

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Jhoseny Souza Santos

**ÍNDICE CLASSIFICADOR DE EVENTOS DE ZONA DE CONVERGÊNCIA DO
ATLÂNTICO SUL (ZCAS) ASSOCIADOS A CHUVA INTENSA NO RIO DE
JANEIRO**

ORIENTADOR: Dr. Giovanni Dolif Neto

COORIENTADOR: Dr. Leonardo Bacelar Lima Santos

Florianópolis/SC

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Jhoseny Souza Santos

**ÍNDICE CLASSIFICADOR DE EVENTOS DE ZONA DE CONVERGÊNCIA DO
ATLÂNTICO SUL (ZCAS) ASSOCIADOS A CHUVA INTENSA NO RIO DE
JANEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Meteorologia, Centro de
Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Giovanni Dolif Neto

Coorientador: Dr. Leonardo Bacelar Lima Santos

Florianópolis/SC

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Jhoseny Souza

Índice classificador de eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) associados a chuva intensa no Rio de Janeiro / Jhoseny Souza Santos ; orientador, Giovanni Dolif Neto, coorientador, Leonardo Bacelar Lima Santos, 2021.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. ZCAS. 3. Rio de Janeiro. 4. chuva intensa. 5. Índice. I. Neto, Giovanni Dolif. II. Santos, Leonardo Bacelar Lima. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Meteorologia. IV. Título.

Jhoseny Souza Santos

**ÍNDICE CLASSIFICADOR DE EVENTOS DE ZONA DE CONVERGÊNCIA DO
ATLÂNTICO SUL (ZCAS) ASSOCIADOS A CHUVA INTENSA NO RIO DE
JANEIRO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Meteorologia e aprovado em sua forma final pelo curso de graduação em meteorologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de maio de 2021.

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias
Coordenados do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Giovanni Dolif Neto
Orientador

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN)

Prof^a. Dr^a. Regina Rodrigues Rodrigues
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Dedico este trabalho às matriarcas Isabel Rodrigues e Guilhermina Souza, que com pouquíssimo estudo e muita força criaram meus avós e ao meu pai, Reinaldo Santos, e a minha mãe, Claudinéia Souza, que durante toda a minha graduação me deram todo o suporte e motivação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço Àquele que, com seu cuidado onipresente, me deu a sabedoria e discernimento necessários para perseverar em meu objetivo.

A minha família, em especial meus pais - Claudinéia Souza e Reinaldo Santos - que nunca deixaram de me apoiar e fizeram do meu sonho, o sonho deles. Nunca teria chegado até aqui sem o nosso amor e união.

Às minhas grandes amigas Natália Cristina, que mesmo de longe esteve sempre presente, e Heloize Andrade, que se tornou uma parceria para todas as circunstâncias. Com vocês sei que posso contar para o que for preciso.

Aos meus colegas, que mais tarde se tornaram amigos, do laboratório Boiling. Em especial, Mônica Machuca, que acreditou no meu potencial e me deu a oportunidade de trabalhar como sua bolsista e ao Willian Radünz, que me incentivou a escrever meu primeiro artigo. Não fosse o incentivo deles e o apoio do professor Júlio César Passos, não teria ido ao Solar World Congress, no Chile em 2019 – uma das experiências mais marcantes de todos estes anos.

A professora Marina Hirota, que antes de gentilmente ceder à orientação deste trabalho ao Giovanni, foi uma grande ouvinte e conselheira, além de orientadora.

Aos pesquisadores do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Giovanni Dolif e Leonardo Santos, orientador e coorientador, que com sua vasta experiência em pesquisa, me conduziram pacientemente neste trabalho. Agradeço pelas palavras motivadoras nos momentos difíceis.

Aos professores e colegas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, onde cursei meu primeiro um ano e meio de curso e aos professores e amigos da Universidade Federal de Santa Catarina, que me acolheram na transferência e muito me ensinaram nos quatro anos posteriores.

E a todos àqueles que passaram pelo meu caminho, mesmo que breve, deixo aqui o meu muito obrigada!

“[...] Mas, depois de muita análise e observação, se você vê que algo concorda com a razão e conduz ao bem e benefício de todos, aceite-o e viva-o.”

Buda.

RESUMO

No Brasil, entre 1991 e 2012, mais de 30% dos desastres naturais estiveram associados a eventos de chuva intensa. No primeiro trimestre de 2020, 70% dos alertas emitidos pelo CEMADEN foram direcionados à região Sudeste, acumulando prejuízos materiais e imateriais. Apesar do Rio de Janeiro não ter registrado muitas ocorrências em 2020, o estado tem um extenso histórico de deslizamentos, alagamentos e enxurradas, como os da Região Serrana em 2011 e do Morro do Bumba em 2010, associados a eventos de ZCAS. Sabendo disso, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para identificação de episódios de ZCAS que causaram chuva intensa no Rio de Janeiro. Verificando a precipitação acumulada das estações do AlertaRio, 36 eventos foram selecionados, correspondendo a 72 instantes de tempo, uma vez que a chuva é resultado de um processo atmosférico que se inicia antes de sua precipitação. Para encontrar qual das 32 variáveis meteorológicas escolhidas melhor distingue eventos de ZCAS de chuva intensa, um índice Geral foi calculado. Foi encontrado que a umidade específica no nível de 500 hPa é a variável com melhor desempenho para os bimestres de Outubro-Novembro (ON) e Fevereiro-Março (FM), com índices globais médios de 0,91 e 0,81, respectivamente. Tal eficiência nos meses de ON e FM está atrelada ao fato de que, durante estes dois meses, a condição normal é de uma atmosfera relativamente mais seca do que o bimestre Dezembro-Janeiro (DJ), logo, durante eventos de ZCAS a presença de umidade é definidora. Para DJ, pico da estação chuvosa, a melhor variável passa a ser o vento meridional em 925 hPa ($G = 0,77$), uma vez que nestes meses toda a coluna atmosférica passa a estar úmida, de modo que a convergência - dada por tal componente do vento - torna-se mais eficiente para distinguir os eventos de ZCAS. A estabilidade do índice foi testada a partir de 30 amostras de treino (80%) e teste (20%) e obtidos como probabilidade de detecção médias 0,92, 0,84 e 0,80 e como taxas médias de alarme falso 0,23, 0,40 e 0,30 para os bimestres ON, DJ e FM, respectivamente. No entanto, as razões médias de alarme falso foram próximas de 1, em razão da pequena amostra de ZCAS+. Deste modo, o método desenvolvido tem potencial para ser aprimorado e posteriormente utilizado em salas de operação.

Palavras-chave: Chuva intensa. Rio de Janeiro. ZCAS. Umidade específica. Índice.

ABSTRACT

In Brazil, between 1991 and 2012, more than 30% of natural disasters were associated with events of intense rainfall. In the first quarter of 2020, 70% of the alerts issued by CEMADEN were directed to the Southeast region, accumulating material and immaterial losses. Even though Rio de Janeiro did not register many occurrences in 2020, the state has an extensive history of landslides, floods, and runoffs, such as those in the Mountain Region in 2011 and Morro do Bumba in 2010, associated with SACZ events. Knowing this, this work aims to develop a method to identify episodes of SACZ that caused intense rainfall in Rio de Janeiro. Checking the rainfall accumulated of the AlertRio stations, 36 events were selected, corresponding to 72 timesteps, since the rainfall is the result of an atmospheric process that begins earlier. To find which of the 32 chosen meteorological variables best distinguishes the SACZ of intense rainfall, a Geral index for the events was calculated. It was found that specific humidity at the level of 500 hPa is the variable with the best performance for the two bimesters of October-November (ON) and February-March (FM), with a Geral index mean of 0.91 and 0.81, respectively. Such efficiency in the months of ON and FM is linked to the fact that, during these two bimesters, the normal condition is of a relatively drier atmosphere than the December-January (DJ) bimester, therefore, during SACZ events the presence of humidity is defining. For DJ, the peak of the rainy season, the best variable becomes the meridional wind at 925 hPa ($G = 0.77$), since the entire atmospheric column in these months becomes humid, so that the convergence - given by such wind component - becomes more efficient to distinguish SACZ events. The stability of the index was tested with 30 training (80%) and testing (20%) samples and found as the probability of detection means 0.92, 0.84, and 0.80 and false alarm rates mean 0.23, 0.40, and 0.30 for the three bimesters ON, DJ and FM, respectively. However, the false alarm ratios mean were close to 1, due to the small sample of SACZ+. Therefore, the method developed has the potential to be improved and later used in nowcasting prediction.

Keywords: Intense Rainfall. Rio de Janeiro. SACZ. Specific Humidity. Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estatística da emissão de alertas por região brasileira.	15
Figura 2: Representação esquemática dos sistemas atmosféricos que atuam na baixa e alta troposfera da América do Sul	18
Figura 3: Imagem do Satélite Goes-16 às 06 UTC do dia 02/03/2019 no canal do infravermelho realçado.....	19
Figura 4: Porcentagem mensal de eventos ocorridos entre 2007 e 2017	19
Figura 5: Gráfico de ROC para as 25 combinações de condições testadas	21
Figura 6: Cartas sinóticas em superfície com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.	23
Figura 7: Cartas sinóticas em 500 hPa associadas com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.	24
Figura 8: Cartas sinóticas em 250 hPa associadas com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.	25
Figura 9: Principal padrão sinótico de ZCAS no RJ obtido a partir da primeira componente principal da PNMM	26
Figura 10: Domínio considerado no estudo, 20,5S-25,5S e 45W-38W	29
Figura 11: Tabela de contingência.	33
Figura 12: Índice G para ON	35
Figura 13: Índice G para DJ	35
Figura 14: Índice G para FM	36
Figura 15: Distribuição para umidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre ON	37
Figura 16: Distribuição para umidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre DJ	37
Figura 17: Distribuição para umidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre FM	38
Figura 18: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para ON.....	39
Figura 19: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para DJ.....	39
Figura 20: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para FM.....	40

Figura 21: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para ON	41
Figura 22: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para DJ.....	41
Figura 23: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para FM	42
Figura 24: Variabilidade do Índice G para a umidade específica em 500 hPa.....	43
Figura 25: Dispersão dos índices POD e POFD para ON.....	44
Figura 26: Dispersão dos índices POD e POFD para DJ.....	45
Figura 27: Dispersão dos índices POD e POFD para FM.....	45
Figura 28: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre ON.....	46
Figura 29: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre DJ.....	47
Figura 30: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre FM.....	47
Figura 31: Variabilidade das classes a) Verdadeiros Positivos, b) Falsos Positivos, c) Verdadeiros Negativos e d) Falsos Negativos para cada bimestre.....	49
Figura 32: Variabilidade do valor absoluto da classificação “Insuficiente”.....	50
Figura 33: Variabilidade do valor absoluto das classificações a) Baixa, b) Média, c) Alta e d) Muito alta	51
Figura 34: Valores médios de cada classe para ON	52
Figura 35: Valores médios de cada classe para DJ	52
Figura 36: Valores médios de cada classe para FM.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista com os eventos de ZCAS que causaram chuva forte sobre a cidade do Rio de Janeiro.	30
Tabela 2: Ocorrências de ZCAS+ por bimestre.....	31
Tabela 3: Limiares críticos para o parâmetro estatístico utilizado.....	31
Tabela 4: Grau de confiabilidade para a previsão de evento ZCAS+ ou Não-ZCAS+.	32
Tabela 5: Valores médios do Índice G para cada bimestre.....	43
Tabela 6: Valores médios de POD e POFD para cada bimestre.	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB Alta da Bolívia

AgP Água Precipitável

ASAS Alto Subtropical do Atlântico Sul

CCM Complexo Convectivo de Mesoescala

CEMADEN Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

DJ Dezembro-Janeiro

EOF *Empirical Orthogonal Function*

FAR *False Alarm Rate*

FM Fevereiro-Março

JBN Jato de Baixos Níveis

L1 Limiar 1

L2 Limiar 2

MAP *Mean Annual Precipitation*

MS Mato Grosso do Sul

ON Outubro-Novembro

ONU Organização das Nações Unidas

PNMM Pressão ao Nível Médio do Mar

POD *Probability of Detection*

POFD *Probability of False Detection*

q Umidade Específica

RJ Rio de Janeiro

ROL Radiação de Onda Longa

SMAS Sistema de Monção da América do Sul

TE Teste

TFP Taxa de Falsos Positivos

TR Treino

TVP Taxa de Verdadeiros Positivos

u Componente zonal do vento

v Componente meridional do vento

VCAN Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo geral	16
1.1.2. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Sistema de Monção da América do Sul e a sua relação com a ZCAS	17
2.2. ZCAS: Métodos de detecção	20
2.3. ZCAS: Padrões Sinóticos Regionais	23
2.3.1. Padrões Sinóticos locais	26
3. METODOLOGIA	28
3.1. Área de estudo	28
3.2. Material e métodos	29
4. RESULTADOS	34
4.1. Índice Geral (G)	34
4.2. Índice Local (L)	38
4.3. Validação Meteorológica	40
4.4. Controle Estatístico	43
5. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Os eventos meteorológicos intensos estão frequentemente associados a desastres naturais, onde perdas humanas e materiais podem ser verificadas em seus mais diversos graus. O monitoramento nacional destas ameaças naturais é feito pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) - órgão responsável por emitir alertas hidrometeorológicos e geodinâmicos para 958 municípios (CEMADEN, 2020).

Das áreas monitoradas, a região Sudeste possui a maior quantidade de municípios contemplados e a segunda maior porcentagem - perdendo apenas para o Nordeste - de população localizada em área de risco, aproximadamente 9,6% (CEMADEN, 2017). A Figura 1, que apresenta a estatística dos alertas emitidos por região para o ano de 2019, mostra que o Sudeste foi a que concentrou a maior parte da emissão de avisos totais e relativos ao risco hidrológico.

Figura 1: Estatística da emissão de alertas por região brasileira.

REGIÃO	ALERTAS 2019	ALERTAS GEOLÓGICOS	ALERTAS HIDROLÓGICOS
Norte	149	62	87
Nordeste	478	276	202
Centro-Oeste	19	2	17
Sudeste	1189	525	664
Sul	357	216	141
Total de Alertas	2192		

Fonte: CEMADEN (2020).

Para o primeiro trimestre de 2020, 71% dos alertas emitidos tiveram origem na região Sudeste do Brasil. Ao total, houve 635 emissões de alerta para risco geológico e 634 para risco hidrológico, e tais números demonstram que ambos os processos geodinâmicos e hidrológicos devem ser igualmente estudados, de modo a preservar a vida humana e o que a cerca (CEMADEN, 2020).

Os estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo foram os que mais sofreram em virtude das condições meteorológicas do primeiro trimestre de 2020, cujo prejuízo líquido em danos materiais perfaz mais de 1 bilhão de reais e afetou quase 2 milhões de pessoas (CEMADEN, 2020). Apesar do Rio de Janeiro não ter sofrido

severamente com os sistemas meteorológicos neste mesmo período, o histórico do estado revela-se extenso no que tange os efeitos de desastres naturais.

Sobretudo, neste extenso histórico, destacam-se dois eventos: os movimentos de terra de 2010, no Morro do Bumba em Niterói, e o de 2011, na região Serrana do RJ. Dereczynski *et al.* (2017) evidenciaram que, uma das primeiras ações governamentais para enfrentar tais desastres, foi a criação do CEMADEN. Ainda em 2011, o deslizamento de terra que atingiu sete municípios da área Serrana do Rio de Janeiro, foi considerado pela Organização das Nações Unidas (ONU) o 8º maior desastre ocorrido nos últimos 100 anos (BUSCH; AMORIM, 2011).

Após 30 horas de chuvas, que chegaram a ultrapassar a marca dos 200 mm acumulados, em algumas cidades da região Serrana, o saldo das chuvas intensas foram 905 mortes, 345 desaparecidos e 34.600 pessoas desabrigadas ou desalojadas, além do grande prejuízo material (BUSCH; AMORIM, 2011). Já para o deslizamento no Morro do Bumba, de acordo com jornal online Band, contabilizou 46 mortes, 267 desaparecidos e 3.200 famílias desabrigadas, após a precipitação intensa em abril de 2010 (ALMEIDA, 2020).

Apesar das diferentes características geomorfológicas, geológicas e morfométricas de cada uma das bacias hidrográficas acometidas pelos desastres, ambos os eventos de abril de 2010 e janeiro 2011 têm um sistema meteorológico em comum: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (PINHEIRO *et al.*, 2011; BANCO MUNDIAL, 2012 E JÚNIOR; DORIGON, 2015).

