



Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil

EXTRATROPICAL CYCLONES: WHAT ARE, CLIMATOLOGY AND IMPACTS IN BRAZIL

MICHELLE SIMÕES REBOITA¹, VITOR HUGO MARRAFON²

1 - DOUTORA EM METEOROLOGIA PELA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP) E DOCENTE DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (UNIFEI).

2 - GRADUADO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS E MESTRE EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (UNIFEI).

E-MAIL: REBOITA@UNIFEI.EDU.BR, VITORHMARRAFON@GMAIL.COM

Abstract: The atmospheric system called an extratropical cyclone, when mentioned in the Brazilian media, in general, causes panic in the population. Then, this system is addressed here in a simple language since our purpose is to share, with all those interested in the subject, information about the definition and formation processes of extratropical cyclones, the impacts they cause in Brazil and their climatological aspects in the Southern Hemisphere and the South Atlantic Ocean. This study is based on a literature review as well as in the use of state-of-the-art data and cyclone identification and tracking algorithm. The findings show that the extratropical cyclones have genesis along the coast from Rio de Janeiro to south of Argentina; between the southeast and south coast of Brazil they are more frequent in austral summer whereas considering the whole Southern Hemisphere, in winter.

Resumo: O sistema atmosférico ciclone extratropical, que geralmente causa pânico na população, quando mencionado na mídia brasileira, é abordado neste artigo em linguagem simples. O objetivo é compartilhar – com todos os interessados no assunto – a definição e o processo de formação dos ciclones extratropicais, os impactos que causam no Brasil e seus aspectos climatológicos no hemisfério sul e oceano Atlântico Sul. O estudo tem como base metodológica tanto a revisão da literatura quanto a utilização de dados estado-da-arte e de um algoritmo de identificação e rastreamento de ciclones. Os resultados mostram que os ciclones extratropicais têm gênese na região costeira entre as latitudes do Rio de Janeiro e sul da Argentina. Ademais, entre as costas sul e sudeste do Brasil, são mais frequentes no verão, enquanto a análise para todo o hemisfério sul mostra o inverno como estação mais ciclogênica.

Citation/Citação: Reboita, M. S., & Marrafon, V. H. (2021). Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terraê Didática*, 17(Publ. Contínua), 1-13, e021032. doi: 10.20396/td.v17i00.8666028.

Keywords: Development process, Precipitation, Strong winds, Trajectory density, Radius of the cyclones.

Palavras-chave: Processo de formação, Precipitação, Ventos fortes, Densidade da trajetória, Raio dos ciclones.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 13/06/2021

Revised/Corrigido: 21/09/2021

Accepted/Aceito: 25/09/2021



Introdução

O acompanhamento da previsão do tempo tornou-se uma rotina para grande parte dos brasileiros que acabam planejando suas atividades diárias com base nos prognósticos informados pela mídia. Entretanto, às vezes, a mídia menciona o nome de alguns sistemas atmosféricos, sem fornecer o devido esclarecimento, gerando um grande pânico na população. Entre esses sistemas têm-se os ciclones extratropicais que são foco do presente estudo. Já aqui deixa-se claro que os ciclones extratropicais são sistemas frequentes e que na costa do Brasil há duas regiões favoráveis para a formação deles: a costa sudeste e o extremo sul do Brasil (Gan & Rao, 1991, Hoskins & Hodges, 2005, Reboita et al., 2010, 2012, 2015, 2018, 2020). Uma vez que o ciclone se forma na região costeira, ele tende a se deslocar para sudeste, fato associado com suas características

dinâmicas (e.g. Marrafon & Reboita, 2019). Logo, o tempo de atuação próximo ao litoral, em geral, é menor do que 24 horas.

Independentemente do tipo de ciclone, que pode ser extratropical, subtropical ou tropical, esses sistemas são caracterizados por apresentarem menor pressão atmosférica do que o ambiente ao seu redor. Uma das primeiras vezes que essa definição apareceu na literatura foi no estudo de Bjerknes (1919). A Figura 1 mostra um exemplo de ciclone extratropical na costa do sul do Brasil no dia 1º de julho de 2020. As linhas na figura são chamadas de isóbaras, uma vez que unem pontos com o mesmo valor de pressão atmosférica. O centro do ciclone é indicado pela isóbara de menor valor (998 hPa) enquanto que na periferia do sistema a pressão é maior (1016 hPa). A figura também mostra a nebulosidade associada ao ciclone, que é

