



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ZCAS COMO UMA FERRAMENTA
PROGNÓSTICA COM BASE NOS DADOS DE PREVISÃO DO GFS**

LOUISE DA FONSECA AGUIAR

**RIO DE JANEIRO
Março de 2023**

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ZCAS COMO UMA FERRAMENTA PROGNÓSTICA COM BASE NOS DADOS DE PREVISÃO DO GFS

LOUISE DA FONSECA AGUIAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador:

Prof. Dr. Edilson Marton (UFRJ)

Orientador:

Prof. Dr. Marcio Cataldi (UFF)

Rio de Janeiro
Março de 2023

**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ZCAS COMO UMA FERRAMENTA
PROGNÓSTICA COM BASE NOS DADOS DE PREVISÃO DO GFS**

LOUISE DA FONSECA AGUIAR

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).



Prof. Dr. Edilson Marton - PPGM/UFRJ - Orientador



Prof. Dr. Marcio Cataldi – UFF - Orientador



Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad - PPGM/UFRJ



Prof. Dra. Priscila da Cunha Luz - LABS P&D/Climatempo



Dr. David Marcolino Nielsen - Universität Hamburg

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO 2023

CIP - Catalogação na Publicação

d111a da Fonseca Aguiar, Louise
Avaliação do índice de ZCAS como uma ferramenta prognóstica com base nos dados de previsão do GFS / Louise da Fonseca Aguiar. -- Rio de Janeiro, 2023. 70 f.

Orientador: Edilson Marton.
Coorientador: Marcio Cataldi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, 2023.

1. Previsão do tempo. 2. Zona de Convergência do Atlântico Sul. 3. Modelagem atmosférica. I. Marton, Edilson, orient. II. Cataldi, Marcio, coorient.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

Por muito tempo eu esperei para escrever estes agradecimentos. Em muitas de minhas noites insones durante o mestrado, em meio às incertezas e ao medo que me cercavam, eu me apegava a estas palavras ainda nem escritas – a única certeza que eu tinha, desde sempre, era que não caminhava nesta trajetória sozinha. Com o passar do tempo (e dos anos), só agradecer não seria possível. A amargura de ter adoecido no caminho, de ver minha própria mente tomada pela depressão e ansiedade, começaram a ocupar um espaço maior do que palavras de agradecimento e de apoio. Inúmeras vezes eu me vi lembrando da minha primeira semana de aulas no IGEO: um rapaz se jogou do CT e, quando fui ao RU, ele ainda estava lá, mesmo horas depois do ocorrido. O espetáculo do horror, de quem não resistiu à pressão da vida, e o ambiente acadêmico não o ajudou. Em meio a minha própria crise particular, logo no início do mestrado, eu comecei a me medicar. E aqui vai o meu primeiro agradecimento: meu psiquiatra Luiz, que desde o primeiro trimestre até hoje, me acompanha na minha montanha russa, obrigada. Foram infinitas conversas de 2019 para cá – risadas, lágrimas, confissões. Várias vezes eu te disse que fugiria do país porque a CAPES ia me cobrar e eu não tinha mais dinheiro nenhum, e em todas as vezes você acreditou mais em mim do que eu mesma era capaz na época. Será que você me dá alta agora? Tá na hora, hein! Nesse processo de desafio e dor e alegria, encontrei a Jéssica, minha psicóloga. Ela me fez enxergar o que havia em mim que não era do mestrado. Sim, esse título virou um bicho-papão: meu projeto não era nada, logo como eu poderia ser? Não havia mais nada a vista para mim. Foi difícil desassociar o que eu era de um trabalho que eu ainda não tinha. E isso cercada de morte e luto trancada em casa devido a uma pandemia mundial. Muitas vezes eu sofri sozinha, por ver na Meteorologia o todo, meu sonho... E nele eu me afundei como se pisasse em areia movediça, por não ver em mim nada: Jéssica, você foi fundamental para que hoje eu tenha essas palavrinhas aqui: só mais um trabalho, em busca de um título - algo que faz parte de mim, mas não sou eu. À minha família eu nem tenho palavras. Seguro o choro porque por eles eu sempre quis ser mais e fazer mais e ser uma Louise feliz e que seja motivo de orgulho. Sinto que hoje eu sou, e não é por causa da dissertação. Meus pais nem entendem o que eu faço. Vivem me perguntando do tempo, e eu brinco com a minha mãe que é melhor ela verificar se sente a cicatriz doer: aí sim vem chuva. À minha avó, eu peço perdão por todas as vezes que não pude lhe dar a atenção que precisava porque estava ocupada no computador. Admito que muitas vezes gostaria de ser apenas neta, de tirar o peso de cuidadora, que precisa estar a vista o tempo inteiro para você não chorar. Mas sei que embora não entenda direito, você também me dá forças. Tudo o que eu e minha irmã fazemos e abdicamos por você torna alguns outros desafios da vida bem pequenininhos. Falando nela, Laisa, minha alma gêmea, meu corpo gêmeo, a você eu devo tudo. Eu sei que você sabe, então vou nos poupar de algumas lágrimas aqui. A nossa irmã mais velha, eu agradeço por toda a torcida, todos os sorrisos a cada vitória, e todas lágrimas divididas por estarmos longe uma da outra vendo nossos velhinhos se tornarem ainda mais velhinhos. Você foi a primeira a quem eu contei sobre meu emprego temporário na Climatempo, sobre o futuro projeto da CNPq e a quem o peso da vida é dividido, e a leveza dela é compartilhada. À minha grande família, obrigada também. Maria Clara, você é a única adolescente possível e eu peço desculpas se te assustei com a vida adulta. Você nem sabe o que é mestrado, mas, de tanto me ouvir falar, é uma das que mais vai comemorar essa fase que chega ao fim. Aos meus amigos, eu nem sei o que dizer. A cada decisão e confusão eu tive suporte “Louise, se tiver que desistir, estarei aqui. Se for continuar, também estarei aqui”. Só continuei graças a vocês, por deixarem meu caminho mais colorido. E aqui citarei alguns nomes: Let, Lale, Fê, Georgia, Bárbara, Judith, May,

Bruna, Ana Bia, Deborah, Pri Esposte, Karin, Rods. Obrigada por toda a força, pelos empurrões que me jogaram para frente e principalmente pela companhia e coragem compartilhada. Nesse meio tempo, pinte o meu cabelo de azul da cor do céu e do mar, e pude me encontrar em tantos outros sentidos! Devo fazer uns agradecimentos um pouco mais sérios agora (ainda de coração), a quem me inspirou todos os dias, e tornou esse trabalho possível: meus orientadores Cataldi e Edilson, muitíssimo obrigada. Cataldi, você foi a pessoa responsável pelo meu primeiro passo na Meteorologia. Eu quase saí da Engenharia para Meteorologia por sua causa. E agradeço por toda a empatia ao longo desses anos, por todas as oportunidades, pelos projetos que surgiram graças a você. Você sempre me lembra de que eu tinha medo de ligar o computador e hoje me aventuro “nessas coisas difíceis” e é verdade! Às vezes a minha mente me engana e eu me vejo com o reflexo do passado, mas eu sei que eu mudei e amadureci muito e isso vai além dessa dissertação, e você é peça fundamental nisso. Edilson, você me acolheu na UFRJ quando eu parecia um gato de rua assustado com tudo e com todos, me fez me apaixonar pela disciplina de dinâmica e fundamentos, e sempre foi tão paciente comigo! Obrigada por todos os ensinamentos – a escola de filosofia está dentro de você e eu sou grata por isso. Priscila Luz, você é uma das pessoas e profissionais mais iluminadas que já conheci. Sorte a minha aprender tanto com você, em todos os sentidos. Em você eu me espelho, e sei que não estaria encerrando esse ciclo sem a sua confiança em mim e o seu apoio. Obrigada por tudo, big boss! À banca de qualificação, agradeço por todas as críticas construtivas, correções e sugestões. Sei que a banca da defesa fará o mesmo para melhorar este trabalho, e agradeço a vocês aqui. Sou grata ao Eric por todos os sábados que nos reunimos por meses para transcrever o índice e tornar este trabalho possível, e aos meus outros colegas do LAMMOC e da Meteoro por todo o apoio com os desafios que surgiram no meio do caminho. Agradeço à minha família espiritual do Abassà D’Asè Obà Sango por ter me acolhido no ano passado quando eu mais precisava de ajuda, em especial ao Pai, à Mãe e à irmã Omirunde por me acolher com minha sombra e minha luz, lembrando-me de que eu sou muito mais do que eu acredito ser. Pela fé que eu encontrei no meio dessa trajetória e eu nem sabia que existia eu agradeço aos meus guias e aos Orixás. Oxalá me ensina todos os dias que, através de passos lentos, tudo na vida tem seu tempo: quem não sabe andar, não pode correr. Em passos lentos eu cheguei até aqui, e desse ciclo que se encerra outros virão, com a maturidade e paciência que vem com a idade e com as experiências, as boas e as ruins. Então, mais do que nunca eu preciso agradecer a mim mesma, mesmo sem enxergar neste trabalho todo o meu potencial. Eu sei que eu dei o meu melhor, e tive também que aprender que um trabalho feito que existe é melhor do que um perfeito que só existe nas madrugadas para me assombrar e me lembrar do que não tenho. Então, essa dissertação eu dedico a mim, pois é ela que eu tenho, e é através dela que deixo um pouco do que aprendi até aqui. Até o tempo se tornar clima, que eu seja resiliência e nunca me canse de aprender: porque, se um dia eu quero ser quem ensina, eu sei que preciso passar por essa experiência e sair dela ainda mais forte, para ser também o exemplo que todos que cruzaram minha trajetória também foram para mim.

RESUMO

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um fenômeno atmosférico típico da primavera e do verão na América do Sul, estando associada com uma faixa de nebulosidade que ocasiona chuvas intensas e persistentes em muitas regiões do Brasil, principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Episódios de ZCAS podem ser responsáveis por diversos desastres naturais, como deslizamentos de terra, alagamentos e enxurradas. Além disso, os impactos da precipitação na disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, no setor energético, são extensos. O principal objetivo deste estudo foi investigar a implementação do índice de ZCAS como uma ferramenta de previsão objetiva, utilizando como dados de entrada a previsão do modelo do Global Forecast System (GFS). Inicialmente, comparamos o índice com os eventos de ZCAS identificados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) de 2017 a 2021. Em seguida, investigamos o horizonte de previsão do índice com dois estudos de caso de 2021, utilizando a previsão do GFS como dados de entrada, de 24h a 384h. Por fim, utilizamos dados da Previsão Global GFS 0.25 grau de 2017 a 2021 para calcular métricas como Acurácia, Probabilidade de Detecção (POD) e Razão de Alarme Falso (RAF) e Taxa de Falso Positivo (FPR) para avaliar o índice ZCAS como uma ferramenta de previsão. Destacam-se como resultados que com a aplicação do índice de ZCAS foi possível detectar todos os eventos classificados como ZCAS pelo CPTEC de 2017 a 2021. Com dados do NCEP GFS 0.25, de 2017 a 2021, um evento com dinâmica semelhante à ZCAS em sua posição média de atuação pode ser previsto com 10 dias de antecedência considerando o limiar mais sensível; 4 dias de antecedência com o limiar intermediário; e com 3 dias de antecedência para o limiar mais específico. Os resultados da previsão do índice com a previsão do GFS permitem um acompanhamento do evento de acordo com a dinâmica atmosférica; eventos com valores do índice mais altos (acima de h3) significam eventos de ZCAS mais marcados e, conseqüentemente, mais intensos. Eventos com valores dos índices acima do limiar mais específico (h1) e do limiar intermediário (h2), embora representem um maior número de falsos alarmes de ZCAS, indicam a presença de sistemas atmosféricos que podem causar chuva. Ao utilizar o índice como uma ferramenta de previsão, a objetividade gerada nesse contexto pode ser aproveitada pelos previsores para auxiliar na operação e tomada de decisões

Palavras-chave: modelagem atmosférica, previsão do tempo, Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ABSTRACT

The South Atlantic Convergence Zone (SACZ) is an atmospheric phenomenon typical of spring and summertime in South America, where a band of nebulosity causes intense and persistent rainfall in many regions of Brazil, mainly in the Southeast and Center-West regions. Episodes of SACZ can be responsible for many natural disasters, such as landslides, flashfloods and floods. Besides, impacts of rainfall on water availability and consequently on the energy sector are extensive. The main objective of this study was to investigate the implementation of the index as an objective forecasting tool using as input data the Global Forecast System (GFS) model prediction. Initially, we compare the index with the SACZ events identified by the Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) from 2017 to 2021. Next, we investigate the index's forecast horizon with two case studies from 2021. We used the GFS forecast as input data from 24h to 384h. Finally, we used data from the GFS 0.25 Degrees Global Forecast from 2017 to 2021 to calculate the Accuracy, Probability of Detection, False Positive Rate and False Alarm Ratio to evaluate the SACZ index as a prediction tool. Results showed that it was possible to detect all events classified as SACZ by the Brazilian Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC/INPE) from 2017 to 2021. Besides, an event with dynamics similar to SACZ in its average position of action can be predicted 10 days in advance considering the most sensitive threshold; 4 days in advance with the intermediate threshold; and 3 days in advance for the most specific threshold. The results of the SACZ index forecast with the GFS forecast allow a follow-up of the event according to the atmospheric dynamics; events with higher index values (above h3) mean more marked and consequently more intense SACZ events. Events with index values above the most specific threshold (h1) and intermediate threshold (h2), although representing a higher number of false SACZ alarms, indicate the presence of atmospheric systems that can cause rain. By using the SACZ index as a forecasting tool, the objectivity generated in this context can be leveraged by forecasters to assist in operation and decision making.

Keywords: atmospheric modelling, weather forecasting, South Atlantic Convergence Zone

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Interação da circulação de ventos dos sistemas meteorológicos que formam a ZCAS. Fonte: Climatempo (2020)..... 13
- Figura 2: Representação esquemática das principais características da dinâmica da ZCAS. Abaixo: vetores de vento a 850hPa com radiação de onda longa (ROLE). Meio: movimento vertical ômega a 500hPa (sombreado) e altura geopotencial (contorno). Acima: vento a 200hPa e divergência horizontal (sombreado). Média de 989 dias com configuração de ZCAS entre dezembro de 1995 e abril de 2015. Fonte: Nielsen et al. 2019..... 14
- Figura 3: Registros das destruições causadas por enchentes e deslizamentos em Nova Friburgo, região serrana do Rio de Janeiro, durante episódio de ZCAS nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011. Fonte: A Voz da Serra (2021) 17
- Figura 4: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paraíba do Sul. Os círculos verdes são episódios de ZCAS. Fonte: SEABRA (2004). 18
- Figura 5: Fluxograma com as etapas utilizadas nesta pesquisa..... 22
- Figura 6: Sudeste do Brasil e o destaque para as regiões de estudo AB, C e DE (esquerda). Anomalia média de radiação de onda longa para os dias ZCAS nas respectivas regiões, de 1986 a 2015. A linha diagonal representa a posição média para referência. Para a posição AB foram utilizados 265 dias para cálculo da média, para a posição C, 649 dias, e para a posição DE, 70 dias. Fonte: Nielsen et al. (2019) (direita) 24
- Figura 7: Parte da rotina de pré-processamento do índice. Cálculo da média da variável u nas áreas de assinatura (polígonos) em 200hPa. Em destaque no retângulo vermelho, o cálculo para a região C..... 25
- Figura 8: Etapas para o cálculo do índice de ZCAS 26
- Figura 9: Exemplo de *download* dos dados do GFS 0.25° para o cálculo do índice de ZCAS do dia 21/02/2021. Os dados foram baixados com inicialização de 00Z, com uma discretização de 24h, para um horizonte de previsão de 16 dias, entre outubro e abril de 2017 a 2021 31
- Figura 10: Índice de ZCAS para a posição mais ao norte (AB) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo) 34
- Figura 11: Índice de ZCAS na posição média (C) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo). 35
- Figura 12: Índice de ZCAS na posição mais ao sul (DE) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo)..... 36
- Figura 13: Resultados do índice de ZCAS (Reanálise II) na região C de 2017 a 2021 (até agosto). Os limiares h_1 , h_2 e h_3 estão destacados por linhas horizontais. A área

sombreada azul indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada verde indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada vermelha indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3 38

Figura 14: Índice de ZCAS com a previsão do GFS desde o dia 05/02/2021, a 14 dias do início do evento 2, que começa no dia 18/02/2021 e atua até o dia 22/02/2021. A área sombreada em lilás indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada em rosa claro indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada em rosa escuro indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3. O retângulo vermelho em destaque no eixo horizontal representa a janela de ocorrência do evento..... 41

Figura 15: Índice de ZCAS com a previsão do GFS desde o dia 21/02/2021, 14 dias antes do início do evento que começa no dia 07/03/2021 até o dia 12/03/2021. A área sombreada em lilás indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada em rosa claro indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada em rosa escuro indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3. O retângulo vermelho em destaque no eixo horizontal representa a janela de ocorrência do evento..... 44

Figura 16: Índice de ZCAS com entrada da Reanálise II (NCEP) do dia 04/02/2021 ao dia 11/03/2021. Os 3 eventos destacados com retângulo preto foram classificados pelo CPTEC como ZCAS, mas o retângulo em vermelho, também presente nas previsões do índice com entrada do GFS, não foi considerado como ZCAS pelo CPTEC 45

Figura 17: Imagens do satélite GOES 16 para o período entre 25/02 e 28/02. Observa-se a faixa de nebulosidade que vai desde o centro primário de convecção tropical da Amazônia até o Sudeste, típica da ZCAS. Fonte: CPTEC/INPE 46

Figura 18: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais sensível h1, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021) 47

Figura 19: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais sensível h1, mas considerando como observado o limiar h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021) 48

Figura 20: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar intermediário h2, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021) 49

Figura 21: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar intermediário h2, mas considerando como observado o limiar h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021) 50

Figura 22: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais específico h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021) 51

Figura A 1: Componente zonal do vento (u) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita)	61
Figura A 2: Componente meridional do vento (v) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita).....	61
Figura A 3: Ômega (esquerda) e altura geopotencial (direita) em 500 hPa.....	62
Figura A 4: Divergência horizontal do vento (div) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita).....	62
Figura A 5: Vorticidade relativa do vento (vort) em 200 hPa.....	62
Figura B 1: Normalização dos dados de entrada (por exemplo, do GFS) para cálculo do índice de ZCAS.....	63
Figura B 2: Aplicação do peso das componentes principais de cada variável para cálculo do índice de ZCAS.....	64
Figura B 3: Combinação linear das componentes principais para cálculo do índice de ZCAS	65
Figura B 4: classificação logística considerando os limiares h1, h2 e h3 do índice de ZCAS para saída em <i>csv</i> com valores do índice entre 0 e 1 para o período de tempo desejado e uma plotagem gráfica para facilitar a visualização.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela I: Variáveis de assinatura para o cálculo do índice, produtos da Reanálise II do NCEP e dos cálculos realizados pela biblioteca <i>Metpy</i> ^{1 2}	23
Tabela II: Limiares para classificação de eventos de ZCAS a partir do índice para a região C	27
Tabela III: Histórico de eventos de ZCAS classificados pelo CPTEC no período de 2017 a 2021	28
Tabela IV: Tabela de contingência para cálculo da avaliação de desempenho do índice	32

SUMÁRIO

1. <i>Introdução</i>	10
1.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	11
1.2 Motivação: vulnerabilidade social e energética.....	15
1.3 O papel da modelagem atmosférica na previsão de eventos de ZCAS.....	19
1.4 Objetivos.....	20
2. <i>Metodologia</i>	21
2.1 Cálculo do índice de ZCAS.....	21
2.2 Comparação dos eventos de ZCAS identificados pelo CPTEC com o índice no período de 2017-2021.....	28
2.3 Previsão do índice de ZCAS com dados do GFS: estudos de caso.....	29
2.4 Avaliação do índice de ZCAS como ferramenta prognóstica: Tabela de contingência.....	30
3. <i>Resultados e discussões</i>	34
3.1 Utilização do índice de ZCAS em Python.....	34
3.2 Comparação dos eventos do CPTEC com o índice de ZCAS.....	36
3.3 Índice de ZCAS como ferramenta de previsão: estudos de caso.....	39
3.4 Avaliação de desempenho do índice de ZCAS: resultados com base nas previsões do NCEP GFS 0.25 (2017-2021).....	46
4. <i>Conclusões</i>	52
5. <i>Referências</i>	54
6. <i>Apêndices</i>	61

1. Introdução

Os fenômenos que modificam as condições de precipitação da região, tanto em áreas urbanas quanto em áreas de agricultura, que causam chuvas em excesso ou secas, são fatores determinantes para a sociedade e responsáveis por causar grandes impactos sociais e econômicos. A ZCAS está relacionada à ocorrência de chuvas que afetam a precipitação das regiões mais populosas do país, de forma que episódios fortes ou persistentes podem ser a causa de fortes inundações e deslizamentos (VERA et al., 2006; NIELSEN et al., 2016; FONSECA AGUIAR e CATALDI, 2021).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é definida como uma região de convergência de umidade desde os baixos níveis até a média troposfera, com orientação de noroeste para sudeste que persiste por pelo menos quatro dias consecutivos e se estende do sul da Amazônia ao sudoeste do Oceano Atlântico. Durante o verão na América do Sul, a ZCAS tem grande influência no regime de precipitação e circulação quase-estacionária (KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2004). A ZCAS é responsável por cerca de 25% do volume de chuvas em todo o Sudeste do Brasil entre os meses de outubro a abril (NIELSEN et al., 2019).