Embora a ZCAS seja elemento do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), que é intensamente estudado por mais de duas décadas, a previsibilidade deste sistema meteorológico ainda é alvo de estudos, uma vez que, como dito acima, é mecanismo deflagrador de desastres naturais. Sabendo disso, este trabalho tem como proposta estudar 36 eventos de ZCAS, ocorridos de 2006 a 2016 no estado do Rio de Janeiro, para que assim, os centros de alerta e monitoramento, como o CEMADEN, possam prevêê-los com certo grau de acurácia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Distinguir, dentre toda a série temporal, os eventos de ZCAS que causaram chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro no período compreendido entre 2006 e 2016.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- (1) Desenvolver um método para identificação objetiva desses episódios;
- (2) Identificar, a partir do método, as características que distinguem os episódios de ZCAS que causaram grande volume de chuva no município do Rio de Janeiro, de 2006 a 2016.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de Monção da América do Sul e a sua relação com a ZCAS

Embora os comportamentos monçônicos tenham sido inicialmente verificados há mais três séculos, quando Hadley (1686) descreveu monção como a mudança na direção do vento em diferentes partes do oceano Índico, somente em 1998 o Sistema de Monção da América do Sul foi devidamente caracterizado através da verificação da mudança na direção dos ventos na região (ZHOU; LAU, 1998).

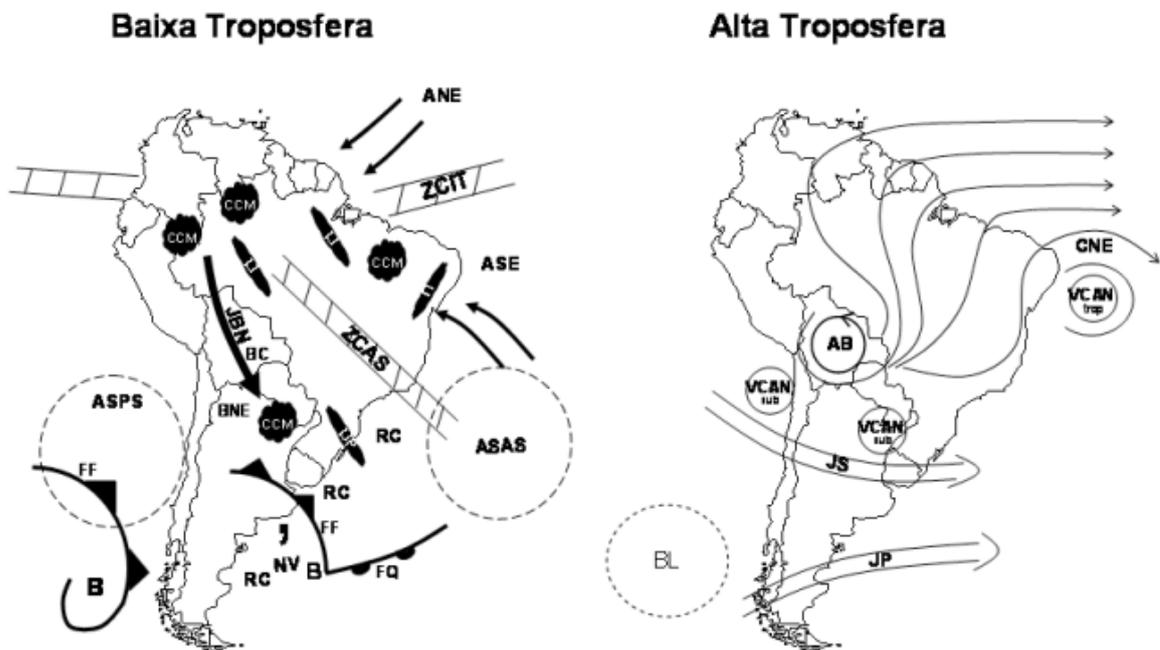
O SMAS começa a se organizar em meados de outubro na Bacia Amazônica, atinge a fase madura nos meses de dezembro e janeiro - com precipitação intensa no Centro-Oeste e Sudeste - e tende a se desaparecer entre fevereiro e março. Durante a fase madura, a atmosfera, tanto em altos quanto em baixos níveis, apresenta sistemas e configurações meteorológicos típicos, conforme mostra a Figura 2.

Em altos níveis (Figura 2 à direita), tipicamente em 200 hPa, configuram-se um centro de alta pressão próximo à Bolívia, denominada Alta da Bolívia (AB); um cavado - que pode se tornar uma baixa pressão, também denominada Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) - no Atlântico, próximo à costa do Nordeste Brasileiro e uma única configuração de jato, proveniente da união entre Jato Polar e Jato Subtropical, em torno de 60°S (ZHOU; LAU, 1998).

Para os baixos níveis (Figura 2 à esquerda), no Norte/Nordeste da Argentina, verifica-se um sistema de baixa pressão denominado Baixa do Chaco (BC); no Atlântico Sul, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se direcionada mais para dentro do continente e um Jato de Baixos Níveis (JBN), cujo escoamento de noroeste-sudeste é visto à leste da Cordilheira dos Andes (ZHOU; LAU, 1998; MARENGO *et al.* 2010).

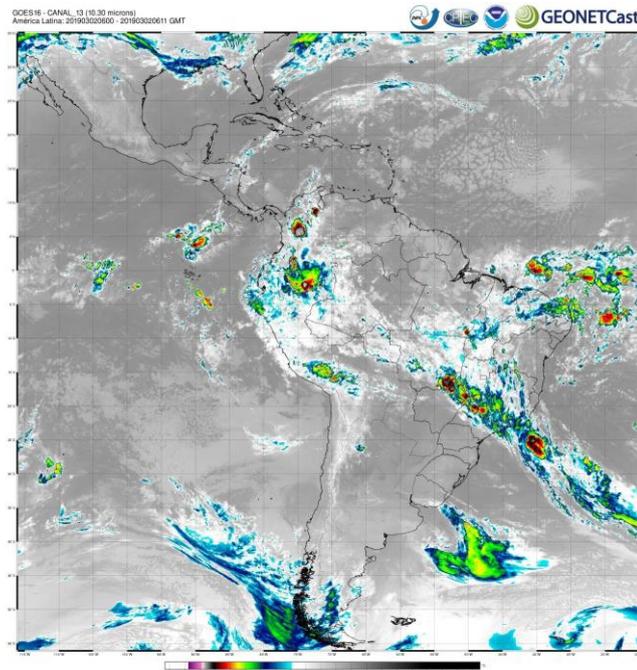
Associado a estes sistemas, ainda há na região do Sudeste do Brasil, uma grande área de convergência de massa de orientação noroeste-sudeste (Figura 3), que se estende da bacia Amazônica ao Atlântico Sul, denominada Zona de Convergência do Atlântico Sul (QUADRO, 1994). Nielsen *et al.* (2018) mostraram que, na média, de outubro a abril, cerca de 25% da precipitação do Sudeste do Brasil é proveniente da ZCAS.

Figura 2: Representação esquemática dos sistemas atmosféricos que atuam na baixa e alta troposfera da América do Sul. Legenda: ANE - ventos alísios de Nordeste, ASE - ventos alísios de Sudeste, ASPS - Alta Subtropical do Pacífico Sul, BC - Baixa do Chaco, BNE - Baixa no Noroeste da Argentina, LI - Linha de Instabilidade Tropical, LIP - Linha de Instabilidade Pré-Frontal, JS - Jato Subtropical, JP - Jato Polar, CNE - Cavado do Nordeste do Brasil, RC - Regiões Ciclogênicas, NV - Nuvem Vírgula, B - Baixa pressão, FF - Frente Fria, FQ - Frente Quente, BL - Bloqueios Atmosféricos. Durante o verão, uma única configuração de jato é visualizada em altos níveis.



Fonte: Reboita *et al.* (2010).

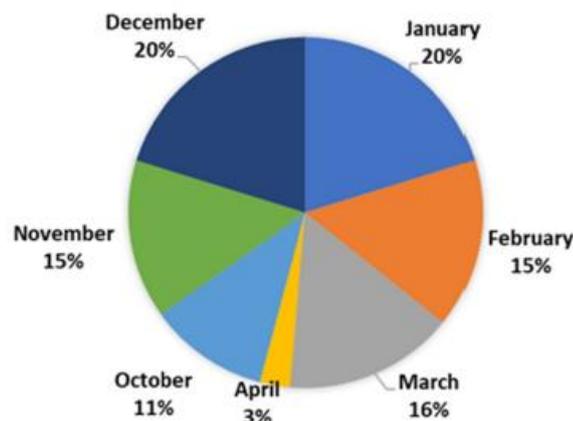
Figura 3: Imagem do Satélite Goes-16 às 06 UTC do dia 02/03/2019 no canal do infravermelho realçado.



Fonte: CPTEC (2021).

Muito embora, Zhou e Lau (1998) indiquem a presença de ZCAS apenas no estágio maduro do SMAS, QUADRO *et al.* (2016) apontou, a partir do Boletim Climanalise, que os eventos de ZCAS ocorrem durante os meses de novembro a março, podendo ser vistos alguns poucos episódios em outubro (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015; ESCOBAR; REBOITA, 2020), como observado na Figura 4. Os eventos de ZCAS ainda podem ter formação tanto no continente, quanto no oceano - fatores determinantes na variabilidade das chuvas intensas (CARVALHO *et al.*, 2004).

Figura 4: Porcentagem mensal de eventos ocorridos entre 2007 e 2017.



Fonte: Escobar e Reboita (2020).

2.2. ZCAS: Métodos de detecção

Somente recentemente, os episódios de chuva intensa em alguns estados do Sudeste do Brasil foram associados a eventos de ZCAS (CARVALHO *et al.*, 2002; MATOS *et al.*, 2014; AMBRIZZI; FERRAZ, 2015; ROSA *et al.*, 2020, ESCOBAR *et al.*, 2020), uma vez que, mesmo que de intensidade fraca, a estacionaridade do sistema pode produzir uma quantidade de precipitação similar aos eventos caracterizados como extremos (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015).

Quadro (1994) define que, para um episódio ser considerado ZCAS, as condições atmosféricas observadas durante o estágio maduro da SMAS devem persistir por, no mínimo, 4 dias. Este critério de estacionaridade da banda de nebulosidade se mostrou satisfatório para definir um evento como sendo ZCAS pelo fato de que a organização do sistema se daria apenas com a passagem de uma frente fria.

Embora este limiar de 4 dias seja bem aceito, a literatura mostra outros critérios para definir a ZCAS. Para estudar eventos extremos associados a este sistema no estado de São Paulo, Carvalho *et al.* (2002) utilizou limiares específicos tanto para a precipitação, quanto para a Radiação de Onda Longa (ROL). A chuva extrema foi definida quando o limiar de 20% acima da média climatológica de dezembro, janeiro e fevereiro era ultrapassado. Para a ROL, foi estabelecido que a área de convecção profunda poderia ser identificada ao ser igual ou menor que 200 W/m² (CARVALHO *et al.*, 2002).

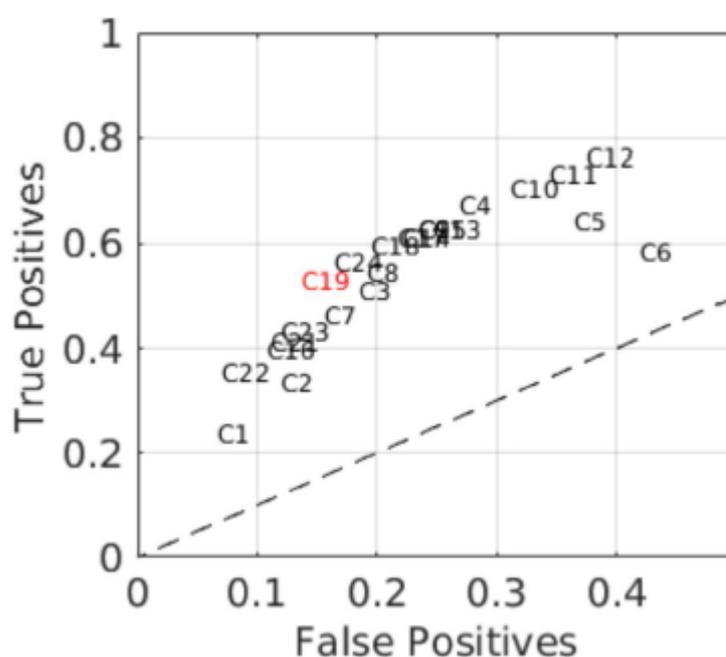
Assim como Carvalho *et al.* (2002), Rosa *et al.* (2020) utilizou o limiar compreendido entre 200 W/m² e 250 W/m² para ROL diária com o objetivo de determinar os eventos de ZCAS durante os meses de novembro a fevereiro. Além deste primeiro limiar, foi verificada a excentricidade da região, de modo a eliminar os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), obtendo assim três novos critérios: 2) a área dos segmentos convectivos ser menores 786,5 x 10³ km² e maiores que 1270,5 x 10³ km²; 3) número de pixels próximos a costa de tais segmentos deveriam oscilar entre 2 (220 km) e 8 (880 km) e 4) excentricidade entre 0,5 e 0,85.

A partir destas quatro condições, o candidato à ZCAS era verificado. Se os critérios fossem obedecidos, por pelo menos 4 dias - mesmo critério de Quadro (1994) - seria de fato classificado como um evento de ZCAS. Tal algoritmo foi construído com

o objetivo de desenvolver um método para identificar os eventos de ZCAS de forma objetiva e automática.

A acurácia do mesmo foi testada a partir do cálculo da Taxa de Falsos Positivos (TFP) e Taxa de Verdadeiros Positivos (TVP) para cada uma das combinações de condições. O algoritmo com melhor desempenho obteve 77% como TVP e 13% como TFP (ROSA *et al.*, 2020) - que corresponde a rodada C19 em vermelho no gráfico de Característica de Operação do Receptor (*Receiver Operator Characteristic*, do inglês, ROC) apresentado na Figura 5.

Figura 5: Gráfico de ROC para as 25 combinações de condições testadas. Legenda: True Positives = Verdadeiros Positivos e False Positive = Falsos Positivos.



Fonte: Rosa *et al.* (2020).

Procurando verificar a existência de outras variáveis que também poderiam se associar à ZCAS, Nielsen *et al.* (2018) empregou a técnica de Funções Empíricas Ortogonais (*Empirical Orthogonal Functions*, do inglês, EOF) em seis variáveis meteorológicas em diferentes níveis, dentre elas componentes zonal e meridional do vento, divergência, vorticidade, velocidade vertical, vorticidade e altura geopotencial.

Após análise cuidadosa, foi adotado que as componentes principais das seguintes variáveis: vorticidade relativa em 200 hPa, divergência do vento em 850 hPa e 200 hPa e velocidade vertical em 500 hPa seriam as escolhidas para desenvolver um método para prever os episódios de ZCAS (NIELSEN *et al.*, 2018).

A previsão foi elaborada a partir de um modelo de regressão logística, que é melhor aplicado a distribuições discretas. Usando o método da máxima verossimilhança e de variáveis estatísticas que avaliam o desempenho do modelo, assim como a TVP e a taxa de verdadeiros negativos (TVN), os autores encontraram distintas combinações de componentes principais para distintas regiões de ocorrência de ZCAS (NIELSEN *et al.*, 2018).

É necessário ressaltar que, a elaboração do método também contemplou a fase de controle estatístico, onde há a separação dos dados em treino e teste e a posterior obtenção de diversas amostras randômicas. Os autores obtiveram 10 amostras para o desenvolvimento do método, sendo cada uma delas com 90% para treino e 10% para teste (NIELSEN *et al.*, 2018).

Visando operacionalizar o modelo construído de forma binária, Nielsen *et al.* (2018) determinaram limiares críticos a partir da divisão dos índices em 100 diferentes percentis. A sensibilidade do método, para cada região de ocorrência de ZCAS, foi novamente testada usando as métricas TVP e TVN. Para o melhor limiar, foi encontrado que a TVN fica entre 90% e 100%, não atingindo valores inferiores a 80%. Já para a TVP, os valores máximos estão entre 70% e 80% para as ZCAS nas áreas continentais e 100% para as oceânicas (NIELSEN *et al.*, 2018).