uma informação obtida por satélite. Nota-se que a nebulosidade não circunda totalmente as isóbaras, mas que há um ramo estendido no sentido noroeste-sudeste e outro no sentido oeste-leste; configuração que será explicada adiante. A Figura 1 também deixa expresso que o tamanho de um ciclone extratropical é acentuado. Em termos de diâmetro, se a isóbara de 1016 hPa é considerada como linha limite para o ciclone, nota-se que esse se estende de cerca de 60°W a cerca de 35°W, isto equivale a uma distância de 25°. Se for considerado que um grau equivale a aproximadamente 110 km, tem-se 2.750 km de diâmetro. Logo, quando um ciclone atua na costa brasileira, não é possível ver todo o sistema, uma vez que ele é muito amplo. A visualização completa do sistema só é possível através de imagens de satélite.

Um ciclone extratropical é resultado de processos que buscam o equilíbrio térmico da atmosfera. Esses sistemas afetam o tempo das regiões onde atuam através da presença de nebulosidade, chuva, redução da temperatura do ar e ventos fortes. A Figura 1 não mostra os ventos associados ao ciclone extratropical, entretanto, como as isóbaras são apresentadas, é fácil inferir como é a circulação atmosférica, pois, em geral, a circulação acompanha o padrão das isóbaras. Assim, diz-se que um ciclone extratropical no hemisfério sul tem giro horário, ou seja, o escoamento atmosférico acompanha o sentido dos ponteiros do relógio.

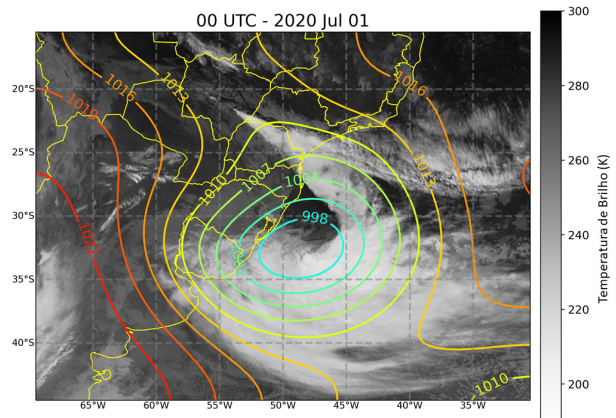


Figura 1. Exemplo de um ciclone extratropical na costa sul do Brasil no dia 1º de julho de 2020. As linhas coloridas são as isóbaras (hPa) e os tons de cinza corresponde à temperatura de brilho (K), que quanto mais branca, indica maior nebulosidade. Autoria própria

Os ciclones extratropicais, como o próprio nome já indica, são sistemas que ocorrem preferencialmente nos extratropicais, banda de latitude ao redor de 45°S, mas isso não significa que esses sistemas também não se formam em latitudes mais baixas (~30°S). Os ciclones extratropicais com gênese ao longo da costa leste da América do Sul têm sido foco de estudos desde a década de 1990 (Gan & Rao, 1991) até os dias atuais (Reboita et al., 2020, 2021). A região preferencial de ocorrência dos ciclones extratropicais no globo é mostrada na Figura 2, que também destaca as