Como exemplos de consequências onde a chuva intensa afeta sistematicamente a vida urbana, têm-se enxurradas, inundações, alagamentos e deslizamentos de terra, que acontecem principalmente em cidades cuja drenagem é inadequada ou insuficiente para suprimir a quantidade de chuva que atinge a região (CARVALHO et al., 2002).

A influência do clima para a sociedade é um dos principais fatores para o investimento em pesquisas científicas nesse âmbito, em que se torna relevante investigar a distribuição temporal e espacial de seus elementos e, como exemplo, o impacto das chuvas na disponibilidade hídrica. Esse entendimento mais aprofundado acerca da interferência da variabilidade pluviométrica nas bacias hidrográficas permite que a gestão dos recursos naturais seja feita de maneira mais eficiente e promissora (MENDES SILVA et al., 2012; MENDES SILVA, 2014).

A variabilidade da ZCAS no continente e o mecanismo compensatório de subsidência no sul do Brasil, nordeste da Argentina e Uruguai afetam regiões densamente povoadas e regiões com intensa atividade agrícola. Portanto, a ZCAS desempenha um papel importante no ciclo hidrológico dessas regiões (GANDU e SILVA DIAS, 1998; BARROS et al., 2000; MUZA et al., 2009).

A motivação para este trabalho encontra-se na importância de identificar e antecipar com melhor precisão a ocorrência de chuvas com característica de evento de zona de convergência subtropical, visto que diversos fatores sociais e econômicos da sociedade estão atrelados diretamente à precipitação intensa caracterizada pela configuração da ZCAS, fenômeno que faz parte da dinâmica atmosférica que atua sobre o Brasil. Dentre estes fatores, destacam-se a susceptibilidade de ocorrer desastres naturais tais como enchentes e deslizamentos; também é válido ressaltar a relevância das chuvas e conseqüentemente o funcionamento de usinas hidrelétricas para a geração de energia elétrica no país (GETIRANA et al., 2021; FONSECA AGUIAR e CATALDI, 2021).

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar o índice de ZCAS desenvolvido por Nielsen et al. (2019) como uma ferramenta de previsão que utiliza a dinâmica do fenômeno de ZCAS para previsão da mesma. Desta forma, é possível avaliar a implementação do índice de ZCAS na análise do horizonte de previsão utilizando como dados de entrada o modelo global *Global Forecast System* (GFS) do NCEP.

Ainda no capítulo 1, será apresentada uma revisão bibliográfica contendo os conceitos básicos sobre a ZCAS e algumas de suas principais conseqüências sociais e econômicas, que consistem em uma das motivações do trabalho; apresentar de forma breve como a modelagem atmosférica atua na previsão da ZCAS; e destacar os objetivos deste estudo. No capítulo 2, será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento desta pesquisa. Os resultados obtidos e a discussão dos mesmos encontram-se no capítulo 3. No capítulo 4, estão descritas as conclusões obtidas nesta etapa do trabalho; no capítulo 5, estão listadas as referências bibliográficas e no capítulo 6 encontra-se o Apêndice.

1.1 Zona de Convergência do Atlântico Sul

Durante o verão na América do Sul, a ZCAS tem grande influência no regime de precipitação e circulação quase-estacionária que, juntamente com a convecção nas florestas tropicais da bacia do rio Amazonas, são fatores importantes do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) durante a sua fase ativa (CARVALHO et al., 2004), o que torna sua configuração relevante para diversas regiões do Brasil, como na região Sudeste do país.

Uma característica típica da ZCAS é a persistência da cobertura de nuvens convectivas por pelo menos 4 dias consecutivos (KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2004).

Para definir e identificar o fenômeno, Kodama (1992; 1993) e Quadro (1994) descrevem que a ZCAS se baseia predominantemente nos seguintes padrões meteorológicos:

- Faixa de movimento ascendente do ar com orientação NW/SE;
- Um cavado semi-estacionário sobre a costa leste da América do Sul em 500 hPa;
- Intenso gradiente de temperatura potencial equivalente θ_e em 500hPa (média troposfera), servindo de separação entre a massa quente e úmida dos trópicos e da massa fria e seca das latitudes médias e altas;
- Faixa de vorticidade relativa anticiclônica (positiva) em altos níveis (200 hPa), na direção da ZCAS, que determina as regiões favoráveis para o acontecimento do evento;
- Transporte de umidade em baixos níveis, manutenção da convecção pela convergência de umidade na baixa e na média troposfera e alto contraste de umidade.

Em níveis mais altos da troposfera, um fluxo anticiclônico de grande escala atinge boa parte do Brasil, com o centro de circulação próximo à Bolívia, a Alta da Bolívia (AB), que representa a resposta termodinâmica da atmosfera ao intenso aquecimento do continente devido ao verão.

De maneira geral, a circulação atmosférica média associada com eventos de ZCAS mostra um padrão em altitude que inclui a presença da AB e do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis no Nordeste do Brasil (VCAN). O VCAN é um sistema atmosférico característico de um ciclone em altos níveis troposféricos que pode ter efeitos combinados da região Sudeste ao Nordeste do Brasil, intensificando sistemas convectivos a partir do padrão ZCAS-VCAN (BRAGA e AMBRIZZI, 2022).

A situação sinótica mais frequente em superfície está associada à atuação de um sistema frontal estacionário, principalmente no oceano e na latitude da Região Sudeste do Brasil (**Figura 1**). A forte divergência em altitude provocada pela AB ajuda a manter a convecção, com o sistema frontal estacionário em superfície que serve como um gatilho para convergência de umidade na camada baixa da atmosfera. Com esse padrão de circulação estabelecido, os sistemas transientes são absorvidos pela zona de convergência da ZCAS, favorecendo a manutenção do sistema (ESCOBAR, 2019).



Figura 1: Interação da circulação de ventos dos sistemas meteorológicos que formam a ZCAS.

Fonte: Climatempo (2020)

A configuração da ZCAS inclui a convergência em níveis mais baixos da atmosfera que se estende desde o centro-oeste brasileiro até o Atlântico Sul, com ventos do Sul carregando ar seco e ventos do Norte/Noroeste carregando umidade (AMBRIZZI e FERRAZ, 2015).

A **Figura 2** contém a representação esquemática das principais características que envolvem a dinâmica da ZCAS.

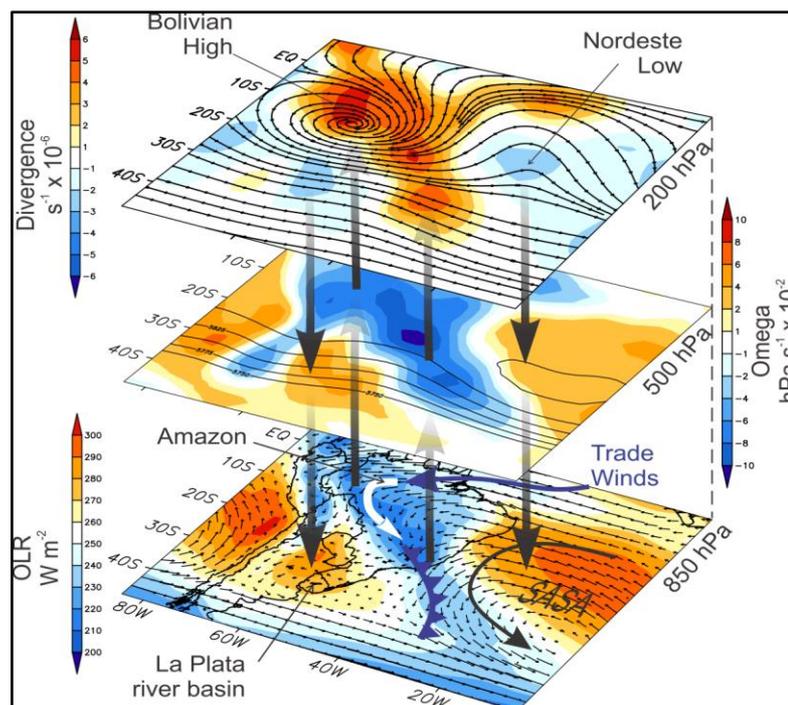


Figura 2: Representação esquemática das principais características da dinâmica da ZCAS.

Abaixo: vetores de vento a 850hPa com anomalias de radiação de onda longa (ROLE) no topo da atmosfera. Meio: movimento vertical ômega a 500hPa (sombreado) e altura geopotencial (contorno). Acima: vento a 200hPa e divergência horizontal (sombreado). Média de 989 dias com configuração de ZCAS entre dezembro de 1995 e abril de 2015. Fonte: Nielsen et al. 2019.

A região onde ocorre a ZCAS permite que a umidade seja transportada para níveis mais altos na troposfera, o que contribui para a instabilidade da camada e formação de nebulosidade que ocasionará a precipitação. Os maiores valores de umidade encontram-se em fase com a convergência do ar em 850hPa e divergência em 200hPa (RODRIGUES et al., 2016)

A umidade é de grande importância na análise do potencial da ZCAS, tendo em vista que o escoamento horizontal de umidade contribui para variação na organização espacial, na intensidade das precipitações e na circulação atmosférica.

É importante destacar a faixa de valores negativos do movimento vertical ômega na orientação NW-SE do Brasil, indicando uma velocidade vertical ascendente do vento na mesma região onde ocorre convergência em 850 hPa, divergência em 200 hPa e altos valores de umidade específica em 1000 hPa. Esta característica atmosférica influencia a presença de nebulosidade convectiva na orientação NW-SE e contribui para a ocorrência de um evento de ZCAS (RODRIGUES et al., 2016).

Nas regiões da baixa troposfera, o giro dos ventos alísios durante o verão no hemisfério sul, quando há intensa atividade convectiva na Amazônia, contribui para o transporte de umidade para as latitudes médias e também para a instauração da zona de convergência (FIGUEROA e NOBRE, 1990).

É evidente a importância do fluxo transitório de umidade da Amazônia, embora os ciclones e frentes extratropicais também tenham uma parte essencial na manutenção da configuração da ZCAS (LENTERS e COOK, 1995; AMBRIZZI e FERRAZ, 2015).

Esse transporte de umidade é realizado pelos jatos de baixo nível (JBN) e depende de sua disponibilidade na região da Amazônia e de sua capacidade de armazená-lo durante a primavera. O desmatamento recente e os incêndios na floresta amazônica podem resultar em uma redução na precipitação, afetando diretamente a umidade transportada pelos JBN (LEJEUNE et al., 2015; NIELSEN et al., 2016).

Conforme Quadro (1994) descreveu, este giro dos ventos alísios forçado para o sul por causa dos Andes indica como a umidade pode ser transportada da região da Amazônia para a ZCAS, e constitui uma relação oposta ao que normalmente ocorre com o fluxo de umidade com a ocorrência dos JBN, onde não ocorre o desvio para o sul.

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul associado ao giro forçado dos alísios parece auxiliar no estabelecimento e na permanência da Zona de Convergência do Atlântico Sul, servindo como uma fonte transportadora de umidade. Kodama (1992) inferiu que a posição média da ZCAS é atribuível à profunda convecção da Bacia Amazônica, que segundo Figueroa e Nobre (1990) e Ambrizzi e Ferraz (2015), pode se desenvolver 12-18 horas após um pico na convecção da Amazônia, com as mudanças na faixa de nuvens possivelmente influenciadas pela convecção profunda.

1.2 Motivação: vulnerabilidade social e energética

Considerando as chuvas intensas ou persistentes típicas da ZCAS no sudeste do Brasil durante a estação chuvosa do SMAS, sua consequente vulnerabilidade socioeconômica é um fator determinante para a população atingida pelo fenômeno. A vulnerabilidade é uma condição que aumenta a suscetibilidade de uma comunidade aos impactos de riscos naturais, enquanto um desastre é uma interrupção da função de uma comunidade com perdas humanas, materiais, econômicas e ambientais que estão além da capacidade da comunidade afetada em superá-lo (UNISDR, 2009).

Eventos meteorológicos extremos são uma das principais causas de desastres naturais. Esses podem ser agravados pelo uso indevido e ocupação inadequada da terra, como: impermeabilização da terra; desmatamento; sistemas inadequados de abastecimento de água e drenagem; obstrução dos cursos de água. Além disso, o crescimento desordenado e a ocupação de áreas de risco, principalmente pela população mais vulnerável em decorrência de sua situação socioeconômica, resulta em um cenário socioambiental de risco (MALVESTIO, 2013; DEINA e COELHO, 2016; MENDONÇA e VALOIS, 2017).

A relação entre a ZCAS e o rastro dos impactos que o fenômeno pode causar no Sudeste do Brasil foi objeto de estudo de Fonseca Aguiar e Cataldi (2021). Foi analisada a relação entre a ZCAS e a incidência de desastres naturais no sudeste do Brasil de 1995 a 2016 utilizando registros oficiais de desastres da Defesa Civil e a série temporal de eventos de ZCAS.

Desastres naturais como deslizamentos, enxurradas, alagamentos e inundações, típicos da precipitação causada pela ZCAS foram quantificados em dias de ZCAS no período de estudo. Os autores calcularam a probabilidade condicional da atuação da ZCAS quando houve registros de desastres naturais, revelando que praticamente metade dos dias (48%) com ZCAS entre outubro e abril de 1995 a 2016 aconteceram em dias em que houve deslizamentos, enxurradas, alagamentos e inundações. Além disso, foi calculada também a probabilidade condicional de ocorrência de desastres, e o resultado indicou que há uma probabilidade de 24% de ocorrência de desastres naturais na região Sudeste do país quando a ZCAS está configurada na atmosfera. Este estudo abriu uma linha de investigação que pode ir além no estudo do fenômeno da ZCAS e na regionalização de seus efeitos na sociedade (FONSECA AGUIAR e CATALDI, 2021).

De acordo com Lima et al. (2010), as chuvas fortes no verão são responsáveis por quase todos os desastres naturais no sudeste do Brasil, nos quais os eventos de frente fria correspondem a 53% dos casos e os eventos de ZCAS a 47%. Cerca de 35% dos eventos de precipitação severa no estado de São Paulo ocorreram quando a atividade de convecção da ZCAS foi intensa em grandes partes da América do Sul tropical, que inclui São Paulo Capital (CARVALHO et al., 2002). Inundações são comuns em algumas bacias dos estados brasileiros, principalmente como consequência das características geomorfológicas do terreno (BOU et al., 2015).

Condições fortes e persistentes de ZCAS são responsáveis por causar inundações e deslizamentos de terra que causam destruição de propriedades, interrupções no trânsito

e mortes perto da Serra do Mar entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro (ESPÍRITO SANTO e SATYAMURTY, 2002; SELUCHI e CHOU, 2009).

No estado do Rio de Janeiro, Luz Barcellos et al. (2016) observaram que a ZCAS foi responsável por 57% dos desastres naturais ocorridos na cidade de Duque de Caxias, região metropolitana do estado, entre 1996 e 2015.

Um evento relacionado com a configuração da ZCAS aconteceu na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 e foi considerado um dos piores desastres naturais no Brasil em décadas (AVELAR et al., 2013; MALVESTIO, 2013). Cerca de 3.562 deslizamentos ocorreram com mais de 900 óbitos, 300.000 pessoas afetadas e perdas econômicas estimadas em cerca de 4,78 bilhões de reais. Além disso, foram causados graves danos à infraestrutura urbana e rural dos municípios de Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, Sumidouro e Bom Jardim (AVELAR et al., 2013; MALVESTIO, 2013), principalmente Nova Friburgo, conforme evidenciado na **Figura 3**.



Figura 3: Registros das destruições causadas por enchentes e deslizamentos em Nova Friburgo, região serrana do Rio de Janeiro, durante episódio de ZCAS nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011. Fonte: A Voz da Serra (2021)

Além das consequências socioambientais relacionadas à ocorrência de eventos de precipitação intensa ou persistente, é válido ressaltar que cerca de 67% da produção de energia elétrica brasileira ainda depende do potencial hídrico (ANEEL, 2021), com o Sudeste concentrando a maior parte da capacidade de armazenamento em reservatórios de usinas hidrelétricas do Brasil, o que evidencia a vulnerabilidade da matriz brasileira a períodos de estiagem sobre o Sudeste.

No estudo de Seabra (2004), foi investigada a influência da ZCAS em algumas bacias como, por exemplo, a bacia do rio Paraíba do Sul, localizada na região Sudeste. Na **Figura 4**, destaca-se a influência da ZCAS no regime pluviométrico da bacia hidrográfica. É possível notar que, em praticamente todos os eventos onde a precipitação média mensal foi maior do que o valor médio mensal de longo curso, ocorreram episódios de ZCAS.

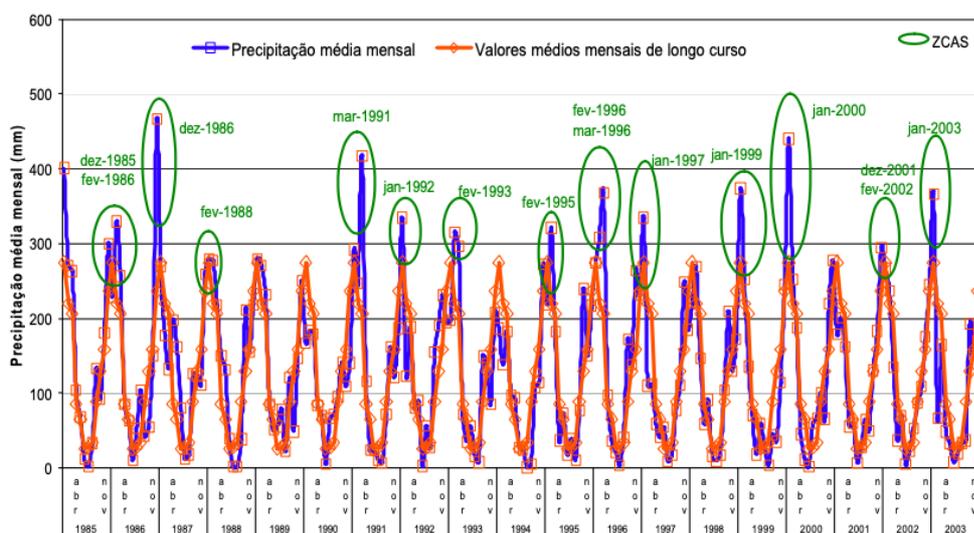


Figura 4: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paraíba do Sul. Os círculos verdes são episódios de ZCAS. Fonte: SEABRA (2004).

Em 2015, os reservatórios do sistema da Cantareira em São Paulo atingiram menos de 5% da sua capacidade de armazenamento, devido ao reduzido número de episódios de ZCAS (COELHO et al., 2015).

Nesse contexto, a ocorrência ou não ocorrência da ZCAS desempenha um papel determinante nas bacias hidrográficas. A previsão meteorológica deste fenômeno é fundamental para a operação e manutenção de usinas hidrelétricas, o que ajuda no desenvolvimento de medidas preventivas para diminuição de perdas na produção de energia e um melhor aproveitamento desta (KUNZLER et al., 2018).

De forma a ter um planejamento mais efetivo da operação integrada do parque hidrelétrico interligado, o Brasil depende das previsões de precipitação e de outras variáveis, além das previsões de afluência que têm sido praticadas com a utilização de modelos hidrológicos. Essas informações facilitam a coordenação e a operação das usinas hidrelétricas, contribuindo para tomadas de decisão do setor elétrico (ONS, 2000).

Além disso, a variabilidade da ZCAS afeta regiões também regiões com intensa atividade agrícola, principalmente no Sudeste e Centro-Oeste do país. A agricultura é responsável por cerca de 1/4 do produto interno bruto (PIB) do Brasil, o que torna o papel da ZCAS no ciclo hidrológico ainda mais importante, especialmente no momento de crise hídrica que afeta o país (GETIRANA et al., 2021).

1.3 O papel da modelagem atmosférica na previsão de eventos de ZCAS

Através do desenvolvimento de pesquisas sobre a previsão de ocorrência de ZCAS, incluindo localização e intensidade dos seus eventos, é possível desenvolver políticas públicas eficientes de forma a evitar e reduzir desastres naturais, além de identificar fases críticas de reservatórios e, então, buscar soluções para mitigar possíveis crises hidrológicas.

Para a previsão de chuvas intensas, a modelagem numérica do tempo é a principal ferramenta de antecipação e previsão do fenômeno, e sistemas de alerta em todo o mundo já fazem uso dessa metodologia como a primeira medida de prevenção para emissão de alertas para a sociedade (DANHELKA, 2011; GERARD, 2011).

Porém, as técnicas de modelagem e estudos relacionados ao desenvolvimento de ferramentas científicas que auxiliem os órgãos governamentais na proteção da população continuam sendo um desafio para as comunidades científicas (VITERBO et al., 2020). Do ponto de vista da previsão operacional de tempo, os meteorologistas previsores enfrentam uma série de dificuldades relacionadas à identificação da ZCAS (ESCOBAR, 2019). É difícil realizar uma previsão de tempo e determinar o início de um fenômeno com todas as suas características de ocorrência, frequência e duração. Uma das maiores dificuldades na previsão do tempo se deve à natureza caótica da atmosfera e ao aumento dos erros iniciais com o passar do tempo (GLEESON, 1967).

Na prática, no geral as previsões de tempo não são capazes de desenvolver boas taxas de acerto para mais de sete dias, e em casos específicos a previsibilidade se estende a 10-15 dias (SAMPAIO e SILVA DIAS, 2014). A previsão do tempo em horizontes mais longos do que 2 semanas só se tornou possível com a realização das previsões em termos probabilísticos (BUIZZA e LEUTBECHER, 2015).

