, o conforto e o estabelecimento de rotas mais rápidas e econômicas e, conseqüentemente, uma diminuição do impacto ambiental são resultados de tomadas de decisões baseadas no auxílio prestado pelo serviço de meteorologia aeronáutica do SISCEAB.

Atualmente, esse serviço é composto por uma complexa rede de Radares, Estações Meteorológicas, Células Regionais de Coordenação e um Centro Integrado que compõem um vasto mosaico o qual proporciona cobertura meteorológica em todo o nosso território (BRASIL, 2019e).

Com o crescimento dos movimentos aéreos, a crescente necessidade de se otimizar o espaço aéreo, os episódios meteorológicos extremos sem precedentes, como o Furacão Catarina e acidentes envolvendo a meteorologia, como o Air France 447; tornaram as informações meteorológicas um dos principais assessoramentos para a tomada de decisão dos envolvidos com o transporte aéreo nacional e internacional (BRASIL, 2019a).

### 3.6.1.1 O Centro Meteorológico de Vigilância de Recife

As demandas modernas exigem que as instituições adotem medidas de racionalização de suas atividades, simplificação de processos e busca ininterrupta pela eficiência. Inserida nesse contexto, a Força Aérea Brasileira (FAB) desencadeou uma série de ações que visam ao desenvolvimento do Poder Aéreo e Espacial Brasileiro com esse viés de racionalização, por meio de mudanças estruturais e organizacionais nos grandes comandos e unidades subordinadas, buscando eficiência na gestão administrativa e operacional (FAB, 2018a).

Nessa perspectiva, até o final de 2018, conforme Brasil (2019e), em cada CINDACTA havia um Centro Meteorológico de Vigilância (CMV) responsável pela prestação do serviço meteorológico aeronáutico de vigilância e previsão dentro de sua respectiva área de responsabilidade. No CINDACTA III, por exemplo, o Centro Meteorológico de Vigilância de Recife (CMV-RE) era o responsável pela prestação desse serviço em rota e em superfície para todo o NEB e parte dos estados do Tocantins, de Minas Gerais e do Espírito Santo.

Ainda segundo Brasil (2019e), o serviço meteorológico aeronáutico de vigilância e previsão, que era prestado pelo CMV-RE, abarcava previsão terminal de aeródromo (TAF) com validade de 24 horas e de 12 horas para os aeródromos internacionais e nacionais, respectivamente; mensagens de previsão e vigilância para níveis baixos; mensagens de vigilância para atender aeronaves em rota e o serviço de radiodifusão VOLMET, que permite comunicação direta com o aeronavegante durante o voo.

Por meio do Plano do Comando da Aeronáutica (PCA) 105-1 – Plano Específico do Departamento de Controle do Espaço Aéreo para a Implantação do Centro Integrado de Meteorologia da Aeronáutica (CIMAER), as ações de centralização dos CMV no CIMAER, localizado no Rio de Janeiro, conforme política de reestruturação da FAB, começaram a se delinear (BRASIL, 2018f).

Segundo o Regulamento do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (ROCA 21-109), publicado no Diário Oficial da União (DOU) de 15 de abril de 2019, O CIMAER foi criado com a seguinte finalidade:

Prestar o serviço de previsão e vigilância meteorológicas no SISCEAB, fornecer prognóstico para o emprego aeronáutico, apoiar as atividades relativas à Meteorologia de Defesa, gerenciar a aplicação da climatologia para fins aeronáuticos e a divulgação de informações meteorológicas aeronáuticas e espaciais, fomentar estudos e intercâmbios, visando ao aprimoramento profissional e à qualidade na prestação do serviço, e representar o Comando da Aeronáutica junto aos órgãos nacionais e internacionais relacionados à Meteorologia Aeronáutica (DOU, 2019, p. 1)

Assim, atualmente, no local onde os CMV atuavam, há uma Célula Regional de Meteorologia (CELMET), que, além de servir como elo de coordenação entre o CIMAER e as outras estações de meteorologia, ainda é responsável pela prestação do serviço de radiodifusão VOLMET, que só passará a ser efetuado pelo CIMAER no final de 2020.

É por meio desse serviço de radiodifusão, que, em tempo real, as CELMET recebem das aeronaves, em voo, as aeronotificações contendo as informações meteorológicas que estão reinando no nível de voo em que elas se encontram.

Durante o voo, o aeronavegante segue o que está previsto nas Cartas de Rota (ENRC – *Enroute Chart*), sendo obrigatório em determinados pontos dessa rota a transmissão de informações meteorológicas ao VOLMET da área de jurisdição que ela se encontra. Outra situação em que o aeronavegante deverá chamar o serviço VOLMET é quando se depara com condições meteorológicas significativas. Nesse momento, o profissional responsável por prestar o serviço VOLMET, registrará as informações transmitidas em forma de código chamado AIREP (BRASIL, 2018c).

#### 3.6.1.2 Mensagem de informação operacional e meteorológica

Segundo Brasil (2018c), as mensagens contendo informações operacionais e/ou meteorológicas proveniente de uma aeronave em voo, em pontos ou horas obrigatórios, será transmitida na forma de AIREP com o designador “ARP”. Caso sejam observados pelo piloto fenômenos meteorológicos considerados perigosos à navegação aérea, fora do horário e posições obrigatórias, a mensagem será transmitida em forma de AIREP especial, utilizando-se do designador “ARS”.

A mensagem AIREP deve ser enviada da forma que for recebida da aeronave para o ACC e centro meteorológico interessado. A AIREP especial deverá ser encaminhada imediatamente pelo órgão de controle ao centro meteorológico interessado conforme procedimento interno estabelecido (BRASIL, 2016b).

Conforme Brasil (2018c), a aeronotificação em forma de AIREP possui três seções. A seção 1 trata da identificação da aeronave, sua posição, horas, nível de voo ou altitude, próxima

posição e tempo de sobrevoo previsto e próximo ponto significativo. Na seção 2, encontra-se a hora prevista de chegada ao destino e autonomia. E a seção 3 comporta informações sobre temperatura do ar, direção do vento, velocidade do vento, turbulência (leve/moderada/severa), formação de gelo (leve/moderada/severa), umidade (se disponível) e fenômenos experimentados ou observados que exigem uma aeronotificação especial (turbulência severa, formação de gelo severa, onda orográfica severa, trovoadas com ou sem precipitação, trovoadas com granizo, tempestade de poeira/areia severas e nuvem de cinzas vulcânicas e, somente para aeronaves supersônicas, turbulência moderada, granizo e nuvens Cumulonimbus - Cb).

No que se refere às particularidades das seções, ressalta-se que a seção 1 é obrigatória. As informações previstas na seção 2 são facultativas e somente serão transmitidas apenas quando solicitadas pelo explorador ou seu representante, ou ainda, quando julgado necessário pelo piloto em comando da aeronave. E a seção 3, ou parte dela, será transmitida em todos os pontos de notificação meteorológicas previstos nas cartas de rota, conforme Brasil (2018c). Seguem abaixo dois exemplos do código AIREP regular e AIREP especial decodificado:

a) ARP GOL 3504, VTR 1317, F330, AV 55, FUEL 0830, MS47, 255/45, TURB MOD, SCT CB TOP F280 =

*“AIREP GOL TRÊS CINCO ZERO QUATRO, POSIÇÃO VITÓRIA (ESPÍRITO SANTO) UNO TRÊS UNO SETE, NÍVEL DE VOO TRÊS TRÊS ZERO (33.000 PÉS), ABROLHOS (PRÓXIMA POSIÇÃO) AOS CINCO CINCO (MINUTOS), AUTONOMIA ZERO OITO TRÊS ZERO, TEMPERATURA MENOS QUATRO SETE (GRAUS CELSIUS), VENTO DOIS CINCO CINCO (DIREÇÃO EM GRAUS DE ONDE VEM O VENTO) BARRA QUATRO CINCO (VELOCIDADE EM NÓS), TURBULÊNCIA MODERADA, SCT (CÉU PARCIALMENTE NUBLADO) CUMULONIMBUS ACIMA DO NÍVEL DE VOO DOIS OITO ZERO (28.000 PÉS).”*

b) ARS AZUL1809, NOR 1536, F310 ASC F350, REC 21, FUEL 0400, TURB SEV=

*“SPECIAL AIREP AZUL UNO OITO ZERO NOVE, POSIÇÃO NORONHA UNO CINCO TRÊS MEIA, NÍVEL DE VOO TRÊS UNO ZERO (31.000 PÉS) ASCENDENDO NÍVEL DE VOO TRÊS CINCO ZERO (35.000 PÉS), PRÓXIMA POSIÇÃO RECIFE DOIS UNO, AUTONOMIA ZERO QUATRO ZERO ZERO, TURBULÊNCIA SEVERA.”*

### 3.7 OS PRINCIPAIS SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES NA FIR-RE

Para que se possa ter uma adequada previsibilidade de algum fenômeno meteorológico, é necessário o conhecimento dos sistemas meteorológicos que atuam e influenciam a dinâmica atmosférica de uma determinada região.

Na América do Sul, diversos sistemas meteorológicos com origem continental e/ou Oceânica interferem no estado da atmosfera. Dentre os que Ferreira (2006) cita, aqueles que estão, de forma mais significativa, alinhados ao escopo dessa pesquisa são: Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Corrente de Jato, Frentes Frias, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Compreender esses fenômenos e suas consequências são imprescindíveis para que se possa realizar um prognóstico mais assertivo das condições meteorológicas propícias à formação de turbulência dentro da FIR-RE.

#### 3.7.1 Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

Segundo Bastos e Ferreira (2000), altas subtropicais são típicas das regiões subtropicais dos dois hemisférios, sendo constituídas por ar quente. Por isso, a pressão atmosférica decresce lentamente com a altitude, e os anticiclones, mantendo circulações fechadas em todos os níveis, podem se estender até a troposfera alta, com o eixo da circulação inclinado para noroeste com a altura. A ASAS, localizada na costa oriental da América do Sul, exerce influência decisiva sobre o tempo e o clima no Brasil, em especial a faixa litorânea.

Vianello e Alves (2012), observaram que os centros de pressão apresentam consistentes variações sazonais entre o inverno e o verão, contribuindo diretamente para as diferenças de temperatura do ar de uma estação para outra. Durante o inverno, as temperaturas são menores sobre os continentes e, em consequência, os centros de alta pressão migram em direção ao continente. No verão, as temperaturas sobre os continentes são maiores e os centros de alta pressão se afastam do litoral, adentrando ao oceano, conforme evidencia a Figura 4.

Varejão-Silva (2001) assevera que os centros anticiclônicos podem ser migratórios ou semipermanentes. Estes, persistem durante todo o ano sobre determinada área, variando um pouco com o tempo em torno de uma posição média que, de certo modo, está parcialmente relacionada com o movimento meridional aparente do Sol.

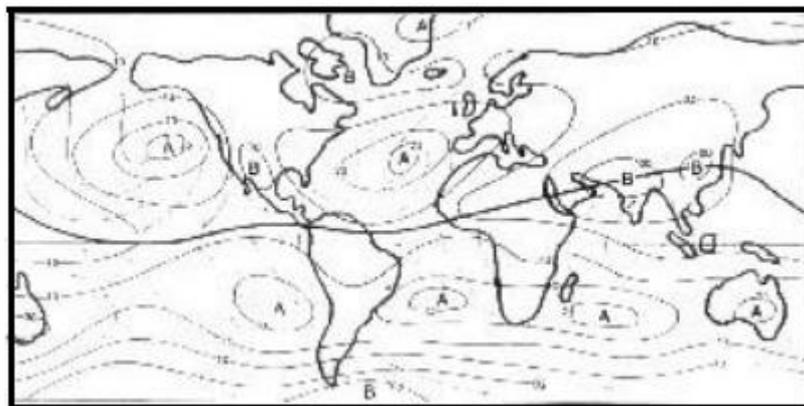
O autor ressalta ainda que há dois conjuntos de três anticiclones semipermanentes, à superfície, localizados na zona subtropical. Os três do Hemisfério Sul se encontram sobre o oceano próximos à latitude de 25°S.

**FIGURA 4 - POSICIONAMENTO DOS ANTICICLONES NO PERÍODO DE VERÃO (A) E (B)  
POSICIONAMENTO DOS ANTICICLONES NO PERÍODO DE INVERNO**

(a)



(b)



Fonte: Vianello e Alves (2012)

Hastenrath (1991) investigou o comportamento e as características de todas as altas subtropicais semipermanentes em ambos hemisférios. O autor observou que essas altas ficam mais próximas do equador durante seus respectivos invernos. Com relação ao deslocamento em longitude, todas (exceto a do Pacífico Sul) localizam-se mais a leste (oeste) no inverno do Hemisfério Norte (Hemisfério Sul) e mais a oeste (leste) no verão do Hemisfério Norte (Hemisfério Sul).

Molion e Bernardo (2002) ressaltam a influência da ASAS na modulação do tempo no NEB. O deslocamento longitudinal da ASAS está amplamente associado às condições de tempo no NEB e de que esse padrão de deslocamento estaria associado a sistemas transientes de latitudes médias (ITO, 1999).

Degola (2013), defende que a posição da ASAS estaria diretamente relacionada a passagem de sistemas frontais e a sua variação longitudinal seria maior em períodos de maior

atividade ciclônica. Acrescenta ainda que a intensidade da magnitude do vento aumenta (diminui) quando a ASAS está mais a oeste (leste) de sua posição climatológica. A passagem de sistemas transientes posicionaria a ASAS mais a leste de sua posição climatológica ocasionando uma diminuição na magnitude da velocidade do vento. Como consequência, o deslocamento longitudinal da ASAS seria amplamente modulado por esses sistemas e estaria sujeito a mesma variabilidade, assim como as variáveis de tempo a ela correlacionadas.

### 3.7.2 Corrente de Jato

A corrente de jato, segundo Reiter (1969), é um estreito escoamento com ventos fortes com velocidade superior a 30 m/s, concentrando-se ao longo de um eixo na troposfera superior ou estratosfera, caracterizada por um cisalhamento vertical e horizontal do vento. Nos altos níveis da atmosfera, próximo à tropopausa, existe uma região onde a componente do vento sazonal de oeste atinge valores máximos, aumentando com a altitude devido à existência de gradientes meridionais de temperatura, proporcionando a transferência de energia dos trópicos para os polos e o excesso de frio dos polos para as regiões tropicais.

Esses escoamentos caracterizados por valores máximos são denominados correntes de jato ou simplesmente jatos (FERREIRA, 2006). As primeiras observações do fenômeno foram feitas sobre o Oceano Pacífico, durante a Segunda Guerra Mundial, quando os pilotos americanos notaram a presença de ventos fortes ao se deslocarem para os ataques ao Japão.

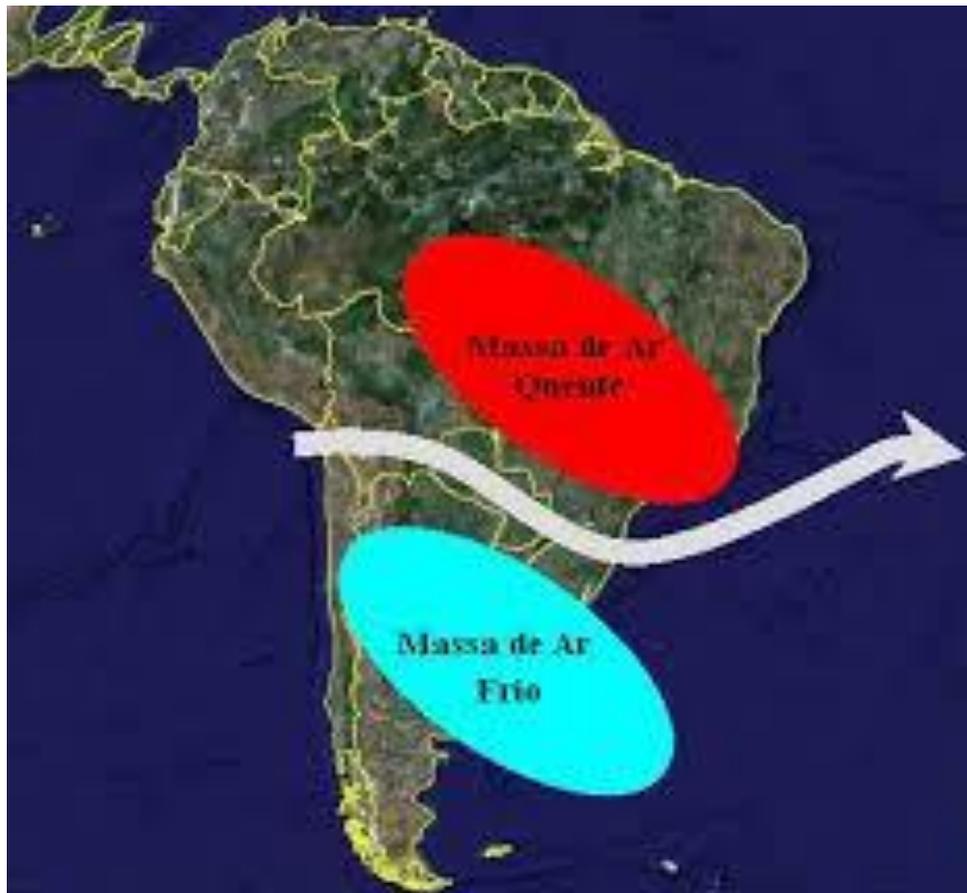
Segundo a *World Meteorological Organization - WMO* (2007), corrente de jato é uma forte e estreita corrente concentrada ao longo de um eixo quase horizontal na alta troposfera, caracterizada por cisalhamento vertical e horizontal do vento.

A presença de uma corrente de jato é um sinal da existência de massas de ar com características distintas e separadas por uma fronteira, onde o ar frio se situa, no Hemisfério Sul, à direita do jato (Figura 5). Devido à diferença térmica entre os trópicos e os polos, faixas de fortes ventos vindos de oeste, desenvolvem-se na alta e média atmosfera, geralmente entre 7 e 15 km acima da superfície, transferindo energia dos trópicos para os polos. Quando essa faixa atinge latitudes ao norte de 35°S, apresentam maior intensidade nas proximidades de 200 hPa (39.000 pés), separando o ar subtropical mais frio do ar mais aquecido dos trópicos, sendo chamado de Jato Subtropical (CAMPOS, 2010).

Vianello e Alves (2012) ressaltam que uma das configurações mais admiráveis do ar superior é a corrente de jato. Ocorre próxima à Tropopausa entre 9 e 13 km de altura, limitando-se a poucos milhares de metros de profundidade e a dezenas de quilômetros horizontalmente.

Em geral, segundo o autor, localiza-se entre massas de ar de diferentes temperaturas, onde há os maiores contrastes térmicos. Varia diuturnamente e, em geral, localiza-se acima das áreas onde ocorrem grandes perturbações atmosféricas à superfície, como é o caso dos sistemas frontais.

**FIGURA 5 - MASSAS DE AR COM CARACTERÍSTICAS DIFERENTES**



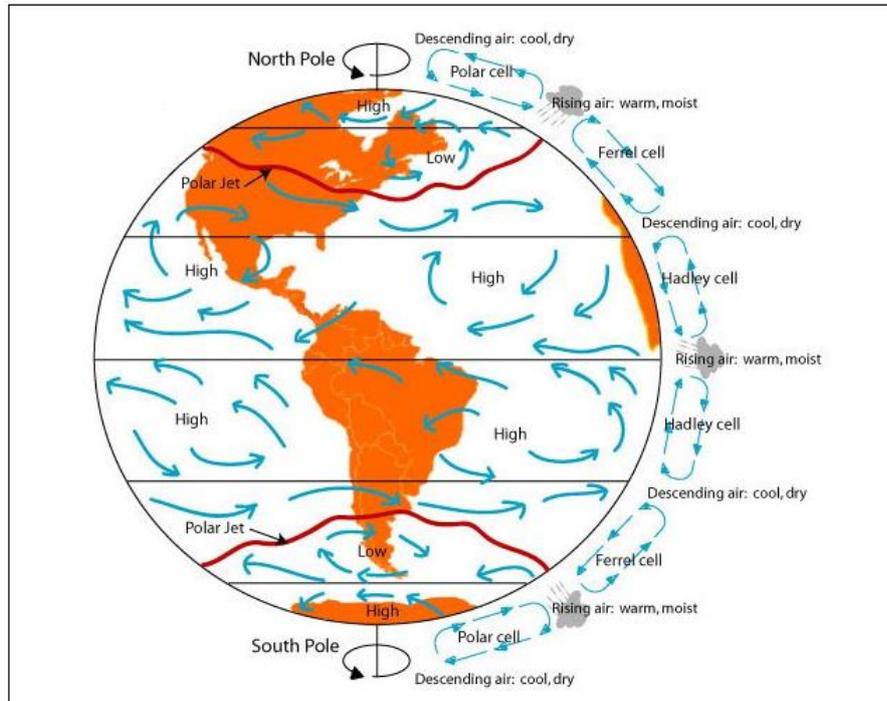
Fonte: Campos (2010).

Desde sua identificação, até os dias de hoje, muitos estudos foram realizados sobre essa região de fortes ventos zonais em altos níveis, porém poucos para a América do Sul. Civita, Rico e Siewers (1995) afirmam que existem duas Correntes de Jato distintas: uma delas é a Corrente de Jato Polar a qual não é muito regular e está associada ao forte gradiente horizontal de temperatura que ocorre nas estreitas zonas frontais, localizando-se no lado equatorial destas.

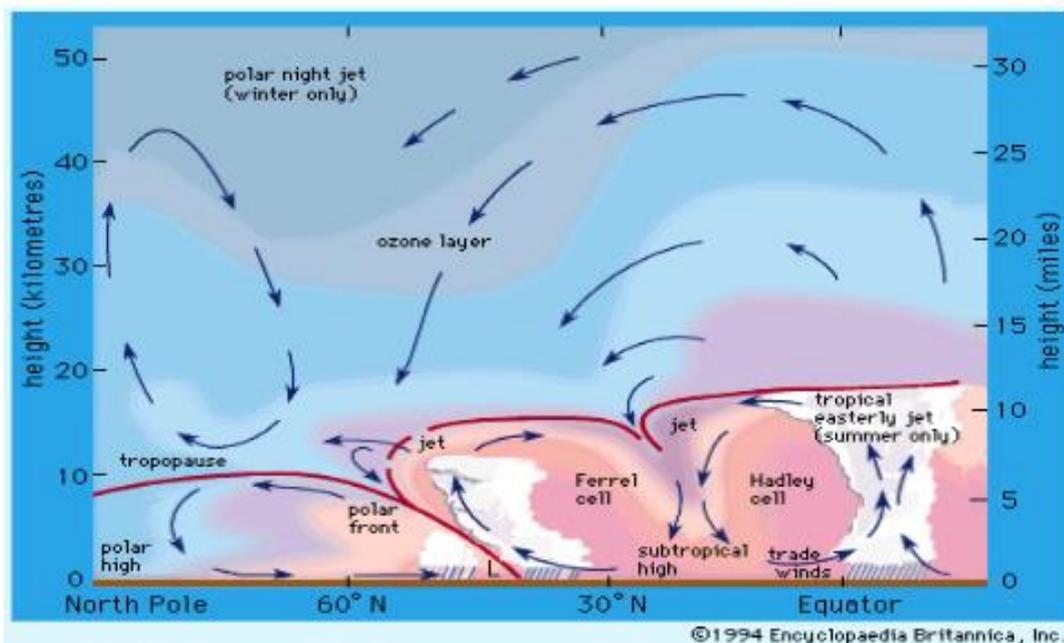
A outra corrente, chamada de Jato Subtropical, segundo o mesmo autor, está associada à circulação da Célula de Hadley e geralmente fica localizada no limite polar dessa célula. As correntes de jato se formam no limite entre as três células em cada hemisfério, onde há o encontro de massas de ar de temperaturas diferentes, originando variações de pressão e fortes

ventos. No inverno, as diferenças de temperatura aumentam à medida que se intensificam as correntes de jato (Figura 6).

**FIGURA 6 - CIRCULAÇÃO GLOBAL (A) E POSIÇÃO GEOGRÁFICA DA CORRENTE DE JATO (B)**



(a)



(b)

Fonte: USP, (2010) (a) e Enciclopédia Britânica, (1994) (b)

De um modo geral, os jatos circulam de oeste para leste e tem um aspecto ondulatório muito definido ao redor de todo o hemisfério, apresentando descontinuidades, conforme os contrastes térmicos entre as massas de ar.

Ferreira (2006) defende que as cristas e cavados associados ao Jato refletem baixas e altas pressões que se encontram presentes ao longo da trajetória do jato. Dessa forma, o tempo associado também sofrerá alterações na escala espaço-temporal, assim como todos os fenômenos a eles associados, definindo e contribuindo para toda a dinâmica atmosférica reinante.

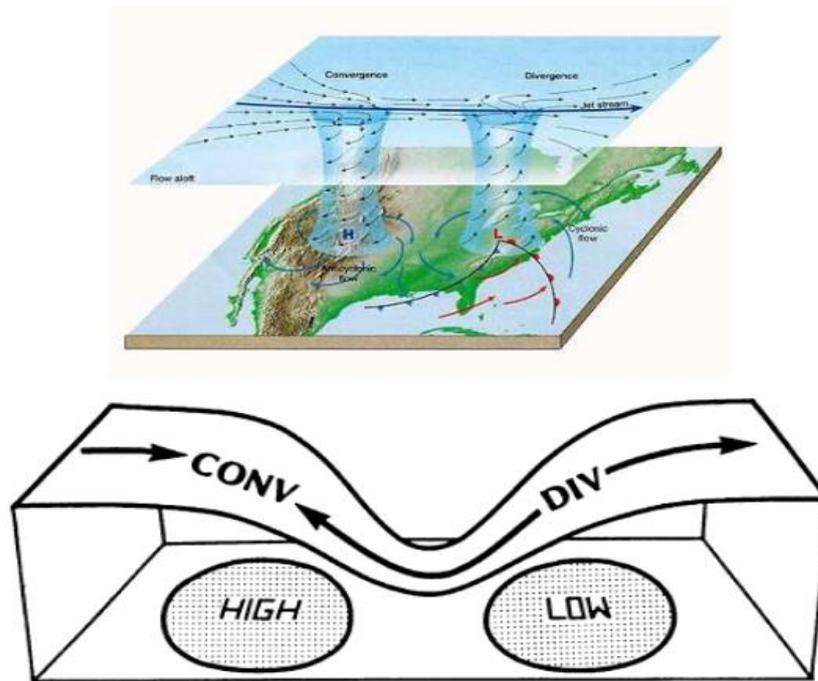
O autor ressalta também que uma corrente de jato apresenta comprimento e amplitude. O comprimento de uma onda típica gira em torno de 5.000 km e 7.000 km e a amplitude pode abarcar entre 500 km e 2.000 km. Essa amplitude é uma importante característica para a determinação do estado do tempo reinante. Quando a corrente possui baixa amplitude, chama-se fluxo zonal e indica que o ar flui quase que diretamente de oeste para leste; que a mistura entre o ar quente e frio é suave e que as baixas associadas são fracas. Por outro lado, quando a amplitude é acentuada, chama-se de fluxo meridional, caracterizado por cavados e cristas com baixas e altas pressões associadas, respectivamente. Nesse contexto, tanto o contraste térmico quanto o transporte de massa são características marcantes dessa configuração.

Zimmemann (2017) cita o papel das correntes de jato na convecção nas regiões subtropicais pelo mundo, sempre que houver umidade e alto grau de instabilidade do lado equatorial do Jato Subtropical. Uma corrente de jato provoca grande deslocamento de massa em altitude e, de forma a compensar esse movimento, a atmosfera buscará retomar o equilíbrio inicial, ou seja, um novo volume de massa será impelido a ocupar esse lugar.

Constata-se, portanto, que as acelerações das partículas que entram no jato podem ser explicadas somente por uma componente ageostrofica da velocidade do vento dirigida para o lado polar e, na região de saída, dirigida para o lado equatorial (HOLTON, 1979).

O escoamento na corrente de jato, de um cavado para uma crista, determina divergência em altos níveis troposféricos. Devido a essa divergência, estabelece-se uma região de considerável convergência na troposfera mais baixa. A identificação da corrente de jato como o mecanismo que estabelece divergência em altos níveis, induzindo convergência em níveis mais baixos, é mais fácil de ser reconhecida quando não se consideram as outras forçantes tais como as frentes (Figura 7). Este centro de convergência intensifica-se pelo transporte de calor associado às correntes de norte e de nordeste (BARBOZA; FEDEROVA 1998).