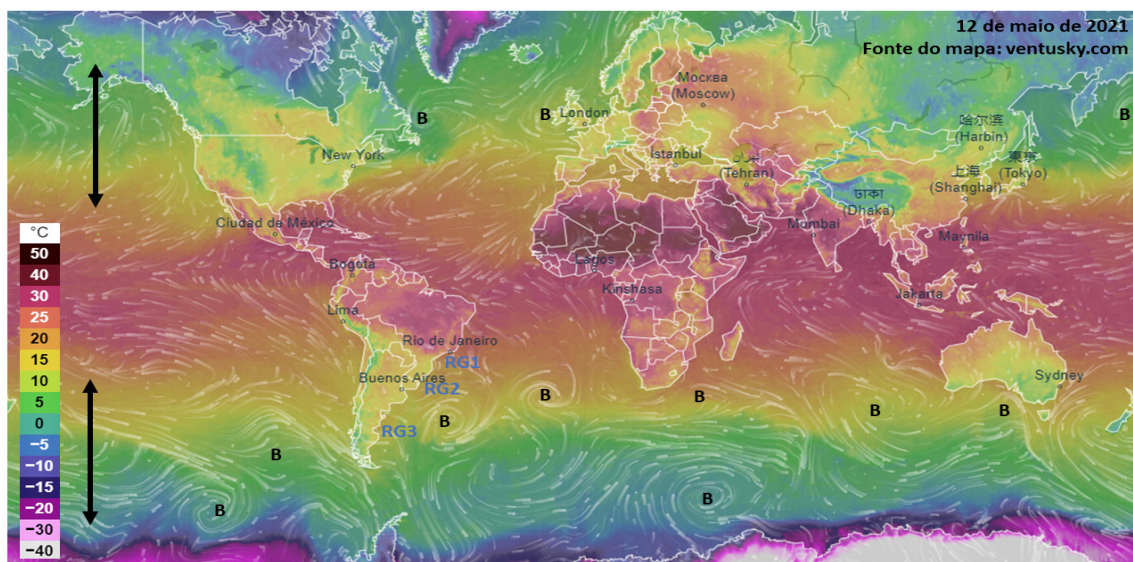


Figura 2. Mapa global mostrando as latitudes mais propícias à formação de ciclones extratropicais. O campo de fundo é a temperatura do ar a 2 metros de altura (colorido) juntamente com representação do escoamento atmosférico a 10 metros de altura (em linhas brancas) no dia 12 de maio de 2021 (fonte: Ventusky.com). A letra B indica o centro dos ciclones extratropicais (centros de baixa pressão), as linhas pretas verticais indicam as regiões de intensos gradientes horizontais de temperatura do ar (regiões preferenciais para a ocorrência dos ciclones extratropicais) e as siglas RG1, RG2 e RG3 indicam a localização das regiões ciclogênicas na costa leste da América do Sul

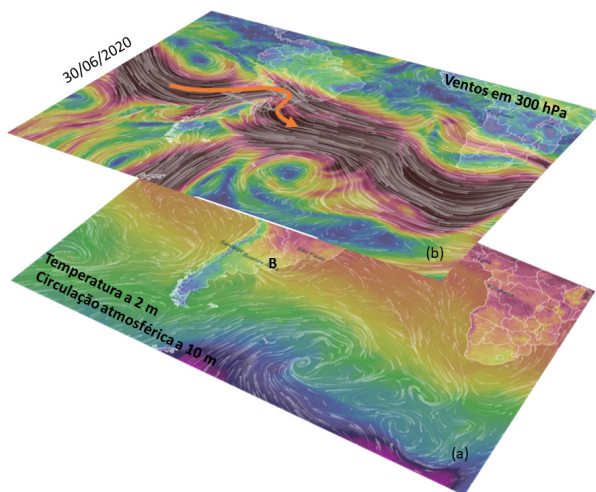


Figura 3. Ambiente associado com a formação de um ciclone extratropical (letra B) na RG2 no dia 30 de junho de 2020 (imagens obtidas de Ventusky.com): a) temperatura do ar a 2 metros de altura (oC, colorido) e indicação da circulação atmosférica a 10 metros de altura (linhas brancas) e b) ventos em 300 hPa, com o destaque na cor laranja para uma onda no escoamento de oeste para leste

regiões propícias à formação dos ciclones longos da costa leste da América do Sul. Reboita et al. (2010) denominaram essas regiões como RG1: costa leste do sudeste do Brasil, RG2: extremo sul do Brasil e Uruguai e RG3: costa sul da Argentina. Outra informação contida na Figura 2 é o campo de temperatura do ar a 2 metros de altura, juntamente com as linhas que indicam o movimento do ar a 10 metros de altura, do dia 12 de maio de 2021. Nota-se que os ciclones extratropicais (indicados com a letra B) ocorrem preferencialmente entre as latitudes que mostram uma variação mais acentuada na temperatura do ar (indicadas com as linhas pretas verticais), sendo chamadas de gradientes horizontais de temperatura do ar. Portanto, aqui fica evidente o motivo pelo qual os ciclones extratropicais são um agente regulador das temperaturas no planeta: transportam ar frio para latitudes mais baixas e ar quente para latitudes mais altas.

A contextualização permite situar os objetivos do trabalho, que são: (a) apresentar os principais mecanismos que contribuem para a gênese dos ciclones extratropicais, (b) descrever os impactos dos ciclones extratropicais na costa brasileira e (c) apresentar as principais características climatológicas dos ciclones no hemisfério sul no período de 1991 a 2020 a partir de dados de reanálise estado-da-arte.