De forma semelhante à Nielsen *et al.* (2018), Ambrizzi e Ferraz (2015) também desenvolveram um método, a partir das EOFs, para prever os eventos de ZCAS. Os eventos de precipitação extrema foram selecionados seguindo quatro critérios: 1) 7 dias consecutivos de chuva, com pelo menos um com precipitação 35% acima da climatologia mensal - definida num período de 30 anos para cada ponto de grade; 2) a soma da precipitação em dois dias antes e dois dias depois deve ser equivalente à, pelo menos, 20% da climatologia; 3) a soma dos três dias antes e depois deve ser equivalente a, no mínimo, 10% do valor médio mensal e 4) nenhum valor deve ser nulo (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015).

Os eventos selecionados a partir dos critérios acima foram confrontados então com àqueles definidos a partir do registro histórico de ZCAS do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), considerando um desvio de dois dias. A partir deste método, foram encontrados 60 eventos extremos para os dados de precipitação real, onde 40 deles coincidem com os episódios de ZCAS observados - cujo total são de 48 eventos para o período de estudo, resultando numa acurácia de 83% e superestimativa de 25% (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015).

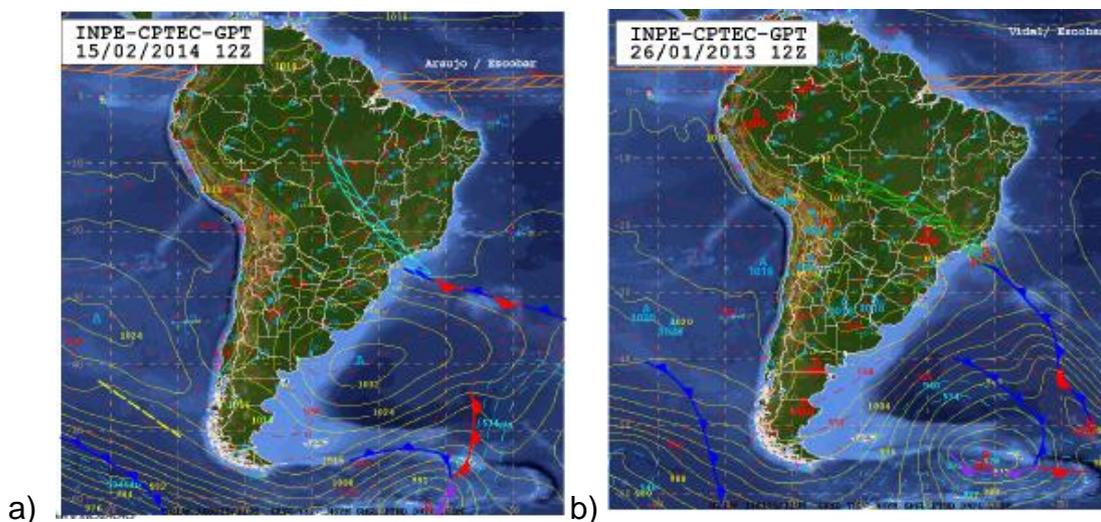
2.3. ZCAS: Padrões Sinóticos Regionais

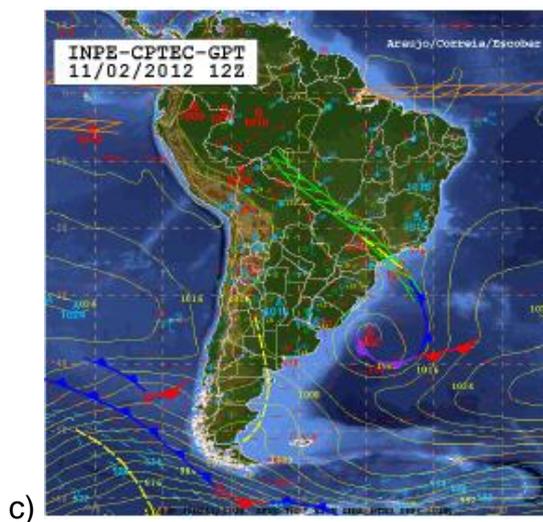
Apesar das detecções automáticas serem diferenciais na tomada de decisão para a emissão de alertas, é importante dar a elas um significado físico, para encontrar os padrões sinóticos associados às ZCAS. Desta forma, a previsão feita com a associação de métodos objetivos e o reconhecimento de padrões atmosféricos típicos torna-se ainda mais acurada.

Partindo de cartas sinóticas - que permitem a visualização da direção do fluxo de umidade, local de convergência de massa e região de advecção de vorticidade - e dos seguintes limiares críticos: água precipitável acima de 45 mm e umidade relativa superior a 80%, Escobar (2019) identificou três padrões sinóticos de ZCAS, sendo que o dominante é responsável por 60% dos eventos.

O principal padrão admite a configuração visualizada na Figura 6a: ASAS na região oceânica e um sistema frontal estacionário na costa do Sudeste em superfície e um forte anticiclone sobre o Centro-Sul do Brasil somado a um cavado frontal sobre o Atlântico no nível de 500 hPa (Figura 7a). Nesta configuração principal, os sistemas AB e VCAN estão em sua posição climatológica (Figura 8a), isto é, AB situada sobre a Bolívia e o VCAN à leste da costa do Nordeste.

Figura 6: Cartas sinóticas em superfície com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.

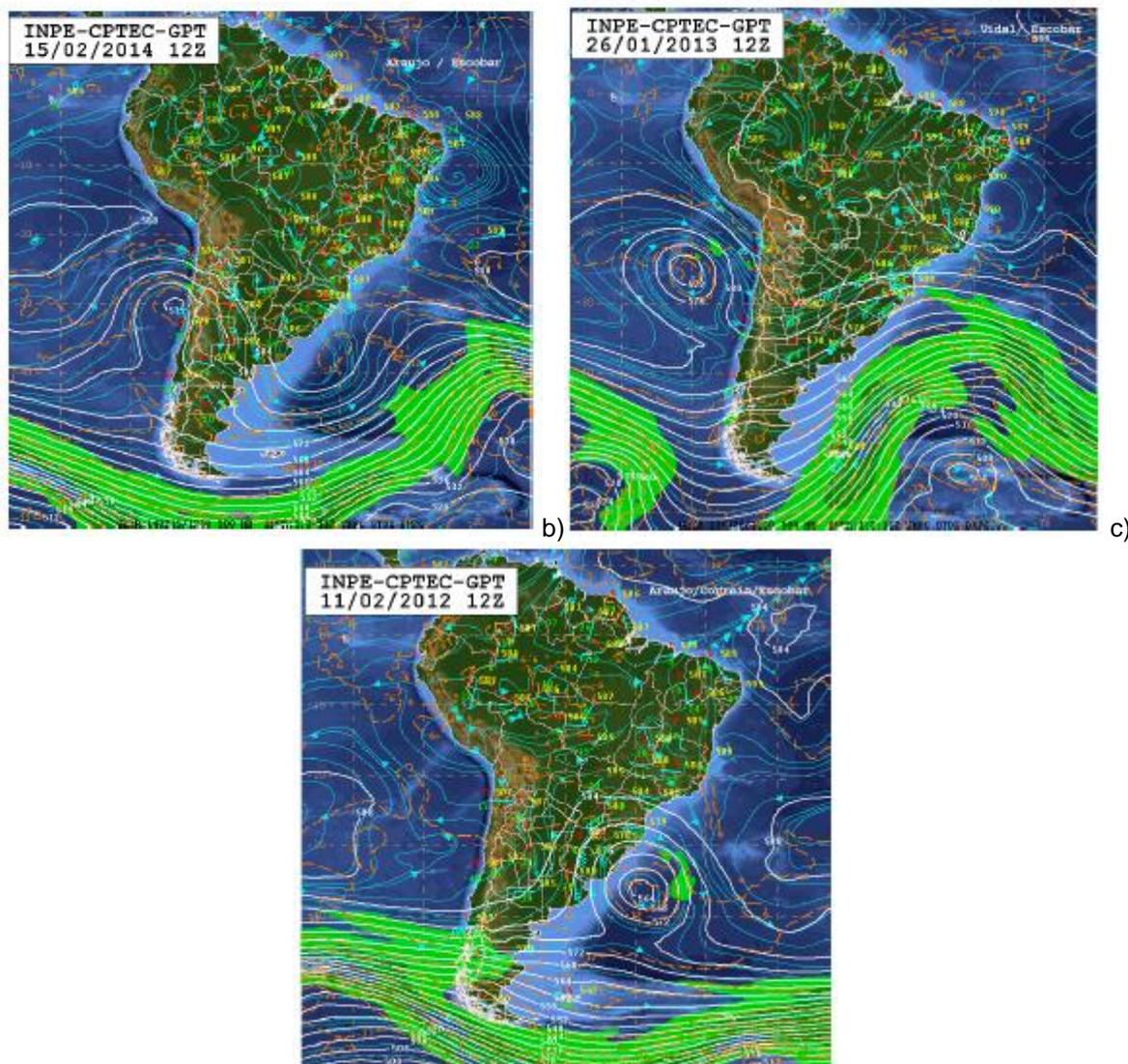




c)

Fonte: Escobar (2019).

Figura 7: Cartas sinóticas em 500 hPa associadas com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.

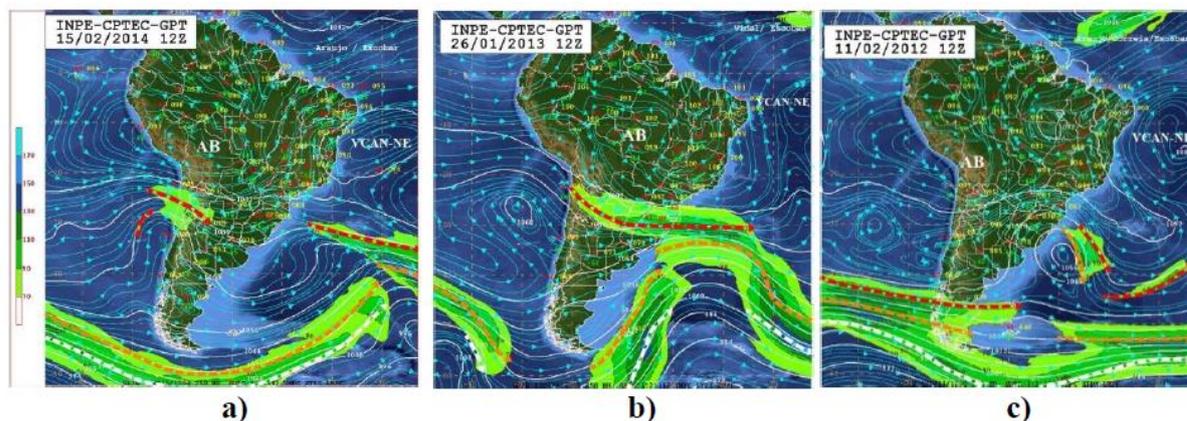


b)

c)

Fonte: Escobar (2019).

Figura 8: Cartas sinóticas em 250 hPa associadas com os três padrões mais frequentes de ZCAS para os dias a) 15/02/2014 às 12 UTC, b) 26/01/2013 às 12 UTC e c) 11/01/2012 às 12 UTC.



Fonte: Escobar (2019).

O segundo padrão sinótico também está associado a um sistema frontal em superfície (Figura 6b), mas que se estende do Rio de Janeiro ao interior do Mato Grosso do Sul (MS). Como suporte a esta frente fria, no nível de 500 hPa (Figura 7b) observam-se um cavado frontal sobre o Atlântico e uma crista intensa sobre o continente. Em altos níveis, a AB e o VCAN são observados, respectivamente, a nordeste e a norte de suas posições climatológicas (Figura 8b) (ESCOBAR, 2019).

O terceiro padrão, por sua vez, é composto por um sistema de baixa pressão sobre o Atlântico (Figura 6c) e que estende até 500 hPa (Figura 7c), sendo que o cavado em 500 hPa se estende do MS ao oceano adjacente. Essa intensa baixa pressão é responsável por favorecer os ventos da direção norte e por intensificar a advecção de ar quente e úmido para a faixa Noroeste/Sudeste do Brasil. No nível de 250 hPa, o VCAN localiza-se aproximadamente na sua posição climatológica, enquanto que a AB levemente deslocada para oeste (Figura 8c) (ESCOBAR, 2019).

Posteriormente, a partir da aplicação da técnica de EOFs nos dados de Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) e geopotencial nos níveis de 850 hPa, 500 hPa e 250 hPa, Escobar e Reboita (2020) definiram um quarto padrão sinótico vinculado à apenas um VCAN localizado na região Centro-Oeste do Brasil - cuja baixa pressão em superfície aparece vinculada a padrões subtropicais e não frontais.

De forma mais simplista, os padrões atmosféricos dos episódios de ZCAS encontrados por Rosa *et al.* (2020) são semelhantes aos encontrados por Escobar (2019): 1) circulação ciclônica (BC), fechada ou não, sobre o continente; 2) cavado

próximo da costa do Uruguai; 3) cavado na costa do Nordeste Brasileiro em altos níveis e 4) Alta da Bolívia também em altos níveis.

Adicionalmente, Rosa *et al.* (2020) verificou que a intensidade e a posição do cavado na costa do Uruguai têm grande influência na atividade convectiva tanto das ZCAS oceânica, quanto na ZCAS continental. A transformação deste cavado numa baixa fria e seu deslocamento em direção à norte é uma forte característica da ZCAS oceânica, sendo que esse tipo de formação tem relação direta com eventos de chuvas fortes e secas intensas nos estados de São Paulo, RJ, Espírito Santo e Bahia.

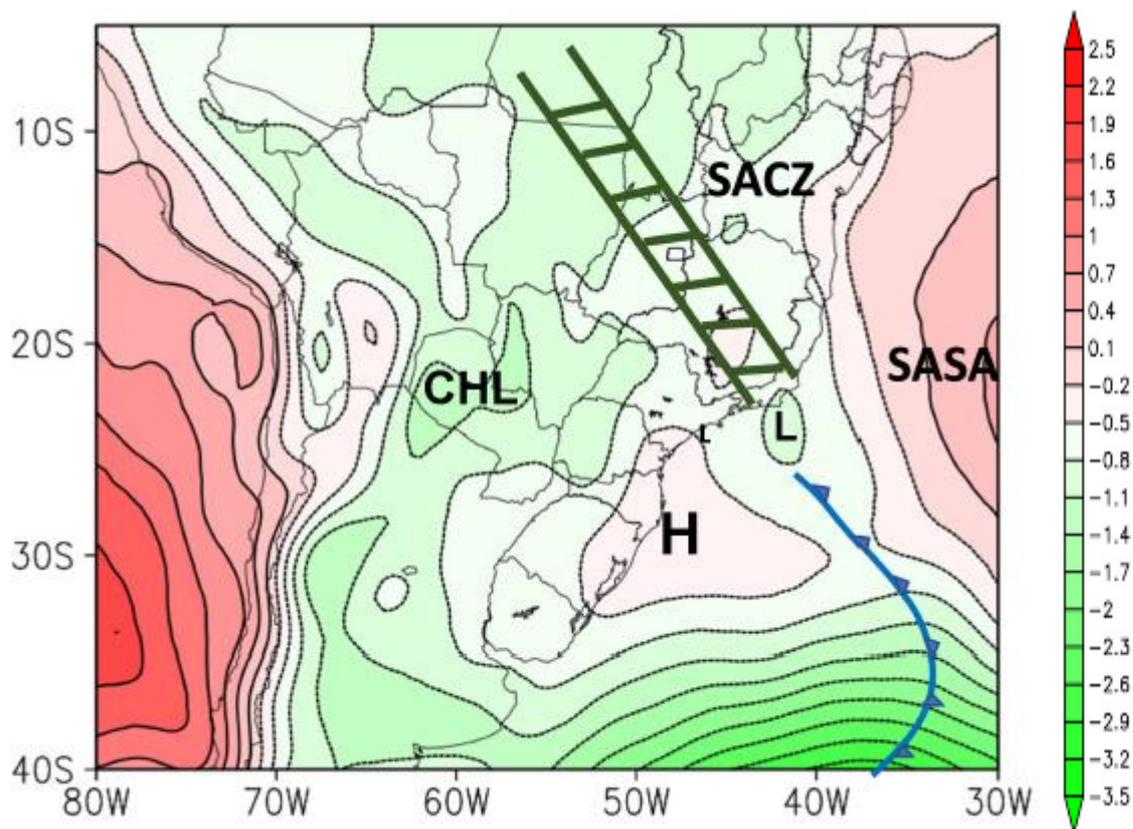
Tal relação das ZCAS oceânica com os eventos extremos já havia sido investigada por Carvalho *et al.* (2002). Cerca de 30% dos episódios de chuva intensa ocorridos em São Paulo foram do tipo oceânico, contra 35% do tipo continental. Dinamicamente, foi verificado que a configuração dos eventos de formação marítima está associada a um fortalecimento do jato subtropical na região do Atlântico em altos níveis.