**FIGURA 7 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PADRÃO DE DIVERGÊNCIA ASSOCIADO COM O SISTEMA CAVADO/CRISTA DO JATO EM ALTOS NÍVEIS E O PADRÃO DE CONVERGÊNCIA EM SUPERFÍCIE**

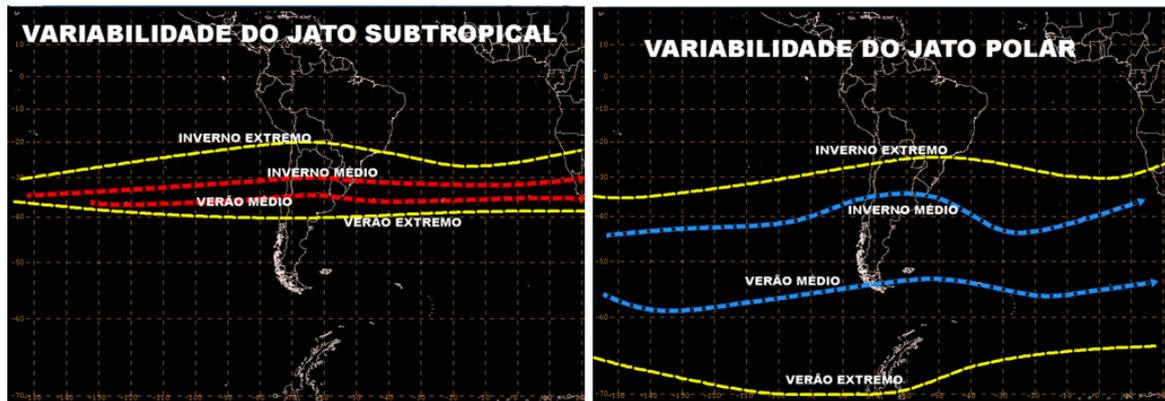


Fonte: Campos (2010)

Cavalcanti *et al.* (2009) afirmam que, normalmente, as correntes de jato fluem por uma extensão de aproximadamente 1000 km, com aproximadamente 100 km de largura e apenas 1 km aproximadamente de espessura. O cisalhamento vertical do vento é da ordem de 5-10 m/s por km e o cisalhamento lateral, de 5 m/s por 100 km.

Pezzi, Rosa e Batista (1996) realizaram um trabalho sobre a climatologia da corrente de jato sobre a América do Sul de 1985 a 1994. No trimestre de verão, o Jato Subtropical praticamente desaparece, prevalecendo o Jato Polar. No trimestre de outono, o Jato Subtropical se apresenta bem definido e em processo de intensificação. No inverno, o Jato Subtropical atinge a sua máxima intensidade sobre a América do Sul com configuração zonal ou uma suave inclinação de noroeste para sudeste. Na primavera, o Jato Subtropical começa a perder a força e o escoamento começa a apresentar uma curvatura anticiclônica em resposta ao aparecimento da Alta da Bolívia (Figura 8).

FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DA SAZONALIDADE DA CORRENTES DE JATO SUBTROPICAL E POLAR



Fonte: Cavalcanti *et al.* (2009)

### 3.7.3 Frente Fria

Lobo (2007) define uma massa de ar como uma grande quantidade de ar que cobre uma extensa região e que apresenta características de temperatura e umidade bem definidas. Como a temperatura é a principal identidade de uma massa de ar, costuma-se simplesmente caracterizar uma massa em quente ou fria. Dessa forma, a superfície que marca o encontro de duas massas com características distintas, chama-se superfície frontal.

É justamente nessa superfície onde se apresentam os fenômenos meteorológicos mais significativos, uma vez que o contraste térmico, juntamente com a umidade são os principais combustíveis para a formação de fenômenos meteorológicos severos. O autor ressalta ainda que com o deslocamento da massa fria, o ar quente, menos denso, da massa quente tende a subir, cedendo espaço ao ar frio que se sustenta próximo à superfície por apresentar maior densidade. Nesse caso, define como frente fria justamente esse movimento em que o ar frio “empurra” o ar quente; já quando ocorre o contrário, o nome clássico para o avanço do ar quente na direção do frio é uma frente quente.

Cavalcanti *et al.* (2009) acrescentam que se encontra presente neste processo como consequência do gradiente de temperatura entre as duas massas que se opõem, uma instabilidade que resultará em um cisalhamento vertical do vento horizontal.

Os autores afirmam também que a frente ou o sistema frontal é levado pela circulação geral, no hemisfério sul; nas latitudes médias, para leste, desvia-se para sudeste e finalmente para o sul. Quando as frentes frias avançam para norte (em direção ao equador), durante a

estação do verão, interagem com o ar quente e úmido tropical, produzindo convecção profunda e organizada e chuvas fortes sobre o continente, causando excessiva precipitação e inundações, deslizamentos de encostas, além de ventos fortes e granizo. Esses sistemas frontais, geralmente, posicionam-se ao longo da costa do Brasil, entre São Paulo e a Bahia na região da posição climatológica da ZCAS.

Segundo o Lobo (2007), a formação de uma frente fria se encontra associada a uma área de baixa pressão, sugerindo uma circulação ciclônica na área marcada pela junção da frente fria com a frente quente, conforme Figura 9.

**FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA ONDA FRONTAL**



Fonte: CPTEC (2018)

Oliveira, Vianello e Ferreira (2001) defendem que na região em que o ar quente substitui o frio, vai a frente quente; naquela em que o ar frio levanta o quente e o substitui, está a frente fria. Esta, mais rápida que a primeira, deverá alcançá-la, iniciando o processo de oclusão.

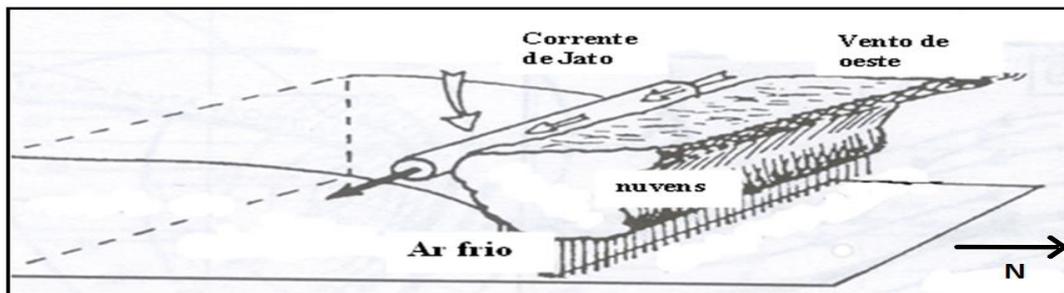
Nesse caso, dois processos podem ser gerados, segundo os mesmos autores: a oclusão de frente quente e a oclusão de frente fria. No primeiro caso, o ar frio adiante da frente quente é mais frio que o ar frio da frente fria, de modo que a frente fria que se formou rente ao solo tende a subir. A oclusão da frente fria, ao contrário, o ar frio da frente fria é mais frio que o ar frio da frente quente, de modo que a frente quente tende a se elevar. Em ambos os casos, a frente oclusa carregará características mistas das duas frentes que a compõe, havendo precipitação em ambos os lados da frente oclusa.

Há ainda, uma quarta denominação chamada de estacionária. Diz-se que quando isso ocorre, o deslocamento do sistema frontal é praticamente nulo, ou seja, os centros de pressão pós-frontal e pré-frontal, os quais impulsionam as massas de ar, apresentam resultante quase

nula, podendo perdurar por três ou quatro dias. Essa situação ocorre com bastante frequência devido ao bloqueio provocado pela ASAS (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

Vale ressaltar que, segundo Andrade (2005), quando o jato se desloca para o norte, seus movimentos são seguidos em superfície pelos sistemas de alta e baixa pressão e pelas frentes frias e quentes. Isso significa que, quando os meteorologistas conseguem prognosticar os deslocamentos dos jatos, podem também prognosticar os avanços ou recuos das frentes em superfície e, portanto, poderão prever as mudanças do tempo. A Figura 10 demonstra o posicionamento do duto de ar da corrente de jato, o qual se encontra por detrás do sistema de nuvens e por cima da superfície frontal fornecendo suporte dinâmico ao sistema.

**FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA NEBULOSIDADE ASSOCIADA A UMA FRENTE FRIA E A CORRENTE DE JATO.**



Fonte: CPTEC (2010)

### 3.7.4 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

Na busca por respostas fundamentadas, Cavalcanti *et al.* (2009) definem os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis como fenômenos meteorológicos que se originam na alta troposfera e se estendem até os níveis médios, dependendo do grau de instabilidade da atmosfera. São quase estacionários, mas podem se deslocar lentamente tanto para leste quanto para oeste, perdurando por vários dias.

Ferreira e Melo (2005) definem os VCAN como um conjunto de nuvens que, observado pelas imagens de satélite, tem a forma aproximada de um círculo girando no sentido horário. Na sua periferia há formação de nuvens causadoras de chuva e no centro há movimentos de ar de cima para baixo (subsidiência), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens.

Ferreira (2006) enfatiza que os VCAN apresentam circulação ciclônica fechada com o centro mais frio do que a periferia, sendo chamados também de baixa fria ou baixa despreendida. Ressalta também que alguns aparecem acima de 5.500 metros (500 hPa), podendo chegar a

3.000 metros (700 hPa), sendo que quanto mais profundos, mais intensos e persistentes tendem a ser.

Os VCAN podem ser classificados em vórtices do tipo Palmén ou do tipo Palmer. O primeiro tipo se origina em latitudes extratropicais e, o segundo, nos trópicos. No Brasil, os de origem tropical atuam com mais frequência entre os meses de dezembro a fevereiro, com um tempo de vida médio que varia de 4 a 11 dias. Com relação à precipitação no Nordeste do Brasil, parte experimenta nebulosidade e chuva (na periferia do sistema), e parte apresenta céu claro decorrente dos movimentos verticais subsidentes existentes no centro do VCAN (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Para uma melhor compreensão da influência desses vórtices no regime pluviométrico do NEB e parte da Região Norte do Brasil, torna-se mister ressaltar sua interação com outros dois sistemas meteorológicos atuantes na América do Sul: a Alta da Bolívia (AB) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Os autores supramencionados definem o primeiro sistema como uma circulação anticiclônica de grande escala que ocorre na troposfera superior, centrada, em média, no platô boliviano. No período de verão, a AB contribui para chuvas que ocorrem principalmente nas regiões Norte, parte do Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. No decorrer do verão, a AB se deslocando para o sul do Peru, a ZCAS configurada de forma clássica e o VCAN se inclinando para noroeste, na vizinhança do NEB; apresentam uma configuração espacial tipo “Y”, lembrando o padrão de nebulosidade típico da região nessa época do ano (Figura 11).

**FIGURA 11 - EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO ESPACIAL TIPO “Y”, FORMADA POR ZCAS, VCAN E AB**



Fonte: Moreira *et al.* (2017)

Dessa forma, Ferreira (2006) assevera que na região de transição entre a AB e o VCAN ocorre difluência (divergência) do escoamento atmosférico, com movimentos verticais ascendentes e instabilidade. Essa característica sugere que os movimentos verticais associados aos VCAN na vizinhança do NEB poderiam ser diagnosticados se levando em consideração a interação AB/VCAN.

Acrescenta ainda o autor que a intensificação dos VCAN ocorre devido à conversão de energia potencial disponível em energia cinética. Já sua dissipação normalmente acontece sobre os continentes e é causada pelo calor latente liberado pelas nuvens Cb localizadas perto do vértice do vórtice ciclônico. A maior atividade convectiva é encontrada na direção do movimento ciclônico do vórtice, mas quando se aproximam do continente, nuvens Cb podem surgir na região central do vórtice. Quando os VCAN se aproximam do NEB, vindos do oceano Atlântico, tornam o céu claro na parte central da região e fomentam a formação de nebulosidade cumuliforme nas partes oeste e norte.

Ramirez (1996) classificou o deslocamento dos vórtices em regular e irregular. Basicamente um VCAN apresentava deslocamento irregular quando estava sob influência de um cavado de latitudes médias. Os VCAN com deslocamento regular se moviam para o NEB

e em alguns casos alcançavam a costa oeste da América do Sul. Nesse caso, foi apontado como principal causador desse movimento a influência da AB.

### **3.7.5 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)**

Outro fenômeno em que as correntes de jato se encontram bastante associadas é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é conhecida como uma persistente banda de nebulosidade orientada no sentido NW/SE, associada a uma zona de convergência nos baixos níveis da troposfera, que se estende desde o sul da Amazônia ao centro do Atlântico Sul (FERREIRA, 2006).

Segundo esse autor, a dinâmica de formação da ZCAS pode estar associada à convecção sobre o continente, principalmente nos meses de verão, com a liberação de grande quantidade de calor latente. Essas zonas de convergência estão associadas à grande quantidade de precipitação, principalmente nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Acompanhando o ciclo anual de precipitação, observa-se uma das características mais marcantes do clima tropical da América do Sul durante o verão: a presença de uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o oceano Atlântico Subtropical. Segundo Cavalcanti *et al.* (2009) essa característica climatológica que se associa a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera, convencionou-se chamar de ZCAS.

Oliveira (1986) enfatiza que durante a primavera-verão do Hemisfério Sul, os sistemas frontais se posicionam preferencialmente sobre a parte central do continente sul-americano, com seu eixo no sentido NW-SE, de inclinação variável, criando uma zona de convergência de umidade que, posteriormente, foi denominada Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) defendem que a ZCAS resulta da intensificação do calor e da umidade provenientes do encontro de massas de ar quentes e úmidas da Amazônia e do Atlântico Sul na porção central do Brasil, estendendo-se da região Amazônica até a porção central do Atlântico Sul.

Estudos sobre ZCAS se debruçaram sobre características dinâmicas e termodinâmicas das bandas de nebulosidade e chuva quase estacionárias que ocorrem sobre os oceanos subtropicais em ambos os hemisférios. Kodama (1992) investigou a existência de três Zonas de Precipitação Subtropical (ZPS), sendo a ZCAS a Zona de Precipitação da América do Sul. A existência das ZPS se encontra associada a duas condições indispensáveis: o Jato Subtropical fluindo de latitudes subtropicais e fluxo de baixos níveis em direção ao polo, ao longo das periferias a oeste das altas subtropicais.

No que tange à persistência da ZCAS, o autor acrescenta que alguns fatores atuantes em escalas espaço-temporais merecem destaque. Fases quentes do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) parecem favorecer a persistência da ZCAS oceânica em mais de quatro dias. Já a persistência da fase convectiva sobre o oceano parece ser favorecida quando o Jato Subtropical se encontra deslocado em direção ao oeste do oceano Atlântico Sul.

Nogués-Paegle *et al.* (2002) afirmam que a topografia exerce grande influência em modular certas feições da circulação atmosférica na América do Sul durante o verão. Em geral, a ZCAS se localiza na sua posição mais a leste em dezembro, principalmente em associação com a alta precipitação sobre o Brasil, o escoamento de nordeste sobre a parte leste da Bolívia e a baixa precipitação sobre o Altiplano. De acordo com o autor, a topografia tende a reforçar a ZCAS, intensificar e reposicionar o máximo de precipitação, reforçando uma relação estreita entre a ZCAS e os Jatos de Baixos Níveis (JBN).

Lima, Satyamurty e Fernández (2010) enfatizaram que os Sistemas Frontais e as ZCAS são os principais sistemas meteorológicos responsáveis pela precipitação na região sudeste do Brasil. Essas duas perturbações são distintas em um aspecto: a duração. Os Sistemas Frontais geralmente são perturbações transitórias que afetam a região por um ou dois dias, enquanto que a ZCAS é um sistema quase-estacionário que permanece sobre o Sudeste do Brasil por mais de três dias em média.

Todos esses sistemas meteorológicos supramencionados, conforme pontuado pelos respectivos autores, possuem características e consequências próprias para as regiões onde atuam. No que tange ao objeto de estudo dessa pesquisa, todos esses sistemas, dentro de suas peculiaridades, propiciam cenários favoráveis a reportes de turbulência atmosférica em altitude.

### 3.8 A TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

Segundo Sharman; Doyle; Shapiro (2012), a atmosfera é um fluido em contínuo movimento impulsionado por gradientes térmicos engendrados, em larga escala, pela própria esfericidade da Terra e em uma escala menor, por superfícies heterogêneas. Dessa forma, os autores definem turbulência como um fenômeno pelo qual a atmosfera fecha seu ciclo de energia cinética, surgindo como resultado de uma complexa cadeia de eventos, sendo a resposta da atmosfera ao forçamento térmico. Turbulência atmosférica vem sendo alvo de crescentes estudos, uma vez que tem relevância e influência em diversas áreas do conhecimento como processos eólicos, aeronáuticos e da construção civil.

O termo turbulência possui várias conotações cotidianas, sendo facilmente compreendidas pelo senso comum. Segundo Mello (2015), no contexto das ciências naturais, o

fenômeno da turbulência pode ser definido sob duas concepções diferentes. A definição de cunho físico traduz a turbulência como o comportamento caótico e estranho de um fluido em movimento ao ser perturbado por alguma fonte e a turbulência de cunho aeronáutico, refere-se ao impacto do fenômeno sobre uma aeronave e os solavancos sentidos a bordo pela tripulação e passageiros.

Ainda segundo o autor, trata-se de um distúrbio atmosférico caracterizado pela mudança da direção e da velocidade do vento resultantes de variações no campo de pressão e de temperatura que ocorrem na atmosfera, interferindo diretamente no comportamento do escoamento das partículas presentes em um determinado volume de ar. Os gradientes de pressão e de temperatura favorecem deslocamento linear no fluido e quaisquer mudanças nesses gradientes alteram o escoamento de suas partículas, na qual tendem a se comportar de forma caótica, com bruscos movimentos verticais e horizontais originando a turbulência.

Souza e Oliveira (2011) citam, em um viés mais clássico, que a turbulência é um fenômeno contínuo, pois mesmo os menores vórtices transportadores de momentum, massa, calor e energia encontrados em escoamentos do tipo turbulentos, encontram-se como tipicamente muito maiores em relação à escala de comprimento molecular, caracterizando o escoamento turbulento como um movimento governado pelas equações de Navier-Stokes. Ainda nessa perspectiva, 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 à instabilidade.

Dessa forma, um elevado número de Reynolds se torna um pré-requisito para a produção da turbulência. E, segundo Lyra, Chou e Dereczynski (2007), de acordo com a Física, a turbulência se refere ao efeito dos movimentos verticais, os quais se apresentam em escalas menores quando comparado ao movimento do escoamento básico principal.

Para a definição de cunho aeronáutico, a *International Virtual Aviation Organization* (IVAIO), concebe a turbulência como uma trepidação sofrida pelas aeronaves devido ao movimento irregular no ar, podendo provocar desde um leve desconforto até acidentes graves.

A turbulência na aviação causa impacto negativo na segurança dos passageiros e da tripulação de uma aeronave, podendo provocar acidentes e incidentes. De acordo com dados verificados no CENIPA, no período de 2008 a 2017, ocorreram 1664 acidentes sobre o Brasil, sendo 6,8% destas ocorrências provocados pela meteorologia e desse percentual, 13,2% foram provocados por turbulência. A turbulência é um fenômeno de difícil previsibilidade, estudos e pesquisas relacionados a esse fenômeno são de grande importância para o ramo da aviação, pois milhares de pessoas utilizam esse meio de transporte diariamente.

Possíveis fontes de turbulência incluem sistemas convectivos, jatos, circulação superior, *wind shear*, rugosidade da superfície, orografia e esteira de turbulência de aeronaves de grande porte ou de asas rotativas. A frequência dos eventos de turbulência nas mais diversificadas áreas pode originar informação útil para o planejamento dos voos por meio da identificação dos fatores originadores e/ou contribuintes (WOLFF; SHARMAN, 2008).

### **3.8.1 Turbulência Convectiva**

Segundo a IVAO, Turbulências convectivas ou térmicas possuem uma definida característica diurna, com uma intensidade máxima durante à tarde e um mínimo no período noturno. Apesar de trovoadas, por vezes, perdurarem durante toda noite e se propagarem por uma vasta área, turbulência no período noturno tendem a perder intensidade. No que tange à sazonalidade, no inverno ela é geralmente mais suave e menos frequente, e no verão mais severa e com ocorrência bem mais amigável.

Sobre o mar ou sobre superfícies cobertas por floresta densa, a convecção não depende diretamente do aquecimento da superfície, mas, sobretudo, pelo aporte de vapor d'água do ambiente. Nesses ambientes a quantidade de calor é tão alta, que somente o calor de condensação utilizado é o suficiente para iniciar um processo convectivo bastante intenso, a partir do nível de condensação. É por isso que a turbulência, sob as bases de nuvens convectivas em ambientes de floresta ou oceânicos, não é tão intensa quanto àquelas relacionadas a nuvens formados sobre superfícies descobertas, ou melhor, sem cobertura, e de, conseqüentemente, maior aquecimento (CHEDE e CHEDE, 1979).

Segundo a WMO (2007), os processos físicos intrínsecos da convecção, por si só explicam o porquê que a convecção está associada à turbulência atmosférica. Correntes verticais dentro e em torno de nuvens convectivas são turbulentas; o desenvolvimento de Cb gera ondas de gravidade que se propagam dentro da bigorna e acima dela; correntes ascendentes termais secas e correntes descendentes associadas com precipitação ou camadas médias de ar frio exemplificam essa associação.

Com relação aos efeitos sobre uma aeronave, a turbulência convectiva resultará em um tremendo solavanco, sendo proporcional à intensidade de acordo com a seguinte categorização, de acordo com a Tabela 1:

**TABELA 1 - CATEGORIZAÇÃO DA INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA**

| <b>Tipo</b> | <b>Efeitos sobre a aeronave</b>  |
|-------------|--|
| Leve        | Efeitos menores que a categoria moderada   |
| Moderada    | Há moderadas mudanças de altitude da aeronave e/ou altura, porém a aeronave permanece controlada; mudanças no acelerômetro de 0,5 a 1 g no centro de gravidade da aeronave; e ocupantes sentem uma maior tensão nos cintos de segurança, há dificuldade em caminhar e objetos se deslocam. |
| Severa      | Mudanças abruptas de altitude/altura da aeronave. Aeronave pode perder o controle por períodos curtos  |

Fonte: Adaptado ICAO (2007)

É claro que esses efeitos irão depender da categoria da aeronave, logo, para aeronaves de menor porte, uma turbulência severa poderá acarretar danos estruturais consideráveis na aeronave. Convém pontuar que, segundo a WMO (2007), uma aeronave fora da nuvem pode ser acometida por turbulência devido às correntes ascendentes oriundas de uma célula convectiva profunda, não precisando estar dentro da nuvem para ser afetada por turbulência convectiva.

Riehl (1965) defende que no estágio de desenvolvimento de uma célula convectiva profunda, correntes ascendentes predominam em toda a massa da nuvem, oscilando de 1 a 2 m/s, perto da base da nuvem e até mais de 10 m/s junto ao seu topo.

Essas correntes ascendentes transcendem a altura do topo e os limites laterais de um Cb. Nesse caso, turbulência severa associada a essas correntes pode acometer uma aeronave que esteja próxima a essa nuvem. Segundo recomendações da ANAC contidas no relatório A-158/CENIPA/2013, procedimentos evasivos de segurança devem ser tomados pelo aeronavegante de forma que áreas suscetíveis à turbulência severa sejam evitadas. Assim, o referido manual orienta que a aeronave deve manter uma separação horizontal de cerca de 20 Milhas Náuticas (NM) e uma separação vertical de 5.000 pés acima do topo de um Cb.

### **3.8.2 Turbulência de Ar Claro**

Turbulência reportadas nos níveis de cruzeiro de uma aeronave comercial (entre 8-14km) são as que mais causam lesões a passageiros e à tripulação. Encontra-se em regiões com ausência de nuvens ou embutidas em nuvens de pouquíssima espessura, podendo estar

associadas a correntes de jato, ondas de montanha e nas proximidades de nuvens convectivas profundas (TVARYANAS, 2003).

Segundo Baas e Sherman (2005), eventos envolvendo turbulência de ar claro são um dos principais fatores contribuintes de acidentes aeronáuticos relacionados à meteorologia aeronáutica, representando cerca de 65% dos incidentes. Dessa forma, a Turbulência de Ar Claro ou *Clear Air Turbulence* (CAT) é sem dúvidas a mais hostil para a aviação e a de maior imprevisibilidade. A dificuldade na previsão e na identificação de regiões com presença de CAT está atrelada às pequenas dimensões espaciais e temporais do fenômeno, sendo classificada como um distúrbio atmosférico de microescala.

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

Segundo Wolff e Sharman (2008), CAT é geralmente encontrada na vizinhança da tropopausa, especialmente próximo de sua quebra. A WMO (1957) define a altura da tropopausa como o mais baixo nível no qual o gradiente adiabático decresce 2 Kelvin (K) ou menos a cada quilômetro.

Segundo Mello (2015), pesquisas provenientes de técnicas 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.

### **3.8.3 Magnitude da Turbulência**

No que tange à magnitude da turbulência, no setor aéreo, há duas perspectivas de mensuração: a qualitativa e a quantitativa. De acordo com Lester (1994), as qualitativas, obtidas pelos reportes AIREP's e PIREP's, ao mesmo tempo em que proporcionam uma fotografia real do cenário atmosférico encontrado pela aeronave (com informações de posição, horário, intensidade, tipo, altitude, duração e tipo de aeronave); por outro lado, apresentam o caráter subjetivo dos reportes, o qual estará vinculado à experiência e à sensibilidade do aeronavegante.

Já as medições quantitativas da intensidade do fenômeno, por não dependerem da avaliação do aeronavegante, acabam possuindo maior objetividade. Segundo o autor, as estimativas numéricas medidas são as flutuações de velocidade, as quais são definidas como a máxima variação de velocidade (sob a influência de turbulência) a partir da velocidade registrada no cenário de pré-turbulência; as rajadas derivadas, ou seja, a variação de altitude a partir da altitude padrão de voo decorrente do impacto de determinada rajada de vento na parte inferior da aeronave e a aceleração vertical, a qual é definida como o pico de desvio da aceleração normal da gravidade de 1.0 G medida no centro de gravidade da aeronave.

No que se refere aos aspectos negativos desse tipo de medição, decorrem que as medidas quantitativas são apenas um aperfeiçoamento das medidas qualitativas, uma vez que ainda não abordam, detalhadamente, o efeito do *design* da aeronave nem do perfil voador pela aeronave numa região de turbulência.

De acordo com Brasil (2017), o informe automático de aeronave contendo dados meteorológicos, *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR), classifica a severidade da turbulência relacionando, aproximadamente, valores derivados de rajadas equivalentes, do seguinte modo, conforme Tabela 2:

**TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA SEGUNDO O AMDAR**

| Valores derivados de rajadas | Classificação        |
|------------------------------|----------------------|
| Menor que 2m/s               | Turbulência          |
| Entre 2m/s e 4,5 m/s         | Turbulência Leve     |
| Entre 4,5 m/s e 9 m/s        | Turbulência Moderada |
| Maior que 9 m/s              | Turbulência Severa   |

Fonte: adaptada de Brasil (2017)

Trabalhos como de Kim e Chum (2010), os quais utilizaram dados de AIREP de turbulência, concluíram que análises sinóticas associadas a análises de cunho geográfico podem fornecer informações úteis para futuros trabalhos sobre turbulência para quaisquer regiões do mundo.

Mello (2015) cita que, a despeito de a CAT ainda não apresentar uma alta precisão quanto à localização e altitude específica de ocorrência do fenômeno, o uso de modelos numéricos do tempo, dados de reanálise e o confronto de diferentes produtos para encontrar

cenários favoráveis à ocorrência de turbulência são interessantes práticas para subsidiar o previsor em suas análises.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ABORDAGEM TEÓRICO-METODOLÓGICA

Na incansável e constante luta do Homem para se conhecer e entender o seu meio, Demo (1985) defende que o método é o instrumento do pesquisador para alcançar seus propósitos, ou seja, o “como” gerar conhecimento. Dessa forma, torna-se condição indispensável definir métodos ou as técnicas que serão aplicadas na análise espacial dos reportes de turbulência atmosférica realizados pelo transporte aéreo dentro da FIR-RE entre 2009 e 2018.