Mecanismos de Gênese dos Ciclones Extratropicais

O processo de formação dos ciclones extratropicais está associado, basicamente, à presença de gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície e a ondas que viajam de oeste para leste na média e alta troposfera (cerca de 500 hPa a 200 hPa que é ~ 5.500 a 10.000 metros de altura; Fig. 3). Cada um desses processos pode originar um ciclone, ou ciclogênese na linguagem técnica, de maneira individual ou em associação.

Gradientes Horizontais de Temperatura do Ar em Superfície

Considerando a existência de gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície, o modelo teórico que explica a gênese de um ciclone extratropical (Bjerknes & Solberg, 1922, Celemín, 1984, Wallace & Hobbs, 2006, Ynoue et al., 2017, Ahrens & Henson, 2021) é mostrado na Figura 4.

- Inicialmente, há a presença de dois centros de alta pressão atmosférica em superfície que induzem uma circulação em sentidos opostos, como mostrado na Figura 4a. Essa situação gera uma região de intensos gradientes horizontais de temperatura do ar, sendo o limite entre as massas de ar, com diferentes propriedades térmicas, indicado por uma linha contínua, chamada frente. No caso, como há uma estagnação da frente, não há movimento por algumas horas, essa recebe o nome de frente estacionária.
- Como as duas massas de ar possuem propriedades térmicas distintas, e lembrando que na atmosfera sempre surgem forças a fim de restabelecer a distribuição de temperatura e outras propriedades termodinâmicas do ar, a força do gradiente de pressão na horizontal começa a atuar, apontando da direção de maior pressão atmosférica (lado do ar frio) para a de menor pressão atmosférica (lado do ar quente), de forma a perturbar/ondular a frente estacionária (Fig. 4b). Essa força do gradiente horizontal de pressão pode ser entendida facilmente por analogia com um tanque em que está dividido em duas porções por uma tábua. Um lado possui água e outro não. Se a tábua é removida, a água escoar para a região vazia.
- A força do gradiente horizontal de pressão é a única força que gera os ventos na atmosfera

e sempre aponta da região de maior para a de menor pressão. À medida que a força atua e ondula/perturba a frente estacionária, induz a uma rotação. Então, os ventos produzidos por essa força, com o passar do tempo, começam a adquirir rotação no sentido horário no *hemisfério Sul*. Com isso, configuram-se as frentes fria e quente e, no campo da pressão atmosférica, é possível identificar linhas concêntricas indicando o centro do ciclone (Fig. 4c). Portanto, um ciclone extratropical, também é chamado de onda frontal. A frente fria indica que o ar frio está avançando para uma região dominada por ar mais quente, enquanto a frente quente indica que o ar frio perde suas características e/ou recua, permitindo o predomínio da massa de ar quente. Como as frentes são regiões de contato de massas de ar com propriedades térmicas distintas, o ar menos denso, que é proveniente do setor quente, tende a ascender sobre a massa de ar frio. Assim, as frentes são regiões de formação de nebulosidade e chuva o que explica o padrão da nebulosidade mostrado na Figura 1. Com o passar do tempo, o ar frio vai se deslocando e ocupando o lugar do ar quente e, à medida que esse processo ocorre, uma frente chamada oclusa vai se configurando (linha roxa na Fig. 4c).

- Quando a frente fria consegue avançar e dominar toda a região em que havia inicialmente ar mais quente, o ciclone chega ao seu estágio de oclusão, isto é, momento que atinge a intensidade máxima. A partir daí, como não existem mais contrastes de temperatura do ar, pois o ar frio predomina no centro do sistema próximo à superfície, o sistema tende a se dissipar, ou em termos técnicos, apresentar a fase de ciclólise (Fig. 4d).

Em síntese, os gradientes horizontais de temperatura do ar são um elemento importante para a gênese dos ciclones extratropicais e explicam porque a maior frequência desses sistemas ocorre em regiões extratropicais, pois nessas regiões do globo ocorrem os maiores contrastes de temperatura do ar.