2.3.1. Padrões Sinóticos locais

Com relação aos padrões sinóticos observados para o estado de interesse, Escobar *et al.* (2020), a partir da identificação de determinados sistemas meteorológicos em cartas sinóticas de superfície e altos níveis, a posterior associação destes eventos com a precipitação acumulada (30mm/dia) nos pluviômetros e aplicação das EOFs em sete variáveis, também encontrou quatro padrões sinóticos principais associados aos episódios de ZCAS no RJ.

O principal deles, que explica 21,4% da variância total dos dados de PNMM, está associado a uma formação mais oceânica: uma frente fria estacionária que se conecta a um sistema de baixa pressão no Atlântico próxima à costa do estado (Figura 9). Neste padrão predominante, ainda é possível observar a BC, localizada entre o Norte da Argentina, Centro-Oeste do Paraguai e Sul da Bolívia, e a ASAS, que se encontra mais ao sul da posição climatológica (ESCOBAR *et al.*, 2020).

Figura 9: Principal padrão sinótico de ZCAS no RJ obtido a partir da primeira componente principal da PNMM. Legenda: CHL - Baixa do Chaco, SASA - Alta Subtropical do Atlântico Sul, SACZ - Zona de Convergência do Atlântico Sul, H - Alta Pressão e L - Baixa Pressão.



Fonte: Escobar (2020).

Já os segundo e terceiro padrões, que explicam, respectivamente, 20% e 19% da variância, são semelhantes aos modos encontrados por Escobar (2019): possuem um pós frontal mais extenso e intenso sobre o RJ. O quarto padrão (9,4% da variância) está atrelado a um sistema de baixa pressão, quase estacionário, ao sul do estado (ESCOBAR *et al.*, 2020).

Foi encontrado ainda que no dia precedente à chuva intensa, a umidade específica em 850 hPa adquire uma configuração de dipolo, com anomalias positivas (negativas) no Sudeste do Brasil (Sul) que está relacionada à advecção de ar frio em função do avanço do pós frontal (ESCOBAR *et al.*, 2020). Em altos níveis, foi visualizado que um cavado anômalo no Sudeste é responsável por intensificar a chuva no RJ. O cavado anômalo na alta troposfera próxima à costa do Uruguai, assim como mencionada por Rosa *et al.* (2020), também foi verificado.

É importante salientar também que, em diversos episódios foi encontrado que o ciclone associado a frente fria têm características subtropicais, de modo que sua estacionariedade é também responsável por intensificar as chuvas nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo (ESCOBAR *et al.*, 2020).

Deste modo, fica nítido que compreender os tipos de ZCAS existentes, as variáveis que melhor a representam e sua associação a eventos extremos é importante para definir a metodologia da pesquisa científica. Apesar de Nielsen *et al.* (2018), antes de ter desenvolvido seu método de detecção de ZCAS, tenha analisado o desempenho de diversas variáveis meteorológicas, o trimestre chuvoso foi analisado como um todo, desconsiderando a possibilidade de que os meses de transição possam ter características diferentes.

É importante ressaltar também que, não foram encontrados trabalhos que avaliassem o desempenho da água precipitável e da umidade específica em médios e altos níveis na caracterização dos eventos de ZCAS. Sabendo dessas duas lacunas existentes e de como o estado do Rio de Janeiro sofre com desastres naturais deflagrados por chuvas intensas decorrentes da ZCAS, este trabalho visa desenvolver um novo método objetivo na identificação de episódios de chuva forte associada às ZCAS.

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Para compreender a atuação da ZCAS no RJ, é necessário entender os tipos de clima da região. De acordo com Alvares *et al.* (2014), quase metade (44,1%) do estado do Rio de Janeiro é marcado pelo clima Aw - tropical com inverno seco e verão chuvoso, seguido pelo Cwa (17,9%) - clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno - e Cfa (14,3%) - subtropical com verão quente, sendo verificado também uma pequena porcentagem dos climas Af, Am, Cfb e Cwb.

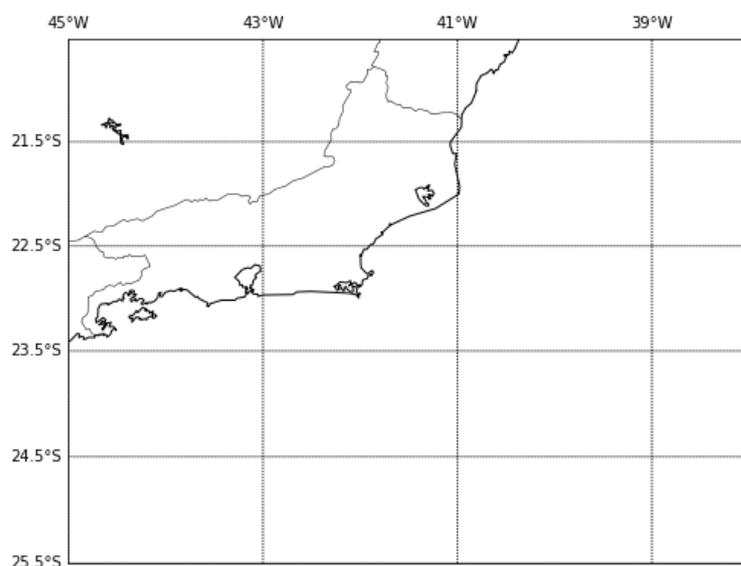
O clima tropical com inverno seco é visto na região costeira e se estende até a Região dos Lagos, próxima de 23°S. Já as condições climáticas subtropical quente e subtropical de altitude estão localizadas na Serra do Mar (ALVARES *et al.*, 2014). Por conta da topografia e da proximidade com o oceano, o regime de chuvas do estado do Rio de Janeiro é influenciado por sistemas de mesoescala, como circulações de brisa vale-montanha e mar-terra e CCMs, e sistemas de escala sinótica, tais como frentes frias, associadas a ZCAS e a ASAS (LIMA *et al.*, 2021).

Silva e Dereczynski (2014) verificaram que a Precipitação Média Anual (*Mean Annual Precipitation*, do inglês, MAP) atinge valores máximos, de 2500 a 2800 mm, na região serrana e mínimos, entre 700 e 1300 mm, em regiões pouco elevadas e

próximas à costa. Sazonalmente, os picos de precipitação em todo o estado ocorrem durante os meses de verão.

Pensando nos fatores climáticos, em sua influência sazonal no regime de chuvas acima descrito, e no fato de que a ZCAS de formação oceânica está associada a desastres no estado (ROSA *et al.*, 2020), a região de estudo (Figura 10) compreende tanto a totalidade da parte continental do RJ, como uma significativa porção oceânica.

Figura 10: Domínio considerado no estudo, 20,5S-25,5S e 45W-38W.



Fonte: Autora (2021).

3.2. Material e métodos

Para o estudo dos eventos de ZCAS que causaram chuva intensa (a partir deste momento mencionados como “ZCAS+”) sobre a cidade do Rio de Janeiro foram utilizadas as variáveis: PNMM, Água Precipitável (AgP), umidade específica (q) e componentes meridional e zonal do vento (u e v , respectivamente), sendo as três últimas avaliadas em 10 níveis de pressão diferentes: 1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 775 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa e 200 hPa.

As variáveis meteorológicas acima mencionadas foram provenientes da reanálise Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) versão 1 (2006-2010) e versão 2 (2011-2016), cujas resoluções espacial e temporal são, respectivamente, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ para a região abaixo (acima) de 10°S (10°N) e 6 horas (SAHA *et al.*, 2010; SAHA *et al.*, 2014).

Os eventos de ZCAS+ a serem estudados foram selecionados com base na precipitação acumulada de 26 estações pluviométricas do sistema Alerta Rio, durante o período de 2006 a 2016. Para a caracterização de episódios de chuva intensa, assim como Escobar *et al.* (2020), foi utilizado o limiar crítico de 30 mm/dia acumulado em pelo menos 4 das 26 estações.

As datas, listadas na Tabela 1, ainda satisfizeram a condição de que a banda de nebulosidade associada a ZCAS estivesse sobre o Rio de Janeiro no dia em que a chuva ultrapassou o limiar estabelecido.

Tabela 1: Lista com os eventos de ZCAS que causaram chuva forte sobre a cidade do Rio de Janeiro.

Data e horário dos eventos de chuva intensa		
29 nov. 2006 às 12Z	12 fev. 2009 às 18Z	24 mar. 2012 às 12Z
15 dez. 2006 às 12Z	13 mar. 2009 às 12Z	15 dez. 2012 às 18Z
24 out. 2007 às 00Z	04 dez. 2009 às 12Z	26 jan. 2013 às 12Z
05 nov. 2007 às 00Z	23 jan. 2010 às 06Z	07 fev. 2013 às 00Z
13 dez. 2007 às 00Z	01 mar. 2010 às 06Z	07 nov. 2013 às 00Z
20 dez. 2007 às 12Z	30 mar. 2010 às 00Z	17 fev. 2014 às 00Z
20 jan. 2008 às 18Z	27 dez. 2010 às 12Z	07 mar. 2014 às 18Z
03 fev. 2008 às 12Z	12 jan. 2011 às 00Z	22 mar. 2014 às 18Z
13 mar. 2008 às 12Z	17 out. 2011 às 12Z	06 fev. 2015 às 12Z
13 nov. 2008 às 18Z	18 dez. 2011 às 12Z	23 mar. 2015 às 00Z
25 dez. 2008 às 18Z	01 jan. 2012 às 18Z	29 fev. 2016 às 18Z
21 jan. 2009 às 12Z	27 jan. 2012 às 12Z	12 mar. 2016 às 12Z

Fonte: Autora (2020).

Foi adotado ainda o critério de considerar como parte dos eventos de chuvas intensas, os instantes de tempo imediatamente anteriores, ou seja, 6 horas antes do horário do máximo de chuva, uma vez que a precipitação acumulada pode ter sido gerada por condições atmosféricas que antecedem ao dado de máxima chuva, sendo assim, o número total de instantes de tempo que perfazem a amostra de precipitação intensa é de 72.

Portanto, o presente estudo trabalhou com dois conjuntos amostrais distintos: (A) eventos de Não-ZCAS+ e (B) eventos de ZCAS+. É necessário ressaltar ainda que, cada um dos conjuntos foi separado por bimestres: (1) outubro-novembro (ON); (2) dezembro-janeiro (DJ); (3) fevereiro-março (FM). Esta separação foi adotada com o objetivo de determinar um critério ajustado para cada um dos bimestres, facilitando a classificação. A Tabela 2 apresenta a quantidade de instantes de tempo classificados como ZCAS+ para cada um dos bimestres.

Tabela 2: Ocorrências de ZCAS+ por bimestre.

Bimestre	Quantidade de eventos ZCAS+
ON	12
DJ	30
FM	30

Fonte: Autora (2021).

Foram definidos dois limiares críticos L1 e L2 (Tabela 3) a partir da média e desvio padrão para cada uma das 32 combinações de variável/nível dos conjuntos ZCAS+ e Não-ZCAS+ para o domínio apresentado na Figura 10. É importante ressaltar que, foram testados também: a) média ± 2 desvios padrões e b) média ± 3 desvios padrões, no entanto, a melhor separação foi observada ao utilizar c) média ± 1 desvio padrão.

Estes limiares foram utilizados para uma “varredura espacial” em cada um dos instantes de tempo de cada bimestre dos conjuntos ZCAS+ e Não-ZCAS+. A partir da contagem dos pontos de grade que estavam acima de L1 ou abaixo de L2, a porcentagem relativa ao domínio total foi calculada para cada um dos instantes de tempo de todo o espaço amostral. A partir destes valores, uma verificação visual da qualidade de separação da variável em questão foi realizada com o auxílio de histogramas.

Tabela 3: Limiares críticos para o parâmetro estatístico utilizado.

Parâmetro	L1	L2
Média	média + 1 desvio padrão	média - 1 desvio padrão

Fonte: Autora (2021).

Buscando quantificar a qualidade de tal separação, isto é, indicar o grau de separabilidade dos eventos de ZCAS+ e Não-ZCAS+ para cada uma das variáveis em cada nível, um índice Geral - denominado Índice G - foi determinado a partir da Equação (1).

$$G = 1 - \frac{\text{intersecção}}{200} \quad (1)$$

O termo “intersecção” representa a menor “altura” de cada um dos intervalos do histograma e o valor “200” corresponde a união da porcentagem total (100%) de cada um dos conjuntos ZCAS+ e Não-ZCAS+. Desta forma, o índice proposto tem valores entre 0,5 e 1, onde 0,5 indica separabilidade insuficiente e 1 separabilidade total.

Além de um índice Geral, foi adicionalmente criado um índice local - denominado Índice L, que é dado de forma similar ao Índice G, conforme mostra a Equação (2).

$$L = 1 - \frac{\text{intersecção}}{\text{união}} \quad (2)$$

No caso do Índice L, o termo “união” refere-se à soma das colunas (rosa e azul, conforme Figuras 18, 19 e 20) referentes aos conjuntos ZCAS+ e Não-ZCAS+ para cada intervalo do domínio. O cálculo da “intersecção” é o mesmo que aquele utilizado no cálculo de G.

Como o objetivo do trabalho é fazer a previsão dos eventos de ZCAS+, a partir deste índice local, foram propostos os graus de confiabilidade visualizados na Tabela 4. Assim, a previsão de um evento, a partir da melhor variável classificadora, pode ser dada com um grau de confiabilidade, facilitando a tomada de decisão de um previsor de tempo.

Tabela 4: Grau de confiabilidade para a previsão de evento ZCAS+ ou Não-ZCAS+.

Índice L	Grau de confiabilidade
0,5 - 0,59	Insuficiente
0,6 - 0,69	Baixo
0,7 - 0,79	Médio
0,8 - 0,89	Alto

0,9 - 1,0	Muito Alto
-----------	------------

Fonte: Autora (2021).

A partir das variáveis com melhor desempenho de Índice G, propõe-se a execução de um controle estatístico, com o objetivo de verificar a acurácia do método apresentado. Para tanto, a série temporal de 10 anos de dados para cada bimestre foi separada em dois conjuntos: treino (TR) e teste (TE), onde o conjunto TR somou 80% dos dados e TE 20%.

Ainda é necessário ressaltar que, para constatar de forma precisa a estabilidade dos índices G para cada bimestre, o controle estatístico foi realizado com 30 “sementes” diferentes, isto é, foram obtidos 30 conjuntos de treino e teste distintos entre si.

Assim como Rosa *et al.* (2020) e Nielsen *et al.* (2018), a amostra de teste foi avaliada com o auxílio da tabela de contingência (Figura 11). Para cada uma das sementes, foram calculadas: Probabilidade de Detecção (*Probability of Detection*, do inglês, POD) - idêntico a TVP - e a Probabilidade de Falsa Detecção (*Probability of False Detection* do inglês, POFD) - mesmo que TFP, que são respectivamente dados pelas Equações 3 e 4 e permitem gerar o gráfico de ROC, como o de Rosa *et al.* (2020) mostrado na Figura 5.

Figura 11: Tabela de contingência.

		Observado	
		Sim	Não
Previsto	Sim	a	b
	Não	c	d

Fonte: Adaptado de Wilks (2011).

$$POD = \frac{\text{positivos corretos (a)}}{\text{positivos corretos (a) + falhas na detecção (c)}} \quad (3)$$

$$POFD = \frac{\text{alarmes falsos (b)}}{\text{alarmes falsos (b) + negativos corretos (d)}} \quad (4)$$

Na Equação (3), os “positivos corretos” - letra “a” da Figura 11 - se referem aos eventos que foram classificados como ZCAS+ de forma correta e “falhas na detecção”

- letra “c” - correspondem aos episódios que eram de ZCAS+, mas que não foram classificados como tal, independente da confiabilidade.

Já os “alarmes falsos” - correspondente a letra “b” - da Equação (4) dizem respeito aos eventos Não-ZCAS+ classificados como ZCAS+, também independente da confiabilidade da classificação. Os “negativos corretos”, que por sua vez é representado pela letra “d”, foram a detecção negativa de maneira adequada.