Soares (2003) cita que o método hipotético-dedutivo consiste no confronto com os fatos para verificar qual (ais) hipótese(s) resistirá (ão) aos testes. Por se tratar de coleta de dados históricos, análise sinótica dos dias em que houve eventos de turbulência e quantificação desses episódios, segundo o referido autor, a presente pesquisa tem caráter quantitativo e se enquadra em procedimentos de natureza estatística.

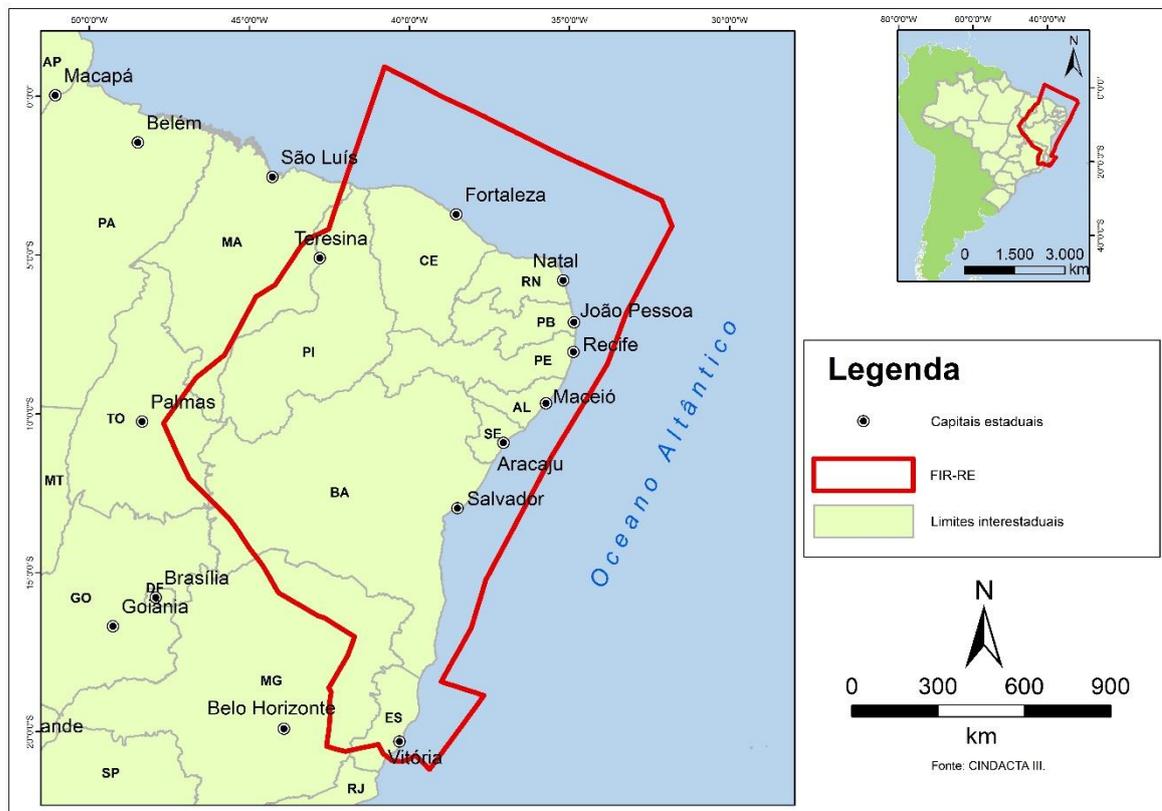
Já Marconi e Lakatos (2003) dizem que o papel do método estatístico é, antes de tudo, fornecer uma descrição quantitativa de um conjunto organizado. Quanto à estatística, pode ser considerada mais do que apenas um meio de descrição racional; é, também, um método de experimentação e prova, pois é um método de análise.

Nessa perspectiva, os dados foram tabulados utilizando o *software Microsoft Excel* 2016. Em seguida, foram importados para o *software* estatístico *IBM-SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)* versão 24, para devido tratamento analítico. Fez-se uso de estatísticas descritivas, conforme Rogerson (2012), dispostas em forma de tabela, onde foram contabilizadas as frequências e porcentagens das variáveis em estudo.

### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Dentro da área de responsabilidade do CINDACTA III, que abarca a FIR-RE e a FIR-AO, aquela foi escolhida como escopo dessa pesquisa por apresentar a maior densidade de tráfego aéreo, maior número de chamadas VOLMET e, por consequência, o maior número de reportes de turbulência, proporcionando uma maior consistência ao conjunto de dados. Seus limites podem ser visualizados na Figura 12.

FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DOS LIMITES DA FIR-RE



Fonte: CINDACTA III, organizado pelo autor (2020)

#### 4.3 COLETA DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA NA FIR-RE

Os reportes de turbulência atmosférica que ocorreram dentro da FIR-RE, entre 2009 e 2018, foram obtidos por meio da recuperação das AIREP's transmitidas, pelo aeronavegante, ao Centro Meteorológico de Vigilância de Recife, no momento em que a aeronave fora acometida por turbulência atmosférica.

Optou-se por coletar as informações de turbulência em altos níveis por meio das AIREP's, devido ao fato de ser um procedimento amplamente normatizado, democratizado pela comunidade aeronáutica e, segundo Lane (2009), um *feedback* praticamente instantâneo da condição atmosférica reinante.

Ao receber essas informações operacionais e meteorológicas, o CMV-RE retransmite essas AIREP's ao Banco Internacional de Dados Operacionais de Meteorologia (Banco OpMET), as quais permanecem armazenadas neste banco, podendo ser acessadas pelo portal da REDEMET no *link* api-redemet.

A despeito de haver uma variedade de fontes de turbulência, conforme ressalta Wolff e Sharman (2008), nesta presente pesquisa, como foram reportes de aeronaves que se

encontraram em níveis altos da atmosfera, as turbulências originadas por rugosidade da superfície e orografia, *wind shear* ou esteira de turbulência de aeronaves de grande porte ou de asas rotativas não fizeram parte dessa seleção, limitando-se, dessa forma, aos tipos convectivos ou de ar claro.

Após realizar o *download* de todas as AIREP's armazenadas dentro do período selecionado, realizou-se a tabulação, conforme Figura 13, das seguintes informações extraídas das AIREP's: ano da ocorrência, estação do ano que ocorreu o reporte, localização geográfica do reporte, intensidade da turbulência, nível de voo do reporte, a hora e a data do reporte.

**FIGURA 13 - TABULAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DAS AIREP'S**

| ANO  | ESTAÇÃO   | LOCALIZAÇÃO          | INTENSIDADE | NÍVEL DE VOO (FT) | HORA (Z) | DATA (DD/MM) |
|------|-----------|----------------------|-------------|-------------------|----------|--------------|
| 2009 | INVERNO   | S09° 30' - W037° 09' | MOD         | FL320             | 00:22    | 13.07        |
| 2009 | INVERNO   | S11° 00' - W044° 09' | MOD         | FL360             | 22:10    | 13.07        |
| 2009 | INVERNO   | S10° 00' - W037° 57' | MOD         | FL370             | 00:00    | 13.08        |
| 2009 | INVERNO   | S12° 54' - W038° 19' | MOD         | FL280             | 13:40    | 21.07        |
| 2009 | INVERNO   | S10° 58' - W037° 04' | MOD         | FL310             | 14:23    | 21.07        |
| 2009 | INVERNO   | S10° 58' - W037° 04' | MOD         | FL350             | 16:38    | 21.07        |
| 2009 | PRIMAVERA | S07° 35' - W038° 27' | MOD         | FL340             | 09:35    | 21.11        |
| 2009 | PRIMAVERA | S13° 09' - W039° 06' | MOD         | FL370             | 22:11    | 21.11        |
| 2009 | VERÃO     | S13° 15' - W043° 24' | MOD         | FL380             | 16:26    | 23.12        |
|      |           |                      |             |                   |          |              |
| 2010 | VERÃO     | S15° 37' - W044° 05' | MOD         | FL380             | 07:17    | 07.01        |
| 2010 | VERÃO     | S13° 38' - W040° 42' | MOD         | FL330             | 01:03    | 08.01        |
| 2010 | VERÃO     | S09° 14' - W036° 41' | MOD         | FL310             | 06:00    | 26.02        |
| 2010 | OUTONO    | S09° 14' - W036° 41' | MOD         | FL300             | 18:30    | 19.05        |
| 2010 | OUTONO    | S11° 48' - W037° 36' | SEV         | FL340             | 07:02    | 23.05        |
| 2010 | OUTONO    | S10° 59' - W037° 04' | SEV         | FL320             | 09:10    | 23.05        |
| 2010 | INVERNO   | S16° 30' - W041° 21' | MOD         | FL330             | 12:45    | 03.08        |
| 2010 | INVERNO   | S11° 32' - W040° 11' | MOD         | FL340             | 06:43    | 07.08        |
| 2010 | INVERNO   | S09° 30' - W037° 08' | MOD         | FL320             | 17:41    | 17.08        |
| 2010 | INVERNO   | S11° 23' - W044° 08' | MOD         | FL340             | 10:41    | 22.08        |
| 2010 | INVERNO   | S10° 12' - W041° 27' | MOD         | FL360             | 10:25    | 22.08        |
| 2010 | INVERNO   | S10° 59' - W037° 04' | MOD         | FL360             | 19:35    | 22.08        |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Optou-se por esse período decadal (2009 a 2018), devido à falta de representatividade das AIREP's, disponíveis no Banco OpMET, anteriores a 2009. Muito provavelmente, não havia uma cultura organizacional e controles operacionais bem sedimentados que garantissem a adequada efetividade deste processo envolvendo a coleta dos reportes dos aeronavegantes e o envio dessas informações operacionais e meteorológicas ao Banco OpMET.

### 4.3.1 Seleção dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE

Pode-se classificar o grau da intensidade da turbulência atmosférica em leve, moderada ou severa a partir de seu índice de severidade (WMO, 1969). Por uma questão de relevância operacional, foram desconsiderados os reportes com turbulência de intensidade leve, sendo tabulados apenas os de intensidade moderada e severa.

Turbulência moderada causa desconforto para a tripulação e para os passageiros, e procedimentos de segurança são adotados como, por exemplo, a suspensão do serviço de bordo e avisos de atar cintos são reforçados. Porém, com essa intensidade, as operações aéreas de controle de tráfego continuam, em princípio, sem sofrerem impactos significativos, sendo no máximo solicitado pelo aeronavegante uma mudança no nível de voo para os casos de eventos mais persistentes.

Já as ocorrências severas, além dos procedimentos de segurança já mencionados para os casos de reportes de turbulência moderada, há impactos operacionais significativos, sendo o mais relevante a suspensão do espaço RVSM (BRASIL, 2018c). Oliveira, Vianello e Ferreira (2001) reforçam a seleção por reportes moderados e severos ao afirmarem que, principalmente, as turbulências severas comprometem a missão e a segurança das aeronaves.

Com isso, dependendo da densidade do tráfego com previsão de adentrar àquele volume do espaço aéreo que apresenta restrição RVSM, impactos no fluxo podem ser gerados. Para esse caso, menos aeronaves poderão ocupar o mesmo volume, logo, um retardo no fluxo normal poderá causar congestionamento nas terminais de maior fluxo e inevitáveis atrasos, em cadeia, nos procedimentos de pouso e de decolagem.

No processo de tabulação, duas informações não foram extraídas diretamente das AIREP's: a localização geográfica e a estação do reporte. Para esta, como se tem a data, a estação é facilmente identificada. Já para aquela, o reporte do aeronavegante geralmente envolve um *waypoint*<sup>1</sup>, ou a distância da aeronave para esses fixos. Logo, como esses

*waypoints* possuem localização geográfica definida, foi utilizada a ferramenta de planejamento de voo *SkyVector Aeronautical Charts*, em meio digital, para se identificar a posição geográfica de cada reporte, conforme demonstrado na terceira coluna da Figura 13 (BRASIL, 2018c).

---

<sup>1</sup> Ponto de notificação ou fixo em rotas ou procedimentos baseados em sistemas de navegação de área (BRASIL, 2018c).

#### 4.4 ANÁLISE ESPACIAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA NA FIR-RE

**4.4.1 Identificação da distribuição espacial e do perfil geral de concentração dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE.** De posse da localização geográfica exata de cada reporte e das coordenadas limítrofes da FIR-RE, as quais foram fornecidas pelo CINDACTA III, utilizou-se o software ArcGIS, versão 10.3 para iniciar a análise espacial desses reportes

Para que suas respectivas coordenadas geográficas pudessem ser inseridas no ArcGIS 10.3, foram realizadas conversões para o formato vetorial *shapefile* (.shp), de natureza pontual. Inicialmente, fez-se a reprojeção dos dados, originalmente no *datum* WGS 1984, para o *datum* SIRGAS 2000, sistema de coordenadas geográficas.

Após todas as edições cabíveis, aplicaram-se diferentes variáveis de classificação, conforme as necessidades, para a execução da presente pesquisa. Os dados resultantes desta etapa foram organizados no gerenciador de *layouts* do ArcGIS 10.3, onde se procedeu à exportação dos produtos cartográficos finais.

No primeiro mapeamento, buscou-se agregar em um mesmo mapa todos os 292 reportes com intensidade moderada e severa selecionados durante 2009 e 2018, englobando todos os níveis de voo reportados, com a finalidade de se ter um perfil geral da distribuição espacial e de concentração desses reportes.

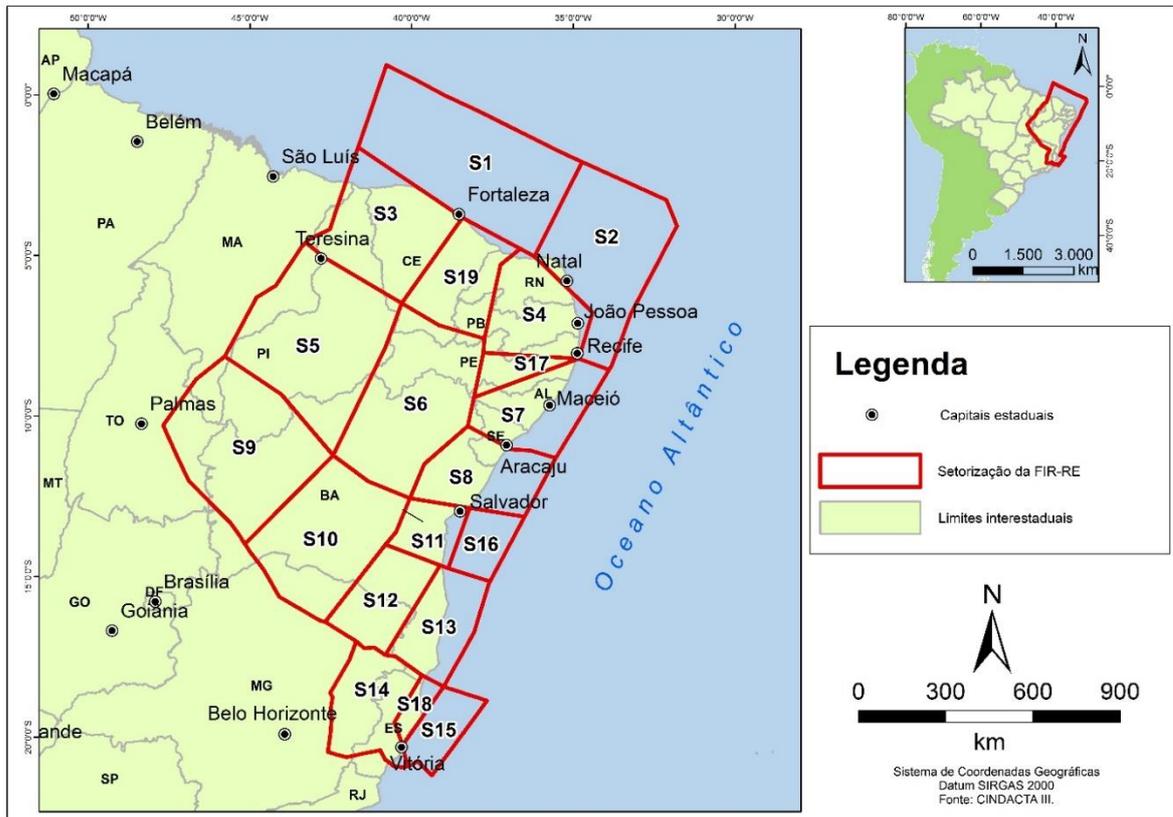
Após a identificação desses perfis gerais, obteve-se, junto ao CINDACTA III, as coordenadas geográficas de cada setor da FIR-RE, as quais estavam georreferenciadas no sistema geodésico de referência WGS 1984. Dessa forma, conforme Figura 14, os dados foram plotados em ambiente SIG e reprojatados para o datum SIRGAS 2000, para que, em seguida, fossem confeccionados os mapas de espacialização dos reportes de turbulência e demais variáveis pertinentes dentro desta grade de setorização.

Com essa setorização, buscou-se uma forma de melhor visualizar a distribuição espacial dos reportes, assim com a verificação das maiores concentrações. Além disso, foi possível identificar as aerovias com maiores números de reportes dentro de cada setor.

Os dados vetoriais dessas aerovias foram adquiridos junto à ferramenta de planejamento de voo *SkyVector Aeronautical Charts*. Os dados em formato *shapefile* (.shp) estavam originalmente no sistema de coordenadas geográficas, datum WGS 1984, sendo reprojatados para o datum SIRGAS 2000. Após isso, as aerovias foram plotadas em ambiente SIG (ArcGIS 10.3), onde se procedeu com a sobreposição destas com os limites dos setores da FIR-RE e

com as ocorrências de reportes de turbulência mapeadas. Com o término das análises pertinentes, elaborou-se os produtos cartográficos finais no editor de layout de mapas do ArcGIS 10.3.

**FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO SETORIZADA DA FIR-RE**



Fonte: CINDACTA III, produzido pelo autor (2020)

#### 4.4.2 Identificação do perfil sazonal de concentração dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE

Após isso, procedeu-se à identificação do comportamento dessa nuvem de pontos em cada estação do ano, ou seja, o perfil sazonal desses reportes. De acordo com a data de cada reporte, foram construídos cinco mapas, todos sobrepostos com a grade de setores da FIR-RE. O primeiro com a plotagem de todos os 292 reportes com suas sazonalidades distinguidas por cores e os outros quatro mapas com os reportes específicos de cada estação do ano, de forma a melhor visualizar as nuances sazonais da nuvem de reportes. A escolha por analisar o comportamento sazonal desses reportes se encontra calcada na possibilidade de se encontrar variações que sejam compatíveis com o comportamento climatológico dos sistemas meteorológicos que atuam direta e indiretamente no NEB.

Nessa perspectiva, Cavalcanti *et al.* (2009) reforçam a importância dessa análise, uma vez que a região Nordeste do Brasil possui uma diversidade de sistemas meteorológicos cada qual com sua peculiar faixa de atuação e sazonalidade, os quais influenciam, de diferentes formas e espaços, as condições de tempo durante todo o ano.

Pelo fato de o período de estudo não ter sido mais amplo, de forma a permitir mais respostas sobre esse comportamento sazonal, optou-se, de forma mais pormenorizada, por avaliar as vicissitudes sazonais desses reportes de turbulência focalizando nos setores de FIR que mais foram impactados pelos reportes, porém sem deixar de analisar as características mais gerais de distribuição espacial dessa nuvem de pontos.

#### **4.4.3 Verificação dos sistemas meteorológicos presentes nos dias de reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE**

Após a identificação do perfil geral e sazonal dos reportes, foi realizada uma nova seleção dos reportes de turbulência, desta vez com filtro no parâmetro nível de voo em que os reportes ocorreram. Com isso, o conjunto de dados analisados, a partir desta etapa, passou a apresentar uma totalidade de 86 eventos.

Esse filtro se tornou necessário pois cada evento de turbulência foi analisado tendo como ferramentas de referência, para as análises dos sistemas meteorológicos em superfície e em altitude, as Cartas Sinóticas de Superfície e de Altitude do CPTEC/INPE, as quais retratam, respectivamente, as condições reinantes em superfície e as linhas de corrente no nível de pressão de 250 hectopascals (hPa) - aproximadamente 34.000 pés ou no Flight Level 340 (FL340).

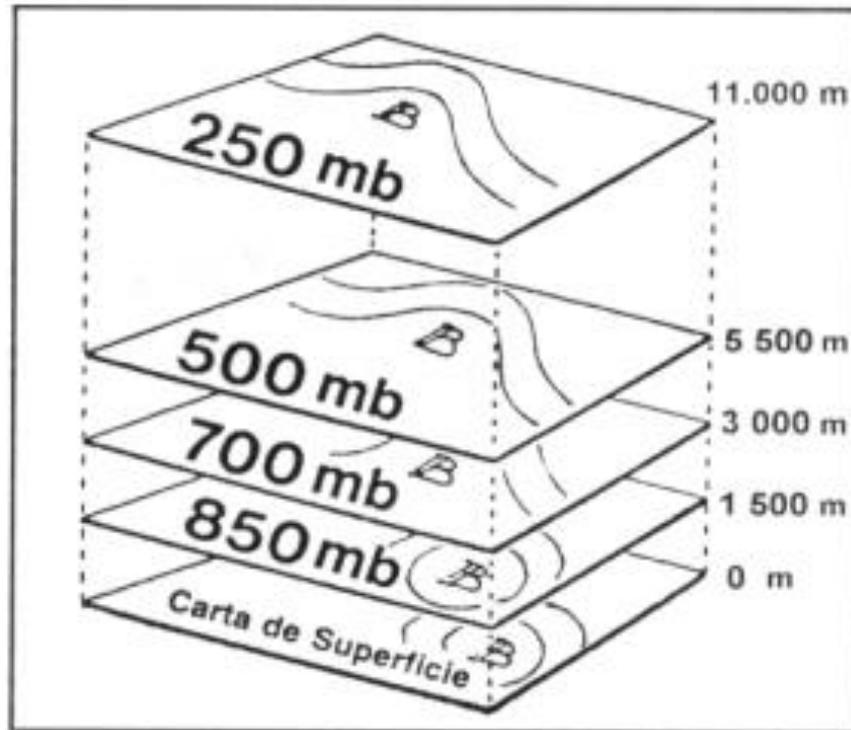
Ratificando a opção por essa ferramenta de análise do ar superior, Varejão-Silva (2001) assevera que Cartas Sinóticas são eficientes para se acompanhar a evolução dos sistemas atmosféricos que condicionam o estado termodinâmico da atmosfera, assim como a identificação desses sistemas, tendo como peculiar característica o fato de os dados utilizados serem coletados simultaneamente, ou seja, possuírem natureza sinótica.

O autor acrescenta que as Cartas Sinóticas de Altitude são mapas meteorológicos para distintos níveis da atmosfera (entre os 1.500 e os 12.000 metros), sendo muito úteis para se identificar sistemas meteorológicos em altitude. Para sua elaboração, são utilizados dados de temperatura, umidade e vento fornecidos pelas Radiossondas, que são balões (com especiais instrumentos meteorológicos) lançados em distintos pontos do país ou por aeronaves em voo.

A Figura 15 mostra uma representação esquemática das Cartas Sinóticas de Altitude, indicando a altura aproximada de cada nível de pressão. Por exemplo, a carta de 500 hPa ou

500 milibares (mb) representa a circulação dos ventos numa altura aproximada de 5.500 metros. Também se pode deduzir que a 5.500 metros de altura a pressão aproximada é de 500 hPa, que a 11.000 metros é de 250 hPa e assim por diante.

**FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CARTAS SINÓTICAS DE ALTITUDE**



Fonte: Varejão-Silva (2001)

Buscando uma melhor otimização no que se refere à representatividade e à fidedignidade do conjunto de dados, optou-se por seleccionar os reportes de intensidades moderada e severa que ocorreram entre 33.000 pés (FL330) e 35.000 pés (FL350), tendo como referência o nível de 250 hPa ou 34.000 pés (FL340).

Após essa filtragem dos níveis de voo, foram seleccionadas as Cartas Sinóticas de Superfície e de Altitude do dia do reporte e da hora mais próxima que a aeronotificação ocorreu (essas cartas são confeccionadas a cada 6 horas, sendo disponibilizadas quatro cartas diárias nos seguintes horários UTC<sup>2</sup> (0000, 0600, 1200 e 1800) de forma a conhecer e tabular os

<sup>2</sup> UTC – *Coordinate Universal Time* - É uma escala de tempo coordenado, mantida pela Agência Internacional de Pesos e Medidas e utilizada como padrão de “hora certa” no controle de tráfego aéreo e serviços de meteorologia aeronáutica. O UTC substitui o GMT (*Greenwich Meridian Time*) ou Z (Zulu), que é baseado na hora local de Greenwich, Inglaterra. Pode ser considerado equivalente ao GMT sempre que não forem importantes as frações de segundo (BRASIL,2010).

principais sistemas meteorológicos que atuaram, em superfície e em altitude, nos dias dos reportes. Vale ressaltar que essas Cartas foram acessadas por meio do banco de dados do CPTEC.

#### 4.4.4 Verificação dos cenários meteorológicos relacionados aos dias de reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE

Com os sistemas meteorológicos em superfície e em altitude tabulados e identificados, buscou-se relacioná-los e encontrar os cenários meteorológicos mais predominantes nos dias de reportes.

Para cada reporte foram tabulados esses sistemas meteorológicos, conforme Figura 16. A relação encontrada entre superfície e altitude, na presente pesquisa, chamou-se de cenário meteorológico, ou seja, a composição do principal sistema meteorológico identificado à superfície com o principal sistema meteorológico identificado em altitude.

**FIGURA 16 -TABULAÇÃO DOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS À SUPERFÍCIE E EM ALTITUDE**

| ESTAÇÃO   | INTENSIDADE TURB | ANO  | DATA (DD/MM) | SISTEMAS METEOROLÓGICOS À SUPERFÍCIE               | SISTEMAS METEOROLÓGICOS EM ALTITUDE   |
|-----------|------------------|------|--------------|--|---------------------------------------|
| INVERNO   | MOD              | 2009 | 21.07        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| PRIMAVERA | MOD              | 2009 | 21.11        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | VCAN                                  |
| VERÃO     | MOD              | 2010 | 08.01        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | VCAN                                  |
| OUTONO    | SEV              | 2010 | 23.05        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 03.08        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | VCAN                                  |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 07.08        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 22.08        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 01.09        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 03.09        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 03.09        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| PRIMAVERA | MOD              | 2010 | 15.10        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 12.04        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | VCAN                                  |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 29.05        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 29.05        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 02.06        | ASAS   | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 03.06        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 05.06        | SISTEMA FRONTAL TRANSIENTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |
| INVERNO   | MOD              | 2011 | 25.07        | ASAS   | CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Foram selecionadas três categorias de sistemas meteorológicos à superfície que mais predominaram (“Sistema Frontal transiente no Oceano Atlântico Sul”, “ZCAS” e “ASAS”) e uma quarta “OUTROS”, representando todos os outros sistemas encontrados de menor representatividade. Em altitude, foram selecionadas duas categorias de maior incidência: “Cavados embebidos no Jato Subtropical”, “VCAN” e uma terceira “OUTROS”, representando os outros sistemas encontrados com menor representatividade.

Após isso, optou-se também por realizar uma relação de sazonalidade, envolvendo esses cenários e as estações do ano que eles mais ocorreram, utilizando a estatística descritiva e uma distribuição bivariada das variáveis envolvidas por meio de tabelas.

#### **4.4.5 Identificação dos posicionamentos e dos pontos críticos dos sistemas meteorológicos em altitude que estiveram diretamente relacionados aos reportes**

Para se analisar o posicionamento e os pontos críticos dos sistemas meteorológicos em altitude que estiveram diretamente ligados ao reporte, foram utilizadas as Cartas Sinóticas de Altitude do CPTEC/INPE.

Para o posicionamento dos sistemas meteorológicos em altitude foram adotadas categorias mais gerais, sem preocupação com exatidão, de fácil visualização nas Cartas Sinóticas de Altitude, de acordo com a predominância encontrada nas ocorrências dos sistemas analisados e corroboradas pelos pesquisadores desses sistemas.