Cavados em Níveis Médios e Altos da Atmosfera

Outro mecanismo que pode causar o desenvolvimento de um ciclone extratropical em superfície é a presença de uma onda no escoamento de oeste em níveis médios e altos da atmosfera (Kousky &

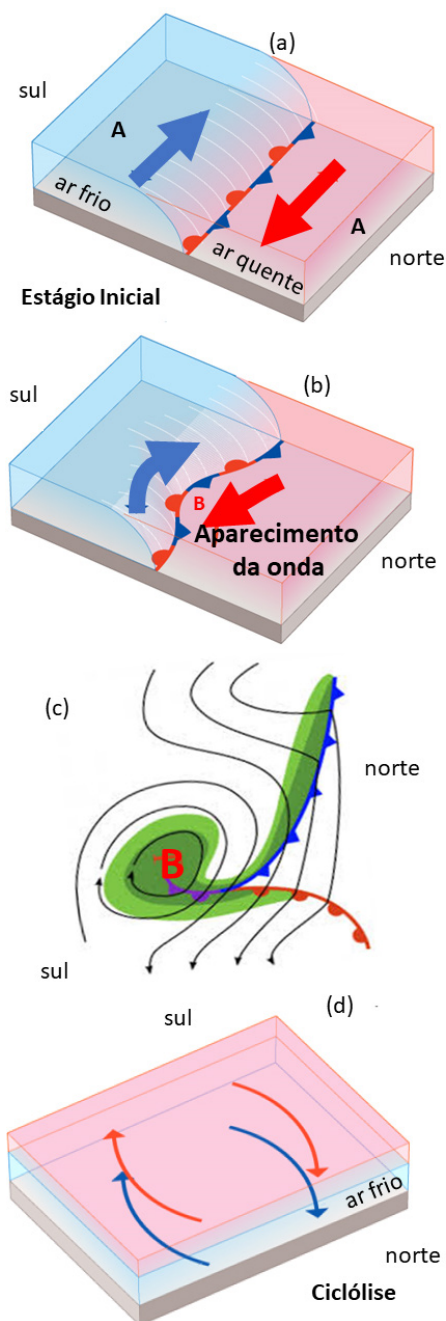


Figura 4. Ciclo de vida de um ciclone extratropical no hemisfério Sul: (a) estágio inicial mostrando a presença de dois anticiclones (A) que favorecem um escoamento em sentidos opostos gerando uma frente estacionária; (b) estágio de onda desenvolvido a partir da atuação da força do gradiente horizontal de pressão; (c) estágio de maturidade; nesse, a frente fria (linha azul com triângulos) invade a região antes ocupada por ar quente; processo indicado pela frente oclusa (linha roxa) e (d) estágio de decaimento do ciclone (ciclólise) em que o ar frio invadiu toda a área em que havia ar quente e o ar quente agora se restringe nas camadas acima do ar frio. Adaptado de <https://www.britannica.com/science/cyclogenesis>

Elias, 1982, Celemín, 1984, Holton, 2004, Wallace & Hobbs, 2006, Reboita et al., 2017a, 2017b).

Na Figura 3, por exemplo, mostrou-se que em níveis altos da atmosfera havia uma onda coincidindo com o ciclone em superfície formado na RG2. Que mecanismo físico essa onda produz para influenciar a formação e/ou a intensificação de um centro de baixa pressão em superfície? Para entender o mecanismo, é feita uma analogia com um canal de água (rio), pois o escoamento atmosférico pode ser pensado da mesma forma que o escoamento da água. Na Figura 5, o movimento das águas do rio é mais lento na parte em que o rio tem sua maior distância entre as margens, mas, à medida que essa distância diminui, para o mesmo volume de água poder passar num mesmo intervalo temporal do que na parte mais ampla, a velocidade aumenta. Esse aumento da velocidade é de extrema importância na atmosfera, pois contribui para a remoção de massa de uma dada coluna atmosférica e configura um processo denominado de divergência de massa. Uma vez que há mecanismos de compensação na atmosfera, movimentos verticais são desenvolvidos de forma que as parcelas de ar tendem a se elevar para suprir a ausência daquelas que foram removidas em níveis mais altos, isso implica em redução da pressão na superfície.

Uma vez que o mesmo processo descrito na Figura 5 ocorre na atmosfera, mas nesse caso, as margens do rio são as isóbaras, a divergência será encontrada a leste do eixo, também chamado de jusante, dos cavados. Nessa parte o leitor deve estar se sentindo confuso, pois em física se aprende que uma onda possui crista e cavado, sendo a crista a parte mais alta e o cavado, o vale. A ideia aqui é a mesma da física quando a análise é feita para o hemisfério Norte. Já no hemisfério sul o cavado corresponde ao padrão da crista do hemisfério norte enquanto a crista possui a configuração do cavado.