As métricas POD e POFD, usadas para gerar o gráfico ROC, são probabilidades condicionais e representam, respectivamente, a taxa de acerto e a taxa de alarme falso. É importante ressaltar ainda que, há também uma terceira métrica, dada pela Equação (5), a Razão de Alarme Falso (*False Alarm Ratio*, do inglês, FAR), que por sua vez, evidencia a fração de previsões positivas incorretas. Deste modo, um método muito acurado e preciso teria valores de POD próximos de 1 e valores de POFD e FAR próximos de zero (WILKS, 2011).

$$FAR = \frac{\text{alarmes falsos (b)}}{\text{alarmes falsos (b) + positivos corretos (a)}} \quad (5)$$

Por fim, as análises e manipulações dos dados acima mencionados foram realizadas a partir da ferramenta Google Colaboratory (Google Colab), que por sua vez é um serviço de execução de códigos em Python, diretamente do navegador do usuário, na nuvem do Google. Embora não seja ilimitada, é gratuita e permite edição e compartilhamento de programas entre usuários, tornando-se muito vantajosa, sobretudo durante o período de encontros e aulas à distância.

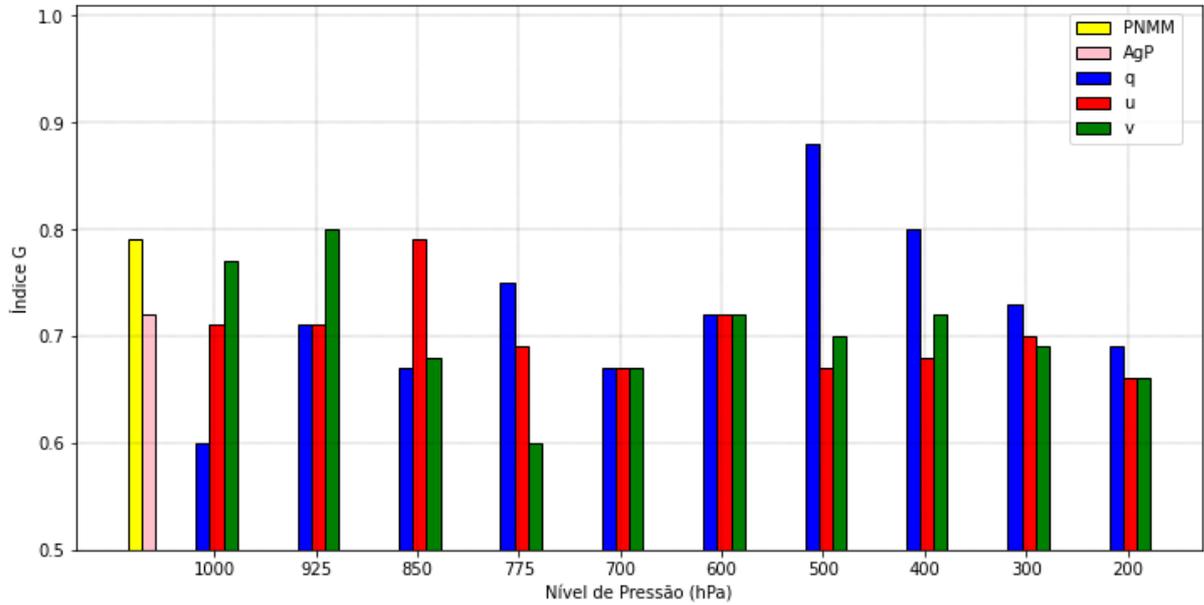
4. RESULTADOS

4.1. Índice Geral (G)

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam o valor do Índice G para os bimestres ON, DJ e FM para as 32 variáveis utilizadas para testar o método. Em termos de desempenho, o semestre ON é aquele onde as variáveis atingem seus valores mais altos, com destaque para a umidade específica em médios níveis (500 hPa). Já para o bimestre DJ, a componente meridional do vento em baixos níveis (925 hPa) é a variável que melhor distingue os eventos ZCAS+ e Não-ZCAS+. Para o último

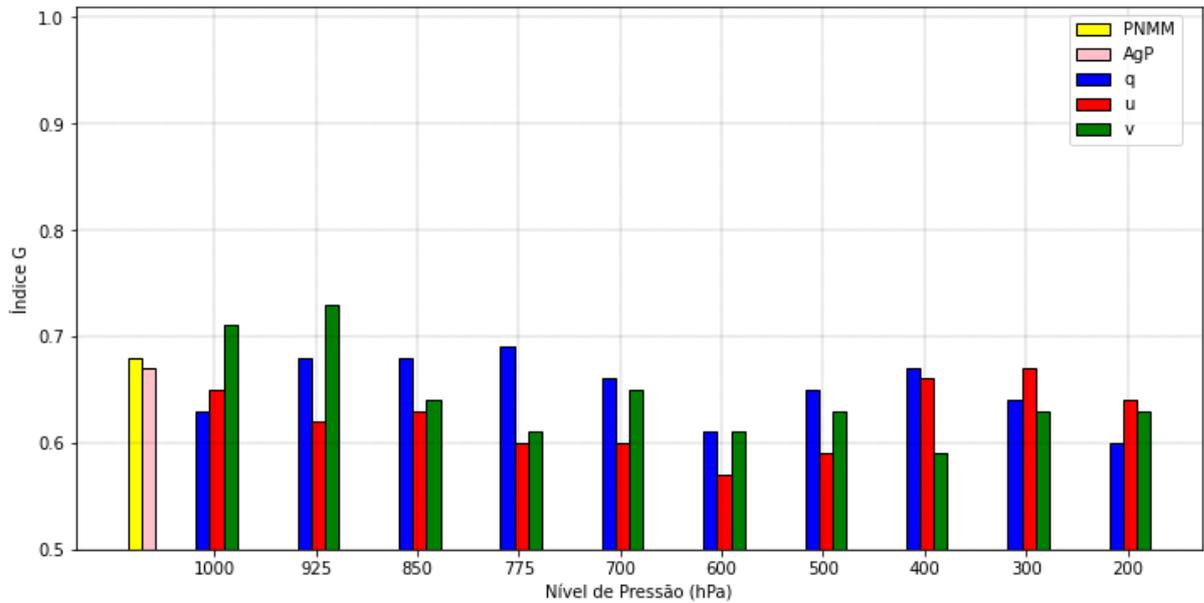
bimestre (FM), a umidade específica novamente em 500 hPa aparece com melhor desempenho.

Figura 12: Índice G para ON.



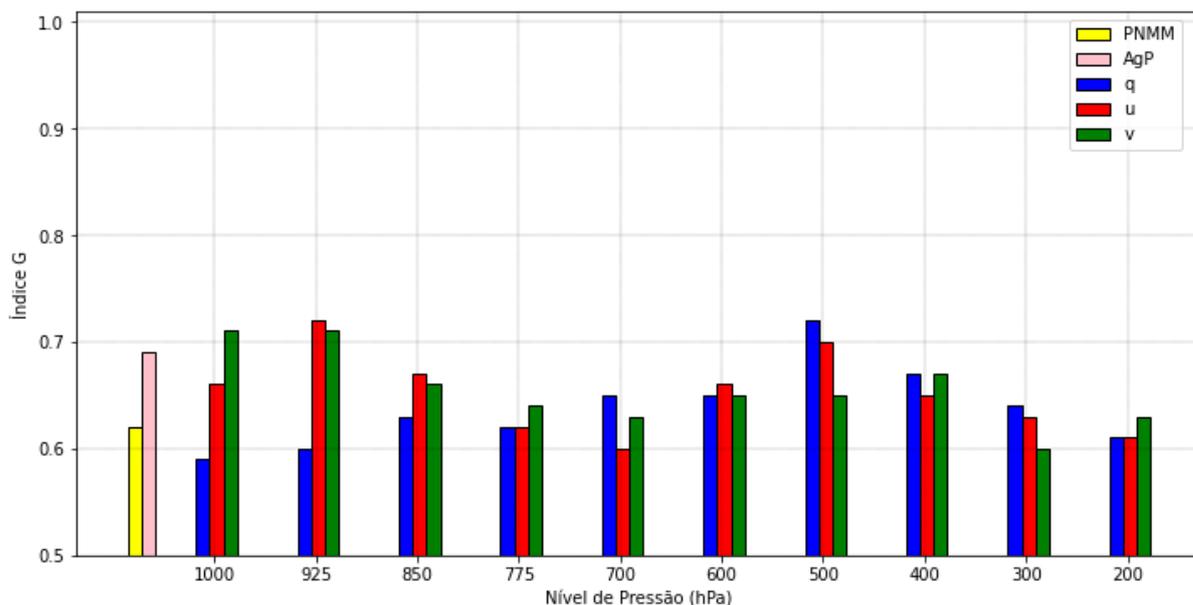
Fonte: Autora (2021).

Figura 13: Índice G para DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 14: Índice G para ON.



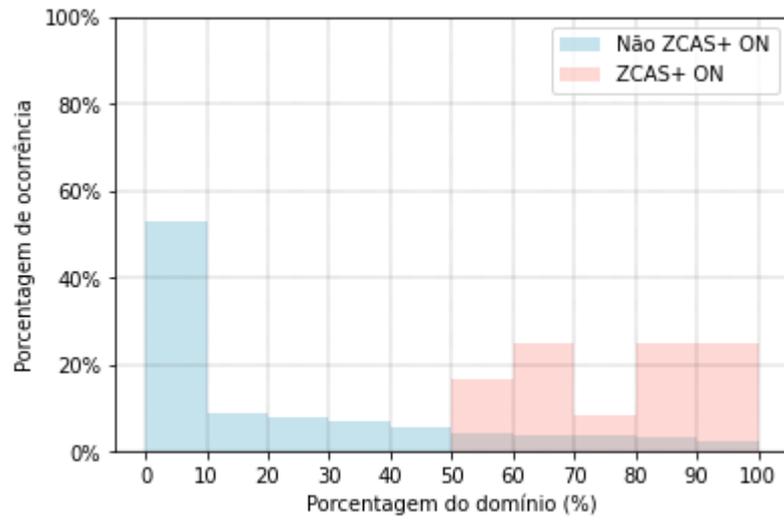
Fonte: Autora (2021).

Em termos de configuração meteorológica, os eventos de ZCAS+ são caracterizados por uma região de convergência intensa, que por sua vez, é uma área onde o conteúdo de umidade é alto. A umidade específica em médios níveis se destaca (Figuras 12 e 14) para os bimestres ON e FM por terem condições de estação de transição, isto é, a umidade atmosférica em altos níveis durante os eventos de ZCAS+ é muito maior do que durante os eventos Não-ZCAS+.

Para o bimestre DJ, meses do pico da estação chuvosa, a umidade está distribuída de forma mais uniforme em toda a coluna atmosférica, de modo que a componente meridional, responsável por indicar a convergência de massa, torna-se mais eficiente no processo de distinguir os eventos em questão (Figura 13).

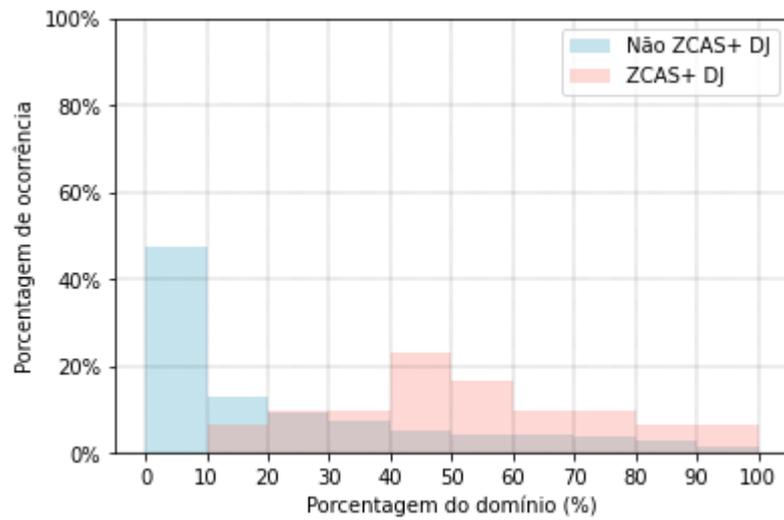
A partir da constatação de uma atmosfera mais úmida em médios níveis, uma modificação na metodologia foi proposta. Ao invés de usar dois limiares, optou-se por utilizar apenas L1, forçando ainda mais a distinção entre os eventos Não-ZCAS+ e ZCAS+. Os histogramas visualizados nas Figuras 15, 16 e 17 apresentam a nova separabilidade entre os conjuntos em estudo para q em 500 hPa em cada um dos três bimestres.

Figura 15: Distribuição para unidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre ON.



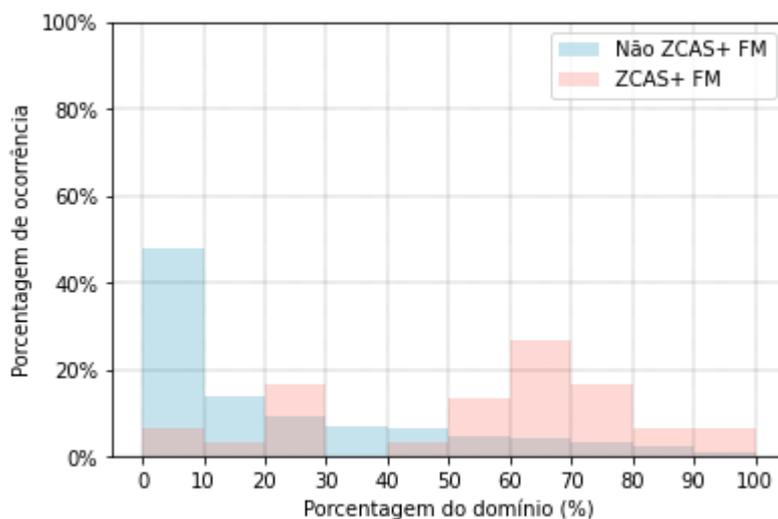
Fonte: Autora (2021).

Figura 16: Distribuição para unidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 17: Distribuição para umidade específica acima do limiar L1 referente ao bimestre FM.



Fonte: Autora (2021).

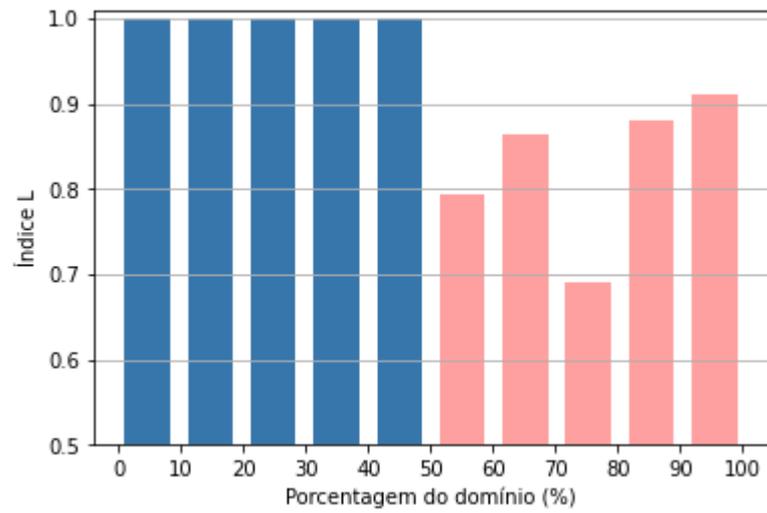
Após a modificação na metodologia, em todos os bimestres, mais de 40% dos eventos Não-ZCAS+ estão no primeiro intervalo de porcentagem do domínio (Figuras 15, 16 e 17), isto é, nestes dias, apenas uma área muito pequena têm valores altos de umidade. Os 60% restantes ficam distribuídos nos demais intervalos, sendo notável uma queda na porcentagem de ocorrência à medida que a área do domínio aumenta.

Os índices G também foram recalculados e os novos valores encontrados foram: 0,91 para ON, 0,77 para DJ e 0,81 para FM, representando uma melhora significativa (18,5% e 12,5%, para DJ e FM, respectivamente) para aqueles bimestres onde o desempenho da variável q era mediano. Deste modo, a modificação da metodologia se mostrou mais efetiva na distinção dos eventos ZCAS+ e Não-ZCAS+.