Os Cavados embebidos no Jato Subtropical e os VCAN foram os sistemas em altitude mais presentes e, por isso, os analisados quanto ao posicionamento e quanto aos seus pontos críticos. Com relação ao posicionamento dos cavados, duas categorias foram adotadas: “Cavado embebido no Jato Subtropical sobre o Espírito Santo” e “Cavado embebido no Jato Subtropical sobre a Bahia”.

Hastenrath (1991) ratifica essas escolhas ao afirmar que o Jato Subtropical, normalmente, encontra-se entre as latitudes de 20°S e 35°S e atua entre os níveis de 300 e 200 hPa. O autor reforça que essas correntes são semipermanentes e sua marcha para as latitudes mais baixas podem apresentar variações de acordo com condicionantes de mesoescala e escala sinótica.

Para a localização dos VCAN, optou-se também por duas categorias: “VCAN: Oceano Atlântico acima de Salvador” (localizado sobre a área oceânica acima de 13° S) e “VCAN: Oceano Atlântico abaixo de Salvador” (localizado sobre a área oceânica abaixo de 13° S). Ferreira (2006), respalda a escolha por essas categorias ao defender que VCAN normalmente se originam no Oceano Atlântico.

Uma outra análise que a pesquisa se propôs foi a identificação de pontos críticos dos sistemas diretamente ligados aos reportes, ou seja, os pontos de cada sistema onde os reportes exatamente ocorreram. Nesse caso, os Cavados embebidos no Jato Subtropical e os VCAN também foram os sistemas analisados.

Para essa identificação, buscou-se duas categorizações para cada sistema, ou seja, para os Cavados: “Final do ramo ascendente do cavado embebido no Jato Subtropical”, representando o início da circulação ciclônica do cavado – antes do seu eixo e “início do ramo descendente do cavado embebido no Jato Subtropical”, representando o final da circulação ciclônica – após o seu eixo. Essas tabulações contendo essas categorizações podem ser visualizadas na Figura 17.

**FIGURA 17 - TABULAÇÃO DO POSICIONAMENTO E DOS PONTOS CRÍTICOS DOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS EM ALTITUDE**

| ANO  | DATA (DD/MM) | POSIÇÃO GEOGRÁFICA   | LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA METEOROLÓGICO EM ALTITUDE           | PONTOS CRÍTICOS   |
|------|--------------|----------------------|--|---|
| 2009 | 21.07        | S10° 58' - W037° 04' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2009 | 21.11        | S07° 35' - W038° 27' | VCAN: OCEANO ATLÂNTICO ACIMA DE SALVADOR                   | BORDA OESTE DO VCAN   |
| 2010 | 08.01        | S13° 38' - W040° 42' | VCAN: OCEANO ATLÂNTICO ACIMA DE SALVADOR                   | BORDA OESTE DO VCAN   |
| 2010 | 23.05        | S11° 48' - W037° 36' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE A BAHIA          | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2010 | 07.08        | S16° 30' - W041° 21' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2010 | 22.08        | S11° 32' - W040° 11' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2010 | 01.09        | S11° 23' - W044° 08' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2010 | 03.09        | S10° 00' - W037° 57' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2010 | 03.09        | S09° 21' - W040° 33' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2010 | 15.10        | S10° 16' - W038° 23' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2011 | 12.04        | S09° 49' - W037° 37' | VCAN: OCEANO ATLÂNTICO ACIMA DE SALVADOR                   | BORDA OESTE DO VCAN   |
| 2011 | 29.05        | S03° 46' - W038° 32' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2011 | 29.05        | S13° 51' - W041° 24' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2011 | 02.06        | S13° 50' - W041° 23' | OUTROS   | OUTROS  |
| 2011 | 03.06        | S11° 44' - W045° 59' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2011 | 05.06        | S14° 48' - W039° 02' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |
| 2011 | 25.07        | S11° 22' - W040° 11' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO | OUTROS  |
| 2011 | 20.11        | S14° 57' - W045° 12' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE A BAHIA          | OUTROS  |
| 2011 | 20.11        | S14° 28' - W043° 30' | CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL SOBRE A BAHIA          | FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Para os VCAN, foram adotadas as seguintes categorias: “Borda oeste do VCAN” - lado oeste do corte latitudinal que passa pelo seu centro e “Borda Este do VCAN” - lado este do corte latitudinal que passa pelo seu centro.

Para a identificação dos pontos críticos de cada um desses sistemas, como houve necessidade de uma maior precisão do que a fornecida pela grade fornecida pelo CPTEC, as Cartas Sinóticas de Altitude foram georreferenciadas em ambiente SIG, conjunto de ferramentas *georeferencing*, no *software* ArcGIS 10.3. Inicialmente no datum de referência WGS 1984, os dados foram reprojatados para o datum SIRGAS 2000 e, em seguida, foram plotados os reportes de turbulência selecionados a fim de se fazer as análises espaciais pertinentes.

Dessa forma, conseguiu-se obter a localização exata do reporte e, conseqüentemente, identificar e quantificar, dentro de cada sistema, as áreas mais suscetíveis a reportes de turbulência atmosférica. Após isso, foram tabulados os pontos críticos dos sistemas meteorológicos em altitude encontrados, juntamente com suas localizações, de forma a facilitar as relações futuras de sazonalidade, utilizando a estatística descritiva e uma distribuição bivariada das variáveis envolvidas por meio de tabelas.

Foram utilizados ainda, para exemplificar os pontos críticos relacionados aos cavados embebidos no Jato Subtropical, ilustrações do *COMET Program* da *University Corporation for Atmospheric Research's* (UCAR) que se propõe a promover o entendimento da meteorologia de mesoescala entre os profissionais que trabalham com a previsão do tempo.

#### 4.4.6 Verificação dos tipos de turbulência atmosférica ocorridos na FIR-RE

E a última análise realizada envolveu a categorização dos tipos das turbulências em: “Convectiva e “Ar Claro”. Para aquela, classificou-se assim os reportes que ocorreram em regiões sob influência de nebulosidade convectiva profunda (Cb e *Towering Cumulus* - TCU) e para esta, quando não fora detectado nenhuma presença, próxima ao reporte, de nebulosidade de tal natureza.

Essa categorização encontra respaldo no que assevera a IVAO, onde turbulência convectiva ou térmica são aquelas formadas por correntes convectivas alternadas as quais fazem com que a aeronave suba e desça, podendo ser facilmente observada por meio da formação de nuvens Cumuliformes.

Pelo fato de se ter selecionado uma espessura da atmosfera entre 33.000 e 35.000 pés para as análises, conforme Atlas 2019, a essa altura, preponderam nuvens de aspecto Cirriformes, ou seja, nuvens compostas, principalmente, por cristais de gelo dispersos com relativa transparência e que dão origem a halos. O aspecto Cirriforme inclui as nuvens Cirrus, Cirrocumulus e Cirrostratus, sendo considerado nesta pesquisa como um cenário de ar claro (WMO, 2007).

Para cada evento, foram selecionadas as imagens de satélite do CPTEC/INPE, do canal de vapor d’água e infravermelho, da data do reporte e do horário mais próximo da aeronotificação, de forma a se ter a melhor análise e interpretação do cenário meteorológico presente. De acordo com Ferreira (2006), a metodologia de se utilizar imagens de satélite do canal de vapor d’água para a identificação de células convectivas profundas (TCU e/ou Cb) são bastante eficientes.

O autor reforça também que a presença de jatos pode ser facilmente detectada nas imagens de satélite. As bandas de Cirrus aparecem normalmente paralela aos ventos fortes da corrente de jato e também por meio de faixas transversais à direção do jato, apresentando, por vezes, aspecto estriado, denotando presença de turbulência de ar claro.

Assim como as análises anteriores, por meio da tabulação dos tipos encontrados assim como da estação em que ocorreram, conforme Figura 18, pôde-se conhecer a sazonalidade dos tipos das turbulências reportadas, utilizando estatística descritiva das variáveis envolvidas por meio de gráfico.

**FIGURA 18 - TABULAÇÃO DOS TIPOS DAS TURBULÊNCIAS**

| ESTAÇÃO   | INTENSIDADE TURB | ANO  | DATA (DD/MM) | TURBULÊNCIA CONVECTIVA | TURBULÊNCIA DE AR CLARO |
|-----------|------------------|------|--------------|------------------------|-------------------------|
| INVERNO   | MOD              | 2009 | 21.07        |                        | X                       |
| PRIMAVERA | MOD              | 2009 | 21.11        |                        | X                       |
| VERÃO     | MOD              | 2010 | 08.01        |                        | X                       |
| OUTONO    | SEV              | 2010 | 23.05        |                        | X                       |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 07.08        |                        | X                       |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 22.08        |                        | X                       |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 01.09        |                        | X                       |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 03.09        |                        | X                       |
| INVERNO   | MOD              | 2010 | 03.09        |                        | X                       |
| PRIMAVERA | MOD              | 2010 | 15.10        |                        | X                       |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 12.04        | X                      |                         |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 29.05        |                        | X                       |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 29.05        |                        | X                       |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 02.06        |                        | X                       |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 03.06        |                        | X                       |
| OUTONO    | MOD              | 2011 | 05.06        |                        | X                       |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Após as análises espaciais dos reportes, optou-se por exemplificar os resultados obtidos. Para também ressaltar a importância e a pertinência das ocorrências de turbulência, na prática, para o gerenciamento e o controle do tráfego aéreo, selecionou-se um dia em que o espaço aéreo RVSM foi suspenso na FIR-RE, devido a sucessivos reportes de turbulência de intensidade moderada e severa na faixa leste e sul do estado da Bahia. Assim, buscou-se realizar um estudo de caso de forma a entender o contexto sinótico reinante e os principais fatores meteorológicos que contribuíram para que medidas de gerenciamento do tráfego aéreo fossem tomadas para se garantir a segurança das operações aéreas no estado da Bahia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PERFIL ESPACIAL DAS TURBULÊNCIAS ATMOSFÉRICAS REPORTADAS NA FIR-RE

A despeito de muitos reportes terem apresentado coordenadas geográficas muito próximas umas das outras, o que ocultou a visualização de alguns reportes, pode-se facilmente identificar, conforme representado na Figura 19, que as maiores concentrações ocorreram dentro do estado da Bahia.

Nesse escopo, quatro trechos chamam a atenção pela densidade de reportes e pelas características espaciais: a parte sul da FIR-RE (divisa entre os estados do Espírito Santo e de Minas Gerais), passando pelo litoral sul da Bahia indo até Salvador; a parte centro-sul da Bahia,

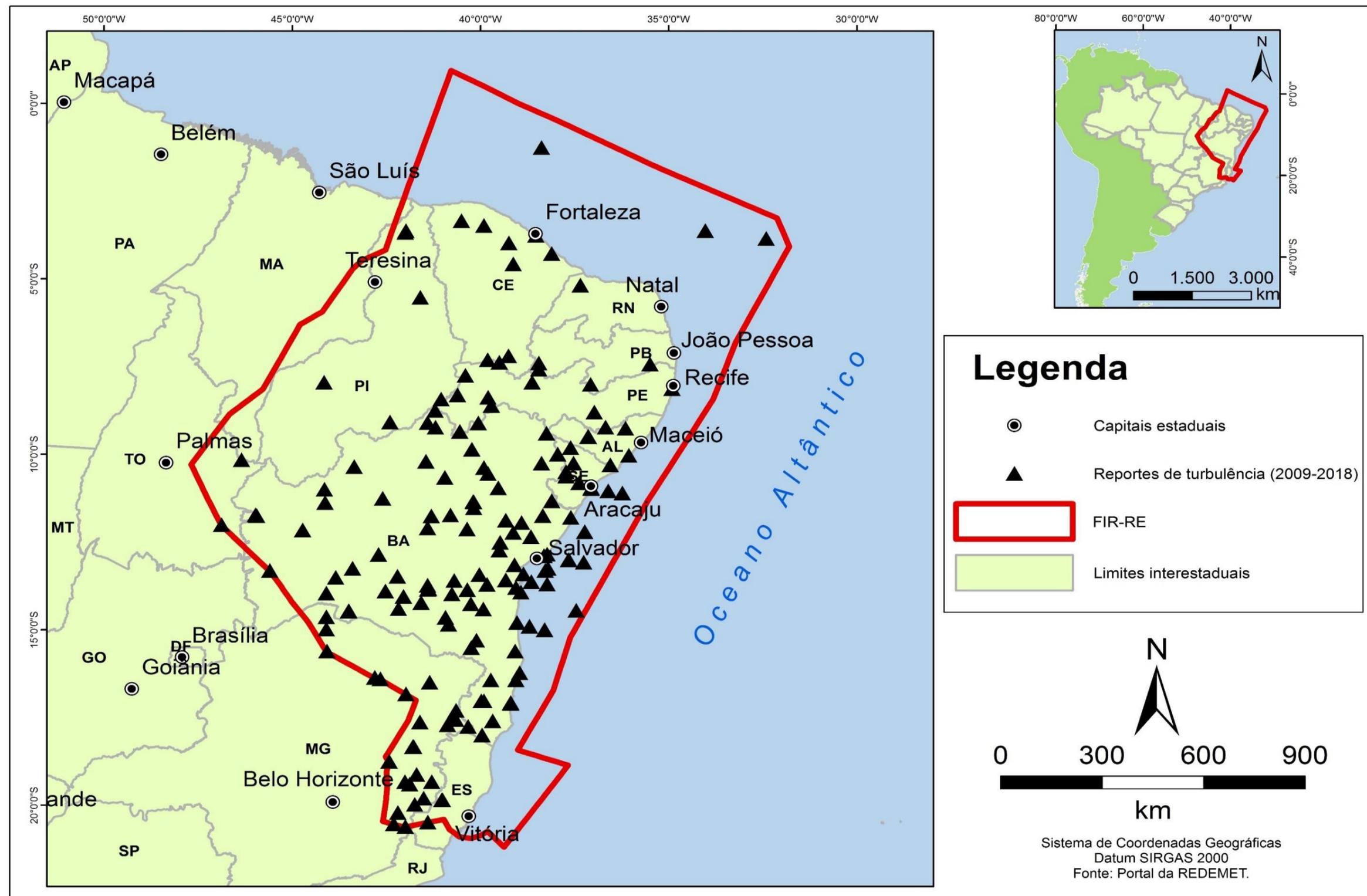
trecho quase retilíneo entre Brasília e Salvador; a parte centro-norte da Bahia, abarcando o trecho que liga Salvador a Teresina-PI e a parte nordeste da Bahia que vai de Salvador, passa por Sergipe e vai até o interior de Alagoas.

Sobre as maiores concentrações e suas localizações, preliminarmente, pode-se conceber que, pelo fato de a Bahia ser o maior estado do Nordeste, há uma maior probabilidade dos reportes ocorrerem dentro desse estado. E os trechos supramencionados podem ser interpretados como rotas mais voadas, em virtude de Salvador ser um dos principais nós da malha aérea do NEB.

Porém, convém pontuar que, na malha aérea do NEB, segundo Infraero (2018), os maiores movimentos aéreos se encontram em Salvador, Recife e Fortaleza. Se esse raciocínio de que as maiores concentrações de reportes estariam nos trechos mais voados, a nuvem de pontos deveria se estender até mais próximo de Recife e de Fortaleza, o que não fica evidente.

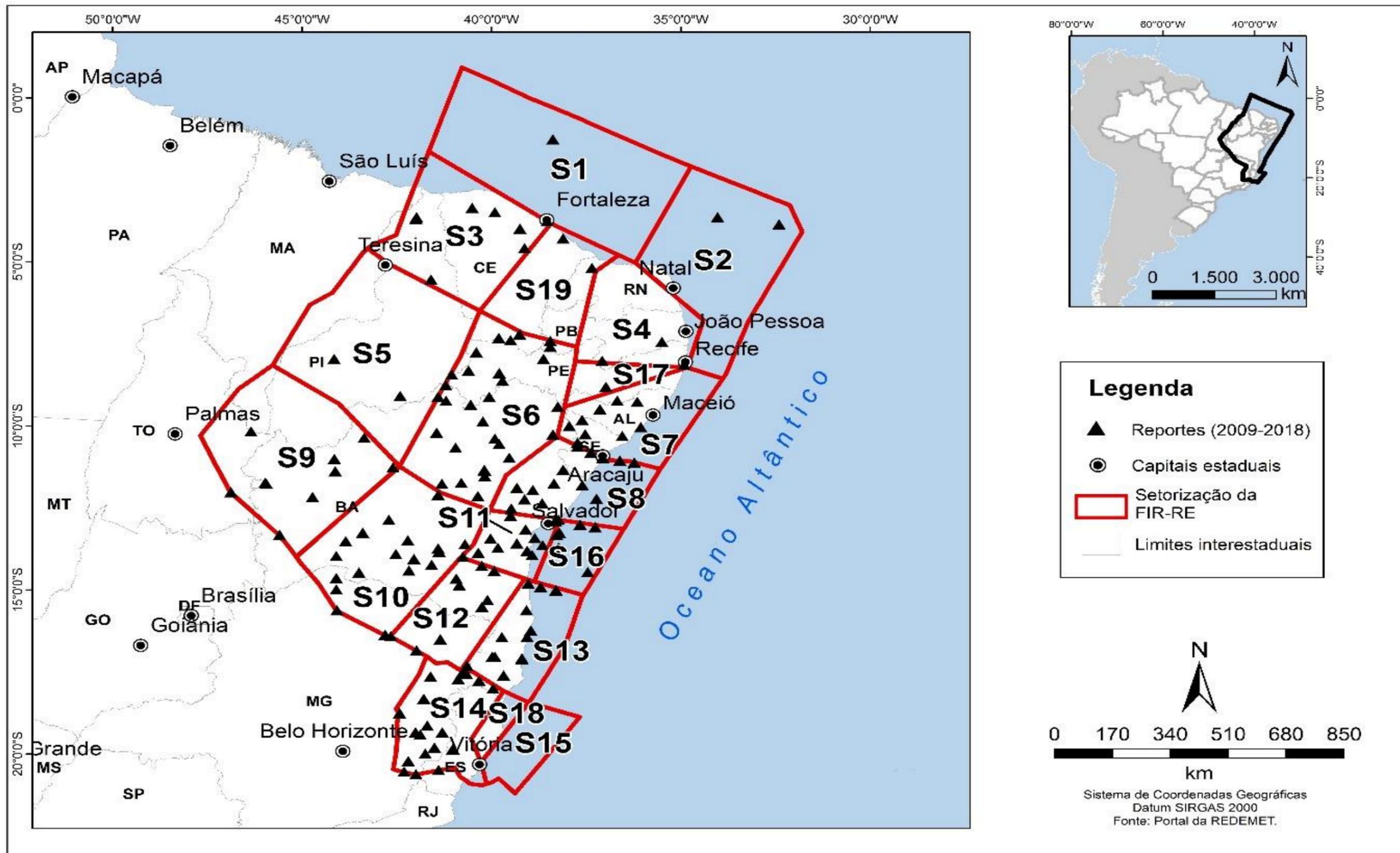
Outro ponto interessante se refere ao trecho entre Salvador e Teresina. Observa-se que a densidade mais significativa de reportes não avança para o estado do Piauí, restringindo-se ao estado da Bahia. Dessa forma, observa-se que o estado da Bahia apresenta destacada e peculiar concentração de reportes e que nos outros estados, inclusive os que possuem importantes nós, como o Ceará e Pernambuco, a nuvem de reportes se apresenta mais isolada e com densidade diminuta.

FIGURA 19 - PLOTAGEM DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NA FIR-RE ENTRE 2009 E 2018



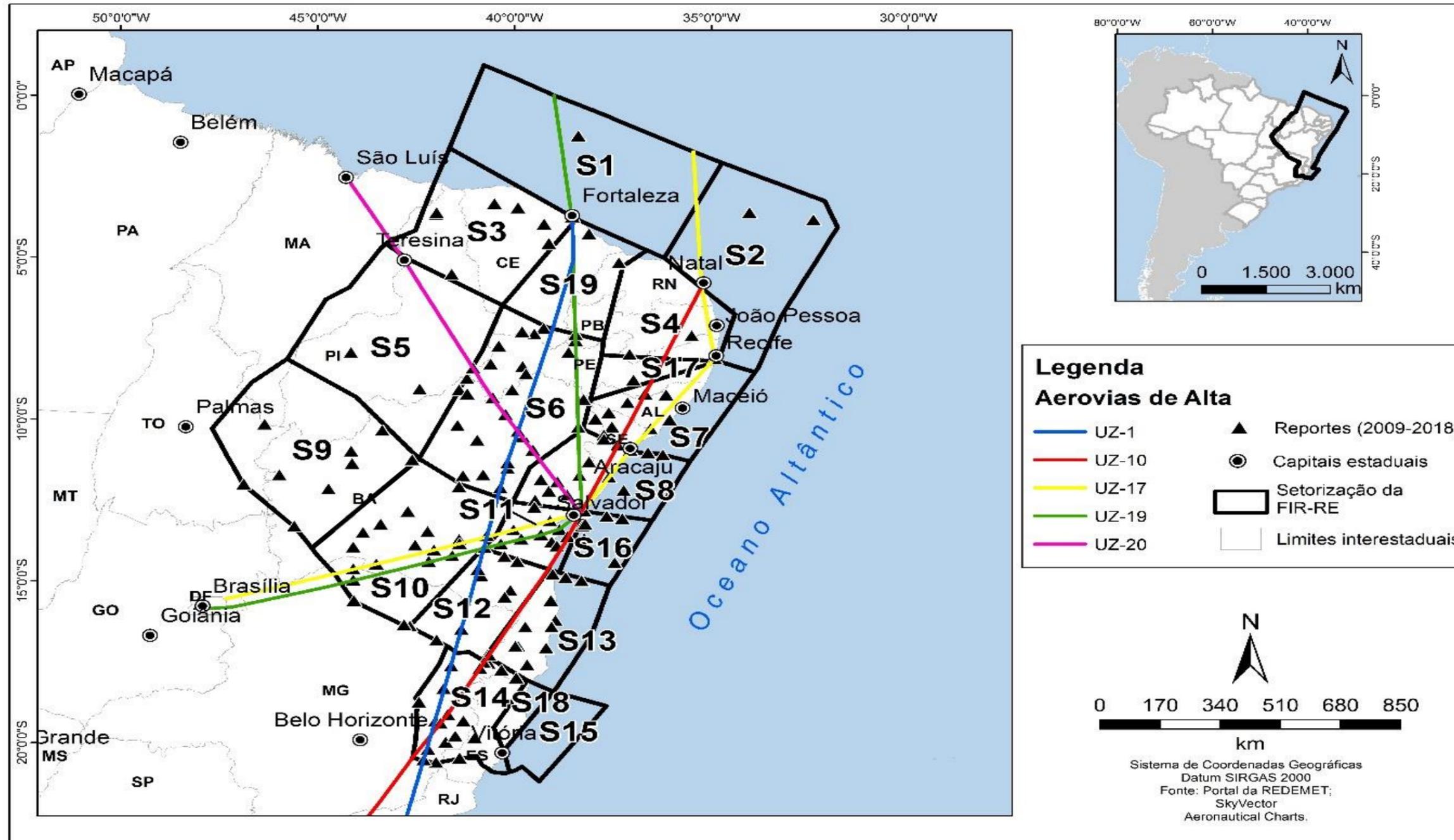
Fonte: Portal da Redemet, organizado pelo autor (2020)

FIGURA 20 - PLOTAGEM DOS REPORGES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NA FIR-RE SETORIZADA



Fonte: Portal da Redemet, organizado pelo autor (2020)

FIGURA 21 - PLOTAGEM DOS REPORGES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NA FIR-RE E AS AEROVIAS COM OS MAIORES NÚMEROS DE REPORGES



Fonte: Portal da Redemet, organizado pelo autor (2020)

Com a sobreposição dos setores e das aerovias aos mapas de espacialização dos reportes, conforme Figura 20 e Figura 21, pode-se ter uma melhor visualização da relação entre os quantitativos de reportes e essas variáveis.

A Tabela 3 detalha a distribuição espacial dos 292 reportes por setores de FIR. Além de corroborar o que demonstra a figura 20, permite a identificação dos setores 6, 10 e 14 como os de maiores números de reportes; a confirmação do expressivo número de reportes nos quatro trechos supramencionados, os quais abarcam também os setores 7, 8, 11, 12 e 13; os reportes mais isolados em setores localizados mais ao norte e oeste da FIR, como os setores 1, 2, 5, 17 e 19 e outros setores que não apresentaram reportes por estarem localizados em áreas muito pouco voadas como é o caso dos setores 15 e 18.

**Tabela 3** - Perfil quantitativo e sazonal dos reportes de turbulência atmosférica nos setores da FIR-RE

| SETORES DA<br>FIR-RE | REPORTE<br>SETOR | ESTAÇÃO   |           |            |            |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|------------|------------|
|                      |                  | VERÃO     | OUTONO    | INVERNO    | PRIMAVERA  |
| SETOR 1              | 1                | -         | -         | 1 (100%)   | -          |
| SETOR 2              | 3                | 1 (33,3%) | 2 (66,7%) | -          | -          |
| SETOR 3              | 12               | 3 (25%)   | 1 (8,3%)  | 6 (50%)    | 2 (16,7%)  |
| SETOR 4              | 3                | -         | 2 (66,7%) | -          | 1 (33,3%)  |
| SETOR 5              | 2                | 1 (50%)   | 1 (50%)   | -          | -          |
| SETOR 6              | 50               | 7 (14%)   | 15 (30%)  | 17 (34%)   | 11 (22%)   |
| SETOR 7              | 24               | 5 (20,8%) | 3 (12,5%) | 12 (50%)   | 4 (16,7%)  |
| SETOR 8              | 22               | 3 (13,6%) | 7 (31,8%) | 7 (31,8%)  | 5 (22,7%)  |
| SETOR 9              | 18               | 4 (22,2%) | 5 (27,8%) | 7 (38,9%)  | 2 (11,1%)  |
| SETOR 10             | 40               | 10 (25%)  | 12 (30%)  | 10 (25%)   | 8 (20%)    |
| SETOR 11             | 16               | 2 (12,5%) | 1 (6,3%)  | 6 (37,5%)  | 7 (43,8%)  |
| SETOR 12             | 16               | 2 (12,5%) | 3 (18,8%) | 7 (43,8%)  | 4 (25%)    |
| SETOR 13             | 33               | 8 (24,2%) | 6 (18,2%) | 10 (30,3%) | 9 (27,3%)  |
| SETOR 14             | 38               | 3 (7,9%)  | 9 (23,7%) | 14 (36,8%) | 12 (31,6%) |
| SETOR 15             | 0                | -         | -         | -          | -          |
| SETOR 16             | 11               | 2 (18,2%) | 5 (45,5%) | 1 (9,1%)   | 3 (27,3%)  |
| SETOR 17             | 1                | -         | 1 (100%)  | -          | -          |
| SETOR 18             | 0                | -         | -         | -          | -          |
| SETOR 19             | 2                | 1 (50%)   | -         | 1 (50%)    | -          |
| <b>TOTAL</b>         | <b>-</b>         | <b>52</b> | <b>73</b> | <b>99</b>  | <b>68</b>  |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

O setor 6 (S6) que abarca desde o norte da Bahia até a parte central do estado, englobando parte do trecho Salvador-Teresina, apresentou 50 reportes e foi o setor mais impactado com reportes de turbulência no período estudado. Interessante ressaltar que, segundo CGNA (2019), no *ranking* das rotas mais voadas, partindo ou saindo de Salvador, esse trecho não abarca nenhuma delas, as quais estão relacionados à região Sudeste do Brasil. Nesse setor, o maior número de reportes, conforme observado na Figura 21, atuou sobre a aerovia UZ-20.