As condições atmosféricas associadas à ocorrência de chuvas intensas, como as típicas da ZCAS, muitas vezes não são representadas de maneira satisfatória pelos modelos de previsão numérica do tempo, especialmente se relacionado à quantidade da

precipitação de eventos extremos (PINHEIRO et al., 2011). São necessários diversos estudos para aprimorar a previsibilidade das ferramentas utilizadas pelos meteorologistas, de forma que seja viável e eficaz, por exemplo, o envio de alertas meteorológicos pelos órgãos responsáveis à população.

A qualidade dos perfis atmosféricos que são previstos pelos modelos numéricos depende, naturalmente, da acurácia do modelo em reproduzir as características termodinâmicas da região. Isso revela a importância de entender o comportamento dos modelos, sejam eles globais (por exemplo, o GFS) ou regionais (por exemplo, o WRF), sob diferentes situações meteorológicas e utilizar essas informações para tomada de decisão (PINHEIRO et al., 2014).

A utilização de índices como ferramentas objetivas para prognósticos apresenta cada vez mais relevância em ambientes operacionais. Assim, a implementação do índice de ZCAS como uma técnica objetiva, em associação com outras ferramentas, pode aprimorar a previsão do fenômeno em regiões onde o índice de ZCAS é aplicável. Dados como precipitação e umidade, que dependem de esquemas paramétricos de modelos atmosféricos, não compõem o índice de ZCAS (composto e calculado apenas por variáveis dinâmicas). Isto pode aumentar a confiança da previsão meteorológica operacional de tempo (LUZ BARCELLOS e CATALDI, 2020).

1.4 Objetivos

Este estudo tem como objetivo principal aplicar e avaliar o índice de ZCAS, desenvolvido por Nielsen et al. (2019), em condições prognósticas para um horizonte de 16 dias, com base em previsões do modelo NOAA/GFS.

Objetivos específicos:

- Comparar os eventos de ZCAS classificados pelo CPTEC com o índice de Nielsen et al. (2019), obtido a partir dos dados de Reanálises II, em um período de 5 anos, compreendido entre 2017 e 2021;
- Avaliar de forma detalhada o desempenho prognóstico do índice em dois estudos de caso relacionado com episódios recentes da ZCAS;
- Realizar uma análise estatística descritiva detalhada, compilando os resultados da previsão do índice de ZCAS com base nas previsões do GFS de 0.25 de resolução (2017-2021).

2. Metodologia

2.1 Cálculo do índice de ZCAS

Para realização desta pesquisa, foi necessário primeiramente realizar a transcrição do código que calculava o índice de ZCAS do Matlab (que não é um software livre e necessita de uma licença paga para execução) para a linguagem Python 3.7. Além da mudança de linguagem, foi necessário ajustar o código para utilização do mesmo a partir de variáveis advindas de outros modelos além da Reanálise II, como o NCEP GFS 0.25 com dados de previsão.

Foram realizados 2 estudos de caso para avaliar a previsão gerada a partir dos dados de entrada do modelo GFS, e foi feita a análise estatística através da tabela de contingência para avaliar a previsão do índice de ZCAS em cada horizonte de previsão do modelo NCEP GFS 0.25° em comparação com o observado do índice com entrada da Reanálise II do NCEP (KANAMITSU et al., 2002).

Os dados de reanálise são feitos a partir da combinação de dados de medição, observação, simulação e assimilação de dados que melhor representam as características atmosféricas do momento, e servirão como referência para o “observado” do índice de ZCAS nesta pesquisa. A **Figura 5** contém o fluxograma com as etapas utilizadas nesta pesquisa.



Figura 5: Fluxograma com as etapas utilizadas nesta pesquisa

Em resumo, a metodologia para transcrever o índice de ZCAS consistiu em utilizar as médias diárias das variáveis de assinatura (NIELSEN et al. 2019) destacadas na **Tabela I** da Reanálise II (NCEP) com resolução horizontal $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ para ser utilizado como referência do índice de ZCAS observado, com a diferença de que o período de dados utilizado para o cálculo do índice foi de 01/01/1980 a 31/07/2021, enquanto em Nielsen et al. (2019) o período correspondente é de 01/01/1986 a 31/12/2015.

Tabela I: Variáveis de assinatura para o cálculo do índice, produtos da Reanálise II do NCEP e dos cálculos realizados pela biblioteca *Metpy* (MAY et al., 2022)

Variável	Nível
componente zonal do vento (u)	200 hPa
componente zonal do vento (u)	850 hPa
componente meridional do vento (v)	200 hPa
componente meridional do vento (v)	850 hPa
velocidade vertical ômega (ω)	500 hPa
altura geopotencial (ϕ)	500 hPa
divergência horizontal do vento (div)	200 hPa
divergência horizontal do vento (div)	850 hPa
vorticidade relativa (vort)	200 hPa

O índice de ZCAS foi calculado para cada área de acordo com a posição média da ZCAS, no Sudeste do Brasil (**Figura 6**, esquerda): AB (ao norte da posição média), C (posição média), DE (ao sul da posição média) (**Figura 6**, direita).

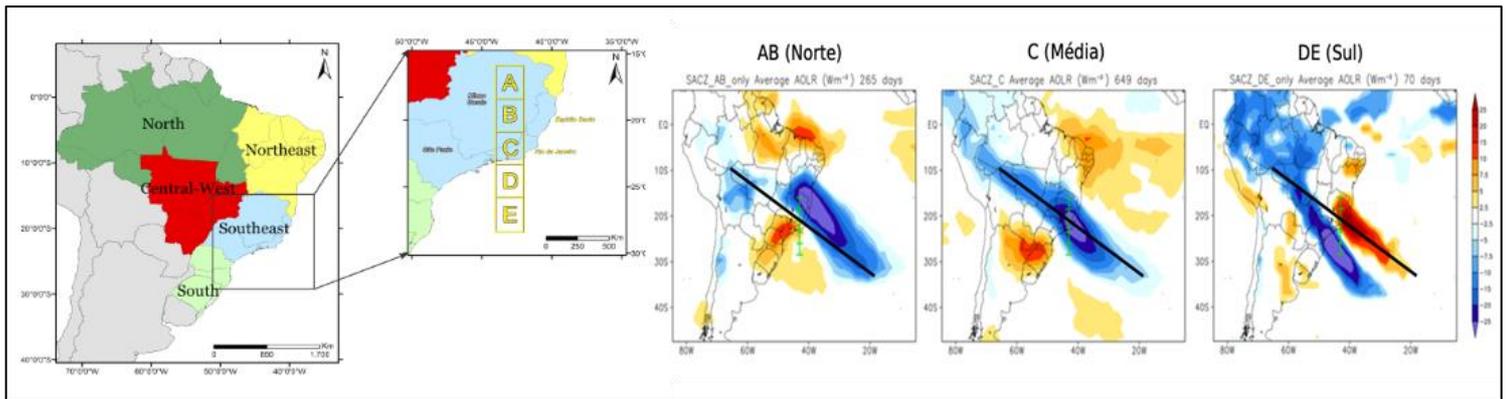


Figura 6: Sudeste do Brasil e o destaque para as regiões de estudo AB, C e DE (esquerda). Anomalia média de radiação de onda longa para os dias ZCAS nas respectivas regiões, de 1986 a 2015. A linha diagonal representa a posição média para referência. Para a posição AB foram utilizados 265 dias para cálculo da média, para a posição C, 649 dias, e para a posição DE, 70 dias. Fonte: Nielsen et al. (2019) (direita)

Dessa forma, a metodologia utilizada para realizar o cálculo do índice de ZCAS seguiu a mesma proposta de Nielsen et al. (2019), com as seguintes adaptações:

- O índice tornou-se adaptável a qualquer entrada de modelo atmosférico, desde que sejam respeitadas as áreas de assinatura das variáveis atmosféricas definidas por Nielsen et al. (2019) destacadas no Apêndice A (**Figura A1, Figura A2, Figura A3, Figura A4, Figura A5**);
- As variáveis passam por um pré-processamento para serem utilizadas no índice: é feito o download do GFS das variáveis u , v , ω e ϕ no formato *grib2*, que são transformadas para o formato *Netcdf*; enquanto as variáveis div e $vort$ são calculadas a partir dos dados de vento através da biblioteca de meteorologia *Metpy*;
- O pré-processamento dos dados das variáveis é feito através da média da variável no recorte em seu respectivo nível e áreas de assinatura (polígonos) que respondem à configuração da ZCAS para cada uma das 9 variáveis da **Tabela I** em cada área de atuação. Como em exemplo na **Figura 7** com a componente zonal do vento u em 200hPa (em destaque o cálculo em retângulo vermelho).

```

for collection in gfs.feature_collection:
    ds_filename = f"{collection.out_name}{collection.level}.csv"
    ds_output_path = Path(postproc_data_path, ds_filename)

    if ds_output_path.is_file():
        print(f"{ds_output_path.stem} already exists locally.")
        continue

    output_ds = list()

    for feature in collection.features:
        print(
            f"calculating {collection.variable} {collection.level} ({feature.area}) ..."
        )
        files = list(nc_dir.glob(f"{collection.variable}_*"))

        data = (
            grid.gridslice(
                xr.open_mfdataset(
                    files, concat_dim="valid_time", combine="nested", parallel=True
                ).sel(isobaricInhPa=collection.level)[collection.nc_name],
                areas.loc[feature.shape],
                xdim="longitude",
                ydim="latitude",
            )
            .mean(["longitude", "latitude"])
            .to_dataset(name=feature.area)
        )
        output_ds.append(data)

    outdf = xr.merge(output_ds).to_dataframe().drop(["isobaricInhPa", "spatial_ref"], axis=1).sort_index()
    outdf.index.name = "time"
    outdf.to_csv(ds_output_path)

calculating w 500 (AB1) ...
calculating w 500 (AB2) ...
calculating w 500 (C1) ...
calculating w 500 (C2) ...
calculating w 500 (C3) ...
calculating w 500 (DE1) ...
calculating w 500 (DE2) ...
calculating gh 500 (AB1) ...
calculating gh 500 (AB2) ...
calculating gh 500 (C1) ...
calculating gh 500 (C2) ...
calculating gh 500 (DE2) ...
calculating gh 500 (DE3) ...
calculating u 200 (AB1) ...
calculating u 200 (AB2) ...
calculating u 200 (AB3) ...
calculating u 200 (C1) ...
calculating u 200 (C2) ...
calculating u 200 (C3) ...
calculating u 200 (DE1) ...
calculating u 200 (DE2) ...
calculating u 200 (DE3) ...
calculating u 200 (DE4) ...
calculating u 200 (DE5) ...
calculating v 200 (AB1) ...
...

```

Figura 7: Parte da rotina de pré-processamento do índice. Cálculo da média da variável u nas áreas de assinatura (polígonos) em 200hPa. Em destaque no retângulo vermelho, o cálculo para a região C

Para o cálculo do índice, faz-se necessário utilizar os pesos atribuídos a cada variável para o cálculo das componentes principais e realização da combinação linear das componentes principais para fazer a regressão. Todos os pesos e coeficientes utilizados compõem a metodologia descrita e detalhada em Nielsen et al. (2019).

Assim, em cada etapa têm-se coeficientes para geração de dados intermediários que são carregados durante o cálculo do índice. Parte da rotina do cálculo do índice de ZCAS está ilustrado no Apêndice B (**Figura B1**, **Figura B2**, **Figura B3** e **Figura B4**).

É válido ressaltar que o código está sempre sendo aprimorado para atender as necessidades do previsor e do pesquisador, e os exemplos de rotinas do Apêndice B foram utilizados para o período específico deste trabalho (2017-2021). Para uma rotina operacional, algumas alterações foram feitas para aprimorar o código, mas mantendo as etapas para o cálculo do índice. Em resumo, o índice de ZCAS é então calculado através das seguintes etapas (**Figura 8**):

- Etapa 1: normalização dos dados de entrada;
- Etapa 2: aplicação do peso das componentes principais de cada variável;
- Etapa 3: combinação linear das componentes principais;
- Etapa 4: classificação logística considerando os limiares h1, h2 e h3;

Resultados: saída em *csv* com valores do índice entre 0 e 1 para o período de tempo desejado e uma plotagem gráfica para facilitar a visualização.

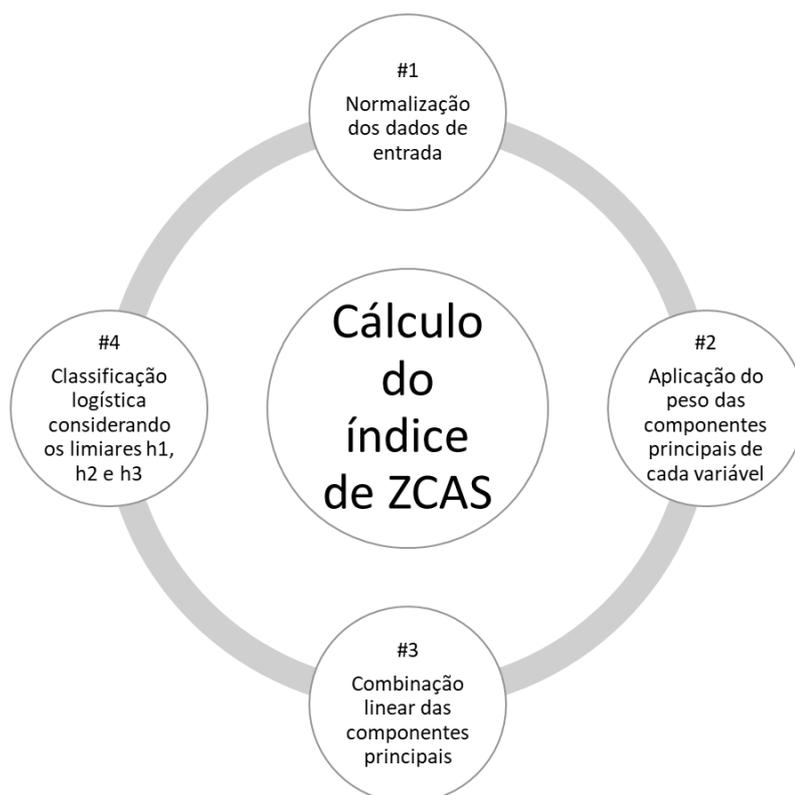


Figura 8: Etapas para o cálculo do índice de ZCAS

Em Nielsen et al. (2019) foram definidos limiares para determinar os melhores limites de corte dos valores do índice de ZCAS. Os limiares de classificação são importantes para o uso operacional do índice, pois facilitam as tomadas de decisão dos preditores ao permitir uma resposta binária (ocorre a ZCAS/não ocorre a ZCAS) quando os valores são maiores/menores que determinado limiar.

Para definir os melhores pontos de corte/limiares de classificação, um intervalo de valores entre 0 e 1 foi usado como limiares e testados quanto à sensibilidade, especificidade e outras métricas, detalhados em Nielsen et al. (2019), para definir três pontos críticos principais (h1, h2 e h3) que também serão considerados neste trabalho para a região C (**Tabela II**).

Para entender melhor a classificação do índice de ZCAS, é necessário explicar como os limiares são interpretados. Em relação à classificação dos índices, o limiar h1 representa o limite no qual a diferença entre as proporções de números de dias de ZCAS classificados correta e incorretamente é máxima (h1 é o limiar mais sensível).

Entretanto, a quantidade de dias com e sem ZCAS diferem consideravelmente entre si, de forma que avaliar a diferença máxima em suas proporções não significa, necessariamente, uma diferença positiva em relação à contagem dos dias. O limiar h1,

então, por ser mais baixo, contempla todos os eventos de ZCAS do histórico, mas também inclui eventos similares que não são oficialmente classificados como ZCAS e isso provoca o aumento de falsos alarmes.

O limiar em que o número de dias classificados correta e incorretamente é o mesmo é definido como h2 (limiar intermediário). O limiar h2 indica então o valor do índice quando o número de dias de ZCAS é igual ao número de alarmes falsos de ZCAS.

Por fim, o limiar definido como h3 reflete a ideia do limite máximo da diferença entre as classificações feitas correta e incorretamente (como h1), mas utilizando a contagem absoluta de dias ao invés de proporções, e é considerado o limiar mais específico.

Dessa forma, ao considerar o limiar h3 de classificação do índice de ZCAS, pode-se não abranger todos os eventos de ZCAS como acontece ao utilizar o limiar h1, mas é considerado o melhor indicativo de ocorrência de ZCAS já que o número de falsos alarmes é mínimo (apenas 3% da série histórica de ZCAS para a região C) (NIELSEN et al., 2019).

Tabela II: Limiares para classificação de eventos de ZCAS a partir do índice para a região C

Região	h1	h2	h3
C	0.14	0.34	0.52

Fonte: Nielsen et al. (2019)

Os valores da Tabela II, para a região de estudo C, permitem uma resposta objetiva do índice em termos de classificação de um evento de ZCAS, com limiar h1=0.14, limiar h2=0.34 e limiar h3=0.52 identificados como pontos críticos e utilizados como valores de referência para o uso preditivo operacional dos resultados do índice de ZCAS, para que não seja feita uma classificação arbitrária das saídas do modelo.

Estes são os valores utilizados nesta pesquisa e, seguindo em conformidade com o estudo de Nielsen et al. (2019), têm-se que os limiares h1 e h2 podem representar perturbações da atmosfera similares à eventos de ZCAS, indicando a presença de sistemas que podem ocasionar chuva.

Assim, eles têm uma grande importância na previsão de precipitação em um ambiente operacional, já que o índice torna a previsão independente das parametrizações dos modelos ao avaliar apenas variáveis dinâmicas dos fenômenos. Enquanto isso, o

limiar h3 (mais específico) indica a ocorrência de sistema atmosférico com a configuração dinâmica da ZCAS bem definida.

2.2 Comparação dos eventos de ZCAS identificados pelo CPTEC com o índice no período de 2017-2021

A partir da série histórica diária de ocorrência de ZCAS, conforme registro oficial pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE em seus relatórios e boletins técnicos, foram selecionados os eventos de 2017 a 2021 para avaliar a capacidade do índice em detectar o fenômeno. A **Tabela III** contém as datas de início e do fim do evento de acordo com o relatório do CPTEC; a data correspondente a 15 dias do início do evento (I-15); o número de dias de duração do evento e a região predominante de atuação (AB, C ou DE) em relação ao posicionamento médio da ZCAS (**Figura 6**).

Tabela III: Histórico de eventos de ZCAS classificados pelo CPTEC no período de 2017 a 2021

I-15	Início	Fim	Duração	Região	I-15	Início	Fim	Duração	Região
08/10/2017	22/10/2017	24/10/2017	3	C, DE	02/02/2019	16/02/2019	19/02/2019	4	AB, C
18/10/2017	01/11/2017	02/11/2017	2	AB	13/02/2019	27/02/2019	03/03/2019	5	C, DE
28/10/2017	11/11/2017	15/11/2017	5	AB, C	09/03/2019	23/03/2019	26/03/2019	4	AB
05/11/2017	19/11/2017	24/11/2017	6	AB, C, DE	26/03/2019	09/04/2019	11/04/2019	3	AB, C
14/11/2017	28/11/2017	29/11/2017	2	AB, C	02/11/2019	16/11/2019	19/11/2019	4	AB, C
17/11/2017	01/12/2017	15/12/2017	15	AB, C	22/11/2019	06/12/2019	08/12/2019	3	AB, C
16/12/2017	30/12/2017	31/12/2017	2	C	20/12/2019	03/01/2020	06/01/2020	4	AB, C
21/12/2017	04/01/2018	11/01/2018	8	AB, C, DE	10/01/2020	24/01/2020	28/01/2020	5	AB, C
16/01/2018	30/01/2018	09/02/2018	11	AB, C, DE	29/01/2020	12/02/2020	14/02/2020	3	AB, C
08/02/2018	22/02/2018	27/02/2018	6	AB, C	13/02/2020	27/02/2020	09/03/2020	12	AB, C
22/02/2018	08/03/2018	14/03/2018	7	AB	18/10/2020	01/11/2020	02/11/2020	2	AB

21/03/2018	04/04/2018	07/04/2018	4	AB, C	06/11/2020	20/11/2020	22/11/2020	3	AB
14/10/2018	28/10/2018	30/10/2018	3	AB	24/11/2020	08/12/2020	12/12/2020	5	AB, C
25/10/2018	08/11/2018	11/11/2018	4	AB, C, DE	09/12/2020	23/12/2020	25/12/2020	3	AB, C
05/11/2018	19/11/2018	21/11/2018	3	AB, C, DE	23/01/2021	06/02/2021	09/02/2021	4	AB, C
18/11/2018	02/12/2018	09/12/2018	8	AB, C	04/02/2021	18/02/2021	22/02/2021	5	AB, C
13/12/2018	27/12/2018	29/12/2018	3	AB, C	21/02/2021	07/03/2021	12/03/2021	6	AB, C
24/01/2019	07/02/2019	08/02/2019	2	AB, C					

O período de investigação compreende os meses de outubro a abril, período úmido do SMAS (CARVALHO et al., 2004), quando a ZCAS costuma estar configurada na atmosfera. Nos 5 períodos úmidos, entre 2017 e 2021, o CPTEC registrou em seus boletins 36 eventos de ZCAS, incluindo aqueles com apenas 2 dias de duração.

2.3 Previsão do índice de ZCAS com dados do GFS: estudos de caso

A partir desde momento, após a utilização do índice de ZCAS com a entrada da Reanálise II para ser utilizado como dado observado, o objetivo do trabalho era justamente comparar os resultados com o índice de ZCAS previsto, isto é, com o código adaptado para ter como entrada dados de previsão do GFS. Foram realizados dois estudos de caso recentes para avaliar os horizontes de previsão nos quais o índice apresenta uma previsão satisfatória.