4.2. Índice Local (L)

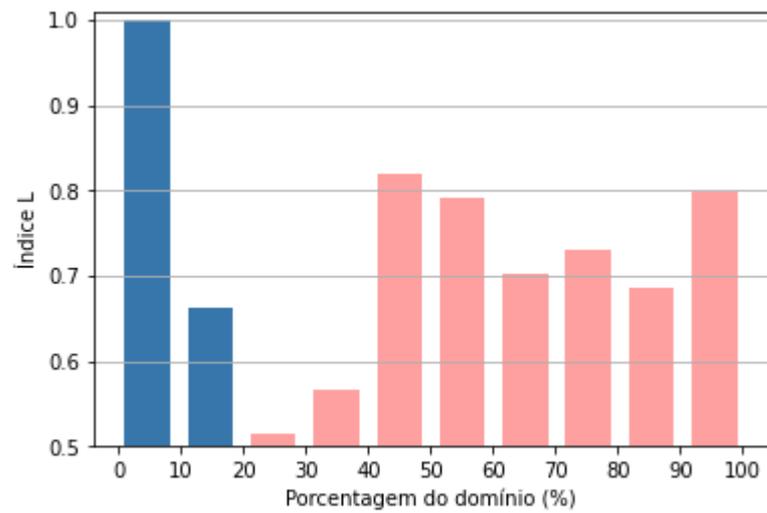
As Figuras 18, 19 e 20 apresentam o índice local (L) referente aos histogramas mostrados nas Figuras 15, 16 e 17. A cor azul (rosa) indica que naquele intervalo do domínio os eventos Não-ZCAS+ (ZCAS+) se sobressaíram. Ainda, como mencionado na metodologia, cada uma das colunas das Figuras 15, 16 e 17 pode ser classificada com o grau de confiabilidade apresentado na Tabela 4.

Figura 18: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para ON.



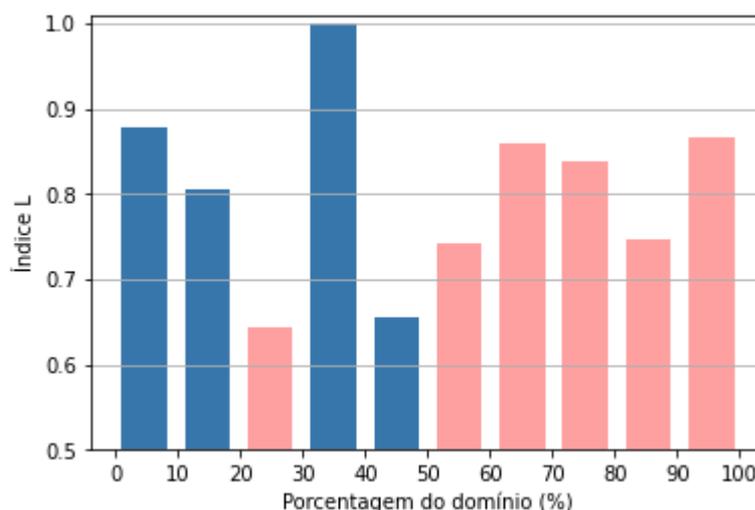
Fonte: Autora (2021).

Figura 19: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 20: Índice L referente à umidade específica em 500 hPa para FM.



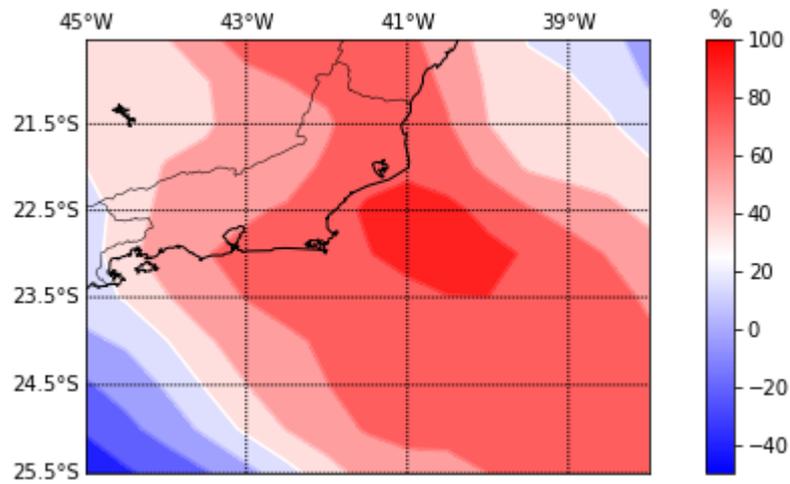
Fonte: Autora (2021).

Como reflexo do eficiente desempenho do índice G, a confiabilidade para o bimestre ON é muito alta em metade dos intervalos da porcentagem do domínio. No entanto, DJ possuem dois intervalos (20-30% e 30-40%) onde o grau de confiabilidade é insuficiente, tornando difícil qualquer inferência sobre o evento sem o auxílio da análise das condições atmosféricas atuantes. Já para o último bimestre, a confiabilidade mais inferior, assim como para ON, é baixa.

4.3. Validação Meteorológica

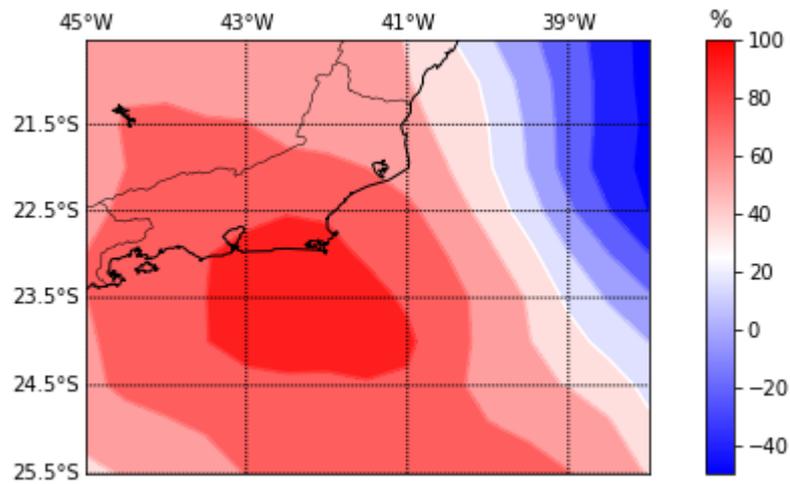
Para verificar a concordância entre os resultados do Índice G com as hipóteses meteorológicas assumidas acima, as Figuras 21, 22 e 23 apresentam as anomalias, isto é, as diferenças percentuais médias da umidade específica em 500 hPa dos eventos ZCAS+ em relação aos episódios de Não-ZCAS+ nos três bimestres.

Figura 21: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para ON.



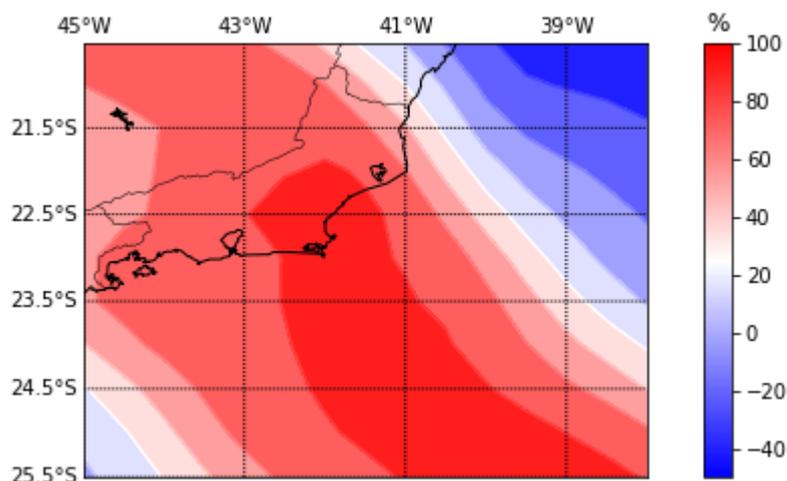
Fonte: Autora (2021).

Figura 22: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 23: Anomalia percentual média da umidade específica em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ relativa à média Não-ZCAS+ para FM.



Fonte: Autora (2021).

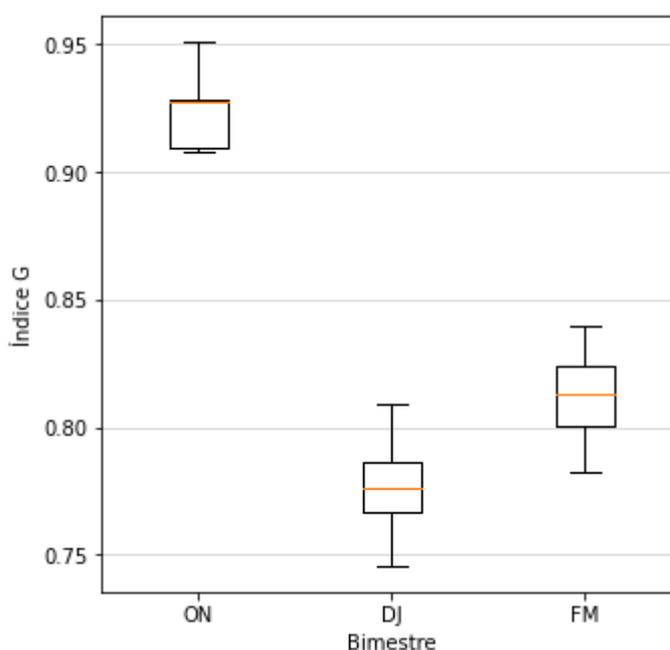
Corroborando com os valores de Índice G, nota-se que durante o bimestre ON (Figura 21) há um maior gradiente espacial das anomalias percentuais na direção leste-oeste, sobre o Estado do Rio de Janeiro, com valores mais positivos na costa e oceano adjacente. Durante os meses mais chuvosos (DJ), é perceptível a homogeneidade positiva em toda a região continental e na maior parte do oceano, indicando, de forma geral, uma atmosfera em nível médio mais úmida (Figura 22). Em FM, a área de maior diferença percentual positiva aumenta ainda mais, em direção ao oceano, e o gradiente na direção leste-oeste sobre o RJ volta a aparecer (Figura 23).

Ainda é importante ressaltar que, a média da umidade em 500 hPa dos eventos de ZCAS+ chegam a ser o dobro da média da umidade observada durante os dias de Não-ZCAS+ em uma área significativa, que se inicia no oceano e que aumenta no decorrer dos bimestres. Já com relação às anomalias percentuais negativas, no canto superior direito das figuras, nota-se que também ficam intensas com o passar dos meses. Tal configuração é muito semelhante àquela visualizada na Figura 3, evidenciando a convergência de umidade na direção noroeste-sudeste, típico comportamento da nebulosidade associada à ZCAS.

4.4. Controle Estatístico

A partir da amostra de treino, novos histogramas, como os das Figuras 15, 16 e 17 foram gerados e, a partir deles, novos valores de Índice G foram obtidos. A Figura 24 apresenta um gráfico do tipo *boxplot* que permite a visualização da variabilidade de G, enquanto que a Tabela 5 apresenta os valores médios para cada bimestre.

Figura 24: Variabilidade do Índice G para a umidade específica em 500 hPa.



Fonte: Autora (2021).

Tabela 5: Valores médios do Índice G para cada bimestre.

Bimestre	G médio
ON	0,92
DJ	0,78
FM	0,81

A partir da Figura 24, pode-se observar que o bimestre com maior variabilidade, e também com desempenho mais inferior dos três no Índice G é DJ, com valor médio e mediana de 0,78. Já para ON, o índice adquire sua forma mais estável, isto é, têm menor variação líquida, com mediana e média em 0,92. Por fim, para o último

bimestre, há uma variação significativa de G tanto positiva quanto negativamente, com valor da mediana e média também coincidindo em 0,81.

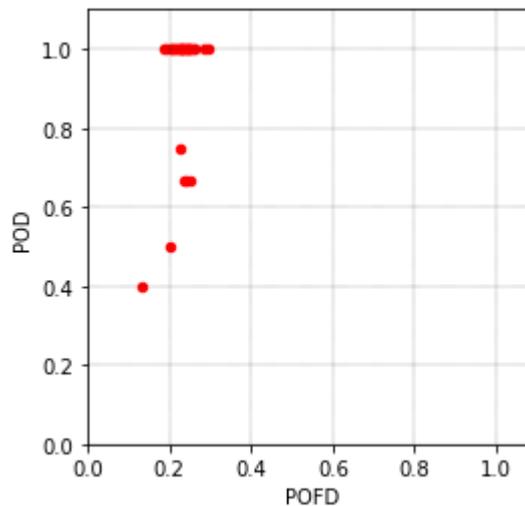
Com a amostra de teste foram calculados, para cada uma das sementes, a POD e a POFD. As Figuras 25, 26 e 27 apresentam os gráficos de dispersão para a umidade específica em 500 hPa para cada um dos bimestres. Já os valores médios de POD, POFD e FAR para cada bimestre podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores médios de POD e POFD para cada bimestre.

Bimestre	POD médio	POFD médio	FAR médio
ON	0,93	0,23	0,98
DJ	0,84	0,40	0,97
FM	0,80	0,30	0,97

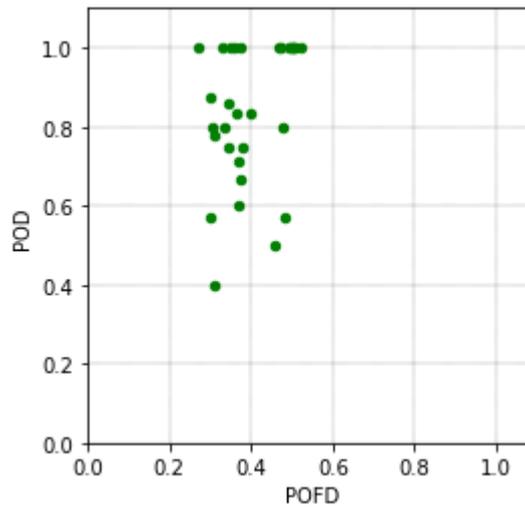
Fonte: Autora (2021).

Figura 25: Dispersão dos índices POD e POFD para ON.



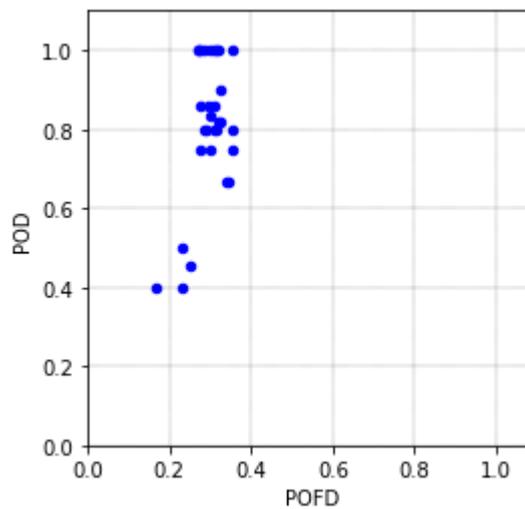
Fonte: Autora (2021).

Figura 26: Dispersão dos índices POD e POFD para DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 27: Dispersão dos índices POD e POFD para FM.



Fonte: Autora (2021).

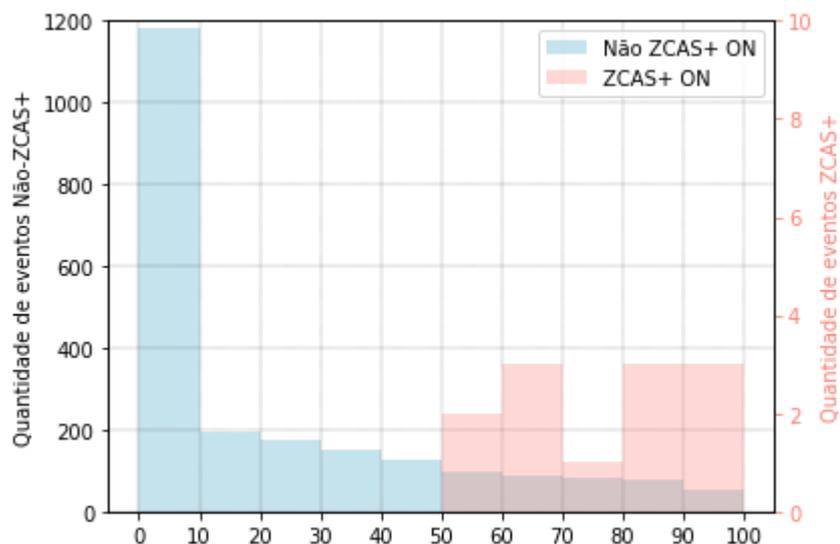
Como já indicado pela estabilidade do Índice G (Figura 24), a Figura 25 corrobora com fato de que o melhor desempenho de q em 500 hPa é dado no bimestre ON, uma vez que, os valores de POD concentram-se em 1, com detecção total dos eventos de ZCAS+. Com relação à dispersão de POFD para o bimestre em questão, tem-se que este se concentra em 0,23 (Tabela 6), indicando que 23% é a frequência de ocorrência de uma previsão errada relativa ao número de eventos que de fato não ocorreram.