O setor 10 (S10) que compreende a parte centro-sul do estado da Bahia e parte do trecho entre Brasília e Salvador, com 40 reportes, foi o segundo setor com mais ocorrências. Apesar desse elevado número de reportes, CGNA (2019) aponta ainda que as rotas

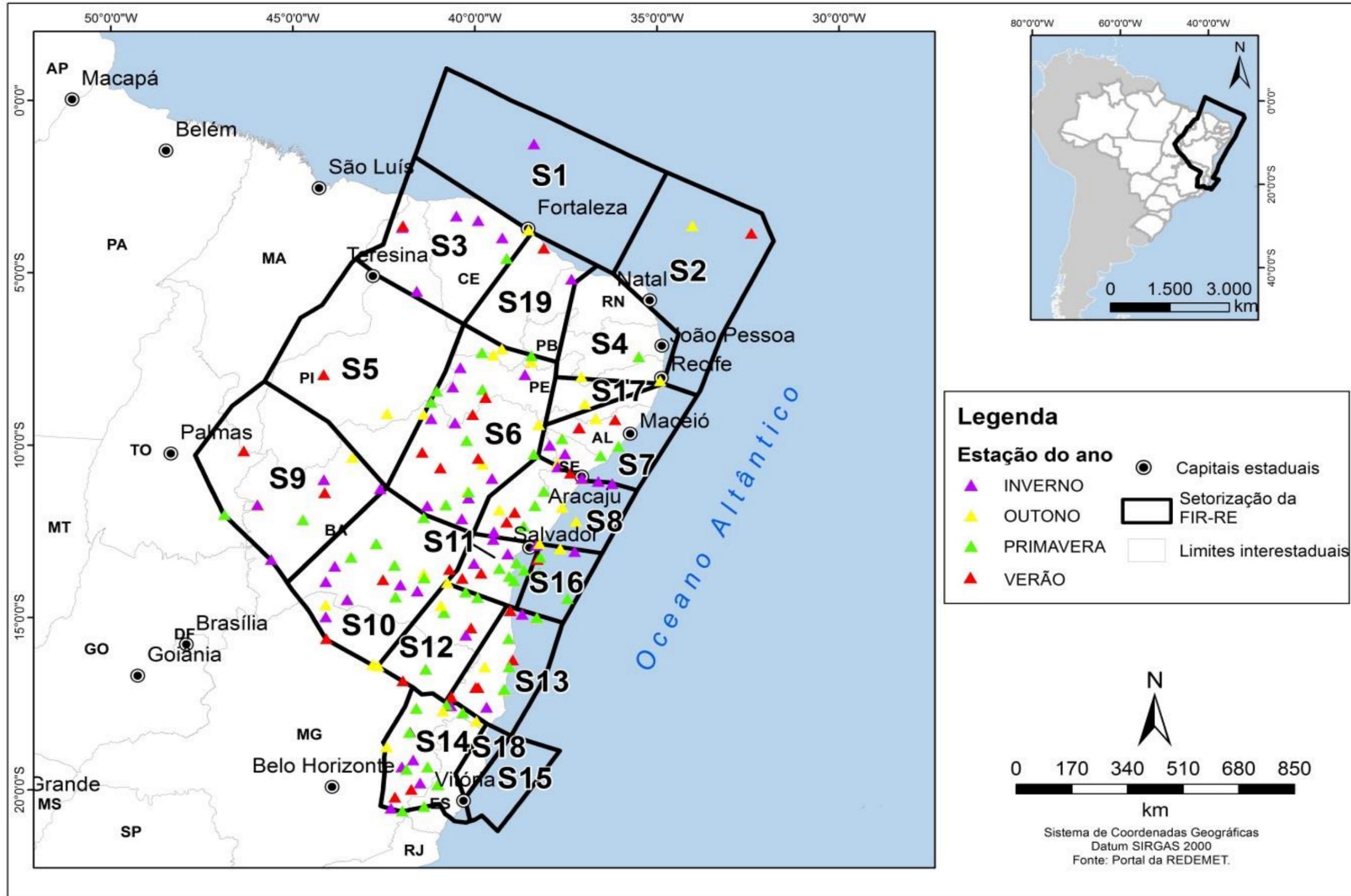
envolvendo Salvador e Brasília não figuram dentre as mais voadas, as quais envolvem Salvador e a Região Sudeste do Brasil. Nesse setor, os maiores números de reportes, conforme observado na Figura 21, atuaram sobre as aerovias UZ-17 e UZ-19.

O terceiro setor com maior número de reportes foi o 14 (S14), abarcando a parte sul da FIR-RE, entre Minas Gerais e Espírito Santo, com 38 reportes. Segundo CGNA (2019), as rotas entre Salvador e a Região Sudeste do Brasil, em especial as que envolvem os aeroportos de Guarulhos, Congonhas e Galeão foram as mais voadas e esse setor é um dos principais para a entrada e a saída de aeronaves que efetuam essas rotas. Nessa perspectiva, as aerovias UZ-10 e UZ-1 foram as mais impactadas com os reportes, conforme Figura 21.

### **5.1.1 O perfil sazonal das turbulências atmosféricas reportadas na FIR-RE**

Na Tabela 3, pode-se verificar ainda o perfil sazonal dos reportes em cada setor da FIR-RE. Essa tabela, ao fornecer números dessa sazonalidade, complementa o demonstrado na Figura 22, podendo ser extraídas algumas importantes informações. Observa-se o esvaziamento dos reportes durante o verão, com 52 reportes, representando quase a metade dos ocorridos no inverno, 99 reportes, estação de maior incidência. Interessante observar também que, os maiores percentis relacionados ao verão estiveram presentes nos setores mais ao norte da FIR, indicando, conforme Ferreira (2006) defende, a atuação das bordas de VCAN que adentram ao continente. Constata-se também que as estações de transição (outono e primavera) apresentaram quantitativos muito próximos, com ligeira vantagem para o outono, com 73 reportes, sendo a estação de segundo maior número de ocorrências.

FIGURA 22 - PLOTAGEM SAZONAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NA FIR-RE



Fonte: Portal da Redemet, organizado pelo autor (20)

Uma outra informação que pode ser extraída da Tabela 3, diz respeito à contribuição da primavera para os expressivos números dos reportes em setores localizados próximos ao litoral da Bahia (setores 8, 11 e 13). Conforme defende Kousky (1979), sistemas frontais transientes alcançam o litoral da Bahia entre o outono e a primavera e VCAN, de acordo com Ferreira (2006), atuam sobre o Atlântico e avançam para o continente a partir de novembro.

No que se refere aos três setores de maior número de reportes, pode-se observar na Tabela 3 que para o S6, o inverno foi a estação com o maior número de reportes, correspondendo a 34% do total dos reportes para este setor. Por ser um setor que abarca uma porção mais central da Bahia, e pelo fato de o inverno ter sido o período com maior número de reportes, a contribuição de Jato Subtropical, torna-se bastante plausível.

Pezzi, Rosa e Batista (1996) realizaram um trabalho sobre a climatologia da corrente de jato sobre a América do Sul de 1985 a 1994. No inverno, o Jato Subtropical atinge a sua máxima intensidade sobre a América do Sul com configuração zonal ou uma suave inclinação de noroeste para sudeste. Essa maior intensidade no inverno, conforme defende Ferreira (2006) gera forte cisalhamento horizontal e vertical do vento, sendo favoráveis à turbulência com intensidades de moderada a severa. Para o S10, 30% da totalidade dos reportes deste setor ocorreram no outono, representando a estação com a maior incidência. Pezzi, Rosa e Batista (1996) ressaltam ainda que, no trimestre de outono, o Jato Subtropical se apresenta bem definido e em processo de intensificação, porém sem atingir os máximos de intensidade e de posicionamento setentrional.

No S14, a primavera foi a estação mais propensa a reportes, representando 36,8% da totalidade dos eventos para este setor. Por se tratar de um setor mais ao sul da FIR-RE, as características climáticas do Sudeste do Brasil acabam tendo uma contribuição mais significativa. Por ser uma estação de transição entre o inverno, estação mais propensa a jatos mais intensos e sistemas frontais transientes, e o verão, estação mais adequada à convecção e ocorrência de VCAN, provavelmente os reportes nesse setor receberam essas contribuições.

Cavalcanti *et al.* (2009) ressaltam que durante o inverno e o verão, os sistemas frontais alcançam latitudes muito baixas, elevando significativamente os índices pluviométricos na costa da Bahia. Kousky (1979) identificou uma maior frequência de ocorrência de sistemas frontais no sul da Bahia nos meses de março a dezembro, para o período de 1961 e 1970. Dessa forma, contata-se que a atuação de sistemas frontais, durante a primavera, na faixa sul da FIR-RE, é um dos fatores contribuinte, juntamente com os VCAN, para o elevado número de reportes na faixa sul da FIR-RE.

Varejão-Silva (2001) ressalta que VCAN se originam nos meses de primavera, verão e outono sobre o Oceano Atlântico, influenciando, geralmente, o tempo no NEB e na Região Sudeste do Brasil.

Nos quatro mapeamentos realizados, um para cada estação, conforme Figuras 23, 24, 25 e 26, pode-se confirmar os dados da Tabela 3, visualizando as nuances sazonais da distribuição espacial dos reportes de cada setor dentro da FIR-RE.

Percebe-se nesses quatro mapeamentos que o verão apresenta, com grande notoriedade, o menor número de reportes. Apesar disso, conforme anuários estatísticos do CGNA (2019), a maior quantidade de movimentos aéreos para o NEB, em especial para Salvador, o aeroporto de maior movimento aéreo do Nordeste, ocorreu nos meses de verão.

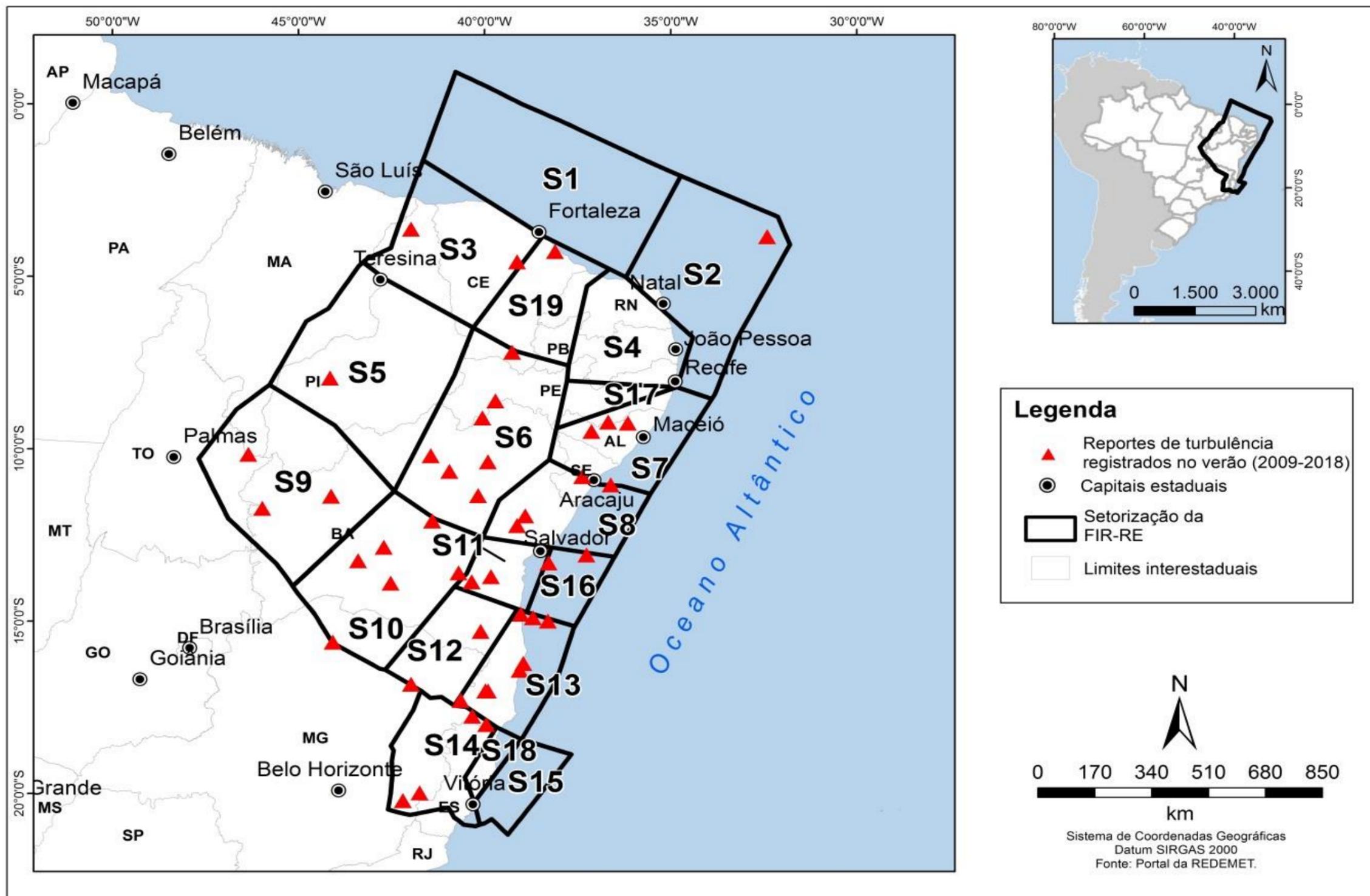
Fica evidente que, no verão, os reportes se apresentaram mais isolados e dispersos no interior da região, em especial no semiárido, indicando a influência de VCAN que adentraram ao continente. Varejão-Silva (2001) reforça que quando os VCAN penetram no continente, atingindo o NEB, causam precipitação na costa norte daquela região e nos estados do Piauí e oeste de Pernambuco.

Os VCAN são sistemas que têm alta significância no clima do NEB, atuantes principalmente em dezembro, janeiro e fevereiro. Por serem transientes, variam muito de posição e não possuem uma sub-região preferencial para atuar, embora possam modificar as condições de tempo no NEB por vários dias (KOUSKY e GAN, 1981; ALVES, 2001).

Outra faixa onde houve uma maior concentração de reportes no verão, foi no litoral sul da Bahia, indicando possivelmente a influência de sistemas frontais transientes e VCAN no Oceano Atlântico. Molion e Bernardo (2000) defendem que os sistemas frontais são um importante mecanismo climático para o sul e leste do Nordeste.

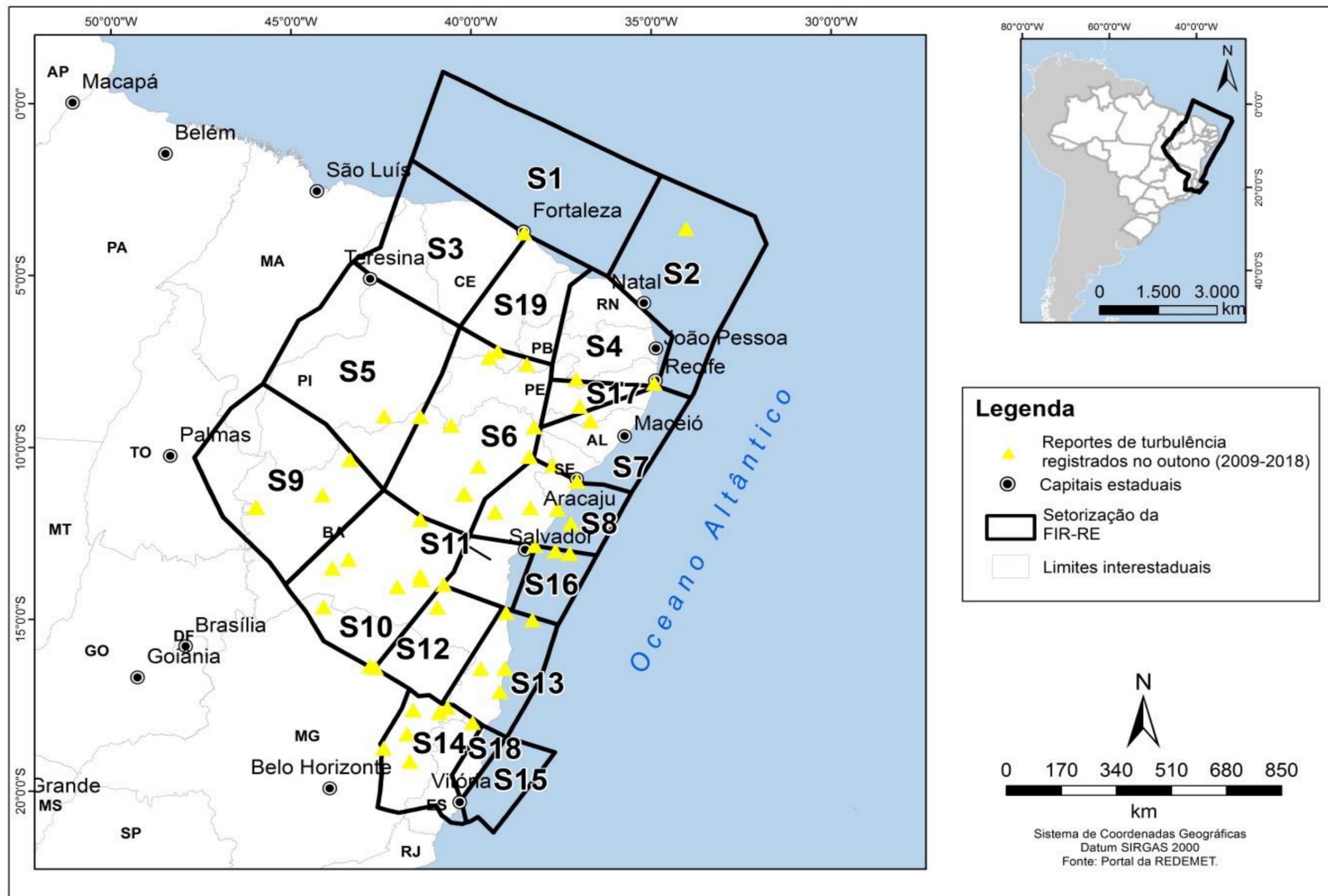
Oliveira (1986), por meio de uma climatologia usando imagens de satélites geoestacionários entre 1979-1984, verificou que os sistemas frontais frequentemente se associam e interagem com convecção tropical embora nem todos com a mesma intensidade.

FIGURA 23 - PLOTAGEM SAZONAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NOS SETORES DA FIR-RE (VERÃO)



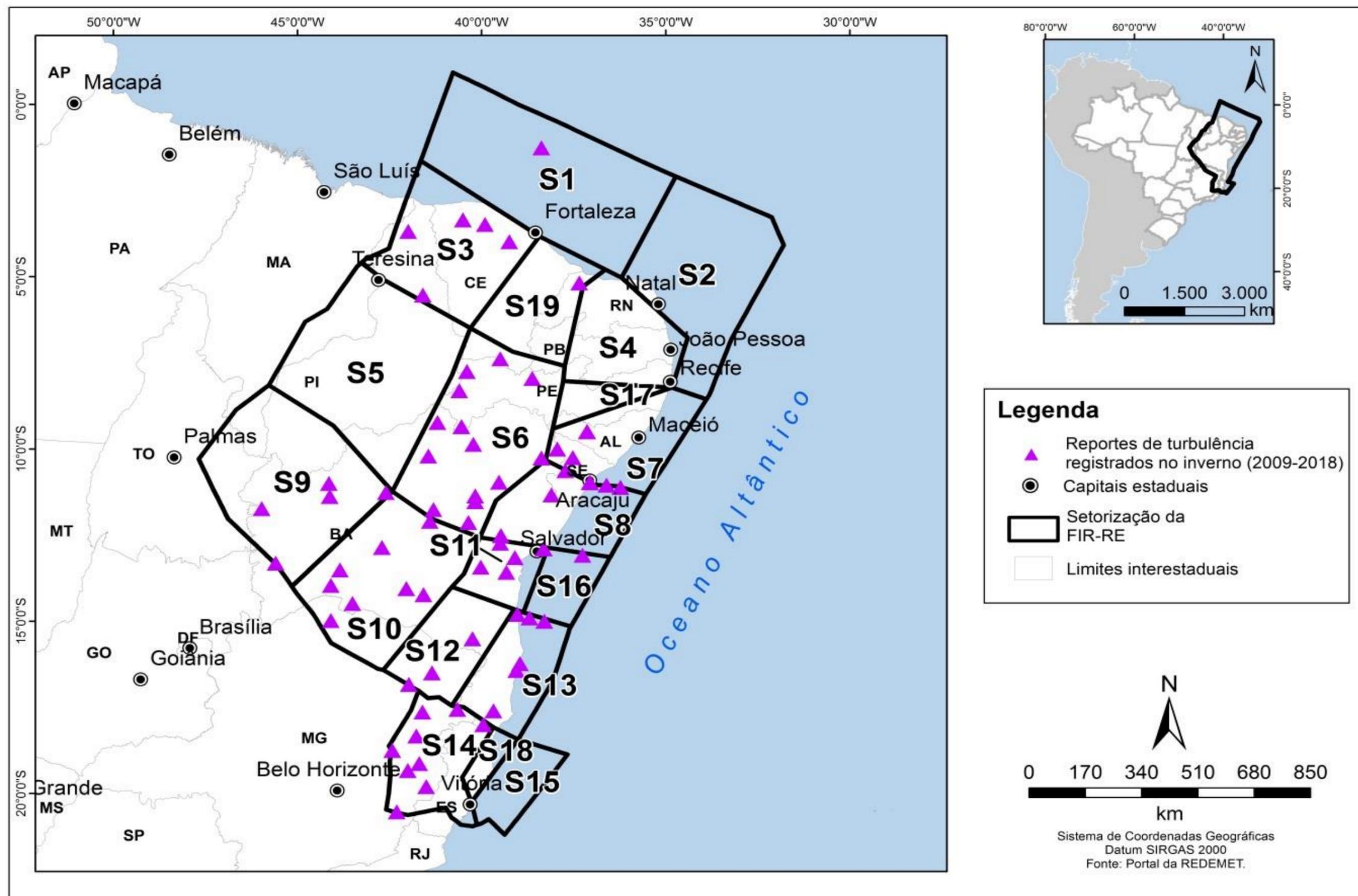
Fonte: Portal de Redemet, organizado pelo autor (2020)

FIGURA 24 - PLOTAGEM SAZONAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NOS SETORES DA FIR-RE (OUTONO)



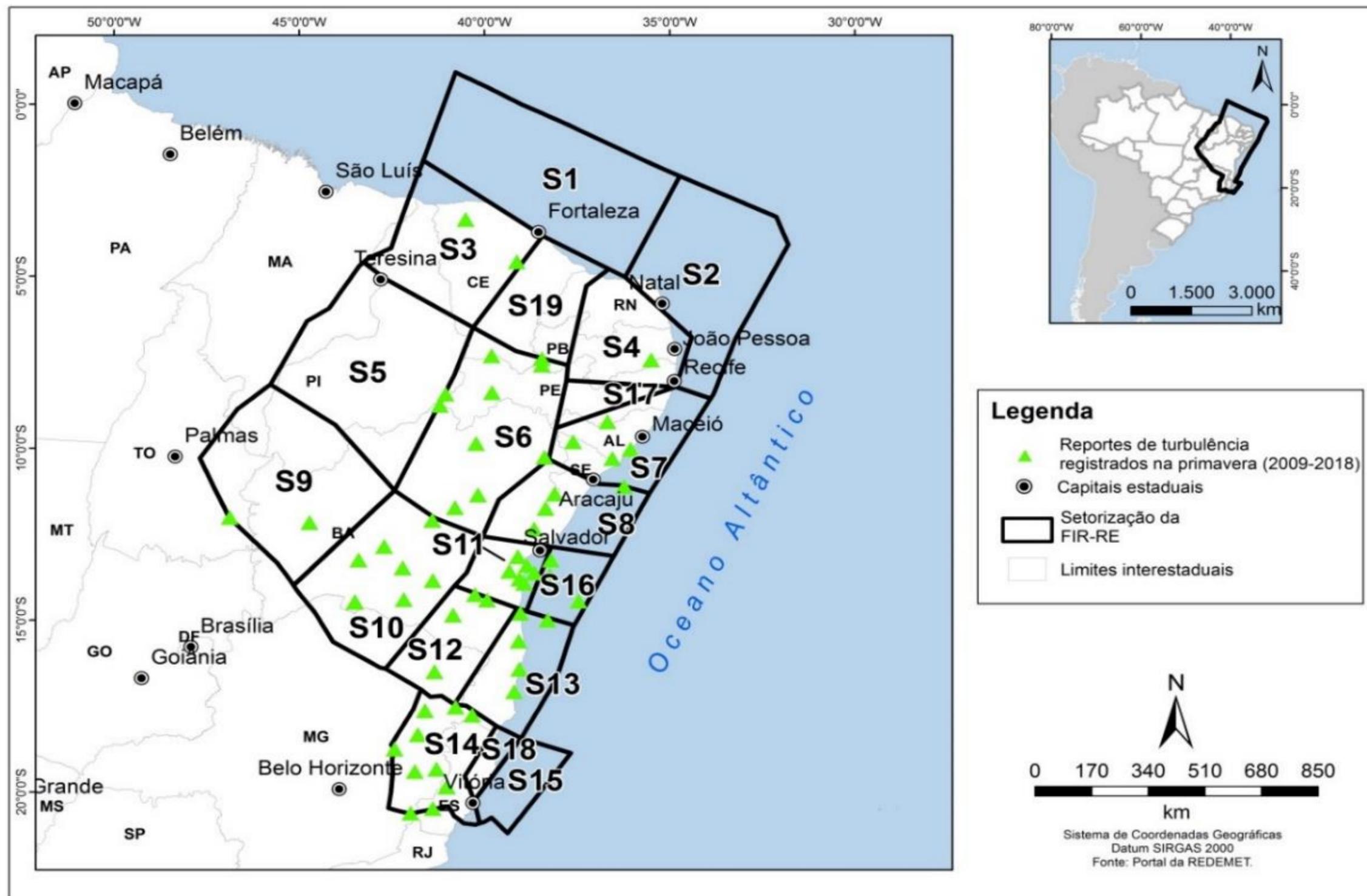
Fonte: Portal de Redemet, organizado pelo autor (2020).

FIGURA 25- PLOTAGEM SAZONAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NOS SETORES DA FIR-RE (INVERNO)



Fonte: Portal de Redemet, organizado pelo autor (2020).

FIGURA 26 - PLOTAGEM SAZONAL DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA DE INTENSIDADE MODERADA E SEVERA NOS SETORES DA FIR-RE (PRIMAVERA)



Fonte: Portal da Redemet, organizado pelo autor (2020)

## 5.2. SISTEMAS METEOROLÓGICOS, CENÁRIOS E OS TIPOS DAS TURBULÊNCIAS ASSOCIADOS AOS REPORTES DE TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICAS NA FIR-RE

Após as análises dos 86 reportes que ocorreram na FIR-RE, entre o FL330 e o FL350, a Tabela 4 mostra um extrato das variáveis encontradas.

**Tabela 4 -** Quantitativos e porcentagens das variáveis analisadas no estudo

| Variável / Categorias  | N  | %    |
|--|----|------|
| <b>ESTAÇÃO</b>   |    |      |
| INVERNO  | 34 | 39,5 |
| OUTONO   | 16 | 18,6 |
| PRIMAVERA  | 22 | 25,6 |
| VERÃO  | 14 | 16,3 |
| <b>SISTEMAS METEOROLÓGICOS À SUPERFÍCIE</b>                    |    |      |
| ASAS   | 6  | 7,0  |
| SISTEMAS FRONTAIS TRANSIENTES SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO SUL     | 60 | 69,8 |
| ZCAS   | 13 | 15,1 |
| OUTROS   | 7  | 8,1  |
| <b>SISTEMAS METEOROLÓGICOS EM ALTITUDE</b>                     |    |      |
| CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL                          | 38 | 44,7 |
| VCAN   | 18 | 21,2 |
| OUTROS   | 29 | 34,1 |
| <b>LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ALTITUDE</b>                      |    |      |
| CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL SOBRE A BAHIA            | 15 | 17,6 |
| CAVADOS EMBEBIDOS NO JATO SUBTROPICAL SOBRE O ESPÍRITO SANTO   | 23 | 31,5 |
| VCAN NO OCEANO ATLÂNTICO ACIM A DE SALVADOR                    | 14 | 21,2 |
| VCAN NO OCEANO ATLÂNTICO ABAIXO DE SALVADOR                    | 4  | 5,6  |
| OUTROS   | 29 | 39,2 |
| <b>PONTOS CRÍTICOS DOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS EM ALTITUDE</b> |    |      |
| BORDA ESTE DO VCAN   | 3  | 3,5  |
| BORDA OESTE DO VCAN  | 16 | 18,6 |
| FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO            | 20 | 23,3 |
| INÍCIO DO RAMO DESCENDENTE DO CAVADO EMBEBIDO NO JATO          | 6  | 7,0  |
| OUTROS   | 41 | 47,7 |
| <b>TURBULÊNCIA CONVECTIVA</b>                                  |    |      |
| Não  | 77 | 89,5 |
| Sim  | 9  | 10,5 |
| <b>TURBULÊNCIA DE AR CLARO</b>                                 |    |      |
| Não  | 9  | 10,5 |
| Sim  | 77 | 89,5 |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Observa-se nessa Tabela 4 o número de eventos e as respectivas categorias em que certas variáveis se apresentaram dentro da totalidade dos episódios analisados. Posteriormente, elas serão mais detalhadas, mas, chamam a atenção as seguintes variáveis, dentro de suas categorias, com seus respectivos números de ocorrências: o inverno com 34; os Sistemas Frontais transientes sobre o Oceano Atlântico Sul com 60; os Cavados embebidos no Jato Subtropical com 38; Cavados embebidos no Jato Subtropical sobre o Espírito Santo com 23; VCAN no Oceano Atlântico acima de Salvador com 14; Borda Oeste do VCAN com 16; final do ramo ascendente dos cavados embebidos no Jato Subtropical com 20 e a Turbulência de Ar Claro com 77. Nesse primeiro momento, pode-se conceber que essas variáveis são as de maior representatividade no conjunto de dados.