Foram selecionadas datas a 15 dias do início do evento (I-15) segundo o CPTEC, da **Tabela III**. Dois eventos de fevereiro e março de 2021 foram escolhidos na região C. Estes eventos foram escolhidos para demonstrar a capacidade do índice em detectar uma ZCAS mais definida e uma ZCAS mais fraca, e também porque entre os eventos há um sinal do índice indicando a presença dinâmica de um outro evento que não foi classificado pelo CPTEC.

Evento 1: 18/02/2021 - 22/02/2021

Evento 2: 07/03/2021 - 12/03/2021

Foram adquiridos os dados de previsão do modelo global GFS com resolução espacial de 0.25 de latitude e longitude, arquivados no *Research Data Archive* (RDA) NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (NCEP, 2015). Para o evento 1, devido a limitações computacionais, o *download* foi feito a partir do dia 05/02/2021, a 14 dias do início do evento. Para o evento 2, o *download* foi feito a partir de 15 dias do início do evento de ZCAS, em 21/02/2021.

Em ambos os casos, foram baixados dados com inicialização de 00Z, a cada 24h, até atingir 384h. Os dados, ao serem utilizados na rotina do índice, geraram uma janela móvel de 16 dias para análise do comportamento do horizonte de previsão do índice de ZCAS. Os principais resultados dos estudos de caso da previsão do GFS serão discutidos no próximo capítulo.

2.4 Avaliação do índice de ZCAS como ferramenta prognóstica: Tabela de contingência

Seguindo o fluxo de trabalho, o principal objetivo deste estudo é responder como a previsão do índice de ZCAS corresponde às previsões de modelos numéricos atmosféricos; isto é, avaliar o índice como ferramenta prognóstica com embasamento estatístico.

Os dados escolhidos para servirem como entrada no índice de ZCAS foram os dados de previsão do modelo global GFS com resolução espacial de 0,25 graus, que é normalmente utilizado como condição inicial para vários modelos regionais, como o *Weather Research Forecasting* (WRF).

Para isso, também foram baixados os dados de previsão do NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast do RDA, com inicialização de 00Z, mas dessa vez para todos os dias entre os meses de outubro a abril, de 2017 a 2021. O *download* foi feito com uma discretização de 24h, para um horizonte de previsão de 16 dias (f000-f384). Um exemplo encontra-se na **Figura 9** a seguir, para o dia 21/02/2021.

```
dspath = "https://rda.ucar.edu/data/ds084.1/"
filelist = [
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f000.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f024.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f048.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f072.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f096.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f120.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f144.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f168.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f192.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f216.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f240.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f264.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f288.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f312.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f336.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f360.grib2",
    "2021/20210221/gfs.0p25.2021022100.f384.grib2",
]
```

Figura 9: Exemplo de *download* dos dados do GFS 0.25° para o cálculo do índice de ZCAS do dia 21/02/2021. Os dados foram baixados com inicialização de 00Z, com uma discretização de 24h, para um horizonte de previsão de 16 dias, entre outubro e abril de 2017 a 2021

Para este estudo, o cálculo do índice de ZCAS foi feito apenas para a região C, que corresponde à posição média da ZCAS e abrange os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais na Região Sudeste, que é muito afetada pelas severas consequências da precipitação intensa ou persistente típica da ZCAS (FONSECA AGUIAR e CATALDI, 2021).

Uma forma muito utilizada para quantificar o grau de acerto ou concordância entre os valores estimados e os valores observados é com o cálculo de índices de desempenho. Para avaliações categóricas, uma ferramenta elaborada por Wilks (2006) permite que a comparação dos pares de previsão/observação seja feita através do resumo dos dados fornecido pela tabela de contingência (**Tabela IV**), na qual é possível calcular as métricas como Probabilidade de Detecção (POD), Razão de Alarme Falso (RAF) e Acurácia.

Tabela IV: Tabela de contingência para cálculo da avaliação de desempenho do índice

Tabela de Contingência		Observação	
		sim	não
Previsão	sim	A	B
	não	C	D

Assim, com base nas categorias apresentadas sob a forma matricialmente (tabela de contingência), foi possível calcular quatro índices de avaliação:

- a) Acurácia: indica uma performance geral do modelo; ou seja, dentre todas as classificações, revela a proporção (%) que o modelo classificou corretamente. É calculado através da Equação 1.

$$\text{Acurácia} = \frac{A+D}{A+B+C+D} \quad (\text{Eq. 1})$$

- b) Probabilidade de detecção (POD): proporção de vezes em que o evento ocorreu e foi corretamente previsto; quanto mais alto o valor do POD, melhor é a destreza do modelo em prever o evento (Equação 2)

$$\text{POD} = \frac{A}{A+C} \quad (\text{Eq. 2})$$

- c) Razão de Alarme Falso (RAF): proporção das previsões do evento que se revelaram alarmes falsos, isto é, representa a fração de previsões “sim” que se mostraram erradas, ou a proporção de eventos previstos que não se concretizaram. O melhor valor possível é zero (100% de correlação com o observado), e o pior possível é um (Equação 3).

$$\text{RAF} = \frac{B}{A+B} \quad (\text{Eq. 3})$$

- d) Taxa de Falso Positivo (FPR): também conhecido como *taxa* de alarme falso, representa o quociente de falsos alarmes sobre o número total de não ocorrências do evento, ou seja, a frequência relativa condicional de uma previsão errada dado que o evento não ocorreu. Valores altos de FPR podem comprometer a confiança do sistema de previsão (Equação 4).

$$\text{FPR} = \frac{B}{B+D} \quad (\text{Eq. 4})$$

Nielsen et al. (2019) utilizou a métrica Taxa de Falso Positivo (FPR) para determinar a taxa de alarme falso do índice de ZCAS. Apesar da nomenclatura ser semelhante, a RAF e FPR representam métricas distintas da matriz de confusão (*ratio vs rate*). Barnes et al. (2009) retrata a confusão da terminologia usada na literatura das ciências atmosféricas, com trabalhos antigos e recentes utilizando incorretamente os termos de alarme falso. Em resumo, a FPR está relacionada à taxa de instâncias incorretamente classificadas como positivas em relação às negativas reais, enquanto a RAF está relacionada à taxa de alarmes falsos em relação ao total de alarmes emitidos, incluindo tanto os falsos quanto os verdadeiros. Ambas as métricas são importantes para avaliar o desempenho de sistemas de classificação (WILKS, 2006; BARNES et al., 2009; REIS JUNIOR et al., 2009).

A partir dessas métricas de avaliação, foi possível comparar os resultados dos valores observados, que é o índice de ZCAS com os dados de Reanálise II, com os valores previstos, com os dados baixados do GFS. O período compreende os anos de 2017 a 2021, entre os meses de outubro (do dia 01 ao dia 31 de outubro) a abril (do dia 01 ao dia 14 de abril). Assim, foi avaliado com quantos dias de antecedência a previsão do índice de ZCAS pode ser utilizada como uma ferramenta prognóstica em ambientes operacionais.

De maneira resumida, a previsão do índice de ZCAS, com entrada dos dados de previsão do GFS, é comparada com os valores observados do índice, com entrada de dados da Reanálise II, em relação aos 3 limiares definidos: h1, h2 e h3. Os resultados serão apresentados para cada limiar. Em seguida, será apresentada a relação do índice de ZCAS considerando apenas o limiar h3 (mais específico) como referência para os valores do índice de ZCAS observado, já que este limiar foi estabelecido para definir condições em que praticamente não foram observados falsos alarmes na série histórica pseudo-observada.

3. Resultados e discussões

3.1 Utilização do índice de ZCAS em Python

Para cada uma das áreas de atuação - AB, C e DE, foram gerados gráficos para comparação e validação do índice no Python em relação ao desenvolvido por Nielsen et al. (2019) no Matlab (linha azul entrada de Reanálise II e linha vermelha entrada de GFS horizonte de 00z). A proposta é comparar a replicação dos dados de Reanálise II nas duas linguagens. A **Figura 10**, **Figura 11** e **Figura 12** ilustram os resultados encontrados para as regiões AB, C e DE, respectivamente.

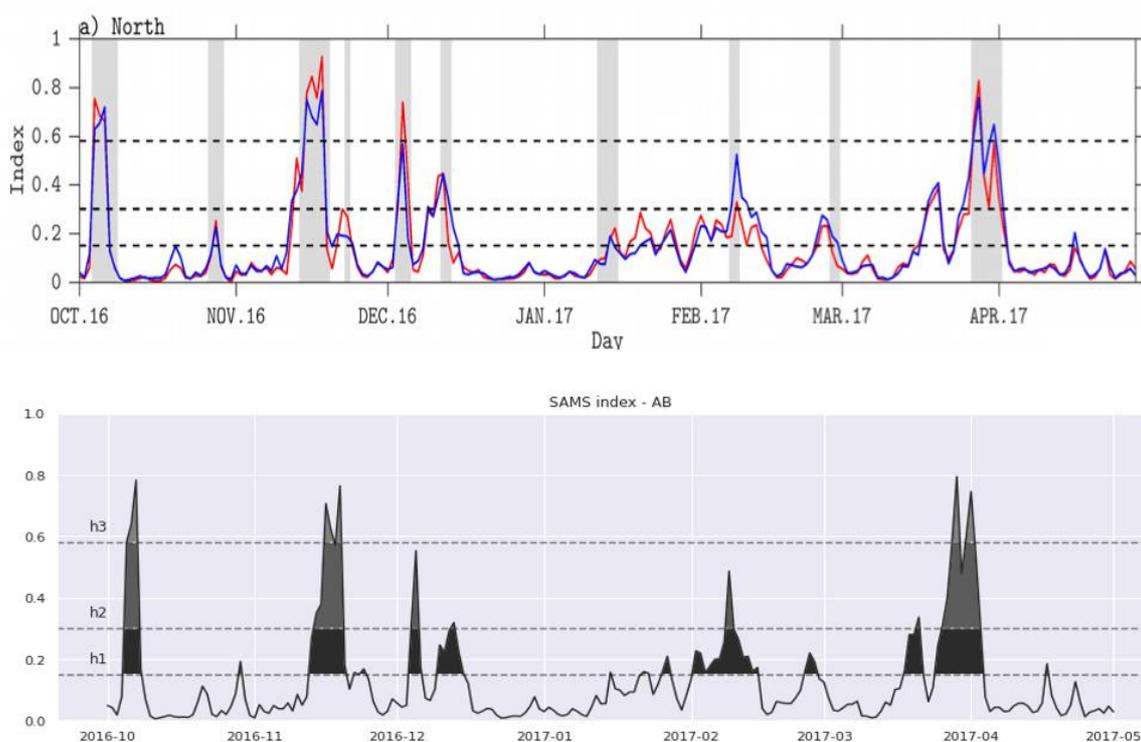


Figura 10: Índice de ZCAS para a posição mais ao norte (AB) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo)

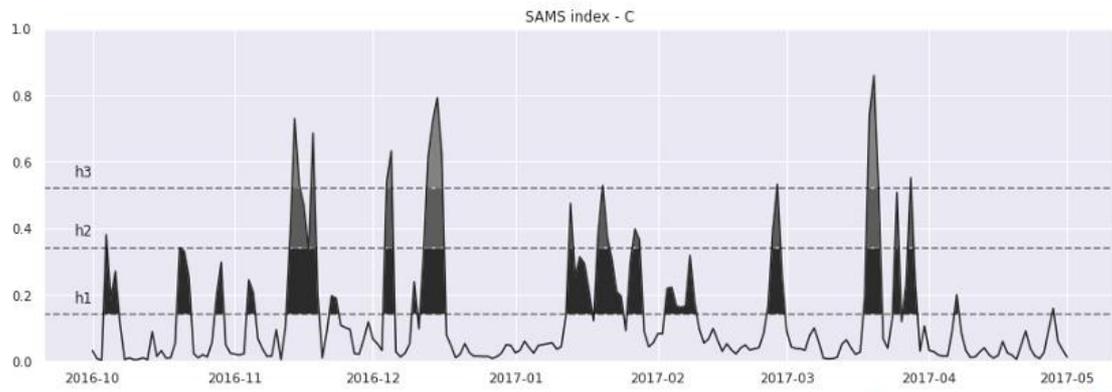
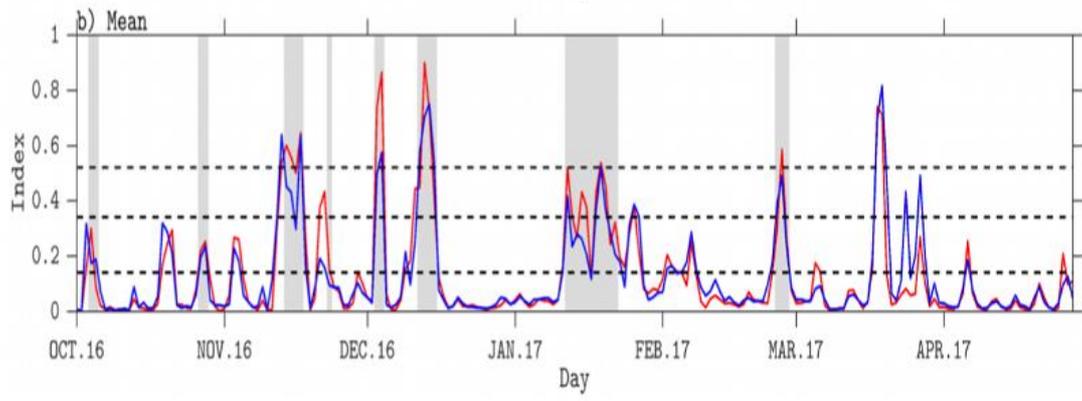


Figura 11: Índice de ZCAS na posição média (C) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo).

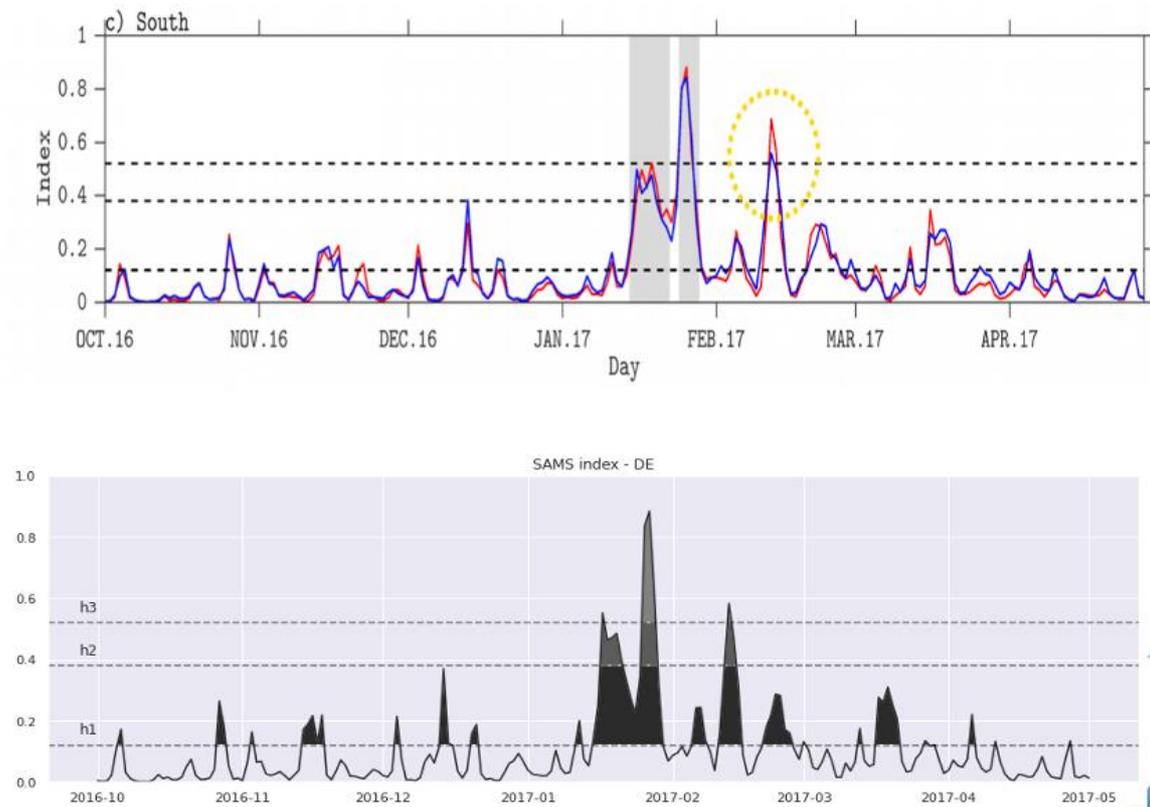


Figura 12: Índice de ZCAS na posição mais ao sul (DE) em Matlab (acima), de Nielsen et al. (2019); reprodução do índice em Python (abaixo)

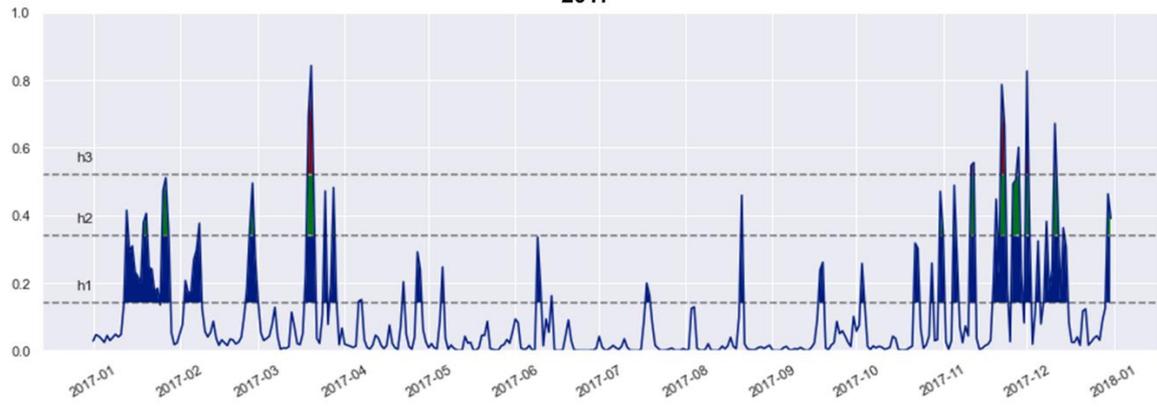
Para as 3 regiões de atuação, observa-se através de uma análise visual que o índice reproduzido em Python acompanhou os resultados publicados por Nielsen et al. (2019). A partir desta transcrição, o índice de ZCAS em Python foi aplicado e pode ser calculado operacionalmente com dados de previsão.

3.2 Comparação dos eventos do CPTEC com o índice de ZCAS

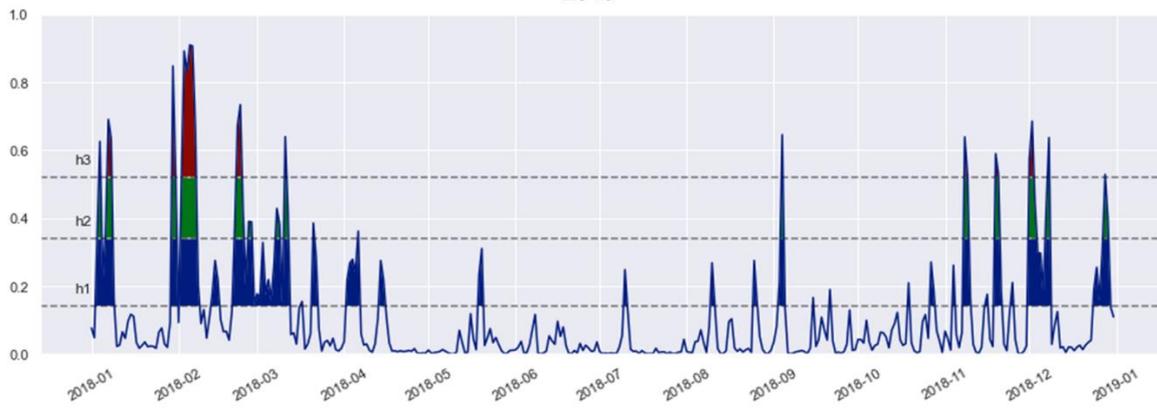
Foram gerados gráficos com os valores do índice com dados de entrada da Reanálise II para os anos de 2017 a 2021. Assim, foi possível comparar os registros de eventos de ZCAS feitos pelo CPTEC (Tabela III) com a resposta do índice.

A **Figura 13** contém os gráficos do índice de 2017 a 2021 (até agosto) para a região C.