Para DJ (Figura 26), bimestre no qual a variável meteorológica em estudo tem seu desempenho menos satisfatório, nota-se um maior espalhamento dos dados, com quantidade considerável disposta com POD mais baixo e POFD mais alto. Por fim, para FM (Figura 27), há uma mistura dos comportamentos da dispersão de ON e DJ, onde os valores de POD se concentram próximos de 0,8 e com POFD em torno de 0,3.

Comparando a dispersão de POD e POFD das Figuras 25, 26 e 27 com aquela da Figura 5, de Rosa *et al.* (2020), observa-se que o método aqui proposto tem dispersão em valores mais altos de POD. Em contrapartida, os valores médios de POD (Tabela 6) são semelhantes àqueles encontrados por Nielsen *et al.* (2018). Com relação ao POFD, as dispersões também se mostram similares à Rosa *et al.* (2020), uma vez que também foi encontrado 13% como valor mais inferior de POFD.

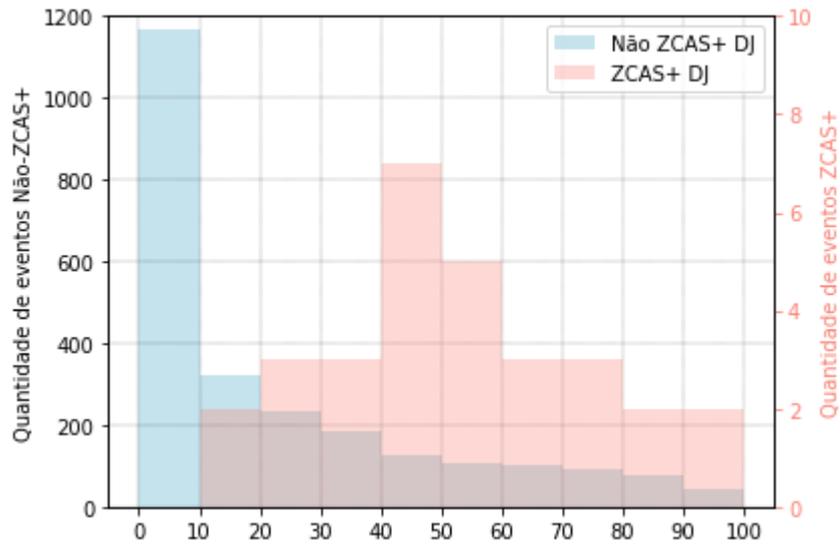
Já os altos valores médios de FAR (Tabela 6) decorrem da pequena amostra de eventos de ZCAS+. A partir das Figuras 28, 29 e 30, que mostram a distribuição de eventos de Não-ZCAS+ (esquerda) e ZCAS+ (direita) de acordo com a porcentagem do domínio que atende ao critério L1, nota-se uma significativa desproporção entre as amostras, que por sua vez, é mascarada pela porcentagem de ocorrência nos histogramas das Figuras 15, 16 e 17.

Figura 28: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre ON.



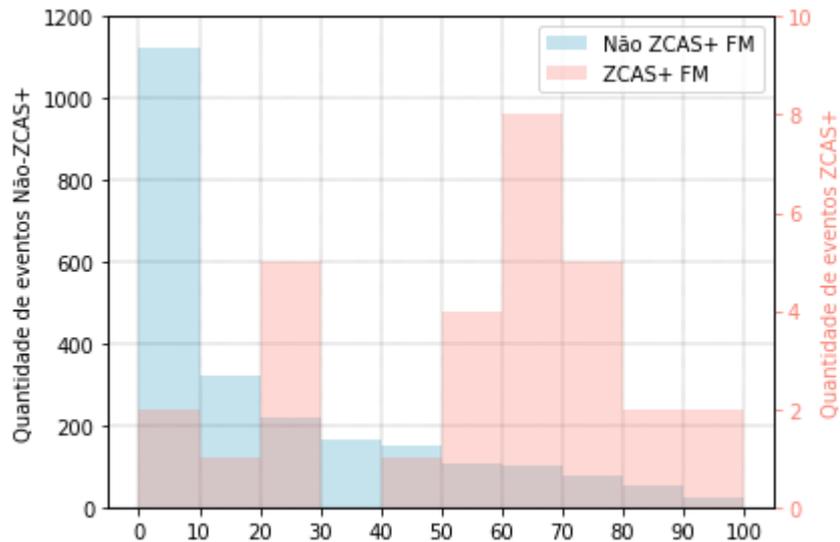
Fonte: Autora (2021).

Figura 29: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 30: Histograma dos valores absolutos de eventos para o bimestre FM.



Fonte: Autora (2021).

Os comportamentos das distribuições dos dois conjuntos amostrais dos três bimestres (Figuras 28, 29 e 30) são idênticos aos apresentados nos histogramas das Figuras 15, 16 e 17, porém com os valores absolutos no eixo das ordenadas. O cálculo do Índice G foi feito a partir das porcentagens já que, embora ocasione certa distorção da realidade, daria maior proporcionalidade entre as duas amostras, possibilitando a visualização nítida dos diferentes Índices Gs.

Com relação às classificações da tabela de contingência (Figura 11) “Verdadeiros Positivos”, “Falsos Positivos”, “Verdadeiros Negativos” e “Falsos Negativos”, a Figura 31 mostra a variabilidade dos valores absolutos para cada um dos bimestres. A amostra total de eventos de teste - que corresponde a 20% do total - para os bimestres ON, DJ e FM foi de 448, 496 e 475, respectivamente.

Como a quantidade de eventos de ZCAS+ ocorridos no bimestre ON é de apenas 12, é neste bimestre que a porção de “Verdadeiros Positivos” é menor, variando de 1 a 4 (Figura 31a). Para esta mesma classe, o número de episódios avaliados para os dois outros bimestres é significativamente maior, entre 1 e 9 (Figuras 31a).

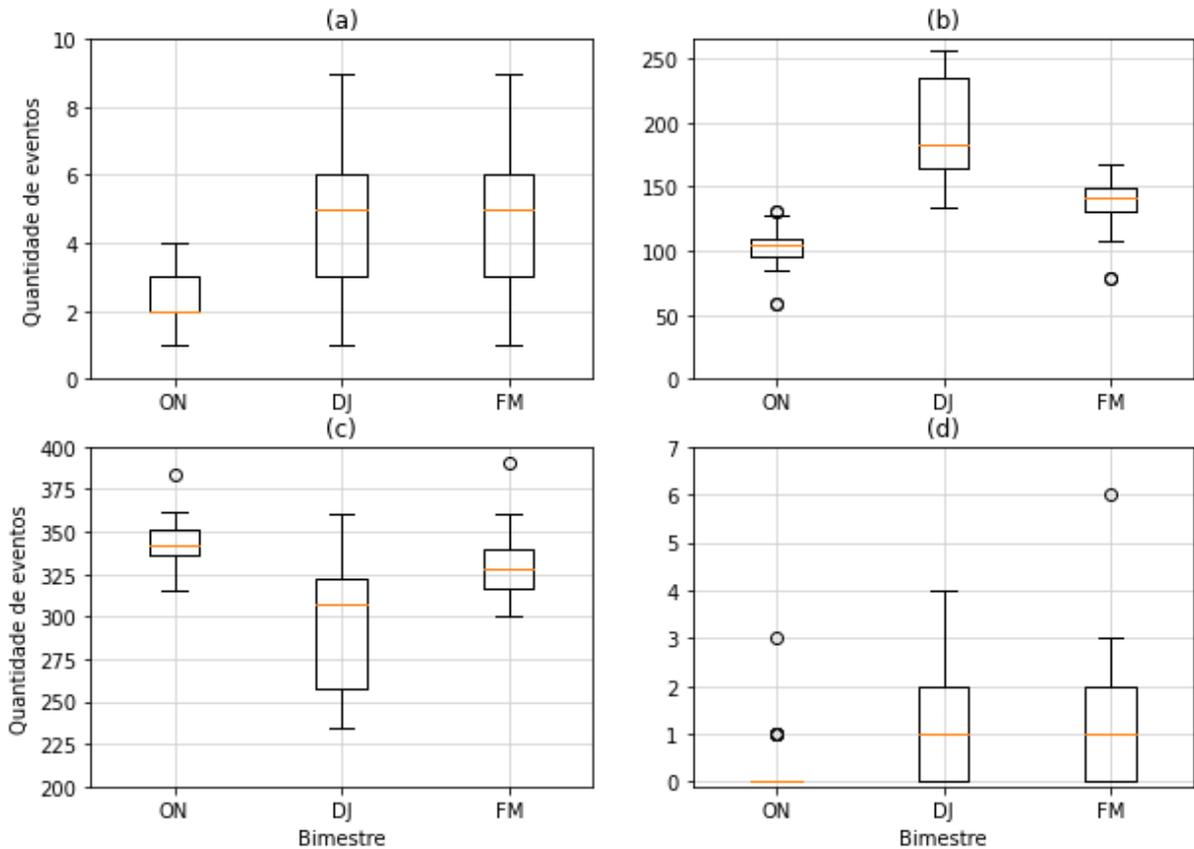
Corroborando com os altos valores de FAR, os “Falsos Positivos” representam um número significativo para os três bimestres, sendo maior em DJ (Figura 31b) - onde ultrapassa 50% da amostra total de eventos de teste, o que também se justifica pelo fato de que a variável umidade específica em 500 hPa não foi àquela com maior índice G. Para ON e FM, as medianas desta classe ficaram próximas de 100 e 150, com valores mínimos ao redor de 50 e 70 (Figuras 31b), respectivamente.

Já a classe de “Verdadeiros Negativos” é aquela com maior valor absoluto de eventos, indicando que o método determina de forma correta os eventos “Não-ZCAS+”. Corroborando com a distribuição dos valores de POFD (Figura 25), ON é o bimestre onde os “Verdadeiros Negativos” têm a menor variação (Figura 31c). Em contrapartida, como também indicado pelo POFD (Figura 26), DJ possui a maior variação, com valores absolutos mínimos próximos de 200 (Figura 31c). O comportamento do último bimestre é semelhante ao observado em ON (Figura 31c).

Por fim, a avaliação dos “Falsos Negativos” é satisfatória nos três bimestres, já que a quantidade de eventos avaliados como tal não ultrapassa seis, sendo que, novamente, o bimestre ON é aquele com a menor variação - mediana em zero e valor máximo em 3, no pior caso (Figura 31d). Para os bimestres seguintes, as medianas são, em ambos os casos, iguais a um (Figura 31d).

Em suma, os *boxplots* da Figura 31 indicam que para o método escolhido para separar o conjunto total em amostras de treino e teste, a semente selecionada tem um certo grau de relevância, sobretudo para o bimestre de DJ, onde verifica-se a maior variação das classes.

Figura 31: Variabilidade das classes a) Verdadeiros Positivos, b) Falsos Positivos, c) Verdadeiros Negativos e d) Falsos Negativos para cada bimestre.

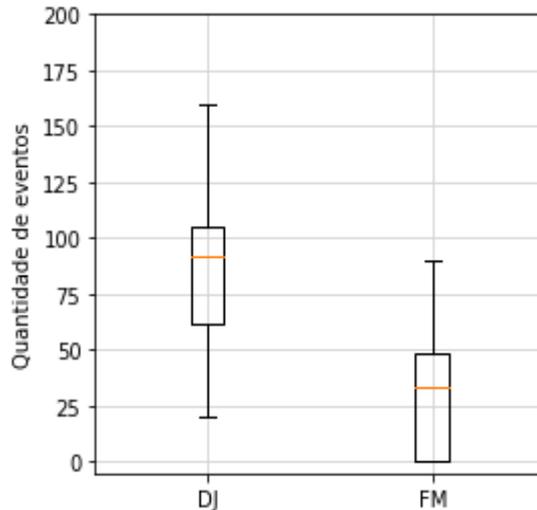


Fonte: Autora (2021).

Da mesma forma que as quatro classes da tabela de contingência foram avaliadas, as Figuras 32 e 33 mostram a distribuição dos valores absolutos para a confiabilidade das classificações (apresentada na Tabela 4), das 30 amostras de teste.

A previsão de eventos com confiabilidade “Insuficiente” para ON foi de zero, indicando que em nenhum momento há sobreposição quase que completa das distribuições de ZCAS+ e Não-ZCAS+. O bimestre de DJ é aquele onde há a maior número absoluto e também maior variação (entre 20 e 160) de insuficientes, enquanto que em FM a variação se mostra menor, entre 0 e 90 (Figura 32).

Figura 32: Variabilidade do valor absoluto da classificação “Insuficiente”.



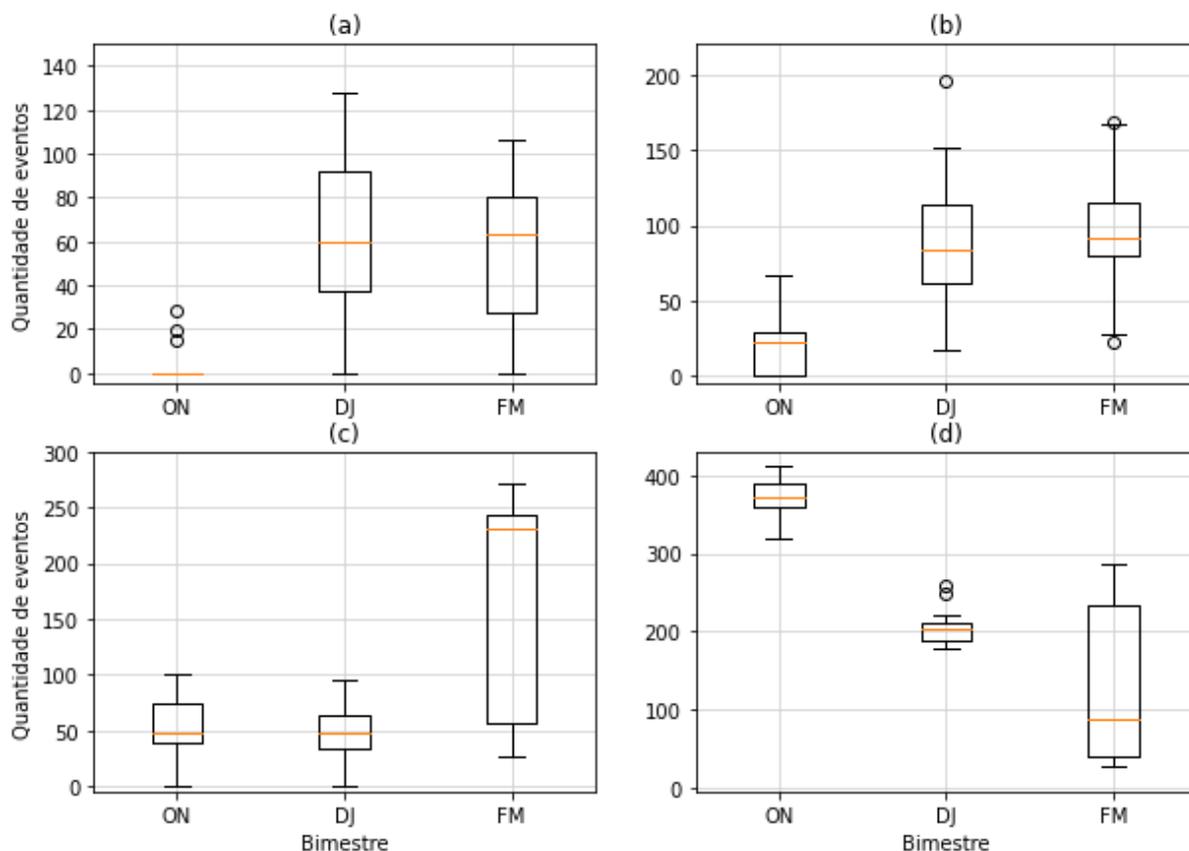
Fonte: Autora (2021).