### 5.2.1 Sistemas meteorológicos à superfície associados aos reportes

Conforme Tabela 4, pode-se verificar que 60 episódios ou 69,8% tiveram a presença de sistemas frontais em deslocamento no Oceano Atlântico, 15,1% tiveram a atuação de ZCAS e em 7% o ASAS fora o principal sistema meteorológico encontrado.

Na Tabela 5, verifica-se que o inverno foi a estação onde sistemas frontais transientes no Oceano Atlântico Sul mais ocorreram. Dos 60 episódios envolvendo os sistemas frontais, 29 foram no inverno, representando 48,3% da totalidade desses eventos.

**Tabela 5** - Distribuição bivariada entre cenários sinóticos à superfície, em altitude e a estação

| SISTEMAS<br>METEOROLÓGICOS<br>EM ALTITUDE   | ESTAÇÃO   | SISTEMA METEOROLÓGICO À SUPERFÍCIE |                      |           |           |
|---|-----------|------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
|   |           | ASAS                               | SISTEMAS<br>FRONTAIS | OUTROS    | ZCAS      |
| CAVADOS<br>EMBEBIDOS NO<br>JATO SUBTROPICAL | INVERNO   | 3 (7,7%)                           | 10 (25,6%)           | 0 (0,0%)  | 0 (0,0%)  |
|   | OUTONO    | 0 (0,0%)                           | 8 (20,5%)            | 3 (7,7%)  | 0 (0,0%)  |
|   | PRIMAVERA | 0 (0,0%)                           | 5 (12,8%)            | 0 (0,0%)  | 8 (20,5%) |
|   | VERÃO     | 0 (0,0%)                           | 2 (5,1%)             | 0 (0,0%)  | 0 (0,0%)  |
| OUTROS                                      | INVERNO   | 2 (6,9%)                           | 19 (65,5%)           | 0 (0,0%)  | 0 (0,0%)  |
|   | OUTONO    | 1 (3,4%)                           | 2 (6,9%)             | 0 (0,0%)  | 0 (0,0%)  |
|   | PRIMAVERA | 0 (0,0%)                           | 3 (10,3%)            | 1 (3,4%)  | 0 (0,0%)  |
|   | VERÃO     | 0 (0,0%)                           | 0 (0,0%)             | 0 (0,0%)  | 1 (3,4%)  |
| VCAN  | OUTONO    | 0 (0,0%)                           | 1 (5,6%)             | 0 (0,0%)  | 1 (5,6%)  |
|   | PRIMAVERA | 0 (0,0%)                           | 5 (27,8%)            | 0 (0,0%)  | 0 (0,0%)  |
|   | VERÃO     | 0 (0,0%)                           | 5 (27,8%)            | 3 (16,7%) | 3 (16,7%) |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Estudos sobre a climatologia dos sistemas frontais foram realizados por Oliveira (1986) e constatou-se que o deslocamento dos sistemas frontais até a altura da fronteira sul do Brasil, dar-se á ao longo de todo o ano; que na faixa abarcando as três regiões do sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) houve redução dos eventos, mas o pico no inverno. A máxima interação com a convecção tropical (faixa entre o Paraná e o Espírito Santo) ocorreu na primavera e, por fim, acima do Espírito Santo os episódios diminuíram, porém, o pico permaneceu na primavera.

Cavalcanti *et al.* (2009) ressaltam também que um estudo entre 1979 e 2005, constatou que, ao longo da costa leste do Brasil, cinco a dez frentes ao ano alcançam a latitude de 15°S, o que corresponde um impacto direto no litoral do Bahia, por meio de cisalhamento dos ventos e precipitação persistente ao nível da superfície.

Ainda nessa perspectiva, Andrade (2005) identificou algumas características das condições sinóticas associadas ao deslocamento dos sistemas frontais sobre o continente ou se desviando para o oceano. Dentre elas, a influência de cavados e cristas e do Jato Subtropical nesse deslocamento.

Segundo Oliveira, Vianello e Ferreira (2001), nas camadas frontais, o gradiente horizontal de temperatura é forte e o vento aumenta em altitude, favorecendo a um cisalhamento vertical que alcança seu máximo em torno de 300 a 200 hPa, abaixo da tropopausa média. Justamente nessa faixa da troposfera superior, onde os ventos predominam de oeste, está situada a corrente de jato, sistema ondular de escala planetária que dá suporte dinâmico ao sistema frontal. A corrente de jato conduz os sistemas frontais que se formam na região extratropical, entre a massa polar marítima e o braço oeste da tropical marítima, proveniente da área equatorial.

Mello (2015) resalta que 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.

Com relação à ZCAS, conforme Tabela 5, dos 13 episódios que estiveram presentes, 8 foram durante a primavera, representando 61,5% dos episódios envolvendo esse sistema. Segundo Abreu (1998), resalta que a ZCAS, por estar associada à convecção tropical que se estabelece na região amazônica, tende a se manifestar na primavera e, na região Sudeste, a partir do mês de outubro. Em outubro/novembro ela atua principalmente no norte de Minas Gerais e sul do Estado da Bahia, sendo também um dos fatores contribuintes para o grande número de reportes encontrado no setor 14 e litoral sul da Bahia durante a primavera.

Cavalcanti *et al.* (2009) reforçam que o período chuvoso com a participação da ZCAS inicia de forma bem sutil já em outubro e alcança seu pico entre os meses de dezembro e fevereiro, ou seja, a primavera tendo bastante representatividade ao associá-la a esse sistema.

Com relação à atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul, dos 6 episódios, 5 foram durante o inverno, representando 83,3% dos episódios em que esse sistema reinara. Ito e Ambrizzi (2000), estudaram o comportamento da ASAS e confirmaram que o inverno é a estação onde ela se encontra mais intensa. As análises indicaram também que, no mês de julho, o centro apresentou os maiores deslocamentos longitudinais e que, em média, atingiu posições mais a oeste, evidenciando que a ASAS fica mais próxima do continente sul-americano durante esse mês.

Oliveira, Vianello e Ferreira (2001) acrescentam que os anticilones semipermanentes como a ASAS são gerados e apresentam sutis deslocamentos sobre a área oceânica, avançando para o continente no período de inverno, onde contribuem para ventos mais intensos no litoral brasileiro, em especial no NEB.

### **5.2.2 Sistemas meteorológicos em altitude associados aos reportes**

Em altitude, observou-se as presenças de Cavados embebidos no Jato Subtropical e VCAN como os principais sistemas que figuraram na atmosfera superior nos dias de turbulência. Dessa forma, quantitativamente, conforme Tabela 4, Cavados embebidos no Jato Subtropical e VCAN estiveram presentes em 38 episódios ou 44,7% e em 18 episódios ou 21,2%, respectivamente, das ocorrências totais.

Segundo a Tabela 5, com relação os Cavados embebidos nos Jatos Subtropicais, dos 39 episódios em que esses sistemas estiveram presentes, 13 episódios ocorreram no inverno e na primavera, ambos representando 33,3% da totalidade.

Importante ressaltar que, conforme defende Andrade (2005), mesmo quando o Jato Subtropical não esteve diretamente ligado ao reporte, esteve presente compondo o cenário meteorológico, por meio do suporte dinâmico aos outros sistemas, contribuindo para difluências e confluências nas latitudes mais ao norte de seu eixo.

Hastenrath (1991) afirma que o Jato Subtropical está associado à circulação meridional de Hadley, sendo mais desenvolvido na estação de inverno onde a circulação média meridional é mais intensa. Esta corrente é semipermanente e a sua posição média se desloca em direção ao Equador no período de inverno e em direção aos polos no verão, sendo a primavera uma estação onde há mescla dessas características (REPINALDO, 2010).

Com relação aos VCAN, pode-se observar também, conforme Tabela 5, que desses 18 episódios envolvendo esses sistemas, 11 ocorreram durante o verão, representando 61,1% da totalidade envolvendo esse sistema.

Ferreira (2006) ressalta que os VCAN, no NEB, encontram-se associados à nebulosidade e chuva e/ou a presença de céu claro, uma vez que ele traz chuva na sua periferia e céu claro no seu centro. Este sistema, geralmente, compõe um mecanismo atmosférico que tem como engrenagens a Alta da Bolívia (AB) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atuando, principalmente, durante o verão austral, estando sua posição e intensidade também relacionadas à variação pluviométrica no semiárido brasileiro.

Varejão-Silva (2001) acrescenta que janeiro é o mês de maior ocorrência de VCAN sobre o Atlântico. Eles geralmente avançam em direção ao continente, em especial na faixa litorânea que abarca o NEB, sendo responsáveis pela modulação da precipitação, no verão, nesta região.

### **5.2.3 Cenários meteorológicos predominantes nos dias dos reportes**

Relacionando os sistemas presentes em superfície com os sistemas em altitude, o cenário meteorológico que mais predominou foi composto por Sistemas Frontais Transientes no Oceano Atlântico Sul, à superfície, e Cavados embebidos no Jato Subtropical, em altitude. Esse cenário, conforme Tabela 5, atuou de forma mais predominante no inverno e no outono, com 25,6% e 20,5%, respectivamente; representando quase a metade dos episódios envolvendo os cavados.

Cabe ainda extrair dessa tabela que esse cenário é típico de inverno com ramificações para as estações de transição (outono e primavera), indicando baixa representatividade do verão nessa configuração.

O segundo cenário meteorológico mais frequente nos dias de reportes teve a presença de Sistemas Frontais Transientes no Oceano Atlântico Sul, em superfície, e VCAN em altitude. Para essa configuração, a Tabela 5 também evidencia que a primavera e o verão foram as estações de maior ocorrência desse cenário, ambas com 27,8%, das ocorrências envolvendo VCAN.

Mello (2015), Andrade (2005), Oliveira (1986), Hastenrath (1991), Varejão-Silva (2001), Oliveira, Vianello e Ferreira (2001) e Cavalcani *et al.* (2009) são algumas das referências supramencionadas que ratificam essas sazonalidades encontradas relativas aos cavados embebidos no Jato Subtropical e aos VCAN.

### 5.2.4 Posicionamento dos principais sistemas meteorológicos em altitude presentes nos dias de reporte

Os posicionamentos dos Cavados embebidos no Jato Subtropical apresentaram duas categorias predominantes: sobre o estado do Espírito Santo e sobre o estado da Bahia. Sobre o estado do Espírito Santo, conforme Tabela 4, esse posicionamento estivera presente em 23 episódios ou 31,5% da totalidade dos reportes. Na Tabela 6, pode-se constatar que o outono foi a estação onde esse posicionamento predominou, com 7 ocorrências das 15 envolvendo essa localização, representando 46,7% desses eventos.

**Tabela 6** - Distribuição bivariada entre pontos críticos, estação e localização do sistema em altitude

| PONTOS CRÍTICOS                              | ESTAÇÃO   | LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ALTITUDE |                        |
|--|-----------|------------------------------------|------------------------|
|  |           | SOBRE A BAHIA                      | SOBRE O ESPÍRITO SANTO |
| FINAL DO RAMO ASCENDENTE DO CAVADO DO JATO   | INVERNO   | 2 (10,0%)                          | 1 (5,0%)               |
|  | OUTONO    | 1 (5,0%)                           | 6 (30,0%)              |
|  | PRIMAVERA | 7 (35,0%)                          | 2 (10,0%)              |
|  | VERÃO     | 0 (0,0%)                           | 1 (5,0%)               |
| INÍCIO DO RAMO DESCENDENTE DO CAVADO DO JATO | INVERNO   | 1 (16,7%)                          | 3 (50,0%)              |
|  | OUTONO    | 0 (0,0%)                           | 1 (16,7%)              |
|  | PRIMAVERA | 0 (0,0%)                           | 1 (16,7%)              |
|  | VERÃO     | 0 (0,0%)                           | 0 (0,0%)               |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Já na segunda localização, sobre a Bahia, os cavados embebidos nos Jatos Subtropicais estiveram presentes em 15 episódios ou 17,6% da totalidade, conforme Tabela 4. Nessa localização, a Tabela 6 evidencia que dos 11 episódios, 7 foram na primavera, representando 63,6% dos eventos em que esses sistemas ocorreram na Bahia.

Nesse sentido, Ferreira (2006) defende que as características das correntes de jato variam conforme a estação. No inverno, por exemplo, estação de maior contraste térmico, as correntes de jato, além de tenderem a apresentar ventos mais intensos, deslocam-se em relação à sua posição climatológica. O Jato Subtropical, que influencia a parte mais austral da FIR-RE, avança para latitudes mais baixas no inverno e normalmente se encontra associado às frentes frias intensas, separando o ar subtropical, mais frio, do ar mais aquecido dos trópicos.

Zimmermann (2017) analisou por trinta anos os Jatos Subtropicais, obtendo uma climatologia mensal. O referido autor revela que o Jato Subtropical varia de 16°S a 35°S,

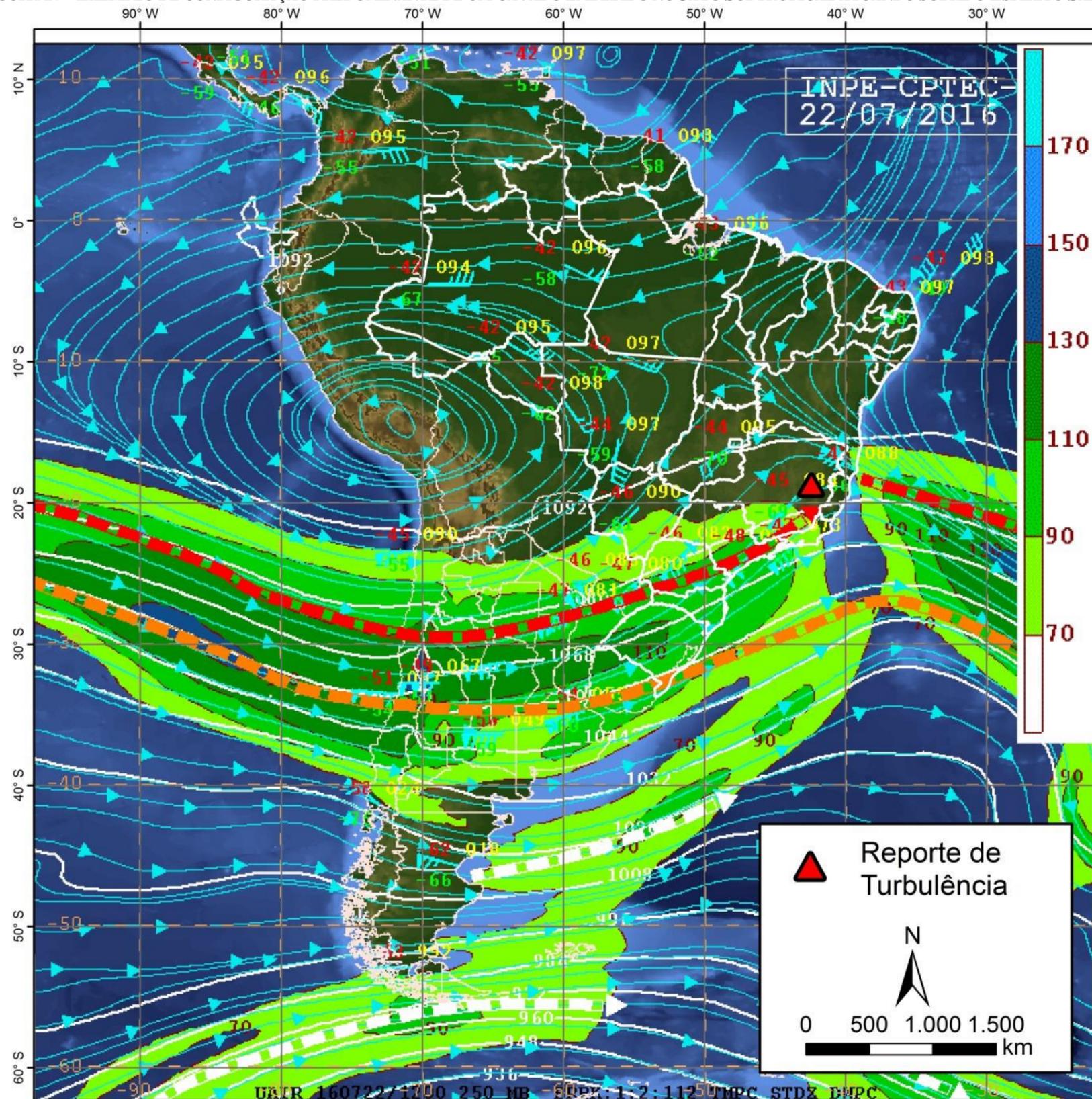
durante o verão, e 18°S a 29°S, durante o inverno, ou seja, atingindo os estados do Espírito Santo e da Bahia. As ocorrências do Jato Subtropical sobre o Espírito Santo e sobre a Bahia, no outono e na primavera, conforme Oliveira (1986), são indicativos de que estiveram associados a sistemas frontais transientes sobre o Atlântico Sul.

Um exemplo dessa configuração em altitude pode ser visualizada na Figura 27, a qual retrata a atuação, no inverno, do Jato Subtropical. Com sua oscilação senoidal típica, apresenta uma circulação ciclônica sobre o estado do Espírito Santo, ocasionando uma confluência dos ventos para essa região interferindo na dinâmica dos ventos.

Essa intensa confluência, somada à quebra na direção do vento causada pela circulação ciclônica do cavado embebido no Jato Subtropical, segundo Molarin (2013), é um cenário propício para reportes de turbulência de ar claro.

A Figura 26 evidencia também o que Oliveira (1986) assevera sobre a desorganização no padrão dos ventos acima do eixo do jato. Essa desorganização causada por confluência e difluências são cenários propícios, segundo Ferreira (2006), para reportes de turbulência de ar claro, principalmente devido às abruptas quebras na direção do vento de sudoeste para noroeste e pelo cisalhamento causado nas áreas de confluência, onde as linhas de corrente se concentram, conforme observado no extremo sul da Bahia .

FIGURA 27 - EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO PREDOMINANTE DE UM CAVADO EMBEBIDO NO JATO SUBTROPICAL ATUANDO SOBRE O ESPÍRITO SANTO



Fonte: CPTEC/INPE (2016)

Com relação ao outro sistema meteorológico que mais figurou nos dias de reporte, os VCAN, foi notória a predominância do seu centro sobre o Oceano Atlântico. A Tabela 7 mostra que, da totalidade das ocorrências em que os VCAN estiveram presentes (18), 14 ou 77,8% ocorreram sobre o Oceano Atlântico acima de Salvador (13°S) e em apenas 4 ou 22,2% sobre o Oceano Atlântico abaixo de Salvador (13°S). Da totalidade envolvendo VCAN, o verão e a primavera, nesta ordem, foram as estações onde esses vórtices mais atuaram, com 11 episódios ou 61,1% e 5 episódios ou 27,8%, respectivamente.

**Tabela 7** - Distribuição bivariada entre pontos críticos, estação e localização do sistema em altitude

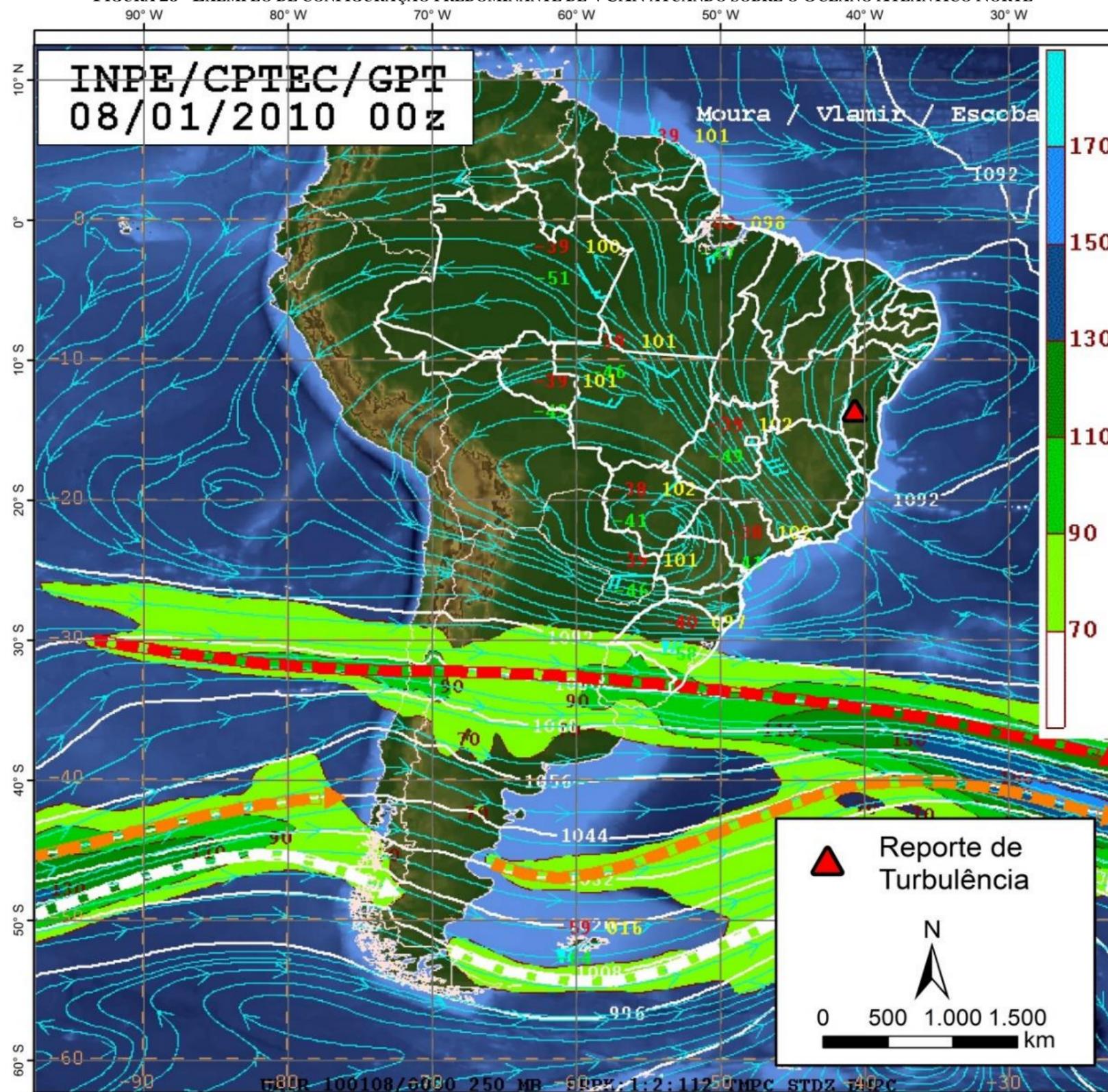
| PONTOS CRÍTICOS     | ESTAÇÃO   | LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA EM ALTITUDE         |   |
|---------------------|-----------|--|---|
|                     |           | VCAN NO OCEANO ATLÂNTICO ACIMA DE SALVADOR | VCAN NO OCEANO ATLÂNTICO ABAIXO DE SALVADOR |
| BORDA ESTE DO VCAN  | INVERNO   | 0 (0,0%)                                   | 0 (0,0%)                                    |
|                     | OUTONO    | 0 (0,0%)                                   | 0 (0,0%)                                    |
|                     | PRIMAVERA | 0 (0,0%)                                   | 0 (0,0%)                                    |
|                     | VERÃO     | 0 (0,0%)                                   | 2 (100,0%)                                  |
| BORDA OESTE DO VCAN | INVERNO   | 0 (0,0%)                                   | 0 (0,0%)                                    |
|                     | OUTONO    | 2 (12,5%)                                  | 0 (0,0%)                                    |
|                     | PRIMAVERA | 5 (31,3%)                                  | 0 (0,0%)                                    |
|                     | VERÃO     | 7 (43,8%)                                  | 2 (12,5%)                                   |

Fonte: produzido pelo autor (2020)

Dean (1971) foi um dos pioneiros em constatar a presença dos VCAN sobre o NEB em cartas médias de 300hPa e 200hPa, nos meses de verão. Segundo ele, a formação dos VCAN está diretamente relacionada com a circulação geral da atmosfera e sua formação favorecida pelo enfraquecimento dos ventos de leste da alta troposfera, na porção tropical do Atlântico, devido à substituição por ventos de oeste oriundos do Hemisfério Norte.

Os VCAN que penetram no NEB se formam no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro e março. Sua trajetória normalmente é de leste para oeste, com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro, conforme demonstrado por GAN (1982). Na Figura 28, um VCAN com centro próximo ao litoral de Sergipe e com deslocamento para o continente, apresenta sua borda oeste sobre a área continental e condições de instabilidades e quebras na direção dos ventos sobre o estado da Bahia.

FIGURA 28 - EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO PREDOMINANTE DE VCAN ATUANDO SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO NORTE



Fonte: CPTEC/INPE (2010)

### 5.2.5 Pontos críticos dos sistemas meteorológicos diretamente associados aos reportes

Os sistemas em altitude selecionados (Cavados embebidos no Jato Subtropical e VCAN) apresentaram um perfil próprio de suscetibilidade frente aos reportes de turbulência. Os dois principais pontos críticos dos cavados embebidos no Jato Subtropical foram o final do ramo ascendente e o início do ramo descendente.

Na Tabela 6, observa-se que, dos 26 episódios envolvendo cavados embebidos no Jato Subtropical com um desses pontos críticos supramencionados, 76,9% apresentaram como ponto crítico o final do ramo ascendente. Segundo ainda a referida tabela, pode-se extrair que dos episódios que apresentaram o final do ramo ascendente como ponto crítico, 35%, estiveram sobre o estado da Bahia e ocorreram durante a primavera.

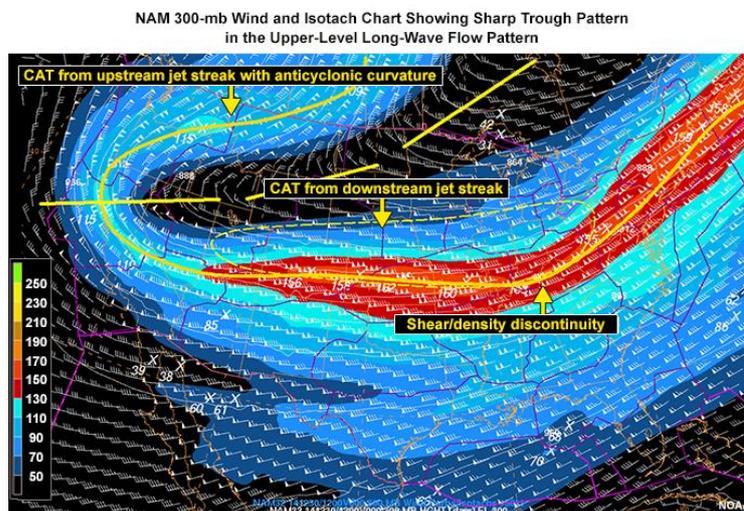
Ferreira (2006) defende que a intensidade dos ventos sofre variação em seu eixo e adjacências e, por muitas vezes, apresenta bifurcação, o que proporciona a divisão da energia e massa do sistema. Geralmente, os jatos apresentam movimento senoidal, com cristas e cavados associados, e padrões de ventos bem definidos. No Hemisfério Sul, nos cavados, região ciclônica do jato, a direção do vento muda de sudoeste para noroeste (sentido horário). Essa quebra na direção do vento é bastante favorável para reportes de turbulência.