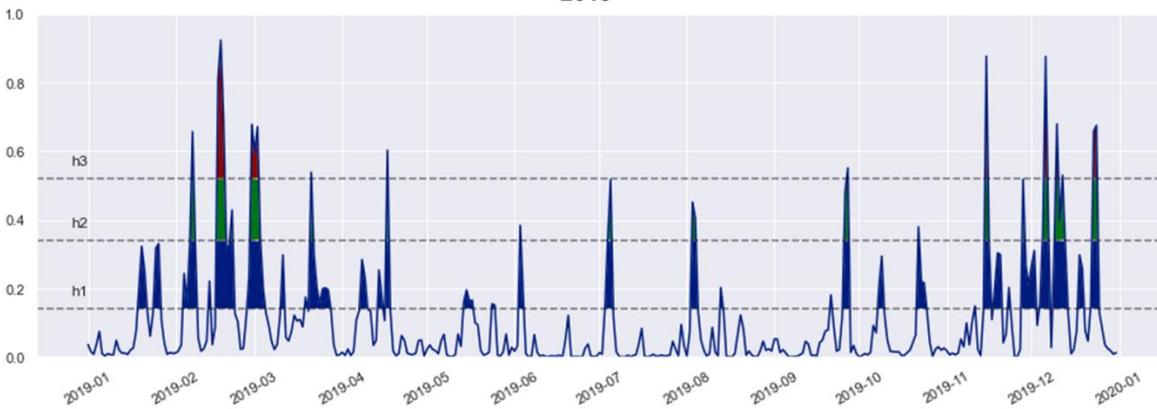
2017



2018



2019



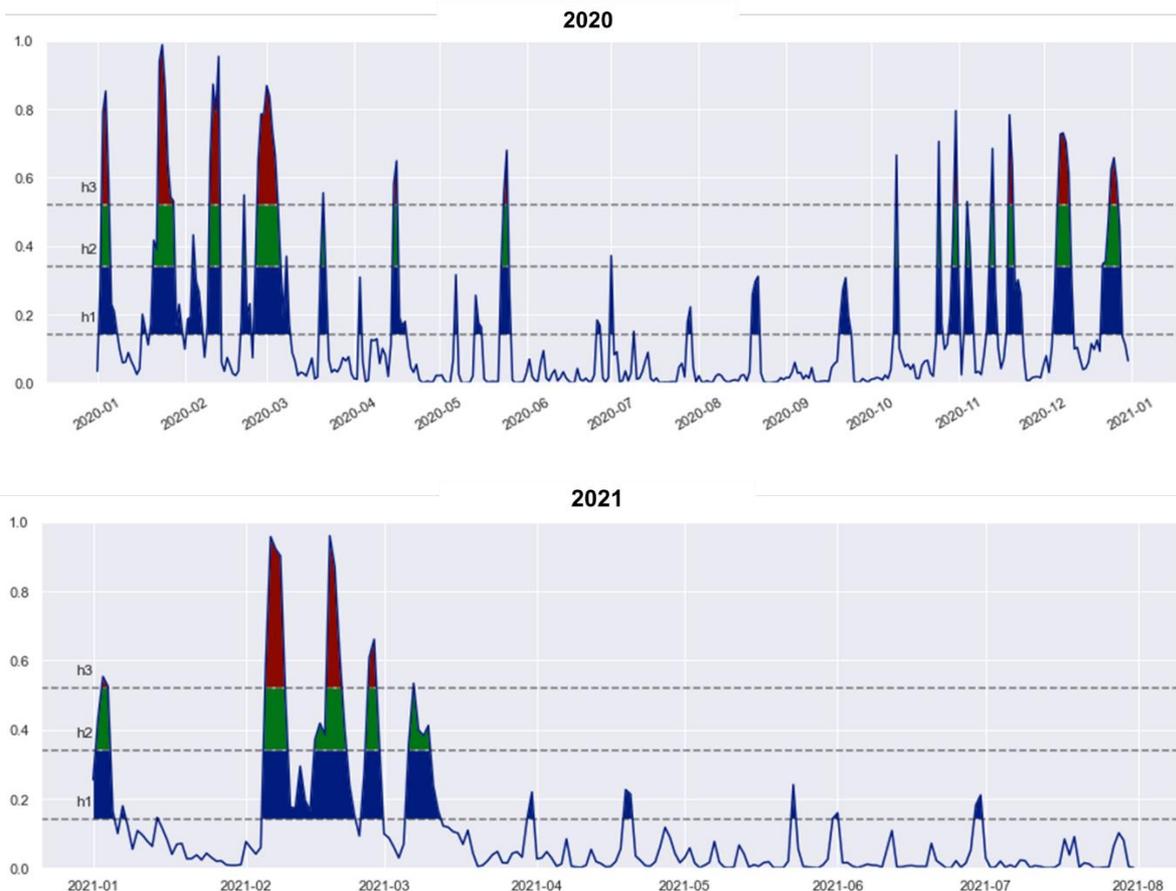


Figura 13: Resultados do índice de ZCAS (Reanálise II) na região C de 2017 a 2021 (até agosto). Os limiares h1, h2 e h3 estão destacados por linhas horizontais. A área sombreada azul indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada verde indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada vermelha indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3

Analisando os gráficos da **Figura 13**, podemos observar uma tendência de pico no início e no final dos anos, entre os meses de outubro a abril, período úmido do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS).

Ano a ano, foram avaliados cada evento de ZCAS classificado pelo CPTEC, do início ao fim do mesmo, com a resposta do índice, e todos os eventos considerados como ZCAS pelo CPTEC foram detectados pelo índice. No entanto, alguns desses picos marcados pelo índice não entraram no boletim técnico do CPTEC, embora a resposta do índice de ZCAS indique a presença de uma configuração dinâmica atmosférica típica da ZCAS, especialmente quando o valor do índice ultrapassa o limiar h3, que é o limiar com menos de 3% de falsos alarmes do fenômeno para a região C.

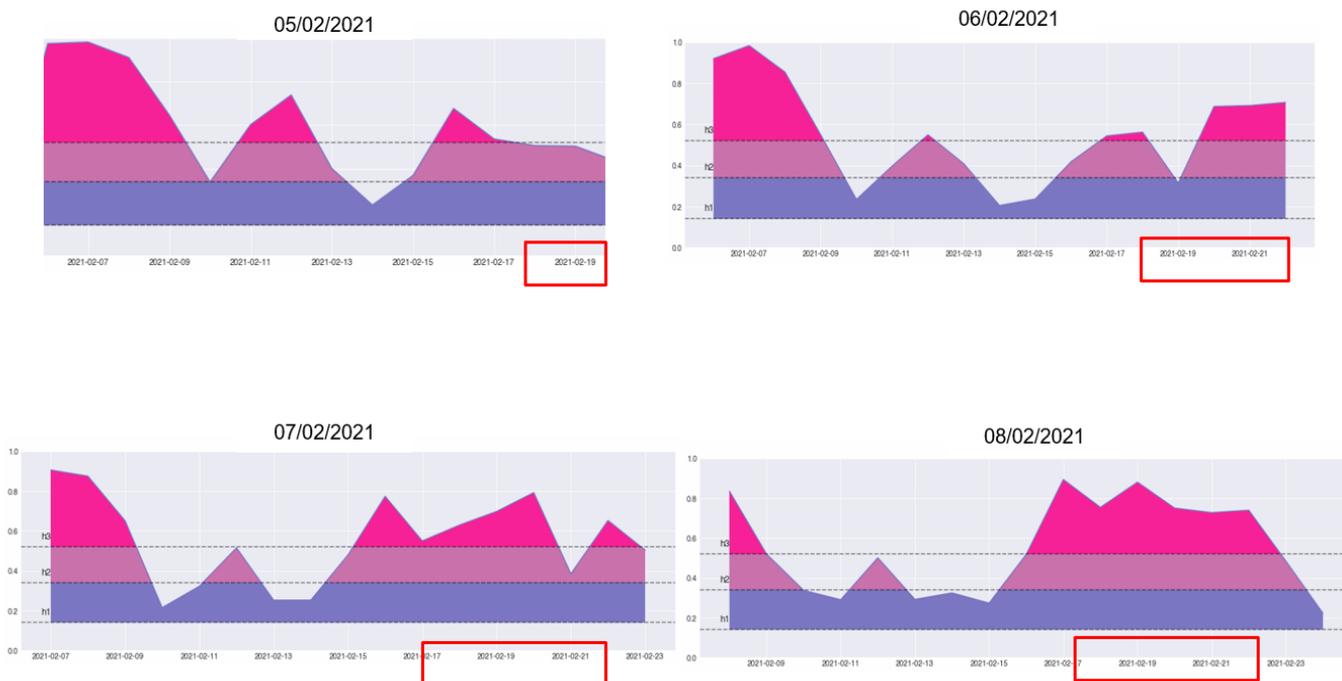
Nos centros operacionais, geralmente são seguidos alguns critérios para a detecção da ZCAS, como a elaboração de um diagnóstico sinótico e a combinação de variáveis do

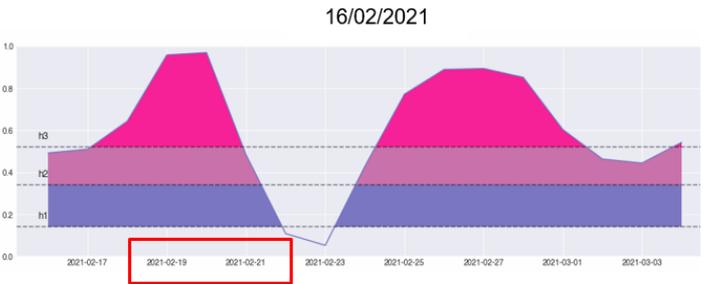
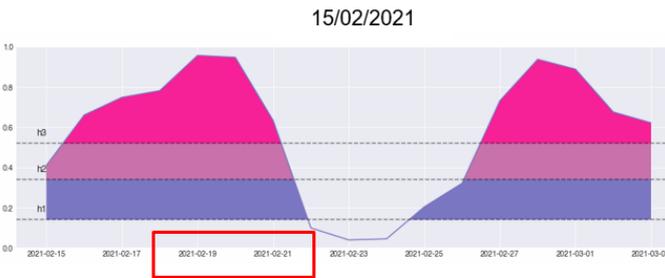
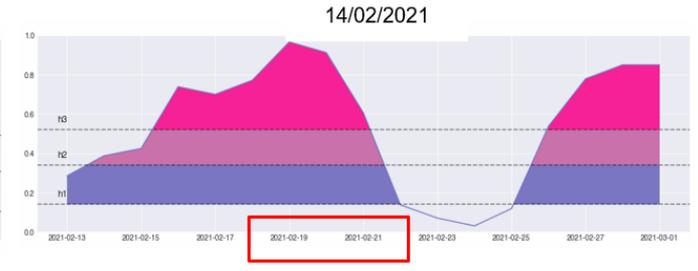
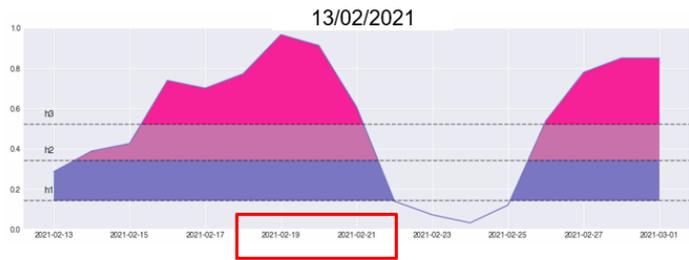
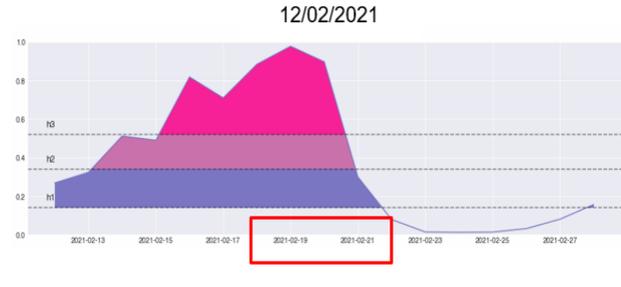
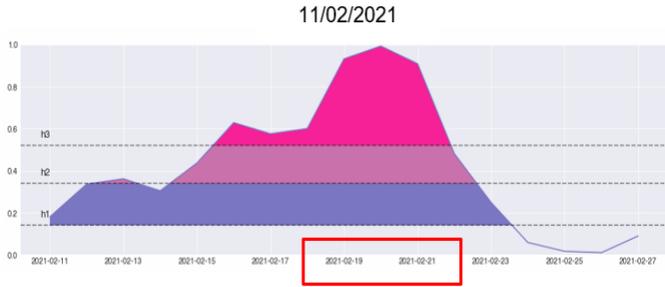
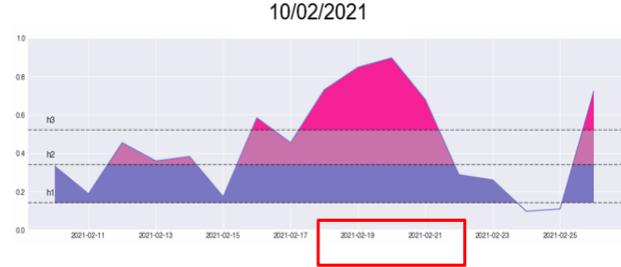
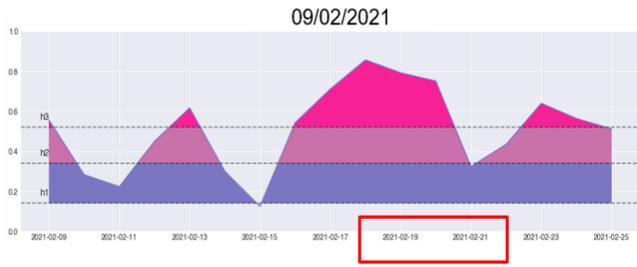
GFS para geração de cartas no *GrADS* e no *Gempak* com limiares de corte definidos segundo a experiência no ambiente operacional (ESCOBAR, 2019). Assim, ao utilizar o índice de ZCAS como uma ferramenta de previsão, é possível auxiliar os previsores na operação e na tomada de decisões.

3.3 Índice de ZCAS como ferramenta de previsão: estudos de caso

Conforme explicitado na metodologia, foram desenvolvidos dois estudos de casos com base na ocorrência de dois eventos de ZCAS em 2021, selecionados com o objetivo de analisar a previsão do índice utilizando dados de entrada do GFS, e observar a janela móvel do índice com um determinado horizonte de previsão. Estes eventos foram escolhidos para demonstrar a capacidade do índice em detectar uma ZCAS mais definida e uma ZCAS mais fraca, e também porque entre os eventos há um sinal do índice indicando a presença dinâmica de um outro evento que não foi classificado pelo CPTEC.

As figuras com os gráficos do índice com a previsão do GFS para os dois eventos de estudo encontram-se a seguir (**Figura 14 e Figura 15**). O retângulo vermelho em destaque no eixo horizontal representa a janela de ocorrência da ZCAS conforme registrado pelo CPTEC.





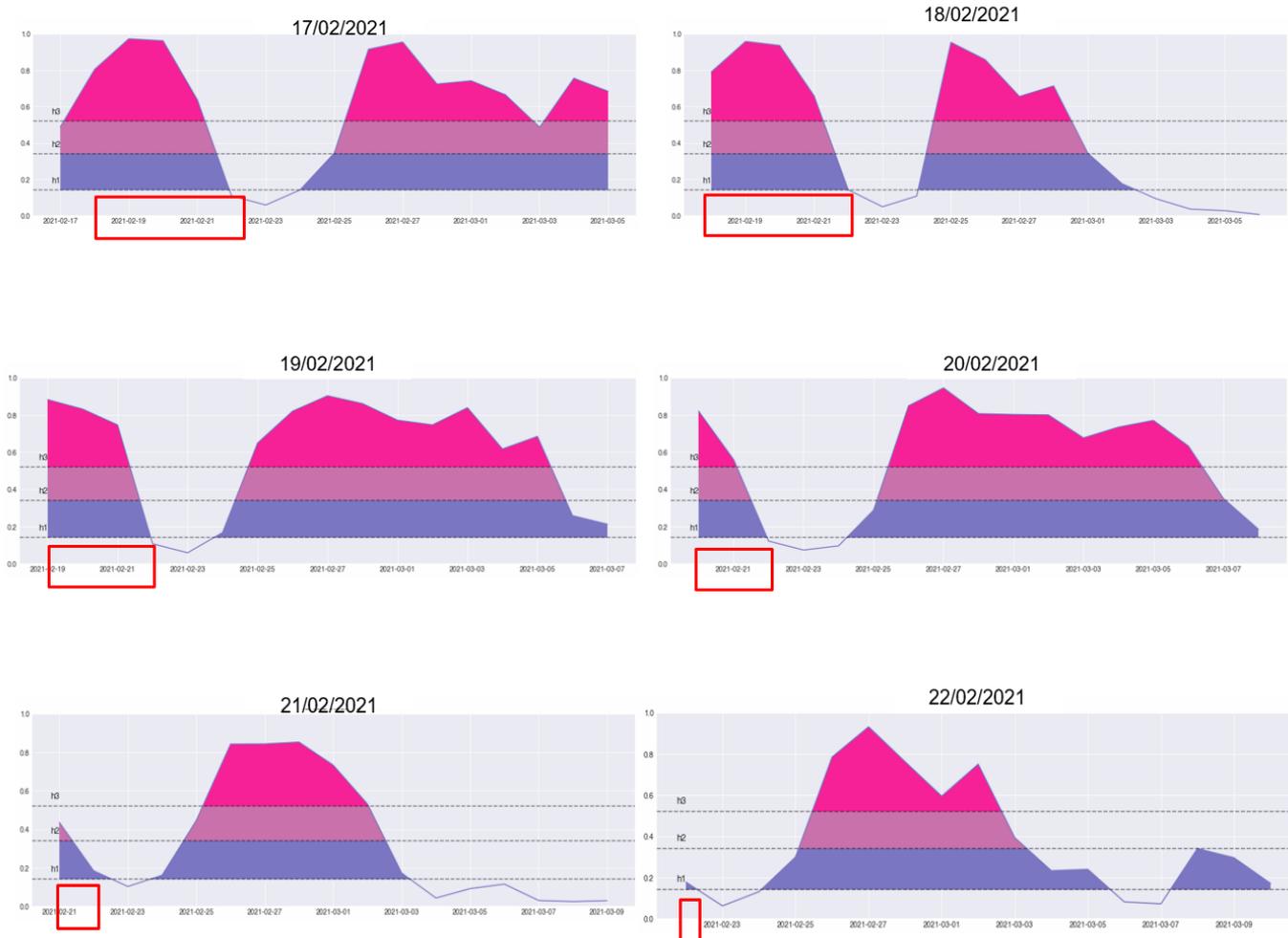
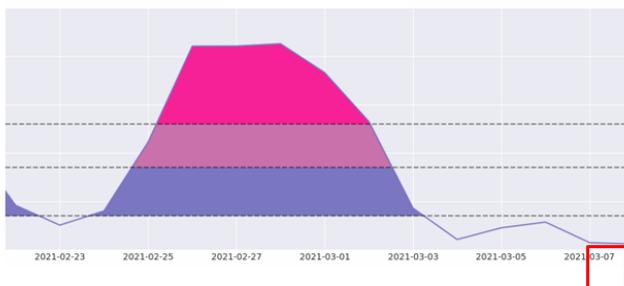


Figura 14: Índice de ZCAS com a previsão do GFS desde o dia 05/02/2021, a 14 dias do início do evento 2, que começa no dia 18/02/2021 e atua até o dia 22/02/2021. A área sombreada em lilás indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada em rosa claro indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada em rosa escuro indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3. O retângulo vermelho em destaque no eixo horizontal representa a janela de ocorrência do evento

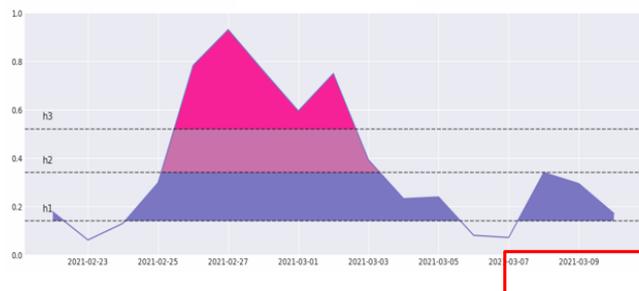
Para o evento 1 (**Figura 14**), na previsão do dia 05/02/2021, o índice de ZCAS marcou a ocorrência do evento, atingindo inclusive o limiar intermediário h2. O sinal permanece nos próximos dias de previsão, de forma praticamente constante, ultrapassando o limiar mais específico h3. É interessante notar que, a 10 dias do início do episódio de ZCAS, na previsão do dia 10/02/2021, o índice diminui significativamente no final do retângulo vermelho (22/02/2021), representando de fato o final do evento. Os próximos dias continuam com a tendência de valores altos durante o evento, e redução dos valores do índice no final do mesmo.

É evidenciado nos gráficos de previsão do índice com o GFS a ocorrência de um outro evento, com início entre 24/02/2021-25/02/2021 e final no início de março, que não foi notificado pelo CPTEC.