Para a confiabilidade “Baixa” (Figura 33a), a variabilidade dos valores absolutos dos bimestres DJ e FM são semelhantes, ao passo que para ON essa confiabilidade aparece em apenas três, das trinta sementes. Já a confiança de previsão “Média” para ON, aparece com maior frequência, oscilando entre 0 e 67. A maior concentração deste nível de confiabilidade está no bimestre DJ, cujo valor de *outlier* é 196.

A previsão de eventos com a confiabilidade “Alta” (Figura 33b), por sua vez, é bem-comportada para os bimestres de ON e DJ. Para FM, a variabilidade do número absoluto nesta classe pode variar entre 26 e 271, mostrando que, novamente, a relevância da randomicidade dos grupos de teste geradas pelas diferentes sementes.

Este mesmo comportamento bimestral para FM é visto para a confiabilidade “Muito Alta” (Figura 33c). Já ON é o bimestre com o maior valor absoluto de previsões deste nível, enquanto DJ tem a menor variabilidade com número moderado de eventos com esta confiabilidade.

Figura 33: Variabilidade do valor absoluto das classificações a) Baixa, b) Média, c) Alta e d) Muito alta.



Fonte: Autora (2021).

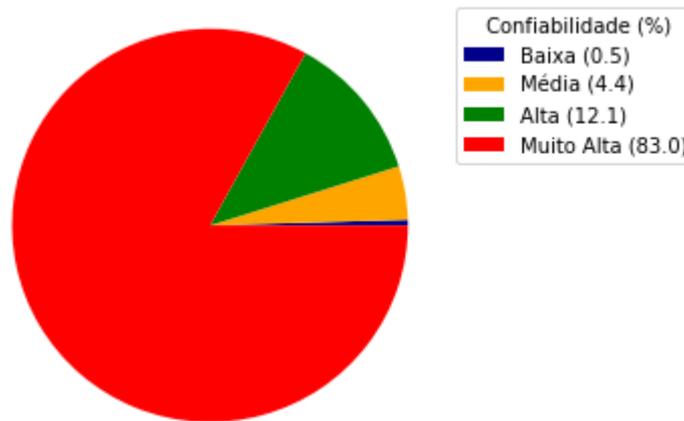
Com relação aos valores médios de cada uma das classes de confiabilidade, tem-se que para o primeiro bimestre (Figura 34), como já indicado pela Figura 33, 83% das previsões são com “Muito Alta” (cor vermelha) confiabilidade, indicando que, o comportamento do Índice L das sementes testadas têm comportamento similar, isto é, as distribuições de ZCAS+ e “Não-ZCAS+” não se sobrepõem, em sua maioria. Por este mesmo motivo, as confiabilidades “Média” (cor laranja) e “Baixa” (cor azul escuro) pouco aparecem.

Para o bimestre DJ (Figura 35), as previsões com “Muito Alta” confiabilidade ainda prevalecem, aparecendo em 41,1% dos eventos avaliados. Mas ao contrário do que foi observado para ON, em DJ há uma maior ocorrência das demais classes de confiabilidade, indicando maior sobreposição dos eventos ZCAS+ e “Não-ZCAS+” como também aponta a distribuição do índice G (Figura 24) para as amostras de treino.

A frequência de “Insuficiente” (cor roxa) também chama a atenção para este bimestre, em quase 18% (cor roxa na Figura 35) das previsões feitas com a umidade específica em 500 hPa não é possível afirmar se um evento é ou não ZCAS+, mostrando novamente a deficiência da variável para este bimestre.

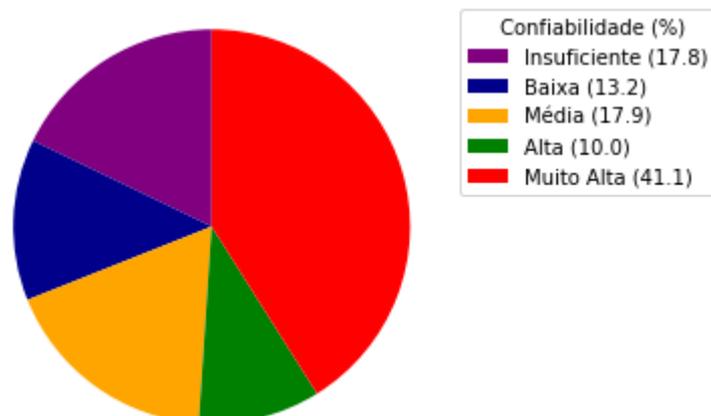
Para FM (Figura 36), a porcentagem de previsões com nenhuma confiabilidade é reduzida para menos da metade, se comparada àquela de DJ. E, diferentemente do que foi observado para os dois primeiros bimestres, em FM a maior parte das previsões (35,9%) é feita com confiabilidade “Alta”.

Figura 34: Valores médios de cada classe para ON.



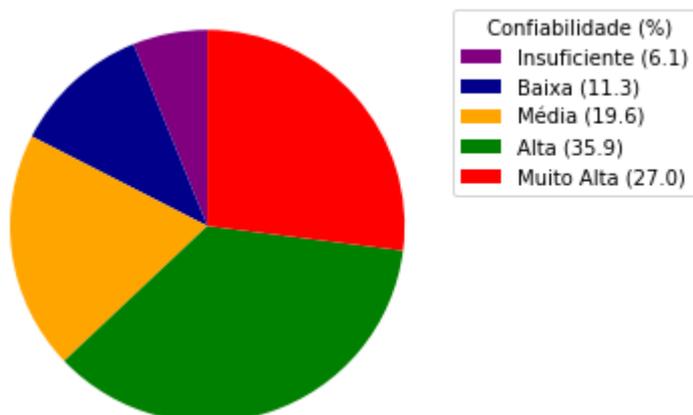
Fonte: Autora (2021)

Figura 35: Valores médios de cada classe para DJ.



Fonte: Autora (2021).

Figura 36: Valores médios de cada classe para FM.



Fonte: Autora (2021).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo fazer uma distinção das condições atmosféricas dos eventos de ZCAS que causaram chuva intensa sobre o Rio de Janeiro, no período compreendido entre 2006 e 2016, bem como o desenvolvimento de um método objetivo para a diferenciação de tais eventos, visto que é de grande utilidade para centros de monitoramento e alertas como o CEMADEN.

A partir de limiares críticos para cada ponto de grade, foram construídos histogramas de distribuição para cada um dos dois conjuntos em estudo: Não-ZCAS+ e ZCAS+. Com o auxílio de um índice, denominado Índice G, obtido a partir da intersecção e da união dos intervalos dos histogramas, as 32 variáveis meteorológicas disponíveis puderam ser avaliadas de forma quantitativa.

Com este panorama geral, a umidade específica em 500 hPa foi aquela que se destacou em dois dos três bimestres analisados - com G médios de 0,92 para ON e 0,81 para FM - tornando-se assim a variável central das avaliações seguintes. A explicação física para a boa performance da umidade específica em médios níveis está no fato de que, os meses de ON são de transição de estação, de modo que passa de uma atmosfera relativamente mais seca, para uma atmosfera mais úmida.

Similarmente, embora fevereiro e março estejam majoritariamente inseridos no verão, a atmosfera começa a transitar novamente para condições relativamente mais secas. Para o bimestre de DJ, foi verificado que a variável com melhor capacidade de distinção é o vento meridional em 925 hPa, que segundo a literatura, é uma

característica marcante da convergência de massa que ocorre durante os eventos de ZCAS.

De modo a avaliar com maiores detalhes o desempenho de Q em altos níveis, o índice local (L) foi proposto de forma similar à G. A partir dele, cada um dos intervalos dos histogramas pôde receber uma confiabilidade, isto é, a classificação de um evento ZCAS+ ou Não-ZCAS+ passa a possuir uma avaliação qualitativa - avaliação esta útil em salas de previsão.

Com o objetivo de testar, de forma aleatória, a boa performance do Índice G, as amostras bimestrais foram separadas em conjuntos de treino (20%) e teste (80%). Com 30 conjuntos de teste e treino, pode-se constatar que a maior estabilidade do índice ocorre para o bimestre ON, ao passo que sua menor estabilidade está para DJ.

Ainda com as amostras de teste, índices que indicam a taxa de acerto e a taxa de alarme falso foram calculados. Corroborando com a sua alta estabilidade, durante o bimestre ON, há probabilidades totais (100%) de detecção correta dos eventos de ZCAS+, com a emissão de cerca de 23% de alarmes falsos. Em DJ, a classificação correta é reduzida para cerca de 84% com aumento de alarmes falsos (40%). Para FM, a detecção assertiva é de 80%, porém com a emissão de menos alarmes falsos (30%).

Embora os valores de POFD e POD estejam dentro do desejável para que o método seja aplicável em salas de operação, os altos valores de FAR mostram uma deficiência, que por sua vez deve-se ao fato da amostra de ZCAS+ ser muito menor que a de Não-ZCAS+. Desta forma, propõe-se que em trabalhos futuros a série temporal seja aumentada.

Com relação aos graus de confiabilidade, a amostra de teste mostrou que o bimestre onde há menor variabilidade e também a maior quantidade de previsões com “Muito Alta” confiabilidade é ON. Em contrapartida, DJ é o bimestre em que uma quantidade significativa de eventos é avaliado com confiabilidade “Insuficiente”. Foi visualizado também que o bimestre DJ é aquele onde há maior variabilidade no valor absoluto de previsões avaliadas de acordo com a tabela de contingência, mostrando que, o desempenho do método é vulnerável à randomicidade da amostra de teste.

Em suma, os índices G e L foram desenvolvidos com o objetivo de facilitar a previsão dos eventos de ZCAS que causaram chuva intensa no Rio de Janeiro. Para que o método se torne ainda melhor, isto é, a razão de alarme falso diminua, sugere-se que a série temporal seja maior, para tanto, há a possibilidade de usar como

amostra de teste dados de modelos atmosféricos ou modificar o limiar crítico de 30 mm/dia de precipitação acumulada. Além disso, para melhorar a acurácia do índice G para o bimestre DJ, sugere-se a exploração de novas variáveis, como a OLR e vorticidade.

Com a posterior diminuição do FAR, o método desenvolvido tem potencial tanto para ser utilizado em salas de operação, para previsão de curto e médio prazo, quanto para a construção de uma climatologia mais longa de eventos ZCAS+, o que permitiria estudar, por exemplo, uma eventual tendência na frequência anual desses eventos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. (ed.). **Deslizamento de terra no Morro do Bumba completa 10 anos:** o soterramento causou 267 mortes, porém apenas 46 corpos foram encontrados; 3.200 famílias ficaram desabrigadas. 2020. Disponível em: <http://www.bandnewsfmrio.com.br/editorias-detalhes/deslizamento-de-terra-no-morro-do-bumba-compl>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, jan. 2014. Disponível em: http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_et_al_2014.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone. **Frontiers In Environmental Science**, [S.L.], v. 3, 9 p., abr. 2015. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2015.00023/full>. Acesso em: 12 dez. 2020.

BANCO MUNDIAL; GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Avaliação de Perdas e Danos:** Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro - Janeiro de 2011. Brasília: Editora Executiva, nov. 2012. 63p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/InundacoesDeslizamentosnaRegiaoSerranadoRiodeJaneiro.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

BUSCH, A.; AMORIM, S. A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011: procurando respostas. **Casoteca de Gestão Pública**, [S.L.], p. 1-20, 2011. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/328/2/A%20trag%C3%A9dia%20da%20regi%C3%A3o%20serrana%20do%20Rio%20de%20Janeiro%20em%202011%20procurando%20respostas.pdf>. Acesso em 20 de nov. 2020.

CARVALHO, L. M. V. *et al.* Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 15, n. 17, p. 2377-2394, set. 2002. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)0152.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)0152.0.co;2). Acesso em: 07 abr. 2021.

CARVALHO, L. M. V. *et al.* The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 88-108, jan. 2004. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)0172.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)0172.0.co;2). Acesso em: 07 abr. 2021.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais.** Disponível em:

http://satelite.cptec.inpe.br/repositoriogoes/goes16/goes16_web/ams_ret_ch14_baixa/2019/03/S11635390_201903020600.jpg. Acesso em: 05 abr. 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Anuário da Sala de Situação do CEMADEN 2017**, São José dos Campos, v. 1, n. 1, p. 1-52, 2019. Anual. Disponível em: http://www.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Sala_Situa%C3%A7%C3%A3o_2017.pdf. Acesso em: 15 de nov. 2020.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Boletim da Sala de Situação**: 1º Trimestre de 2020, São José dos Campos, n. 1, p. 1-71, jun. 2020. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2020/06/Boletim-da-Sala-de-Situa%C3%A7%C3%A3o-JFM2020.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Relatório de Gestão 2019**. São José dos Campos, n. 1, p. 1-57, jun. 2020. Disponível em: http://www.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2020/06/Relatorio_Gestao_2019.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

DERECZYNSKI, C. P. *et al.* Chuvas Extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S.L.], v. 40, n. 2, p. 17-30, maio 2017. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/11422>. Acesso em: 15 nov. 2020.

ESCOBAR, G. C. J. *et al.* Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Atmosfera**, [S.L.], p. 1-40, 9 dez. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20937/atm.52942>. Acesso em: 16 abr. 2021.

ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Relationship between daily atmospheric circulation patterns and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events. **Atmosfera**, [S.L.], p. 1-41, 26 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20937/ATM.52936>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ESCOBAR, G. C. J. **ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS): CRITÉRIO DE DETECÇÃO PARA USO EM CENTROS OPERACIONAIS DE PREVISÃO DE TEMPO**. São José dos Campos, 19 p., 2019. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SGMUDP>. Acesso em: 12 dez. 2020.

HADLEY, E. An Historical Account of the Trade Winds, and Monsoon, Observable in the Seas between and Near the Tropicks, with an Attempt to Assign the Physical Cause of the Said Winds. **Philosophical Transactions**, [S. l.], v. 16, p. 153–168, 1686. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/1761093a0>. Acesso em: 3 abr. 2021.

JÚNIOR, F. A. C.; DORIGON, L. P. ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS DE MASSA NO “MORRO DO BUMBA” ATRAVÉS DE IMAGENS SATÉLITE. In: **XI Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 108-117, 2015. Disponível em: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/1188. Acesso em: 12 dez. 2020.

LIMA, A. O. *et al.* Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: characterization using probability distribution functions and clustering analysis. **Atmospheric Research**, [S.L.], v. 247, p. 1-17, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105221>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MARENGO, J. A. *et al.* Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 1–21, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.2254>. Acesso em: 23 nov. 2020.

MATOS, A. J. S. *et al.* ASSESSMENT OF A REAL-TIME FLOOD FORECASTING AT THE DOCE RIVER BASIN: summer 2013 event. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 6., 2014, São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2014. p. 1-8. Disponível em: <http://eventos.abrh.org.br/icfm6/proceedings/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

NIELSEN, D. M. *et al.* Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. **Climate Dynamics**, [S.L.], v. 52, p. 5527-5553, out. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4460-4>. Acesso em: 10 dez. 2020.

PINHEIRO, H. R. *et al.* **A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE**. In: Simpósio Internacional de Climatologia. João Pessoa-PB. Anais, 2011. Disponível em: http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/11.23.16.17/doc/Pinheiro_A%20maior.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.

QUADRO *et al.* O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. **Revista Climanálise**: Edição Comemorativa de 30 anos do Climanálise, [S.L.], p. 19-25, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/quadroetal.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2020.

QUADRO, M. F. L. **ESTUDO DE EPISÓDIOS DE ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS) SOBRE A AMÉRICA DO SUL**. 1994. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200009>. Acesso em: 19 mar. 2021.

REBOITA, M. S. *et al.* REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 185-

204, jun. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ROSA, E. B. *et al.* Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features. **Frontiers In Environmental Science**, [S.L.], v. 18, 15 p., fev. 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00018/full>. Acesso em: 12 dez. 2020.

SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin Of The American Meteorological Society**, [S.L.], v. 91, n. 8, p. 1015-1058, ago. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/2010bams3001.1>. Acesso em: 16 abr. 2021.

SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 2185-2208, 13 mar. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00823.1>. Acesso em: 16 abr. 2021.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, C. P. Climatological Characterization and Observed Trends in Climatic Extremes in the State of Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 123-138, 28 nov. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_123_138. Acesso em: 12 abr. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais**: 1991 a 2012. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/#>. Acesso em: 27 abr. 2021.

WILKS, D. S. **Statistical Methods for Atmospheric Science**. 3. ed. Oxford: Elsevier Inc., 2011. 669 p. (International Geophysics Series).

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a Monsoon Climate Exist over South America?. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 1020–1040, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2). Acesso em: 23 nov. 2020.