O cavado é caracterizado pelo alongamento das isóbaras de um centro de baixa pressão em uma determinada direção, ou seja, ao longo do eixo do cavado. Quando o cavado é bem pronunciado, constata-se acentuada advecção de ar mais frio para latitudes mais baixas e uma quebra na direção do vento mais abrupta (LOBO, 2007).

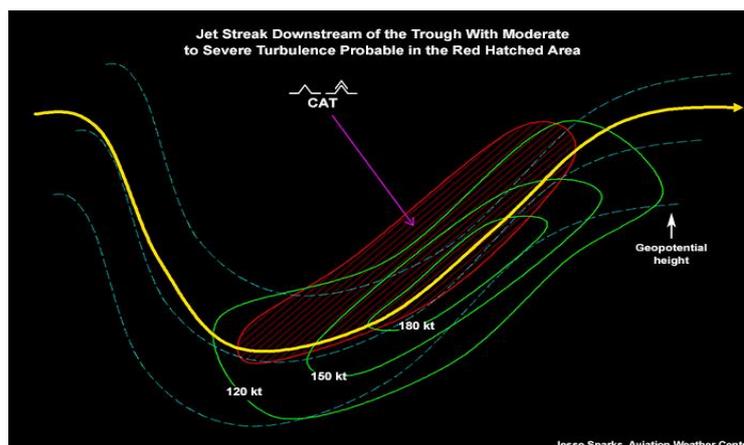
Quando um cavado alongado se forma em altos níveis, segundo o Meted (2019), uma corrente de jato embebida nesse cavado pode gerar CAT de moderada a severa a jusante do cavado (ramo descendente), no lado este do cavado e/ou a montante do cavado (ramo ascendente) do lado oeste do cavado. Convém ressaltar que, segundo o referido programa, a CAT geralmente acontece no lado frio do jato, áreas de divergência e de forte curvatura próximo à base do cavado, conforme ilustrado na Figura 29.

Observa-se ainda na Figura 29 que os dois pontos críticos dos cavados que predominaram na pesquisa, também foram pontuados pelo COMET *Program* da UCAR como as áreas mais suscetíveis a reportes de intensidade moderada e severa.

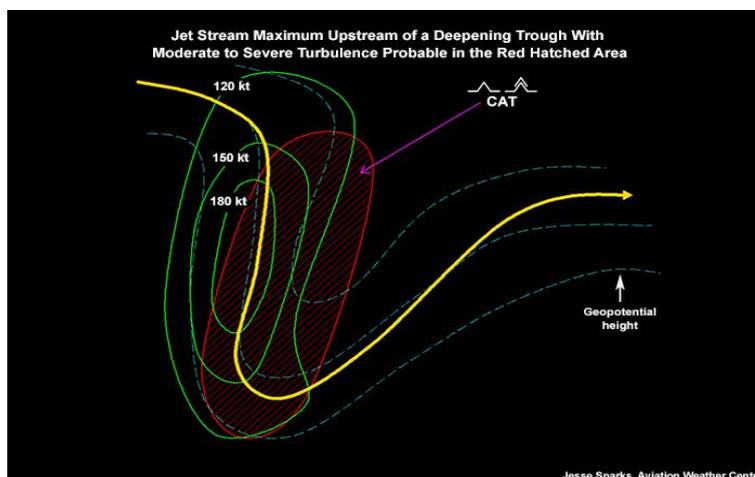
**FIGURA 29 - CARTA DE VENTO E ISOTACAS EM 300 HPA MOSTRANDO UM ALONGADO CAVADO, NO HEMISFÉRIO NORTE, E AS ÁREAS MAIS SUSCETÍVEIS A CAT (A) ÁREAS PROVÁVEIS DE CAT A JUSANTE DE CAVADOS EM ALTITUDE (B). ÁREAS PROVÁVEIS DE CAT A MONTANTE DE CAVADOS EM ALTITUDE (C).**



(a)



(b)

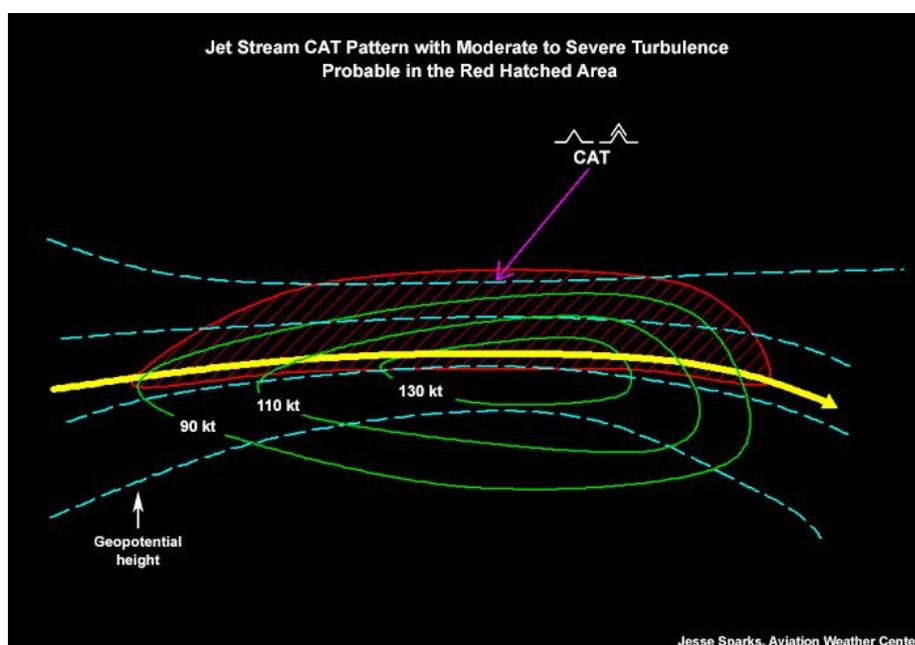


(c)

Fonte: *COMET Program* (2018)

Conforme visto, a corrente de jato possui condições favoráveis a turbulências em virtude de seus cavados e cristas e também pelo cisalhamento horizontal e vertical presentes. A *COMET Program* da UCAR, acrescenta que na vizinhança do jato, em especial no lado do ar frio, ocorre o cisalhamento mais intenso, onde há o maior gradiente de isotacas, que por sua vez traduzem cenários de turbulência de intensidade de moderada a severa, conforme ilustrado na Figura 30.

**FIGURA 30 - ÁREA CRÍTICA DE UMA CORRENTE DE JATO NO HEMISFÉRIO NORTE**



Fonte: COMET Program (2018)

Com relação aos VCAN, a Tabela 7 mostra que, quando se apresentaram sobre o Oceano Atlântico acima de Salvador, as turbulências ocorreram em suas bordas oeste em todos os episódios analisados. Convém pontuar também que, do total de ocorrências envolvendo VCAN, 88,9% apresentaram a borda oeste como o ponto mais crítico desse sistema para os reportes de turbulência na FIR-RE.

Pode-se extrair ainda da referida tabela que, dos episódios que apresentaram a borda oeste dos VCAN como ponto crítico, 43,8%, estiveram sobre o Oceano Atlântico acima de Salvador e ocorreram durante o verão.

Segundo Ferreira (2006), as maiores instabilidades associadas aos VCAN se encontram nas partes oeste e norte e justamente no sentido do deslocamento rumo à costa Nordeste do Brasil.

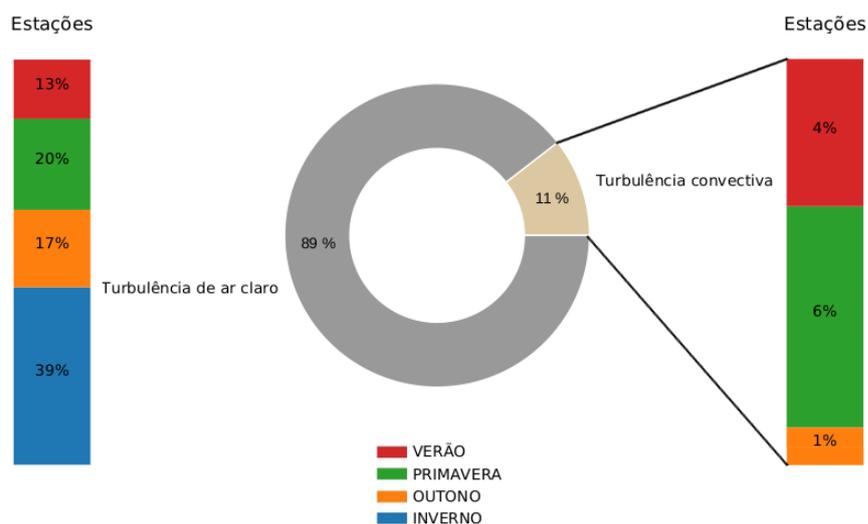
Varejão-Silva (2001), reforça que VCAN revelam forte convecção e maior instabilidade atmosférica adiante da direção do movimento do vórtice. Eventualmente, podem ser observadas formações de Cb mais próximos ao centro do sistema, quando o vórtice ciclônico atinge o continente ou quando se move sobre as águas quentes para oeste rumo à costa do NEB.

### 5.2.6 Os tipos das turbulências associadas aos reportes

Com relação aos tipos das turbulências, pode-se observar, na Figura 31, que 39% dos reportes envolveram o inverno e a turbulência de ar claro, assim como 6% dos episódios envolveram turbulência convectiva e a primavera.

Conforme instrução da FAA, seção 7-1-28, nuvens são os principais fatores contribuintes para reportes de turbulência, ora quando a aeronave se encontra embutida na camada de nuvens, ora quando se encontra no entorno de uma célula convectiva bem desenvolvida.

**Figura 31** – Distribuição bivariada entre os tipos das turbulências e as estações do ano



Fonte: produzido pelo autor (2020)

Mello (2015) destaca a relação entre a turbulência de ar claro e a presença da corrente de Jato Subtropical no Brasil, com maior frequência no período do inverno, período no qual

ocorre também a entrada de sistemas frontais mais intensos provenientes da Argentina e do Chile no Brasil. Ferreira (2006) reforça que dentro de uma Corrente de Jato, um eixo de velocidade máxima normalmente aparece causando turbulência com cisalhamento vertical da ordem de 4 a 7 nós (kt) por cada 1.000 pés e lateral de 10 kt por 60 milhas náuticas.

Mello (2016) cita que as turbulências convectivas decorrem de correntes de ar verticais (ascendentes e descendentes) oriundas de nuvens de tempestades. Essas nuvens podem ser fruto de convecção local, isolada ou atrelada a sistemas convectivos de mesoescala como VCAN e sistemas frontais intensos.

Assim, onde há movimentos verticais do ar causados predominantemente por processos convectivos, segundo a WMO (2007), pode-se categorizar esse fenômeno como turbulência convectiva

### 5.3 ESTUDO DE CASO DO DIA 23.11.2018

#### 5.3.1 Justificativa

Optou-se por realizar este estudo de caso envolvendo o dia 23.11.2018, por se tratar de um exemplo cabal da influência dos principais sistemas meteorológicos analisados na presente pesquisa nas ocorrências de turbulência no estado da Bahia. Os sucessivos reportes desse dia ensejaram ações de gerenciamento de fluxo do tráfego aéreo de cancelamento do espaço RVSM no sul e sudoeste da FIR-RE.

O espaço RVSM permite que mais aeronaves trafeguem em um mesmo volume de espaço aéreo, atendendo assim à alta demanda de aeronaves com intenção de voar. Porém, essa condição só poderá ser alcançada se a meteorologia for favorável, ou seja, se as condições atmosféricas reinantes estiverem favoráveis a uma separação vertical de 1000 pés entre as aeronaves. Nesse caso, o fenômeno meteorológico que mais impacta e interfere nessa condição ótima de separação vertical é a turbulência atmosférica.

No dia 23 de novembro de 2018, a instabilidade atmosférica causou a suspensão do espaço RVSM, comprometendo as autorizações padronizadas de Salvador e Recife para o sul e sudoeste da FIR-RE, durante o período entre 1800Z e 2241Z. Apesar de não ter havido impacto operacional, pois, felizmente, durante esse período a demanda não foi suficiente para tal, ao tomarem medidas restritivas, os gerentes de fluxo do tráfego aéreo geram, inevitavelmente, aumento na carga de trabalho dos controladores de voo, conforme constata Rocha (2017), e para os meteorologistas, uma vez que reportes sucessivos de turbulência, entre

eles de intensidade severa, requerem análises de cenário mais pormenorizadas de todos os profissionais mencionados.

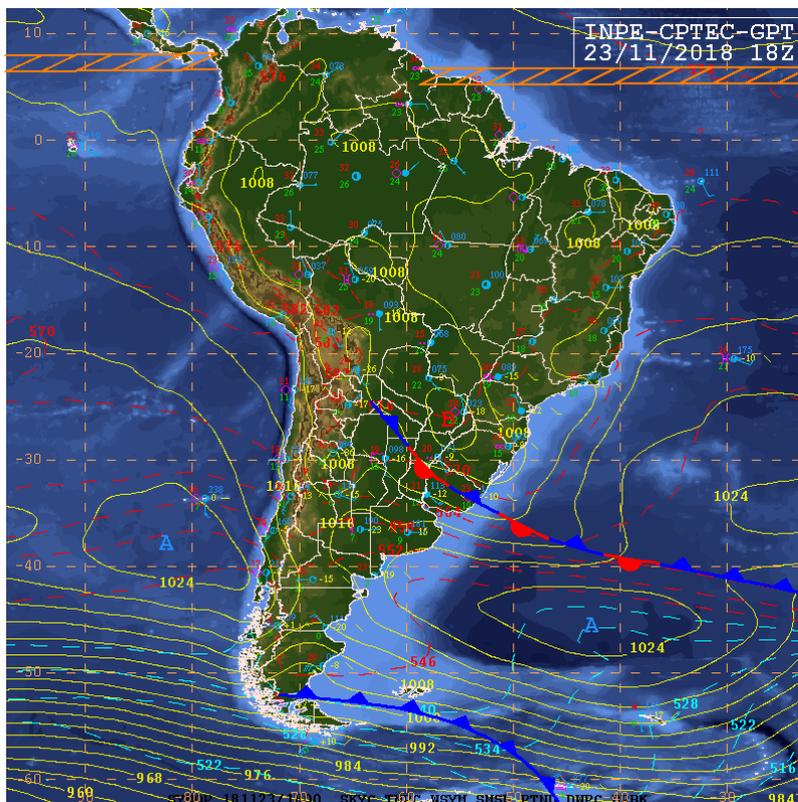
### **5.3.2 Análise sinótica**

Ao analisar a Carta Sinótica de Superfície dos horários mais próximos dos eventos de turbulência atmosférica ocorridos, percebe-se que a atmosfera apresentou consistente perturbação no campo de pressão por meio de um sistema frontal sobre o Uruguai o qual se estendeu para o Atlântico, conforme evidenciado na Figura 32.

Podem-se observar, na Carta Sinótica de Superfície, uma frente estacionária entre a Argentina, Uruguai e Oceano Atlântico adjacente embebida ao intenso escoamento baroclínico em 500 hPa; uma alta pressão pós-frontal atuando com valor de 1024 hPa, a qual estende uma crista atmosférica em superfície com característica subtropical (ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul) e núcleos de baixa pressão sobre o NEB gerando nebulosidade convectiva.

Foi detectada espessura de 5160 mgp no Atlântico Sul caracterizando uma intensa massa de ar polar marítima migratória e uma frente fria no extremo sul do continente Argentino. A Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) apresenta núcleo de 1024 hPa, centrada em torno de 39°S/82°W e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atua em torno de 07°N no Oceano Pacífico e em torno de 05°N no Oceano Atlântico.

FIGURA 32 - CARTA SINÓTICA DE SUPERFÍCIE DAS 1800Z DO DIA 23.11.18



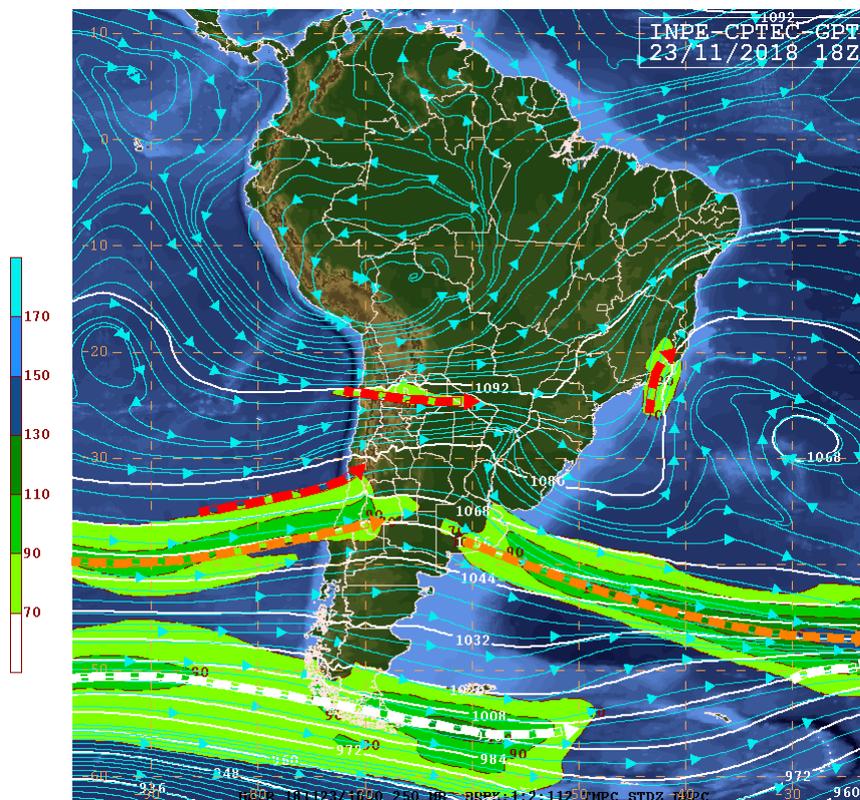
Fonte: CPTEC/INPE (2018)

Seguindo as análises para a compreensão do cenário meteorológico, torna-se condição necessária a análise da Carta Sinótica de Altitude, conforme Figura 33.

Nessa análise, em 250 hPa, nota-se uma ampla circulação associada à Alta da Bolívia (AB) dominando grande parte do noroeste do continente. Entre o centro-leste do Brasil e o Atlântico, observa-se um padrão anticiclônico com o aprofundamento de uma crista a leste das Regiões Sul e Sudeste e outro entre o Atlântico e o NEB.

A combinação desses sistemas gera um padrão de escoamento difluente em altitude, que ocasiona áreas com divergência de massa neste nível, induzindo a convergência de massa em baixos níveis que, combinada com a termodinâmica, contribuiu para a atividade convectiva observada no centro-norte e nordeste do Brasil, especialmente a partir da tarde. Entre o Oceano Pacífico e o centro-norte da Argentina, observa-se outro cavado, contornado pelo Jato Subtropical e pelo ramo norte do Jato Polar. Outra parte do Jato Subtropical cruza o continente entre 20°S e 25°S, e a divergência associada a este sistema contribui para as pancadas de chuva entre o leste de Mato Grosso do Sul e oeste de São Paulo.

FIGURA 33 - CARTA SINÓTICA DE ALTITUDE DAS 1800Z DO DIA 23.11.18

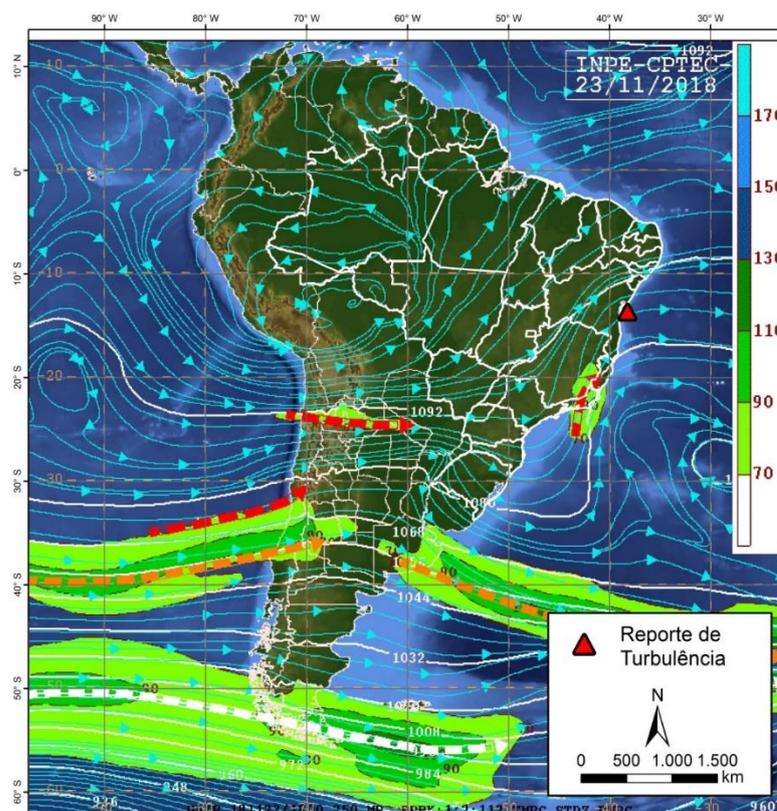


Fonte: CPTEC/INPE (2018)

O reporte de turbulência severa reportada pelo AZUL 6955, conforme AIREP - ARS AZU6955 LEDA 1650 FL360 MS45 250/56 SEV TURB - apresentou as seguintes informações: hora do reporte - às 1650Z, localização geográfica – LEDA (S13°42' - W038°14'), nível de voo - 36.000 pés, temperatura externa - negativa de 45°C, vento - proveniente de 250 graus com 56 nós (kt) de intensidade e reporte de turbulência severa.

Observa-se na Figura 34 que o reporte ocorreu justamente entre os dois pontos críticos identificados na presente pesquisa que se referem aos cavados embebidos no Jato Subtropical, ou seja, o final do ramo ascendente e o início do ramo descendente, denotando uma acentuada quebra na direção do vento, de sudoeste para oeste.

**FIGURA 34 - CARTA SINÓTICA DE ALTITUDE DAS 1800Z COM A LOCALIZAÇÃO DO REPORTE SEVERO**

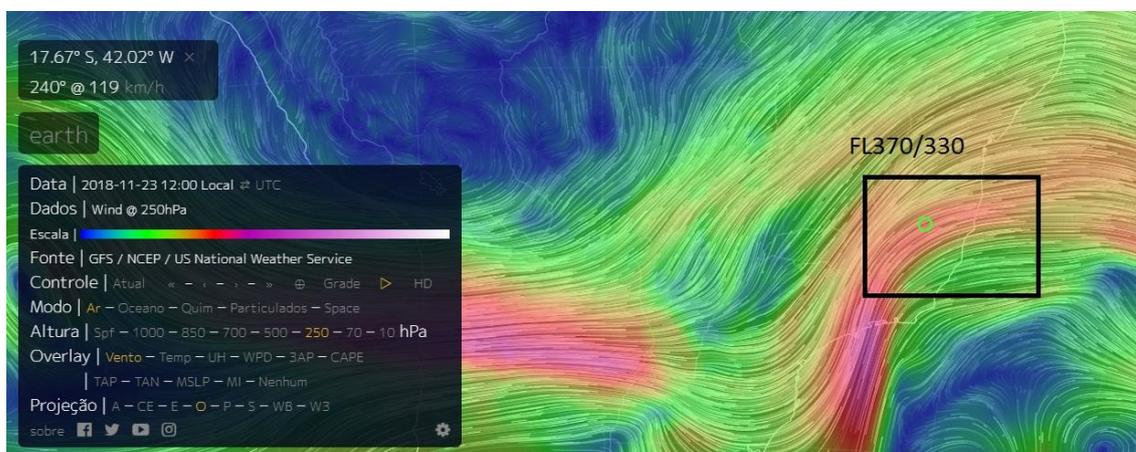


pode ensejar turbulência e, dependendo do local, arrasto e elevação do consumo de combustível.

A despeito de não ser uma época em que o Jato Subtropical se posicione mais ao norte, nota-se que o VCAN no Atlântico Sul favorece a subida do Jato Subtropical e, conseqüentemente, a formação pronunciada do cavado embebido. Essa configuração desses sistemas é corroborada por Repinaldo (2010), o qual ressalta que VCAN sobre o oceano Atlântico geralmente se encontram associados a correntes de ar superiores em sua periferia.

O modelo de previsão numérica do tempo, GFS, no nível de 250 hPa (FL340), da plataforma *nullschool* e o modelo de previsão numérica Europeu, ECMWF, da plataforma *Windy*, detectaram, de forma bem satisfatória, a intensa atuação do Jato Subtropical, a qual pode ser visualizada na figura 35, que retrata um exemplo envolvendo um reporte moderado deste dia.

**FIGURA 35 - ATUAÇÃO DO JATO SUBTROPICAL SOBRE A FAIXA CENTRO-LESTE DA BAHIA E O LOCAL EXATO DE UM DOS REPORTES DE TURBULÊNCIA MODERADA ENTRE O FL330 E O FL370, EM 250 hPa, SEGUNDO MODELO NUMÉRICO DO TEMPO GFS NA PLATAFORMA NULLSCHOOL (A) E MODELO NUMÉRICO DO TEMPO ECMWF DA PLATAFORMA WINDY (B)**



(a)

Fonte: *Earth.nullschool* (2018)



(b)

Fonte: Windy. Wind map (2018)

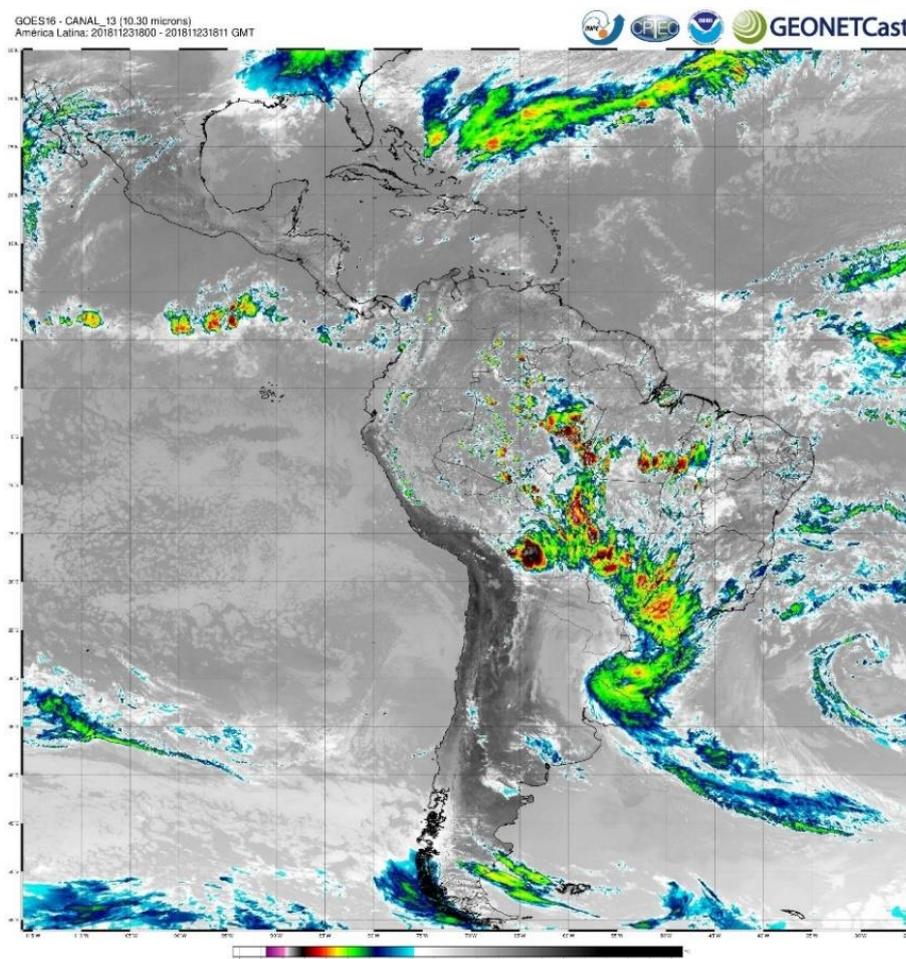
As bordas dessas áreas realçadas são propensas a cisalhamento horizontal do vento, porém, como não apresentam contraste significativo de coloração, o cisalhamento horizontal não apresenta indícios de severidade. Ainda com relação à velocidade, a magnitude apontada pelos modelos (GFS: 119 Km/h e ECMWF: 75 kt) se encontra bem coerente com a reportada pelos pilotos (64 kt).