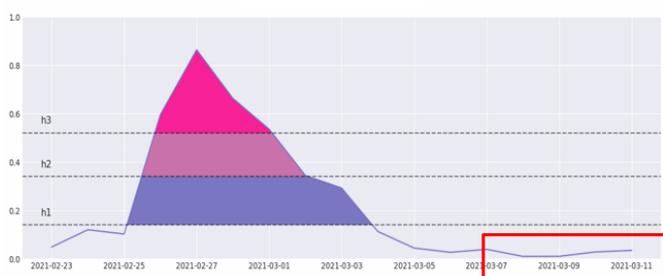
21/02/2021



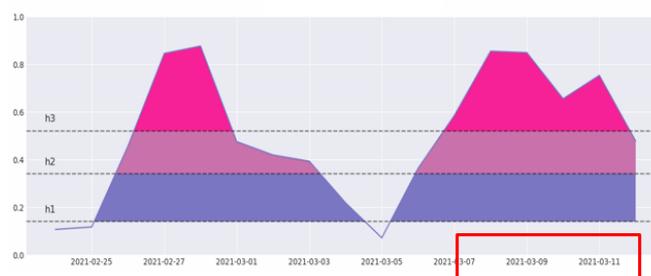
22/02/2021



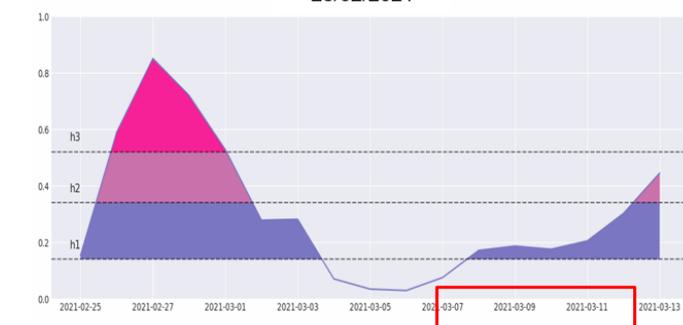
23/02/2021



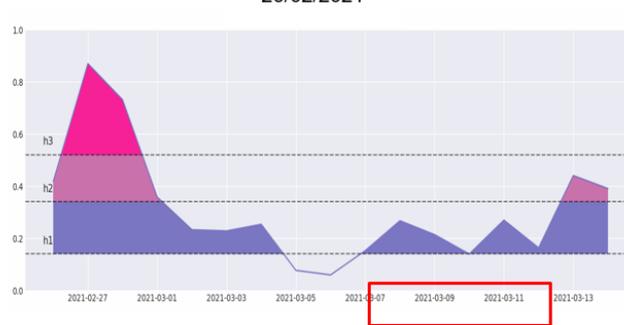
24/02/2021



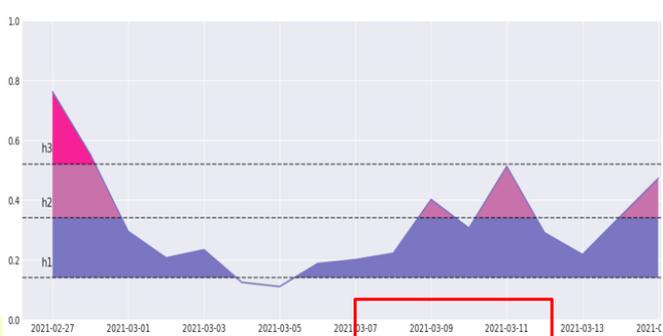
25/02/2021



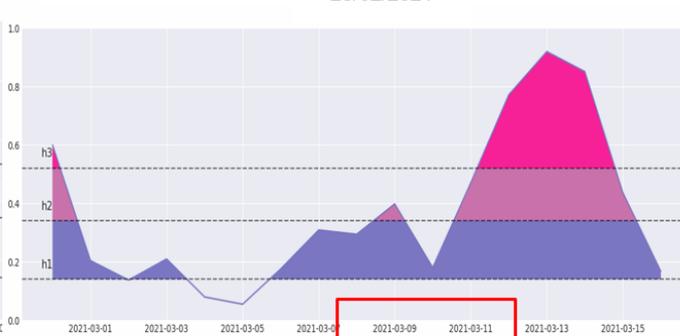
26/02/2021

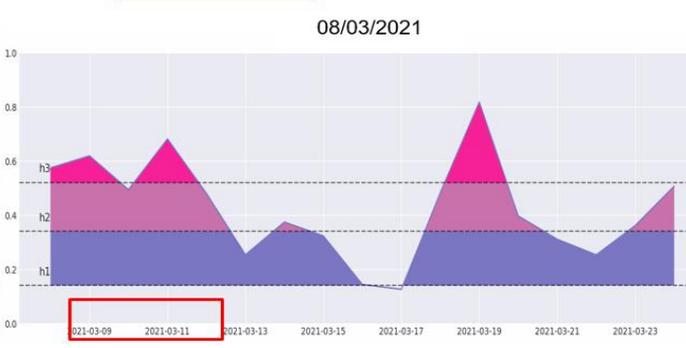
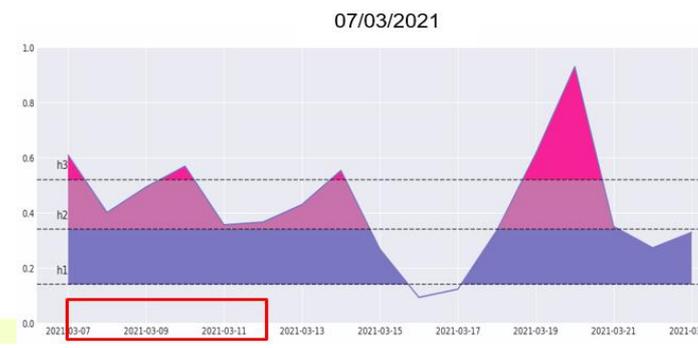
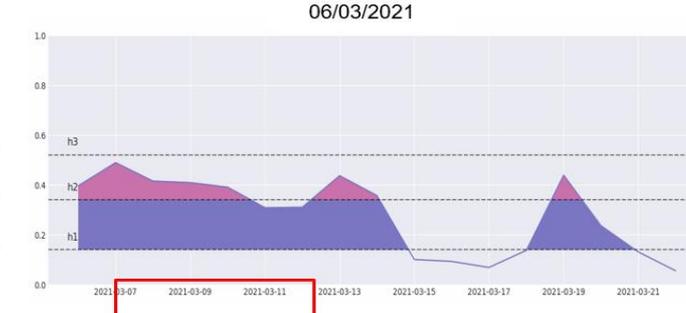
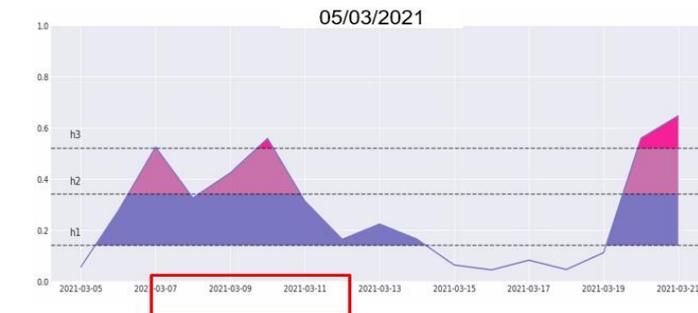
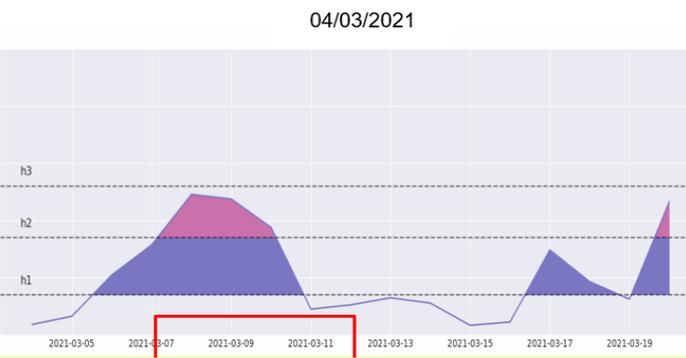
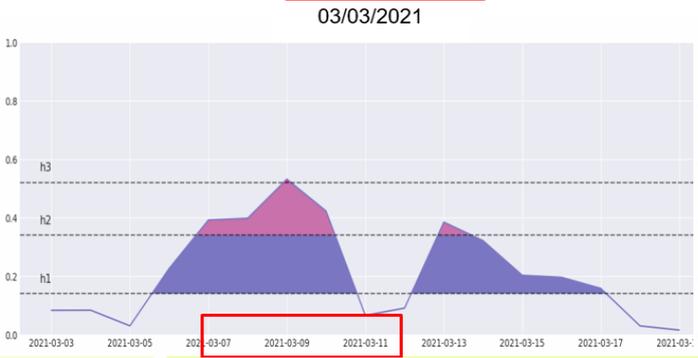
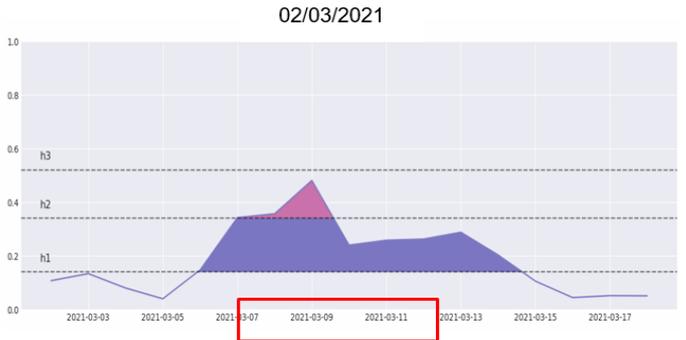
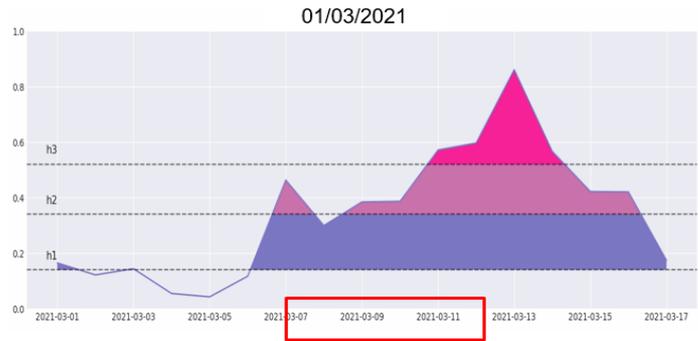


27/02/2021



28/02/2021





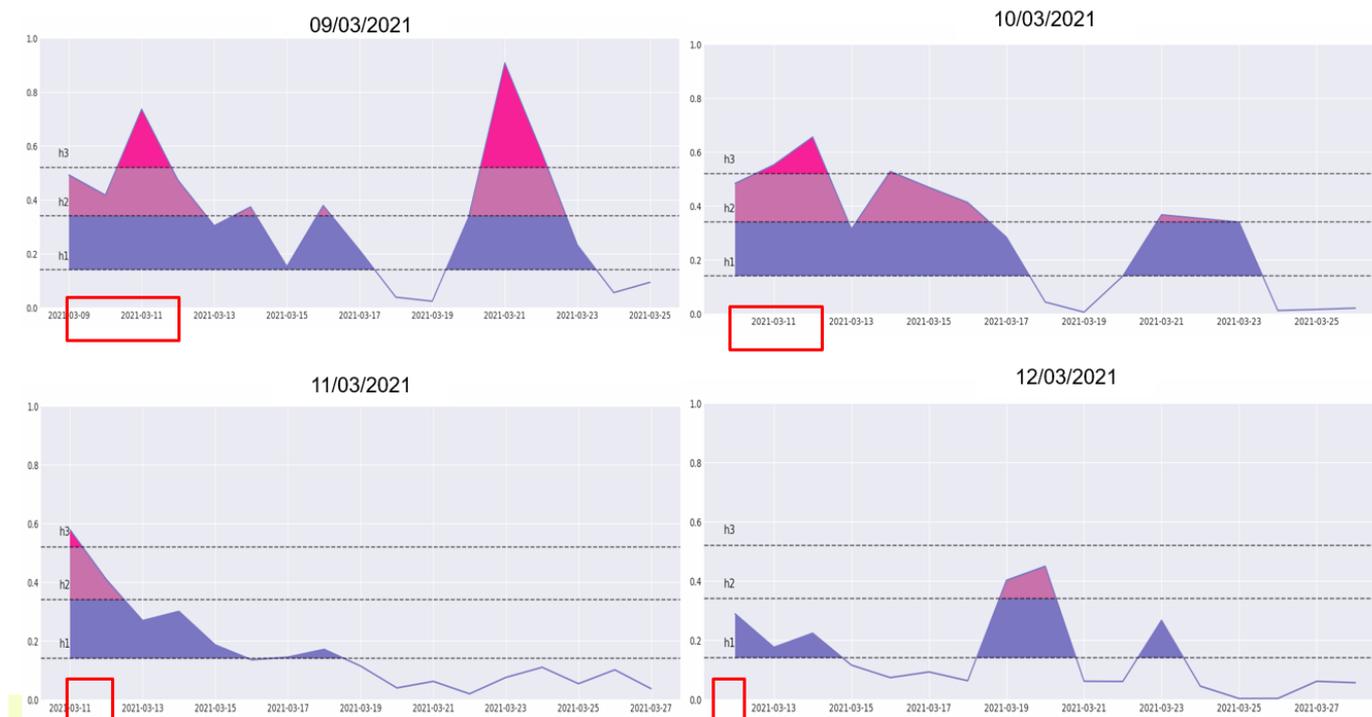


Figura 15: Índice de ZCAS com a previsão do GFS desde o dia 21/02/2021, 14 dias antes do início do evento que começa no dia 07/03/2021 até o dia 12/03/2021. A área sombreada em lilás indica quando os valores do índice de ZCAS atingiram o limiar h1; a área sombreada em rosa claro indica quando os valores do índice de ZCAS são maiores que o limiar h2, enquanto a área sombreada em rosa escuro indica um valor do índice de ZCAS maior que o limiar mais específico h3. O retângulo vermelho em destaque no eixo horizontal representa a janela de ocorrência do evento

No evento 2 (**Figura 15**), observa-se que, aos 15 dias do evento (21/02/2021), o índice não conseguiu prever o início do evento. A previsão do dia 22/02/2021 começa a apontar um sinal para o período do evento escolhido. Apesar disso, a previsão do dia 23/02/2021, a 13 dias do evento, não indicou nenhum sinal da ZCAS.

Já nos dias seguintes, o sinal que representa o começo do evento pode ser visualizado normalmente. Logo, o índice com dados de previsão a 12 dias do evento, do dia 24/02/2021 em diante, atingiu pelo menos o limiar h1 (menos específico) até o final do evento, em 12/03/2021. Também é possível observar a existência de um pico constante entre o dia 25/02/2021 e 03/03/2021.

Pode-se dizer então que, em ambos os estudos de caso, o sinal do fenômeno foi identificado com pelo menos 10 dias de antecedência. O evento com o sinal acima do limiar mais específico (h3) apresentou uma tendência de valores altos durante o evento,

e redução do índice no final do mesmo em comparação ao observado da Reanálise II (NCEP).

Os resultados da previsão para esse período foram semelhantes aos dados de Reanálise, que são feitos a partir da combinação de dados de medição, observação, simulação e assimilação de dados que melhor representam as características atmosféricas do momento.

Na **Figura 16** encontram-se as respostas do índice de ZCAS com a entrada da Reanálise II para comparar a previsão do índice de ZCAS com a previsão do GFS. Os 3 eventos destacados com retângulo preto foram classificados pelo CPTEC como ZCAS conforme listados na Tabela III, sendo que o evento 1 e o evento 2 serviram como estudos de caso para este trabalho.

No retângulo vermelho, entre os dias 25/02/2021 a 28/02/2021, é possível identificar um pico que foi apontado em ambas as previsões do GFS, mas que não foi classificado como um evento de ZCAS pelo CPTEC.

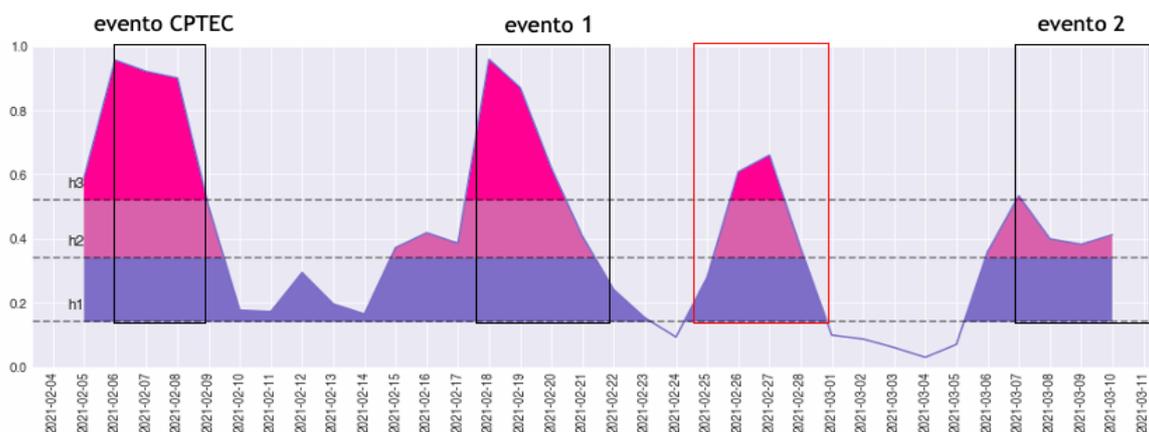


Figura 16: Índice de ZCAS com entrada da Reanálise II (NCEP) do dia 04/02/2021 ao dia 11/03/2021. Os 3 eventos destacados com retângulo preto foram classificados pelo CPTEC como ZCAS, mas o retângulo em vermelho, também presente nas previsões do índice com entrada do GFS, não foi considerado como ZCAS pelo CPTEC

Este período destacado no retângulo vermelho na **Figura 16**, ao ultrapassar inclusive o limiar mais específico h3, indica que existe uma ocorrência das características dinâmicas da ZCAS e que, mesmo não tendo sido catalogado pelo CPTEC como um evento de ZCAS, corresponde a uma perturbação atmosférica que traz consequências na mudança do tempo na região de atuação. Essa informação por si só é importante para um meteorologista que esteja atuando em um ambiente operacional. As imagens do satélite

Geostationary Operational Environmental Satellite Network (GOES 16) (Figura 17) para o período destacado no retângulo vermelho revelam a presença de uma faixa de nebulosidade desde o centro primário de convecção tropical da Amazônia até o Sudeste, típica da ZCAS.

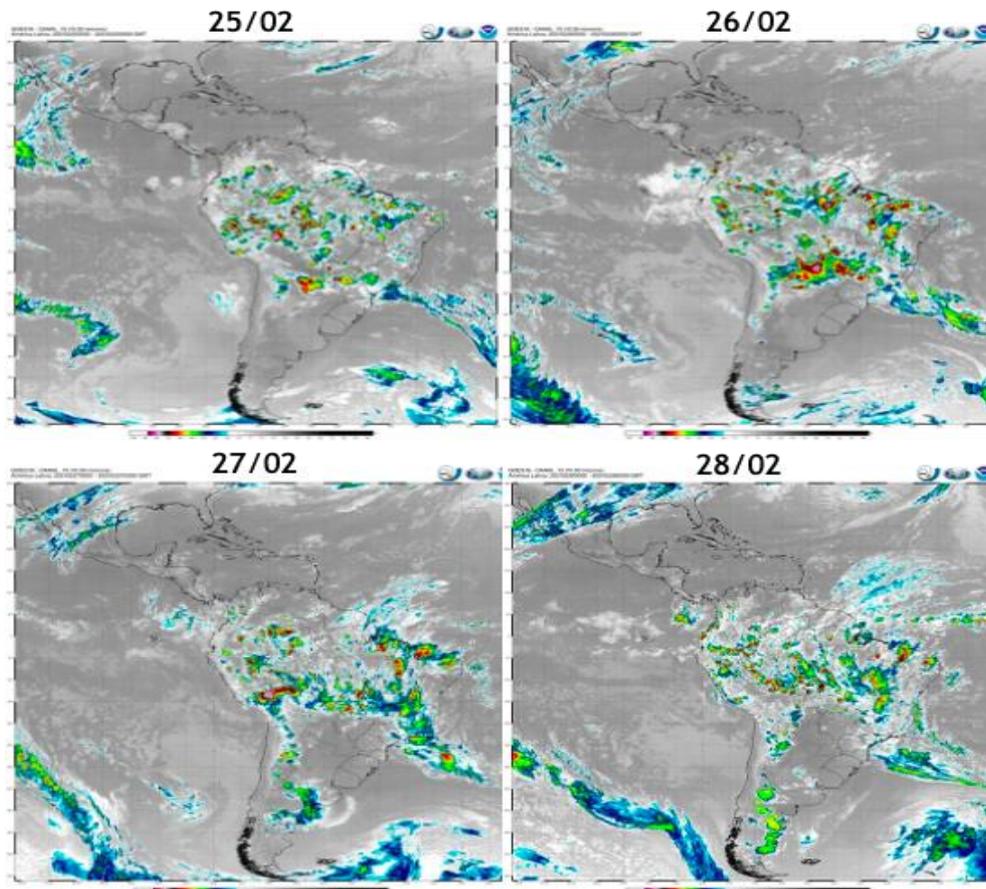


Figura 17: Imagens do satélite GOES 16 para o período entre 25/02 e 28/02. Observa-se a faixa de nebulosidade que vai desde o centro primário de convecção tropical da Amazônia até o Sudeste, típica da ZCAS. Fonte: CPTEC/INPE

3.4 Avaliação de desempenho do índice de ZCAS: resultados com base nas previsões do NCEP GFS 0.25 (2017-2021)

Através dos resultados da tabela de contingência, foram organizados resultados da previsão do índice de ZCAS com base nas previsões do NCEP GFS 0.25, de 2017 a 2021. Acima de cada limiar proposto para a posição média da ZCAS, temos a porcentagem de cada métrica estatística para determinado dia da previsão do GFS, desde o valor de análise à previsão de 24h, 48h, 72h, assim sucessivamente, até 384h (décimo sexto dia de previsão). Para facilitar a análise, os resultados foram dispostos em gráficos com a avaliação de desempenho dos resultados das métricas estatísticas a partir de cada limiar

de referência (com o valor do índice previsto e observado), conforme as figuras a seguir (**Figura 18**, **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21** e **Figura 22**).

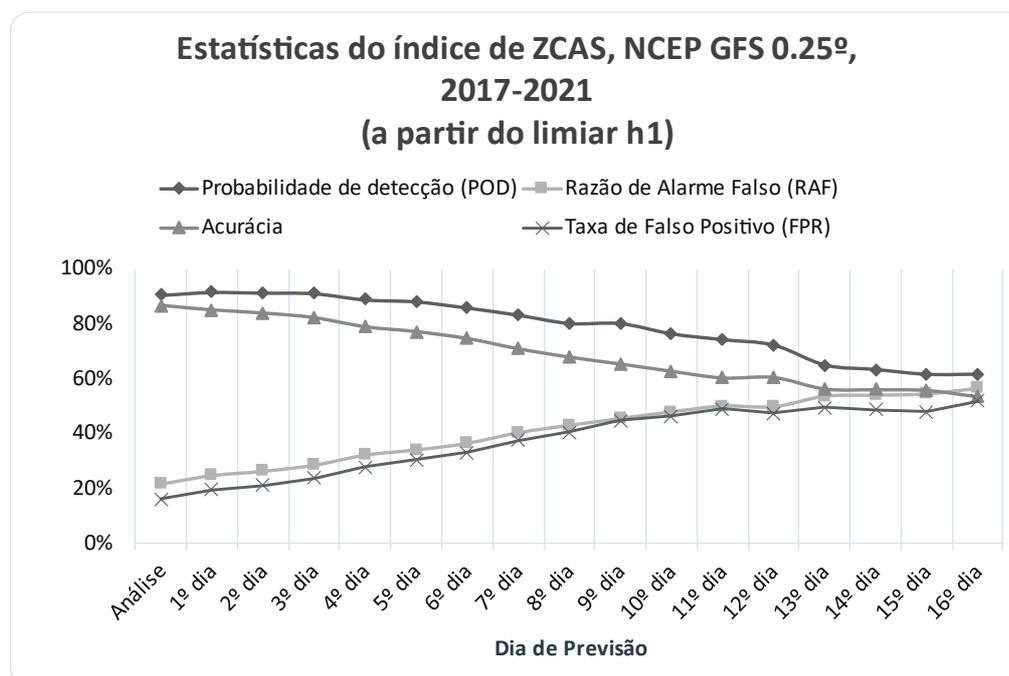


Figura 18: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF, FPR e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais sensível h1, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021)

O limiar h1 é o limiar inferior de classificação e considerado o mais sensível (NIELSEN et al. 2019). Analisando a **Figura 18**, temos que em até 9 dias de previsão, a POD do índice é sempre maior que 80%. Até o 10º dia de previsão, a RAF e a FPR são inferiores a 50%, com POD acima de 75% e acurácia maior que 60%.

Apesar da probabilidade de detecção estar sempre acima de 60% mesmo no 16º dia de previsão, a RAF e acurácia variam entre 50 e 60% do 11º dia ao 16º. A FPR só atinge os 50% no 16º dia de previsão. Considerando a previsão do índice de ZCAS e a RAF como a métrica determinante para avaliar a previsão do índice, tem-se que entre os meses de outubro a abril (2017-2021), a partir do limiar inferior (h1), o melhor prognóstico do índice é até o 10º dia de previsão.

Ao considerar o limiar h3 como referência do índice observado, quando praticamente não há falsos alarmes dos eventos de ZCAS (a taxa de falsos alarmes é mínima) (NIELSEN et al., 2019) para comparar com a previsão do índice de ZCAS a partir do limiar mais sensível (h1), temos o seguinte resultado (**Figura 19**):

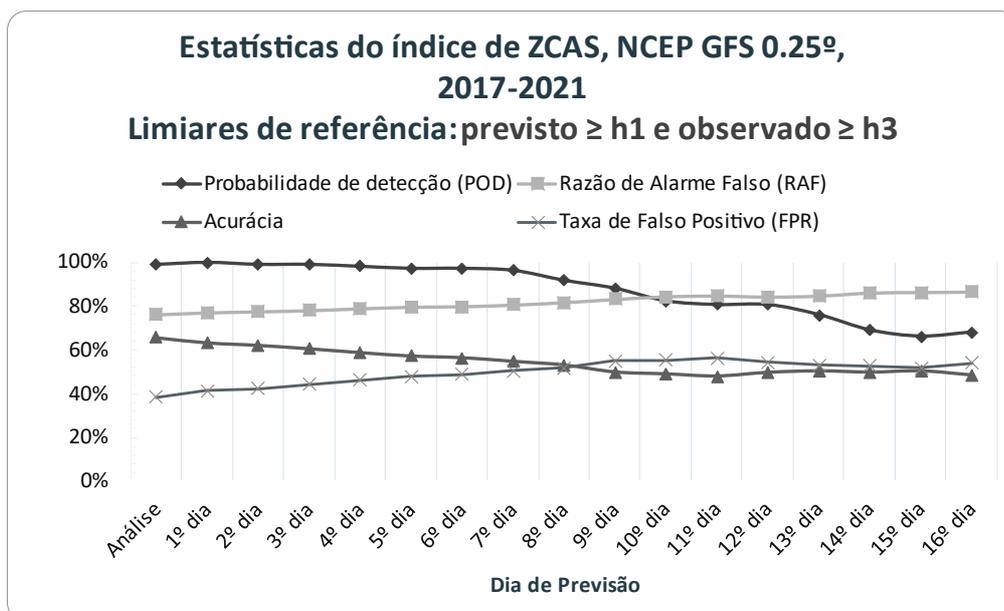


Figura 19: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF, FPR e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais sensível h1, mas considerando como observado o limiar h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021)

Observando a **Figura 19**, entre 2017-2021, temos que em até 8 dias de previsão, a POD do índice de ZCAS é sempre maior que 90%. A probabilidade de detecção de uma ZCAS bem configurada é de aproximadamente 68% em uma previsão de 16 dias (384h). Nos 16 dias de previsão do índice com o GFS, a acurácia da previsão se mantém em torno de 64% (no 1º dia) e 48% (no 16º dia). A RAF aumenta em conformidade com aumento do horizonte de previsão, variando de 76% (no 1º dia) a 86% (no 16º dia). Enquanto isso, a FPR varia em torno de 40% a 55% do 1º dia de previsão ao 16º dia.

O limiar intermediário (h2) representa um sinal de uma ZCAS mais forte que o limiar inferior (h1), onde o número de dias classificados correta e incorretamente é o mesmo (NIELSEN et al., 2019). A **Figura 20** apresenta a avaliação de desempenho do índice a partir do limiar h2.

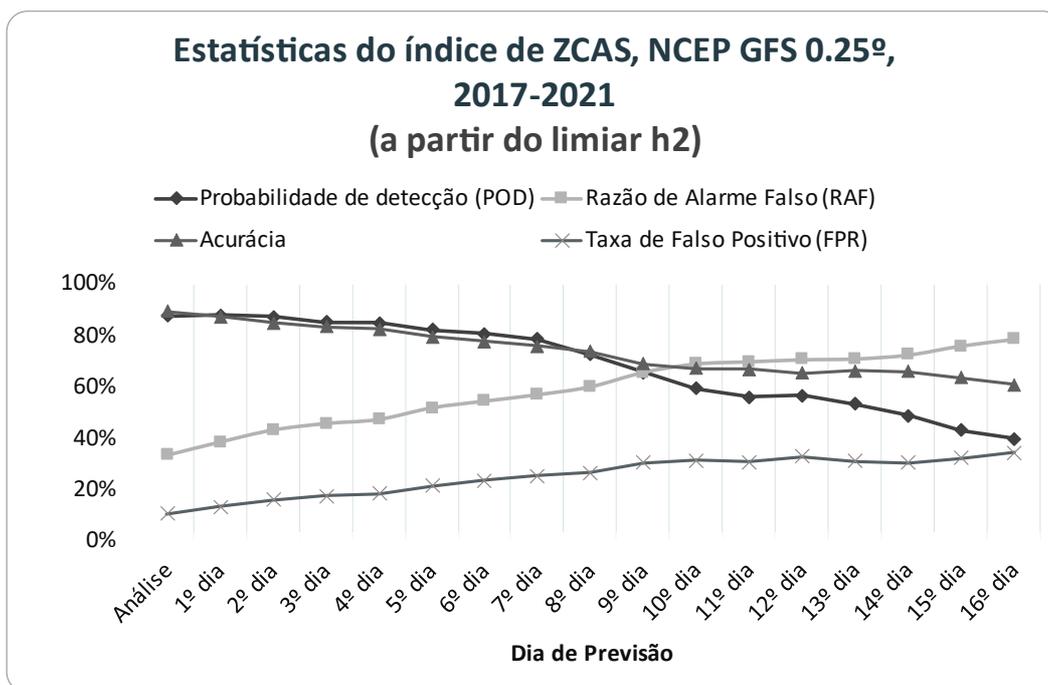


Figura 20: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF, FPR e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar intermediário h2, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021)

Analisando a **Figura 20**, a partir do limiar intermediário (h2), é possível observar que até o 4º dia de previsão, a RAF está abaixo de 50%, e tanto a POD quanto a Acurácia estão acima de 80%. A FPR varia de 10% (no 1º dia) a 35% (no 16º dia de previsão).

Sendo assim, considerando o comportamento de 3 das 4 métricas avaliadas, uma previsão de 96h do GFS no índice de ZCAS pode ser considerado como um bom parâmetro de previsão, garantindo uma antecedência suficiente na detecção da dinâmica de um evento de ZCAS ou semelhante. A POD e a acurácia do índice de ZCAS neste caso estão sempre acima de 65% até o 9º dia de previsão.

Ao considerar o limiar h3 como referência do índice de ZCAS observado para comparar com a previsão do índice de ZCAS a partir do limiar intermediário (h2), temos o resultado da **Figura 21**.

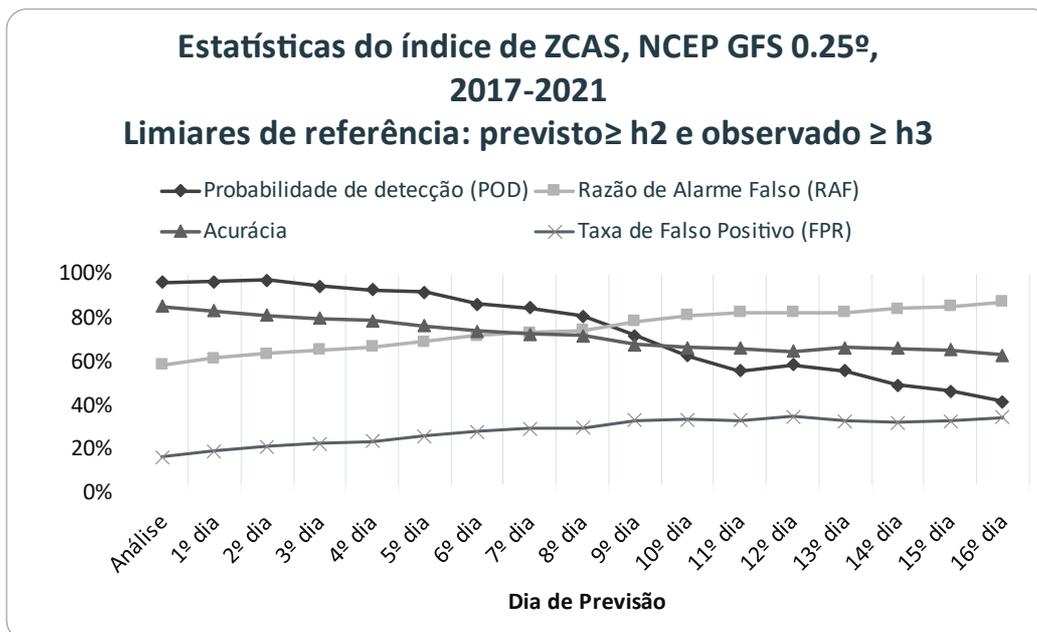


Figura 21: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF, FPR e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar intermediário h2, mas considerando como observado o limiar h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021)

Analisando a **Figura 21** até o 5º dia de previsão, a POD do índice de ZCAS é sempre maior que 90%. O valor da POD é maior que 80% até o 8º dia de previsão. Nos 16 dias de previsão do GFS, a acurácia da previsão se mantém entre aproximadamente 85% (no 1º dia) e 63% (no 16º dia). A RAF do índice de ZCAS aumenta com o aumento do horizonte de previsão, variando em torno de 58% (no 1º dia) a 87% (no 16º dia), enquanto a FPR se mantém baixa em todos os dias, atingindo um valor máximo de 35% apenas no 16º dia de previsão.

O limiar mais específico (h3) representa um sinal mais forte da configuração da ZCAS, isto é, apresenta sua configuração mais definida, com a menor taxa de falsos alarmes (NIELSEN et al., 2019). A avaliação de desempenho do índice de ZCAS acima do limiar h3 no período de estudo está representado na **Figura 22**.

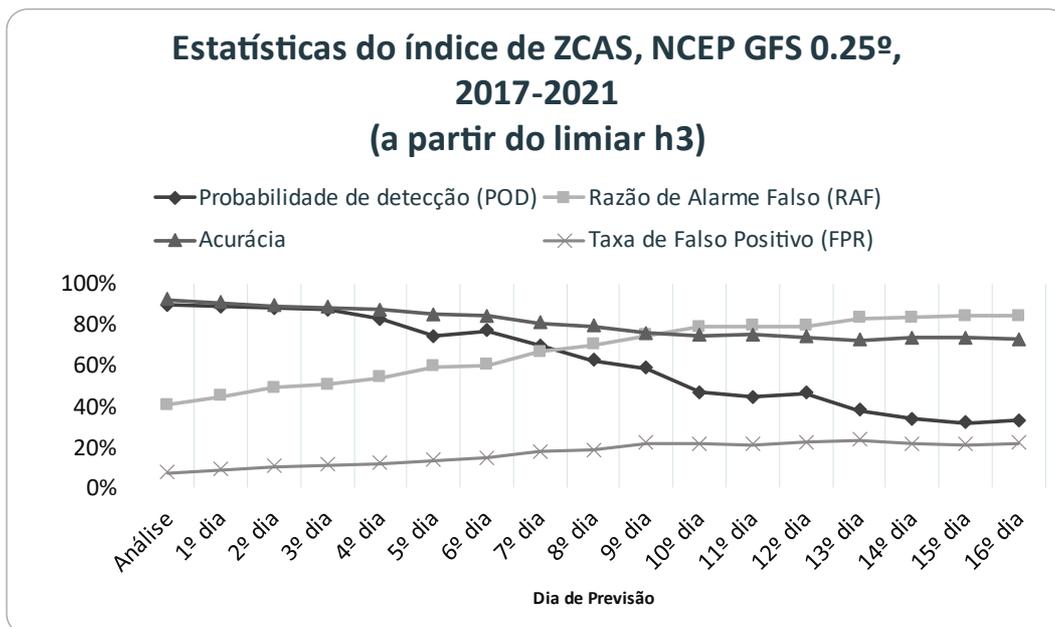


Figura 22: Avaliação de desempenho com valores de POD, RAF e Acurácia do índice de ZCAS calculados acima do limiar mais específico h3, na região C, para os meses de outubro a abril (2017-2021)

De acordo com a **Figura 22**, temos que a partir do terceiro dia de previsão do índice de ZCAS, a RAF ultrapassa os 50%. Em até 7 dias de previsão, a POD se mantém acima de 70% e a Acurácia se mantém em um bom patamar durante todos os dias de previsão, variando de aproximadamente 90% (no 1º dia de previsão) a 73% (no 16º dia de previsão). Já a taxa de falso positivo (FPR), que determina a ocorrência de falsos positivos entre todas as condições negativas, não ultrapassa os 22% mesmo no 16º dia de previsão. A RAF, por outro lado, que determina a proporção de falsos alarme entre todas as previsões geradas, varia de aproximadamente 40% (no 1º dia de previsão) a 84% no (16º dia de previsão).

Se fôssemos considerar a RAF como uma possível métrica de corte, para o limiar h3, uma previsão com 72h de antecedência a um evento de ZCAS indicaria um bom prognóstico do índice de ZCAS, com uma RAF de aproximadamente 50% e tanto a POD quanto a Acurácia maiores que 87%, além da FPR de 10%, coerente com o observado por Nielsen et al. (2019), cujo valor da métrica não ultrapassa 4%.

4. Conclusões

Neste trabalho, o índice de ZCAS desenvolvido por Nielsen et. al (2019) foi adaptado para uso na previsão do tempo a partir dos resultados do modelo NOAA/GFS. Desta forma, o índice de ZCAS além de uma ferramenta acadêmica, pode também ser utilizada como uma ferramenta de previsão de maneira operacional.

A aplicação do índice de ZCAS foi capaz de reproduzir todos os eventos que o CPTEC classificou como ZCAS nos anos de 2017 a 2021. Os dois estudos de caso avaliaram qualitativamente a capacidade de previsão do índice de ZCAS utilizando dados de entrada do GFS, de 24h até 384h, para observar a janela móvel do índice com determinado horizonte de previsão. Em ambos os estudos de caso o sinal do fenômeno foi identificado com pelo menos 10 dias de antecedência.

O estudo de Nielsen et al. (2019) mostrou a correlação do índice com os volumes de precipitação durante os episódios de ZCAS, indicando que o índice de ZCAS apresenta uma melhor precisão em comparação com a previsão de precipitação no Sudeste do Brasil para horizontes de previsão de 1, 4 e 7 dias. Nesse contexto, este trabalho propõe realizar comparações relacionando o índice de ZCAS previsto (com os dados do GFS), com o índice de ZCAS pseudo-observado (calculado usando as reanálises), ou seja, utilizar apenas o índice de ZCAS como referência para análises.

Ao avaliar de maneira quantitativa através da tabela de contingência e métricas de desempenho para a posição média da ZCAS (região C), o índice de ZCAS entre 2017 e 2021 revelou que, a partir do limiar inferior e mais sensível do índice (h1), até o 10º dia de previsão, temos a RAF e a FPR inferiores a 50%, com a POD acima de 75% e Acurácia maior que 60%. Ao considerar o limiar h3 como referência do índice observado para comparar com a previsão do índice a partir do limiar mais sensível (h1), temos que em até 8 dias de previsão, a POD do índice é sempre maior que 90%, e de aproximadamente 68% em uma previsão de 16 dias (384h).

Quando comparada a previsão do índice de ZCAS a partir do limiar intermediário (h2), considerando como observado o h3, temos que até o 5º dia de previsão a POD do índice é sempre maior que 90%, e este valor se mantém maior que 80% até o 8º dia de previsão, com uma Acurácia que varia entre aproximadamente 85% (no 1º dia) e 63% (no 16º dia), com taxa de falso positivo (FPR) atingindo um valor máximo de 35% apenas no último dia de previsão.

Nos casos acima do limiar mais específico (h3) temos que uma previsão do índice de ZCAS com 72h de antecedência do evento indica um bom prognóstico, com FPR menor que 10%, a RAF inferior a 50% e tanto a POD quanto a Acurácia acima de 87%.

É importante ressaltar que embora o índice acima do limiar h3 represente a ZCAS com uma configuração dinâmica mais definida, a avaliação do índice em relação aos limiares h1 e h2 também são importantes em um ambiente operacional, já que indicam a presença de sistemas atmosféricos que podem causar chuva na região de estudo, e a independência do índice em relação às configurações paramétricas de modelos atmosféricos já representa um ganho na previsão.

Sugere-se para trabalhos futuros a utilização de outros modelos atmosféricos como entrada para o índice de ZCAS, como o modelo global ECMWF, ou mesmo o modelo regional WRF com resoluções mais altas para avaliar se a previsão de tempo estendido também pode ser aprimorada pelo acoplamento do modelo regional com o índice de ZCAS.

5. Referências

- AMBRIZZI, Tércio; FERRAZ, Simone ET. An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone. **Frontiers in Environmental Science**, v. 3, p. 23, 2015.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021. Carga e Geração e Histórico da Operação/ONS. Disponível em <<https://bit.ly/3cPPeYs>> Acessado em 20/10/2021
- AVELAR, André; NETTO, Ana Luiza et al. **Landslide science and Practice**. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6>, 2013.
- A VOZ DA SERRA, 2021. Dez anos depois, friburguenses ainda carregam o trauma da mais longa das noites. Por Guilherme Alt. Disponível em: <https://avozdaserra.com.br/noticias/dez-anos-depois-friburguenses-ainda-carregam-o-trauma-da-mais-longa-das-noites>. Acessado 28/02/2023
- BARNES, Lindsey R. et al. Corrigendum: False alarm rate or false alarm ratio? **Weather and Forecasting**, v. 24, n. 5, p. 1452-1454, 2009.
- BARROS, Vicente et al. Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, n. 3, p. 123-133, 2000.
- BOU, AS Fernández; DE SÁ, R. Ventura; CATALDI, M. Flood forecasting in the upper Uruguay River basin. **Natural Hazards**, v. 79, n. 2, p. 1239-1256, 2015.
- BRAGA, Hugo A.; AMBRIZZI, Tercio. A Variabilidade Intrassazonal e Interanual do Acoplamento entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 305-311, 2022.
- BUIZZA, Roberto; LEUTBECHER, Martin. The forecast skill horizon. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 693, p. 3366-3382, 2015.

- CARVALHO, Leila; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002.
- CARVALHO, Leila; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.
- CLIMATEMPO, 2020. O que é a ZCAS e como este sistema se forma? Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2020/01/29/o-que-e-a-zcas-e-como-este-sistema-se-forma-1565>. Acessado em 27/10/2021
- COELHO, Caio AS; CARDOSO, Denis HF; FIRPO, Mári AF. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 125, p. 769-784, 2016.
- DANHELKA, J. Hydrological forecasting and warning in case of flash flood. In: **Proceedings of the Internacional Workshop Early Warning for flash floods**, Prague, Czech Republic. 2011
- DEINA, Miquelina Aparecida; COELHO, André Luiz. A Influência da Zona Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nos Eventos de Inundação no Baixo Jucu em Vila Velha (ES). **Geografia (Londrina)**, v. 24, n. 2, p. 05- 23, 2016.
- 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: INPE**, 2019.
- ESPÍRITO SANTO, C.; SATYAMURTY, P. Eventos extremos de precipitação na região Sudeste do Brasil e redondezas no período de 1997-2001. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 2002. p. 397-402.
- FIGUEROA, Silvio; NOBRE, Carlos. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanalse**, v. 5, n. 6, p. 36-45, 1990.