Com relação à direção do vento, pode-se visualizar compatibilidade com o reporte, ou seja, os modelos previram ventos provenientes do quadrante sudoeste e uma variação para oeste, indicando uma quebra significativa da direção.

Uma outra questão relevante é a temperatura externa, que assim como o cenário severo, também apresentou uma atmosfera real mais aquecida com temperatura de  $-44^{\circ}\text{C}$ , quando, segundo a tabela da Atmosfera Padrão da ICAO, a temperatura no FL350 é de aproximadamente  $-53^{\circ}\text{C}$ . Essa diferença de  $11^{\circ}\text{C}$  indica uma atmosfera bastante rarefeita, o que diminui a sustentação da aeronave e, conseqüentemente, aumenta o grau de suscetibilidade da aeronave a movimentos verticais.

Na imagem de satélite mais próxima do reporte de turbulência severa (Figura 36) observa-se de forma bastante flagrante a influência do Jato Subtropical e do VCAN na dinâmica da atmosfera reinante neste dia de reportes sucessivos de turbulência na FIR-RE. A circulação bem definida do VCAN, a banda de nebulosidade associada ao sistema frontal e a nebulosidade estriada no litoral e norte da Bahia denotam indícios consistentes de um cenário instável de turbulência em altos níveis da atmosfera (FERREIRA, 2006).

**FIGURA 36 - IMAGEM DE SATÉLITE REALÇADA IR DAS 1800Z DO DIA 23.11.18**



Fonte: CPTEC/INPE (2018)

Por meio desse apanhado de cartas e ferramentas de apoio, consegue-se verificar o quão instável a atmosfera se apresentou no dia 23.11.2018. Uma análise sinótica bem feita; o apoio de ferramentas confiáveis de modelagem numérica e uma adequada interpretação das imagens de satélite, permitirão que o cenário seja bem descortinado.

A atmosfera deu indícios suficientes de que seria um dia de sucessivos reportes no litoral da Bahia, principalmente pelo cenário meteorológico constituído por sistemas frontais transientes, por VCAN e pelo Jato Subtropical.

Esse dia foi mais um exemplo de que os reportes com maior concentração no estado da Bahia não são por acaso, mas sobretudo por possuírem estreita relação com o posicionamento climatológico dos sistemas transientes sobre o oceano Atlântico Sul, em superfície, assim como da circulação superior, constituída principalmente por cavados embebidos no Jato Subtropical e por VCAN que permeiam a área continental e oceânica da FIR-RE.

## 6 CONCLUSÕES

Após as análises dos dados obtidos, pode-se concluir que a nuvem de pontos com maior densidade, formada pelas localizações dos reportes de turbulência atmosférica na FIR-RE entre 2009 e 2018, não ocorreu no estado da Bahia apenas pelo fato de ser o maior estado do NEB ou por Salvador ser um dos principais nós dessa região em termos de quantidade de movimento aéreo. Conforme observado nesta pesquisa, houve influência do posicionamento e da sazonalidade de sistemas meteorológicos nesses reportes.

Na análise espacial realizada nesta presente pesquisa, identificou-se que:

- a) As estações mais favoráveis para a ocorrência de turbulência na FIR-RE foram, nesta ordem: o inverno, o outono e a primavera com, respectivamente, 34%, 25% e 23%;
- b) Para as turbulências ocorridas entre o FL330 e o FL350, o inverno, a primavera e o outono com, respectivamente, 39,5%, 25,6% e 18,6% foram as estações mais propícias para os reportes;
- c) Os setores S6, S10 e S14 da FIR-RE foram os mais impactados com reportes de turbulência e as aerovias mais impactadas, dentro de cada um desses setores, foram: S6/UZ-20, S10/UZ-17 e UZ-19 e S14/UZ-1 e UZ-10;
- d) Com relação à sazonalidade envolvendo esses setores, o S6 foi mais impactado por turbulências no inverno; o S10, no outono e o S14, na primavera;
- e) Nos dias dos reportes, os sistemas frontais transientes no Oceano Atlântico Sul, à superfície, e os Cavados embebidos no Jato Subtropical, em altitude, compuseram o cenário meteorológico que mais predominou. O segundo cenário mais presente envolveu sistemas frontais transientes no Oceano Atlântico Sul e VCAN em altitude;
- f) Sistemas frontais transientes sobre o oceano Atlântico Sul, influenciaram as condições meteorológicas em superfície e em altitude ao longo de todo o ano, sobretudo no inverno;
- g) Cavados embebidos no Jato Subtropical sobre o Espírito Santo e sobre a Bahia durante a primavera, o outono e o inverno; e VCAN durante o verão e a primavera denotam sazonalidades mais definidas que os sistemas frontais transientes sobre o Atlântico Sul;
- h) Identificou-se também que o perfil predominante dos cavados embebidos no Jato Subtropical, nos dias de reporte de turbulência foi: localização - sobre o Espírito Santo, ponto crítico - final do ramo ascendente e estação mais propícia - primavera;

- i) O perfil predominante dos VCAN foi: localização - sobre o Oceano Atlântico acima de Salvador, ponto crítico - Bordas Oeste e estação mais propícia - verão; e
- j) O tipo predominante das turbulências reportadas foi de Ar Claro e sua maior incidência foi no inverno.

Do exposto, conclui-se que as análises de previsão de turbulências para a FIR-RE se iniciam à superfície, ou seja, necessário analisar os sistemas atuantes em superfície para se entender as condições meteorológicas nos níveis mais altos da atmosfera.

Ficou evidente que a presença de sistemas frontais transientes no Oceano Atlântico Sul é um bom indicativo de turbulência em altos níveis e que atuam ao longo de todo ano. Ao se analisar o ar superior para se obter a composição do cenário meteorológico, percebe-se que a presença de cavados embebidos no Jato Subtropical ou VCAN compuseram os cenários mais favoráveis aos reportes de turbulência e que apresentam sazonalidade mais bem definida que os sistemas frontais transientes.

Analisar o posicionamento desses cavados embebidos e dos VCAN, assim com seus pontos críticos podem levar o previsor a identificar as áreas mais favoráveis a reportes de turbulência moderada e severa e, de posse das sazonalidades encontradas, terá mais subsídios para suas análises de previsão desses fenômenos.

O conhecimento dos pontos críticos desses sistemas em altitude, poderão assessorar o previsor na avaliação das áreas cobertas por SIGMET, evitando, por exemplo, a superestimação de áreas hostis à aviação e o consequente descrédito da mensagem de vigilância por parte do aeronavegante e dos controladores de voo.

Ressalta-se a importância de uma melhor regulamentação da AIREP, com enfoque no serviço VOLMET e voltado para o pessoal de meteorologia, padronizando procedimentos, nivelando conhecimento e detalhando os critérios de codificação e transmissão dessas mensagens. Isso ajudaria muito para que as informações transmitidas pelo aeronavegante não sofram descontinuidade, seja por falta de conhecimento ou por interpretações equivocadas.

Nessa perspectiva, a presente pesquisa visa a preencher uma lacuna no estudo da turbulência atmosférica para a área do Nordeste do Brasil, servindo como inspiração para novos estudos, com outros enfoques, ou mesmo um aprofundamento ou mudança de escopo; contribuindo assim para uma meteorologia mais proativa e em consonância com a aviação do futuro, a qual busca a eficiência na fluidez e no controle do tráfego aéreo.

## REFERÊNCIAS

- ABRANTES, A. A.; MARTINS, L. M. **A produção do conhecimento científico: relação sujeito-objeto e desenvolvimento do pensamento.** Interface - Comunic, Saúde, Educ, v.11, n.22, p.313-25, mai/ago 2007.
- ABREU, M.L., **A Estação Chuvosa de Minas Gerais: A Zona de Convergência do Atlântico Sul.** Anais... III Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Salvador - BA, 1998.
- AERONAUTICAL CHARTS. **SkyVector.** Arinc, 2006. Disponível em: <<https://skyvector.com> >. Acesso em 22 jan.2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Relatórios Finais – CENIPA.** Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/gerenciamento-da-seguranca-operacional/relatorio-de-acidentes/arquivos/2013/RelatrioPTMVL.pdf>>. Acesso em 22 out.2019.
- \_\_\_\_\_. **Anuário do Transporte Aéreo – ANAC.** Brasília-DF, 2018. Disponível em:<<https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>>. Acesso em 01 jan. 2020.
- ALVES, J.M.B. Um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil e Atlântico Adjacente no verão de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n.1, 115-122, 2001.
- ANDERSON, D. A. **Aviação Comercial Brasileira.** João Pessoa: UFPB, 1979. 167 p.
- ANDRADE, Gilberto Osório. **Ares e ventos do Recife.** Departamento de Cultura do Diretório Acadêmico da Faculdade de Filosofia de Pernambuco, Universidade do Recife, 1952.
- ANDRADE, K. M. **Climatologia dos sistemas frontais sobre a América do Sul.** 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2005.
- ARAKI, Ricardo *et al.* **A história do clima de São Paulo.** São Paulo, 2012.
- AVIATION SAFETY NETWORK. **Database.** ASN, 2019. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/database/databases.php>>. Acesso em 02 out. 2019.
- AYOADE, J.O. **Introdução à Climatologia para os trópicos.** São Paulo: Difel, 2007.
- BAAS, A.C.W.; SHERMAN, D.J. Formation and behavior of aeolian streamers. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 110 (F3), 2005.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Aspectos de competitividade do setor aéreo**. Informe Infraestrutura, nº 42, Brasília, 2001. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>. Acesso em 16 out. 2018.

\_\_\_\_\_. **Estudo do setor de transporte aéreo do Brasil**. Relatório final Visão e objetivos para o setor, Rio de Janeiro, 2010.

BARBOZA, E. R., FEDEROVA, N. **Corrente de Jato subtropical e complexo convectivo de mesoescala. Part I: Situações sinóticas e correntes principais para a formação do complexo convectivo de mesoescala**. In: Anais... Congresso Brasileiro de Meteorologia, 10, Brasília, 1998.

BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. **Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul**. CEP, v. 12220, n. 110, p. 973-990, 2000.

BENJAMIN, Walter. **Obras escolhidas II: Rua de mão única**. São Paulo: Brasiliense, 1993.

BETTINI, H. **Um retrato da aviação regional no Brasil**. Journal of Transport Literature, v. 1, n. 1, p. 46-65, 2007.

BÍBLIA, A. T. Marcos. *In*: BÍBLIA. **Bíblia Sagrada: Novo Testamento**. Tradução: José Luiz Gonzaga do Prado. São Paulo: Paulus, 2005. p. 1074.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo**. ICA 100-22. Rio de Janeiro: DECEA, 2010.

\_\_\_\_\_. **Regras do Ar**. ICA-100-12. Rio de Janeiro, RJ, 2016a.

\_\_\_\_\_. **Procedimentos relativos ao intercâmbio de informações meteorológicas entre os órgãos MET, ATS, SAR e AIS**. CIRCEA-63-1. Rio de Janeiro, RJ, 2016b.

\_\_\_\_\_. **Códigos Meteorológicos**. ICA 105-16. Rio de Janeiro: DECEA, 2017.

\_\_\_\_\_. **Espaço Aéreo Brasileiro**. Rio de Janeiro: DECEA, 2018a. Disponível em:<<http://www.decea.gov.br/?i=quem-somos&p=linha-do-tempo>>. Acesso em 15 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Espaço Aéreo Brasileiro**. Rio de Janeiro: DECEA, 2018b. Disponível em:<<http://www.decea.gov.br/?i=quem-somos&p=espaco-aereo-brasileiro>>. Acesso em 21 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Serviços de Tráfego Aéreo**. ICA 100-37. Rio de Janeiro: DECEA, 2018c. Disponível em:< <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4993>>. Acesso em 15 dez. 2019.

\_\_\_\_\_. **Nossas Unidades**. Rio de Janeiro: DECEA, 2018d. Disponível em:<  
[decea.gov.br/?i=unidade&p=cindacta-iii](https://decea.gov.br/?i=unidade&p=cindacta-iii)>. Acesso em 12 dez. 2019.

\_\_\_\_\_. **Serviços de gerenciamento de fluxo de Tráfego Aéreo. ICA 100-22**. Rio de Janeiro: DECEA, 2018e. Disponível em:<  
<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=48938>>. Acesso em 27 dez. 2019.

\_\_\_\_\_. **Plano Específico do Departamento de Controle do Espaço Aéreo para a implantação do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica. PCA 105-1**. Rio de Janeiro: DECEA, 2018f.

\_\_\_\_\_. **A meteorologia aeronáutica**. Rio de Janeiro: DECEA, 2019a. Disponível em:<  
[portal.decea.gov.br/?i=atividades&p=meteorologia-aeronautica?](https://portal.decea.gov.br/?i=atividades&p=meteorologia-aeronautica?)>. Acesso em 17 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **AEROESPACO**. Rio de Janeiro: DECEA, ano 16, n. 72, 2019b.

\_\_\_\_\_. **Glossário**. Rio de Janeiro: DECEA, 2019c. Disponível em:<  
<https://www.decea.gov.br/index.cfm?i=utilidades&p=glossario&single=2372>>. Acesso em 17 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **SWIN no ATM Nacional. DCA 351-5**. Rio de Janeiro: DECEA, 2019d.

\_\_\_\_\_. **Centros Meteorológicos. ICA 105-17**. Rio de Janeiro: DECEA, 2019e.

\_\_\_\_\_. **Sírius Brasil: o que é?** Rio de Janeiro: DECEA, 2019f. Disponível em:<  
[decea.gov.br/sirius/index.php/o-sirius/o-que-e-2](https://decea.gov.br/sirius/index.php/o-sirius/o-que-e-2)> Acesso em: 13 jan. 2020

CAMPOS, A.M. V. **Modelos conceituais de formação da corrente de jato no nordeste brasileiro**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2010.

CASTILLO, R. **Agronegócio e Logística em Áreas de Cerrado: expressão da agricultura científica globalizada**. Revista da ANPEGE, v. 3, n. 3, p. 21–27, 2007.

CASTRO, I. E., GOMES, P. C. C. & CORREA, R. L. (org.). **Geografia: conceitos e temas**. Rio de Janeiro, Bertrand, 1995.

CASTRO, N. de; LAMY, P. **A Desregulamentação do setor de transportes. Perspectivas da economia brasileira-1994**. Rio de Janeiro: IPEA, 1993.

CAVALCANTI, I. F. A. FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J., DIAS, M. A. F. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CENTRO DE GERENCIAMENTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA. **Portal Operacional**. Rio de Janeiro: CGNA, 2019. Disponível em:< <http://portal.cgna.gov.br/resources>>. Acesso em 27 dez. 2019.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS. **Painel SIPAER**. Brasília: CENIPA, 2018. Disponível em:<<http://www.fab.mil.br/cenipa/>>. Acesso em 02 out. 2019.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Cartas Sinóticas**. Cachoeira Paulista: CPTEC, 2016. Disponível em:< <http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise/>>. Acesso em 02 jan. 2019.

CHEDE, F. C.; CHEDE, I. C. G. **Meteorologia Aeronáutica para voo IFR**. Rio de Janeiro. ETA, 1979.

CIVITA, R.; RICO, G.; SIEWERS, K. **Tempo e Clima – Ciência & Natureza**. Ed. Abril Livros Ltda. Rio de Janeiro – RJ, p. 150, 1995.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte aéreo de passageiros**. Brasília, 2015. Disponível em:<[cms.cnt.org.br/Imagens CNT/Site 2015/Pesquisas PDF/Transporte e Economia Transporte Aéreo de Passageiros.pdf](https://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/Site%2015/Pesquisas/PDF/Transporte%20e%20Economia%20Transporte%20Aéreo%20de%20Passageiros.pdf)>. Acesso em: 13 out. 2017.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais**. Disponível em: < <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic?i=br>>. Acesso em: 09 out. 2017.

Dean, G. A., **The three-dimension wind structure over South America and associated rainfall over Brazil**. Available at the Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP., 164 pp., 1971.

DEMO, Pedro. **Introdução da Metodologia**. São Paulo: Atlas, 1985.

DEGOLA, T. S. D. **Impactos e variabilidade do anticiclone subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO (DOU). **Dispõe sobre Segundo o Regulamento do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (ROCA 21-109)**. Disponível em:< [http://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/71507941](http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/71507941)>. Acesso em 15 dez. 2019.

DUTRA-GOMES Rodrigo; VITTE, Antônio Carlos. **A Geografia e a teoria da complexidade: racionalidades, transmutação molecular, diferenciação de áreas e**

**hibridismo na construção de uma nova matriz espacial.** Revista Geonorte, [S.I], v.4, n.11, p.1-19, dez. 2013. ISSN 2237-1419.

EMPRESA BRASILEIRA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA (INFRAERO). **Anuário Estatístico Operacional.** Disponível em:< <https://transparencia.infraero.gov.br/estatisticas/>>. Acesso em 23 mai. 2019.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. AIM: **Section 1 - Meteorology.** Disponível em:< [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aim\\_html/chap7\\_section\\_1.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap7_section_1.html)>. Acesso em 23 jul.2018.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **Dimensão 22.** Brasília: FAB, 2018b. Disponível em: <[www.fab.mil.br/dimensao22](http://www.fab.mil.br/dimensao22)>. Acesso em 27 mar.2018.

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

FERREIRA A. G.; MELO N. G. S. **Os Principais Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da Região.** Revista Brasileira de Climatologia. v 1, n.1, p. 15-28, 2005.

GAN, Manoel Alonso; GAN, Manoel Alonso. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil.** INPE, 1982.

HASTENRATH, S. **Climate dynamics of the tropics.** Update ed. From Climate and Circulation of the Tropics. Kluwer Academic Publishers, 1991. 488p.

HOLTON, J. R. **Introdução à meteorologia dinâmica.** Edição traduzida. p. 391.1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:<<https://censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Redes e Fluxos do território: Ligações Aéreas.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:<<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-talogo?view=detalhes&id=287896>>. Acesso em: 07 out. 2017.

INFRAERO. **Anuário da Aviação.** Brasília, 2018. Disponível em:<[www4.infraero.gov.br/media/674694/anuario\\_2018.pdf](http://www4.infraero.gov.br/media/674694/anuario_2018.pdf)>. Acesso em: 14 jul. 2019.

INTERNATIONAL VIRTUAL AVIATION ORGANIZATION (IVAIO). **Influência do Vento (Tutorial).** p.3-4, 2008.

ITO, E. R. K. **Um estudo climatológico do anticiclone subtropical do Atlântico Sul e sua influência em sistemas frontais, 1999.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ITO, E. R. K.; AMBRIZZI, T. **Climatologia da posição da alta subtropical do atlântico sul para os meses de inverno.** A meteorologia brasileira além do ano 2000: Resumos, 2000.

KIM, J. H.; CHUN, H. Y. **Statistics and Possible Sources of Aviation Turbulence over South Korea.** 2010. Manuscrito - Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, South Korea, 2010.

KODAMA, Y. M. **Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones.** Journal of the Meteorological Society of Japan, v. 70, p. 813–835, 1992.

KOUSKY, Vernon E. **Frontal influences on northeast Brazil.** Monthly Weather Review, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. **Upper Tropospheric Cyclone Vortices in the Tropical South Atlantic.** Tellus, v. 33, 538-551, 1981.

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.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. **Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brasil.** Theoretical and Applied Climatology, v. 101, n. 1- 2, p. 121-135, 2010.

LOBO, P. R. V. **Meteorologia e oceanografia usuário navegante.** Rio de Janeiro:DHN, 2007.

LYRA, A. A; CHOU, S. C.; DEREZYNSKI, C. P. **Indicadores de turbulência a partir de previsões do modelo regional ETA.** Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso). v. 22, n.2, p. 161-182, 2007.

MANAHAN, S. E. **Environmental chemistry.** 7. ed. New York: CRC Press LLC. 2000.

MARCONI, M. A.; LAKATUS, E. V. **Fundamentos de Metodologia Científica.** São Paulo. Ed Atlas, 2003.

MATHIEU, J.; SCOTT, J. **An introduction to turbulent flow**. Cambridge: University Press, 2000, 368p.

MCKINSEY AND COMPANY. **Estudo do setor de transporte aéreo do Brasil**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: MCKINSEY & COMPANY, 2010. Relatório Consolidado. Disponível em: <[http://www.bn-des.gov.br/SiteBNDES/export\\_io\\_consolidado.pdf](http://www.bn-des.gov.br/SiteBNDES/export_io_consolidado.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

MELLO, I.B.F. **Climatologia e estudos de caso da turbulência de céu claro a partir de registro de aeronaves: Análises de dados observacionais e de modelagem**. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2015.

MELLO, I.B.F. **Um guia para pilotos: Turbulência Descomplicada**. Brasília, 2016. Disponível em:< <https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/profissionais-da-aviacao-civil/meteorologia-aeronautica/arquivos/GUIAPARAPILOTOSTURBULENCIA.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2019.

METED. Comet Program. **Education and Training**. Disponível em:<[https://www.met-ed.ucar.edu/training\\_detail.php](https://www.met-ed.ucar.edu/training_detail.php)>. Acesso em: 20 jul. 2019.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Anuário Estatístico de Transportes**. Brasília, 2018. Disponível em:<[infraestrutura.gov.br/anuario\\_estatistico.html](http://infraestrutura.gov.br/anuario_estatistico.html)>. Acesso em 12 jan. 2020

MOACIR, M. F. Silva. Circulação Superior. **Revista Brasileira de Geografia**, Distrito Federal, v.3, n.3, p.97-98, jul./set. 1941.

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

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, S. de O. **Dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Anais...(CD-ROM). Rio de Janeiro. 2000.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 17, n. 1, p. 1–10, Jun 2002. ISSN 1982-4351. Disponível em: <[http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista\\_busca\\_resultado.php](http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_busca_resultado.php)> Acessado em 20 dez. 2019.

MOREIRA M. **Análise de determinantes de custo de companhias aéreas**. 2011. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

MOREIRA, A. B. CAVALCANTI, P. F.S.; SOARES, D. B. S.; NÓBREGA, R. S. **Eventos extremos e a cidade: estudo de caso dos impactos causados por um evento climático em área urbana.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.10, n. 06, p. 1730-1745, 2017.

NOGÚES-PAEGLE, J.; MECHOSO, C.R.; FU, R.; BERBERY, E. H.; CHAO, W. C.; CHEN, T-C. et al. **Progress in Pan American CLIVAR research: Understanding the South American Monsoon.** Meteorológica, v. 27, p.3-30, 2002.

NOVAES, A. L.; SOUZA, A. O. **Nas asas da geografia com a aviação regional.** Geo Uerj, n. 34, p. 32772, 2019.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia.** São José dos Campos, 1986.

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia Fundamental.** Erechim, RS: Edifapes, 2001.

PACHECO, E. **Alteração das acessibilidades e dinâmicas territoriais na Região Norte: expectativas, intervenções e resultantes.** 2004. 479 f. Tese (Doutorado em Geografia). Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, 2004.

PÉDELABORDE, P. **Introduction à l'étude scientifique du climat.** Paris: L'information géographique, 1970.

PEZZI, L.P.; ROSA, M.B.; BATISTA, N.N.M. **A corrente de Jato subtropical sobre a América do Sul.** Climanálise Edição Especial de Outubro. Edição especial comemorativa de 10 anos. 1996.

RAGAZZO, C. E. J. **O processo de flexibilização e as fusões e os acordos de cooperação no mercado de transporte de passageiros.** In: SEAE/MF Documento de Trabalho. Brasília, n. 32, 2006.

RAMIREZ, M. C. V. **Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos de altos níveis no Nordeste do Brasil.** 1996. 109 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

RANGEL, I. **Obras reunidas.** Rio de Janeiro: Contraponto, 2005. 744 p.

REDE DE METEOROLOGIA DO COMANDO DA AERONÁUTICA. **REDEMET.** Brasília: DECEA, 2000. Disponível em <  
<https://www.redemet.aer.mil.br/?i=facilidades&p=api-redemet>>. Acesso: 25 jan. 2019.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. Maringá: **Boletim de Geografia Teorética**, 23(46-46):288-294, 1993.

RIEHL, H. **Meteorologia Tropical**. Rio de Janeiro: Aliança para o Progresso, 1965.

REITER, E. R. **Jet Stream Meteorology**. The University of Chicago Press, p. 515, 1969.

REPINALDO, H. F. B. **Vórtice ciclônico em altos níveis e corrente de jato do nordeste brasileiro em anos de El Niño e La Niña**. 2010.

ROCHA, A. **Uma análise da Integração em Rede: Os Transportes Aéreos no Estado da Bahia**. 2006. 181 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia. 2006.

ROCHA, A.C. **Estimativa simulada das emissões atmosféricas provenientes da aviação civil regular no Brasil em um dia específico**. 2012. 369 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

ROCHA, A.C. **Impacto provocado pelas condições meteorológicas sobre a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo e sobre as emissões de CO<sub>2</sub> nas áreas terminais de São Paulo e Rio de Janeiro**. 2017. 369 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

ROGERSON, Peter A. **Métodos estatísticos para a geografia: um guia para o estudante**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 348 p.

SANTOS, L. C. B.; ALMEIDA, C.A.; FARIAS, J. L.; *et al.* **Aviões – Sumário Estatístico 2008-2017**. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília. 2018.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4<sup>a</sup> ed., 5<sup>a</sup> reimpr. ed. São Paulo, SP: Edusp, Ed. da Univ. de São Paulo, 2009.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. **O Brasil: território e sociedade no início do século XXI**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Record, 2002.

SANTOSO, Edi; STULL, Roland. **Wind and temperature profiles in the radix layer: The bottom fifth of the convective boundary layer**. Journal of applied meteorology, v. 37, n. 6, p. 545-558, 1998.

SHARMAN, R. D.; DOYLE, J. D.; SHAPIRO, M. A. **An investigation of a commercial aircraft encounter with severe clear-air turbulence over western Greenland**. Journal of Applied Meteorology and climatology, v. 51, n. 1, p. 42-53, 2012.

SILVA, A. C. D. **As categorias como fundamentos do conhecimento geográfico**. In: O Espaço interdisciplinar. Coleção Espaços. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 1995. p. 25–37.

SILVA DIAS, M. A. F. **Meteorologia e Sociedade**. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia. v. 30, n. 2-3, 2006.

SIMÕES, A. F. **O transporte aéreo brasileiro no contexto de mudanças climáticas globais: Emissões de CO<sub>2</sub> e alternativas de mitigação.** 2003. 288 p. Tese (Doutorado em Planejamento Estratégico) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2003. Revista Formação, v. 2, n. 15, p. 37-55, 2003.

SOARES, E. **Metodologia científica: lógica, epistemologia e normas.** Atlas, 2003.

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.

STEINKE, E.T. **Climatologia Fácil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 143 p.

STORER Luke N; WILLIAMS Paul D.; GRILL Philip G. **Aviation Turbulence Dynamics, Forecasting and Response to Climate Change.** Pure and Applied Geophysics, UK, 2018.

TVARYANAS, Anthony P. **Epidemiology of turbulence-related injuries in airline cabin crew, 1992–2001.** Aviation, space, and environmental medicine, v. 74, n. 9, p. 970-976, 2003.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia.** INMET, 2001.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV 2 ed. 2012.

WOLFF, J. K.; SHARMAN, R. D. **Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States.** Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 47, n. 8, p. 2198-2214, 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – (WMO) **“Definition of the Tropopause,”** WMO Bulletin, No. 6, 1957, p. 136.

\_\_\_\_\_. **La Meteorologica da Aeronautica en America Latina.** WMO/Nota tecnica n° 88., 1969.

\_\_\_\_\_. **Education and Training Programme.** WMO/TD 1390, 2007.

\_\_\_\_\_. **Internacional Cloud Atlas.** No. 407, Genebra, 2017. Disponível em:<<https://cloudatlas.wmo.int/home.html>>. Acesso em 30 out. 2019.

ZAVATTINI, João Alfonso. **O Tempo e o Espaço nos Estudos do Ritmo do Clima no Brasil.** Geografia, v. 27, n. 3, p. 101-132, 2002.

ZIMMERMANN, D. F. R. **Subtropical jet climatology over South America.** 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica e Ciências Atmosférica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.