- FONSECA AGUIAR, Louise; CATALDI, Marcio. Social and environmental vulnerability in Southeast Brazil associated with the South Atlantic Convergence Zone. **Natural Hazards**, p. 1-15, 2021.
- GANDU, Adilson W.; SILVA DIAS, Pedro L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D6, p. 6001-6015, 1998.
- GERARD, F. State of art with flash flood early warning and management capacities in France. In: **Proceedings of the Internacional Workshop Early Warning for flash floods**, Prague, Czech Republic, 2011.
- GETIRANA, A., LIBONATI, R., CATALDI, M. Brazil is in water crisis—it needs a drought plan. **Nature**, v. 600, p. 218-220, 2021.
- GLEESON, Thomas A. On theoretical limits of predictability. **Journal of Applied Meteorology (1962-1982)**, p. 213-215, 1967.
- KANAMITSU, Masao et al. Ncep–doe amip-ii Reanalysis (r-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 11, p. 1631-1644, 2002.
- KODAMA, Yasumasa. 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. Ser. II**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.
- KODAMA, Y. M. Large-scale common features of Subtropical Convergence Zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating STCZs. **Journal Meteorological Society of Japan**, v. 71, p. 581-610, 1993.
- KUNZLER, Stéfani S; BOIASKI, Nathalie et al. Análise interanual da influência da ZCAS na Energia Natural Afluente dos Subsistemas em bacias hidrográficas da região Sudeste do Brasil. **Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves – RS, 2018.

- LEJEUNE, Quentin et al. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. **Climate Dynamics**, v. 44, n. 9, p. 2769-2786, 2015.
- LENTERS, John Derick; COOK, K. H. Simulation and diagnosis of the regional summertime precipitation climatology of South America. **Journal of Climate**, v. 8, n. 12, p. 2988-3005, 1995.
- LIMA, Kellen Carla; SATYAMURTY, Prakki; FERNÁNDEZ, Júlio Pablo Reyes. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 121-135, 2010.
- LUZ BARCELLOS, Priscila da Cunha et al. Diagnóstico meteorológico dos desastres naturais ocorridos nos últimos 20 anos na cidade de Duque de Caxias. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 319-329, 2016.
- LUZ BARCELLOS, Priscila da Cunha.; CATALDI, Marcio. Flash Flood and Extreme Rainfall Forecast through One-Way Coupling of WRF-SMAP Models: Natural Hazards in Rio de Janeiro State. **Atmosphere**, 11, no. 8: 834, 2020.
- MALVESTIO, Leônidas Mantovani. **Variabilidade da precipitação pluviométrica da região Sudeste do Brasil no período chuvoso e suas consequências ambientais**. 2013. 155 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – SP. 2013.
- MAY, Ryan M. et al. MetPy: A meteorological Python library for data analysis and visualization. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 103, n. 10, p. E2273-E2284, 2022.
- MENDES SILVA, Mariana et al. Reconhecimento de possíveis influências dos eventos El Niño e La Niña no regime pluviométrico da bacia do rio Araguari, Minas Gerais. In. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v.1, n.5, 2012, p.754-765.

MENDES SILVA, Mariana et al. Variabilidade do início e fim da estação chuvosa e ocorrência de veranicos na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

MENDONÇA, Marcos Barreto; VALOIS, Adriana Sobreira. Disaster education for landslide risk reduction: an experience in a public school in Rio de Janeiro State, Brazil. **Natural hazards**, v. 89, n. 1, p. 351-365, 2017.

MUZA, Michel N. et al. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over southeastern South America and the subtropical Atlantic during austral summer. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1682-1699, 2009.

NCEP National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service NOAA U.S. Department of Commerce. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (Updated daily) [Dataset]. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2015. <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK> (accessado 20 de outubro de 2021)

NIELSEN, David Marcolino; CATALDI, Marcio; BELÉM, André Luiz; ALBUQUERQUE, Ana Luiza. Local indices for the South American monsoon system and its impacts on Southeast Brazilian precipitation patterns. **Natural Hazards**, v. 83, n. 2, p. 909-928, 2016.

NIELSEN, David Marcolino; CATALDI, Marcio; BELÉM, André Luiz, MARTON, Edilson. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9, p. 5527-5553, 2019.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2000, Hidrologia Operacional – Submódulo 6: Disponibilização de Informações Meteorológicas e Climáticas. Disponível em <http://www.ons.org.br>

- PINHEIRO, Henri Rossi; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; ANDRADE, Kelen Martins. Aplicação de uma ferramenta objetiva para previsão de tempo severo em ambiente operacional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 209-228, 2014.
- PINHEIRO, Henri; ANDRADE, Kelen; MOURA, Carlos. A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE. Banco de Artigos Plutão, DPI/INPE, p. 1-8, 2011.
- QUADRO, Mário Francisco Leal. **Estudo de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. INPE, 1994.
- REIS JUNIOR, Dirceu Silveira; SOMBRA, Sérgio; COSTA, Alexandre Araújo; NETO, Otacílio; SANTOS, Antônio Carlos; FIRMINO, Mosefran. Verificação da previsão operacional de chuva sobre Bacias Hidrográficas do Estado do Ceará. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009.
- RODRIGUES, Leonardo Preza; CARNEIRO ALVES SENNA, Mônica; CATALDI, Marcio. Representação dos Padrões Atmosféricos Relacionados à Zona de Convergência do Atlântico Sul Através de um Modelo Acoplado Atmosfera-Biosfera. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, 2016.
- SAMPAIO, Gilvan; SILVA DIAS, Pedro Leite da Silva. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.
- SELUCHI, Marcelo E.; CHOU, Sin Chan. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, n. 1, p. 67-77, 2009.
- UNISDR (2009) Terminology on Disaster Risk Reduction. Publishing United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Disponível em:
<https://www.undrr.org/terminology/vulnerability> Acessado em 14/05/2020
- VERA, Carolina et al. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of climate**, v. 19, n. 20, p. 4977-5000, 2006.

VITERBO, Francesca et al. A multiscale, hydrometeorological forecast evaluation of national water model forecasts of the May 2018 Ellicott City, Maryland, flood. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 3, p. 475-499, 2020.

WILKS DS. Statistical methods in the atmospheric sciences San Diego: **Academic Press**, 630 p., 2006.

6. Apêndices

Apêndice A - variáveis e regiões-assinatura que respondem à configuração da ZCAS (NIELSEN et al., 2019)

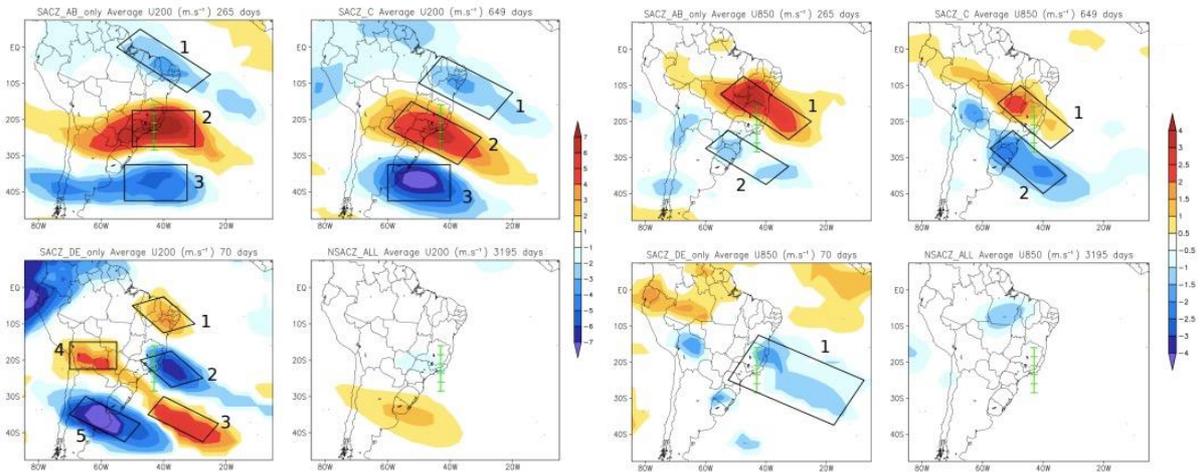


Figura A 1: Componente zonal do vento (u) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita)

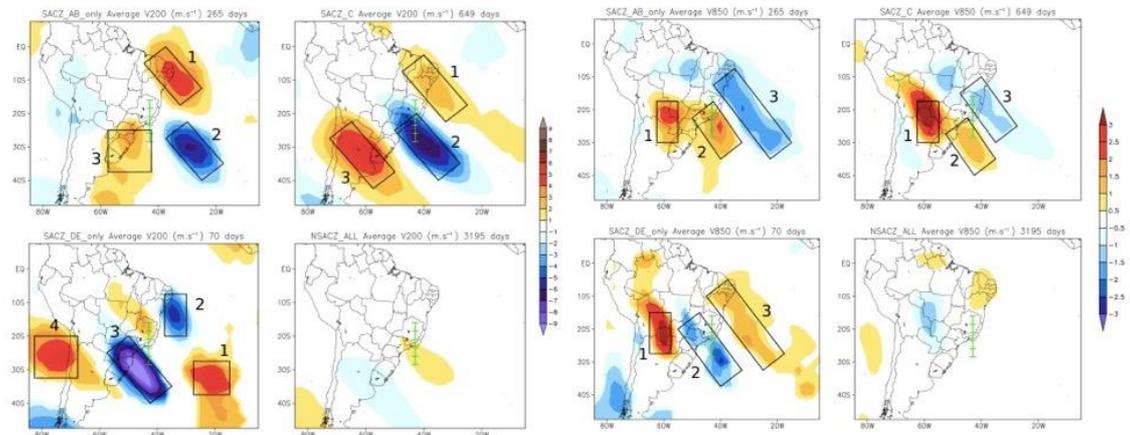


Figura A 2: Componente meridional do vento (v) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita)

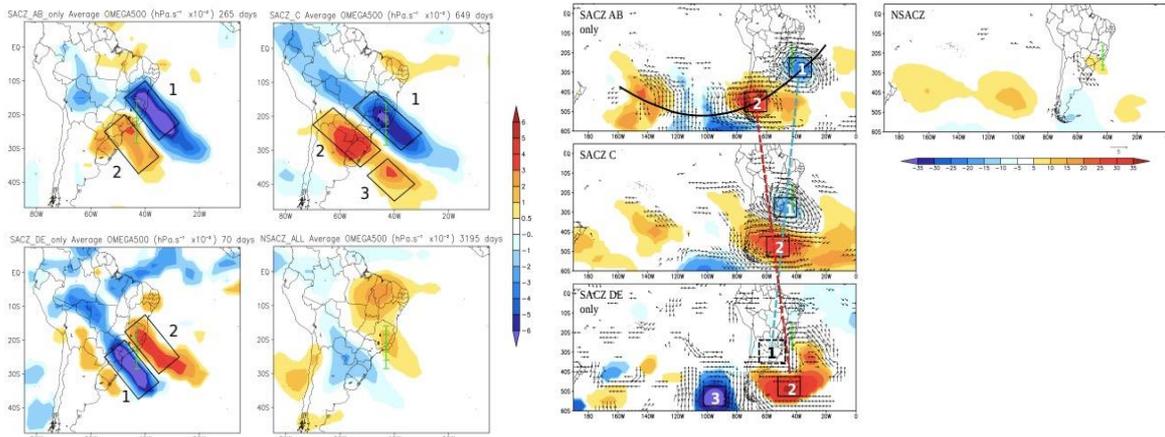


Figura A 3: Ômega (esquerda) e altura geopotencial (direita) em 500 hPa

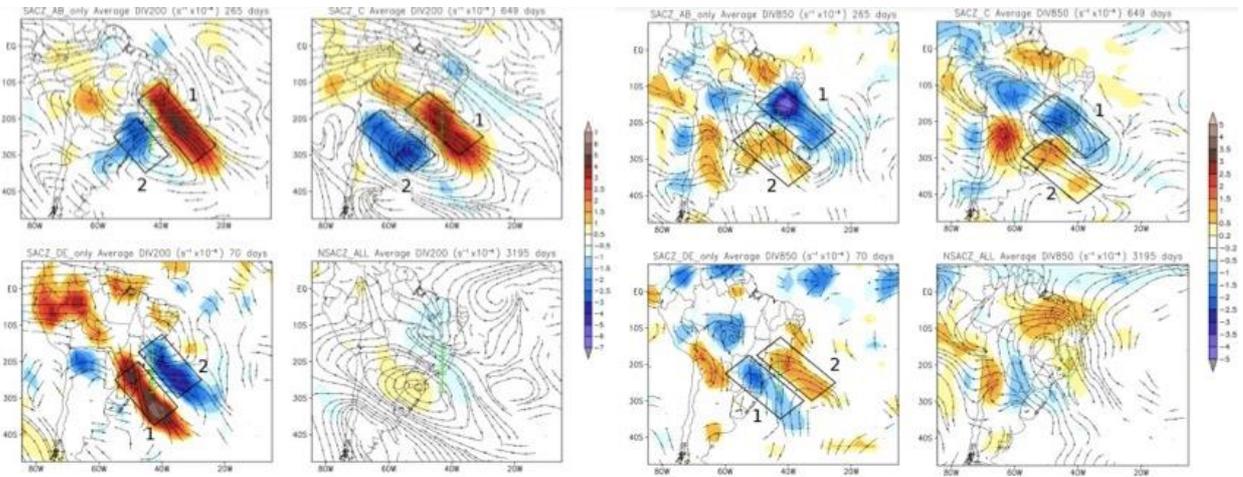


Figura A 4: Divergência horizontal do vento (div) em 200 hPa (esquerda) e 850hPa (direita)

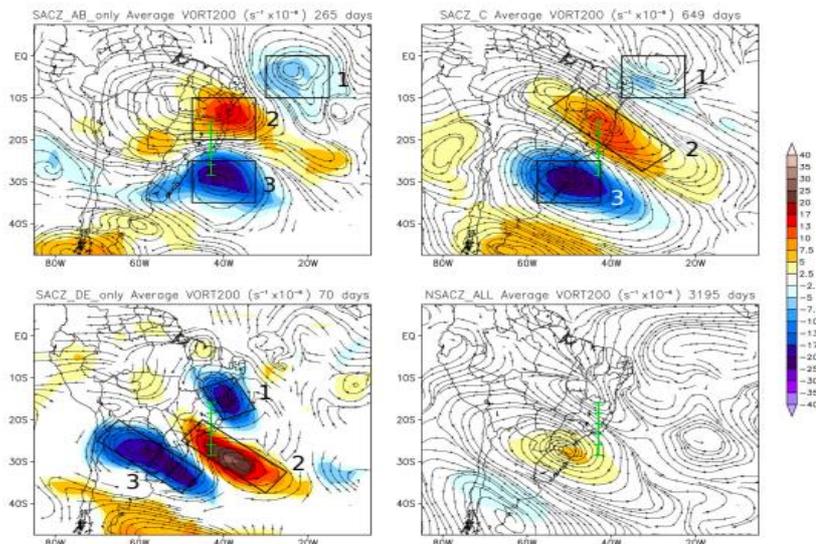


Figura A 5: Vorticidade relativa do vento (vort) em 200 hPa

Step 1: normalization

$$x_{normalized} = (b - a) \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} + a$$

```
def scale(x, a: int = -1, b: int = 1) -> int:  
    return (b - a) * ((x - fmin) / (fmax - fmin)) + a
```

```
for variable in variables:  
    dcomp_variable = list()  
  
    for area in areas:  
        dpath = Path(inputdpath, f"{variable.lower()}.csv")  
        d = pd.read_csv(dpath, parse_dates=["time"])  
        d = d.set_index("time", drop=True)  
  
        dscalepath = Path(cpath_step1, f"scale_coefs_{area}.csv")  
        scale_coefs = pd.read_csv(dscalepath)  
        scale_coefs = scale_coefs.set_index("var", drop=True)  
        scale_coefs = scale_coefs.filter(regex=variable, axis=0)  
  
        dcomp_area = list()  
        for idx, coef in scale_coefs.iterrows():  
            fmin = scale_coefs.loc[idx, ["min"]].item()  
            fmax = scale_coefs.loc[idx, ["max"]].item()  
            dsel = d.filter(regex=idx.split("_")[0], axis=1)  
            dscl = dsel.apply(scale) - scale_coefs.loc[idx, ["mean"]].item()  
            dcomp_area.append(dscl)  
  
        dcomp_variable.append(pd.concat(dcomp_area, axis=1))  
  
    interoutpath = Path(interdpath_step1, f"{variable}.csv")  
    pd.concat(dcomp_variable, axis=1).to_csv(interoutpath)
```

Figura B 1: Normalização dos dados de entrada (por exemplo, do GFS) para cálculo do índice de ZCAS

Step 2: PC weighting

+ c

```
for area in areas:

    weights_path = Path(cpath_step2, f"pc_weights_{area}.csv")
    pc_weights = pd.read_csv(weights_path).set_index("PC")

    pc_comp = dict()
    for npc in range(1, pc_weights.shape[0] + 1):

        weighted_total = list()
        for variable in variables:
            dir_input = Path(interddpath, "step1", f"{variable}.csv")
            dscl = pd.read_csv(dir_input, parse_dates=["time"]).set_index("time")
            dscl = dscl.filter(regex=area, axis=1)

            for subarea in dscl.columns:
                weight = float(pc_weights.loc[npc, [f"{subarea}_{variable}"]])
                weighted = dscl.loc[:, [subarea]] * weight
                weighted_total.append(weighted)

            weighted_total_df = pd.concat(weighted_total, axis=1).sum(axis=1)

        pc_comp.update({npc: pd.concat(weighted_total, axis=1).sum(axis=1)})

    pc_comp_outpath = Path(interddpath, "step2", f"{area}.csv")
    pd.concat(pc_comp, axis=1).to_csv(pc_comp_outpath)
```

Figura B 2: Aplicação do peso das componentes principais de cada variável para cálculo do índice de ZCAS

Step 3: linear combination

```
# primeiro valor = PC; segundo = beta
pcs_beta = {
    "AB": [(1, 2), (2, 3), (3, 4), (6, 5), (7, 6)],
    "C": [(1, 2), (2, 3), (4, 4), (5, 5), (6, 6), (8, 7), (9, 8), (10, 9)],
    "DE": [(1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (8, 7), (9, 8), (11, 9)],
}
```

```
for area in areas:
    betas_path = Path(cpath_step3, f"betas_{area}.csv")
    betas = pd.read_csv(betas_path).set_index("PC")

    comp = list()
    for pc, beta in pcs_beta[area]:
        pcweighted_path = Path(interddpath, "step2", f"{area}.csv")
        pcweighted = pd.read_csv(pcweighted_path).set_index("time")
        pc_series = pcweighted.loc[:, [str(pc)]].astype(float)
        betaweighted = pc_series * betas.loc[beta, "beta"].item()
        comp.append(betaweighted)

    combined = pd.concat(comp, axis=1).sum(axis=1).to_frame()
    combined = combined.rename({0: f"{area}"}, axis=1)

    combined = combined + betas.loc[1, ["beta"]].item()
    interoutpath = Path(interddpath, "step3", f"{area}.csv")
    combined.to_csv(interoutpath)
```

Figura B 3: Combinação linear das componentes principais para cálculo do índice de ZCAS

Step 4: logistic classifier

```
# output plots time interval
itime = "2020-10-01"
ftime = "2021-12-01"

thresholds = {
    "AB": {"h1": 0.15, "h2": 0.30, "h3": 0.58},
    "C": {"h1": 0.14, "h2": 0.34, "h3": 0.52},
    "DE": {"h1": 0.12, "h2": 0.38, "h3": 0.52},
}

def classifier(x):
    return exp(x) / (1 + exp(x))

for area in areas:
    betaweighted_path = Path(interddpath_step3, f"{area}.csv")
    betaweighted = pd.read_csv(betaweighted_path)
    betaweighted = betaweighted.set_index("time").astype(float)

    classified = betaweighted.apply(classifier, axis=1).to_frame()
    classified.index = pd.to_datetime(classified.index, format="%Y-%m-%d")

    classified_path = Path(outputdpath, f"{area}.csv")
    classified.to_csv(classified_path)

    plot_path = Path(outputdpath, f"{area}.png")
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(16, 5))
    data = classified.loc[itime:ftime]
    ax.plot(data.index, data.values, label=area)
    ax.set_ylim([0, 1])
    ax.set_title(f"SAMS index - {area}")
    ax.legend().remove()

    for name, threshold in thresholds[area].items():
        reshaped_data = data.values.reshape(-1)
        ax.fill_between(
            data.index,
            threshold,
            reshaped_data,
            where=reshaped_data >= threshold,
            interpolate=True,
        )
        ax.axhline(threshold, linestyle="--", color="black", alpha=0.5)
        ax.text(data.index[0], threshold + 0.05, name, size=12, ha="right", va="center")

    fig.savefig(plot_path, bbox_inches="tight")
```

Figura B 4: classificação logística considerando os limiares h1, h2 e h3 do índice de ZCAS para saída em *csv* com valores do índice entre 0 e 1 para o período de tempo desejado e uma plotagem gráfica para facilitar a visualização