A Figura 6 exemplifica a divergência de massa a leste do eixo de um cavado no hemisfério sul. Como a atmosfera deve se manter em equilíbrio, para compensar o ar que está deixando um dado local numa camada mais afastada da superfície, se desenvolvem movimentos ascendentes na atmosfera. Assim, o ar é transportado na vertical e removido da coluna pelo processo de divergência. Novamente, para ocorrer compensação, se desenvolve convergência em superfície: as parcelas de ar de diferentes locais se deslocam para uma

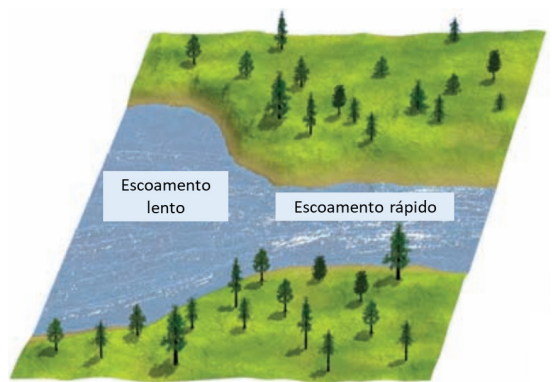


Figura 5. Exemplo do escoamento da água num canal. Adaptado de Ahrens e Henson (2021)

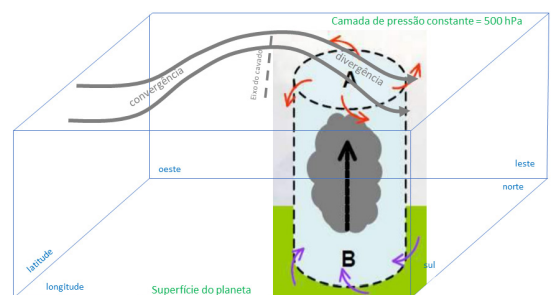


Figura 6. Esquema ilustrativo de uma onda na superfície de pressão atmosférica constante de 500 hPa influenciando a formação de um ciclone extratropical em superfície. A leste do eixo do cavado ocorre divergência de massa, que induz a uma circulação anticiclônica, enquanto que os movimentos ascendentes na coluna atmosférica contribuem para a convergência de massa à superfície e movimento ciclônico do ar

mesma região. Quando a divergência em níveis mais elevados supera a convergência em superfície, a pressão atmosférica da coluna decresce e um ciclone em superfície se forma. Nesse caso, as frentes fria e quente vão se desenvolver após a formação do centro de baixa.

Acoplamento dos Mecanismos

A contribuição dos gradientes horizontais de temperatura do ar (Fig. 7a) e de sistemas em níveis médios e altos da atmosfera (Fig. 7c) podem ocorrer concomitantemente (Reboita et al., 2017a, 2017b) e favorecer a formação de um ciclone extratropical em superfície (Fig. 7a). Esses são os mecanismos essenciais para a formação dos ciclones extratropicais. Entretanto, tais mecanismos ainda podem ser intensificados ou enfraquecidos por processos que têm contribuição secundária. Por exemplo, a influência da topografia (Reboita

et al., 2012), que também impacta o desenvolvimento e/ou a intensificação dos ciclones na costa leste da América do Sul. Esses processos de ordem secundária não serão abordados aqui, mas o leitor pode encontrá-los em Reboita et al. (2012).

Na Figura 7c são mostrados ventos em 300 hPa (~9.000 m) enquanto na Figura 7d, os ventos a 10 metros de altura e a pressão ao nível médio do mar (PNMM). Em baixos níveis da atmosfera, a circulação ciclônica (movimento horário) é bem definida, porém, em altos níveis é observado um escoamento mais retilíneo (chamado de zonal) e que mostra, do centro do ciclone para norte, uma região de ventos com maior intensidade. Os ventos intensos adiante de ventos mais fracos que aparecem acima da região continental contribuem para o processo de divergência de massa. Além disso, nota-se uma ligeira ondulação no padrão do escoamento (setas) (Fig. 7c).

Impactos dos Ciclones Extratropicais na Costa Brasileira

Uma vez que já se conhece a definição e o processo de formação dos ciclones extratropicais fica claro que como nesses sistemas há movimentos ascendentes na atmosfera, logo ocorrerá a formação de nuvens e precipitação. Dessa forma, os ciclones afetam o tempo por meio de nebulosidade, chuva, mudança na temperatura do ar e ventos intensos (Messmer & Simmonds, 2021). Porém, antes de abordar os impactos dos ciclones na costa brasileira, é importante destacar que, em termos climáticos, eles desempenham um papel importante que é o de redistribuir calor e umidade na atmosfera (Peixoto & Oort, 1992).

No Brasil, o Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC-USP, www.grec.iag.usp, cujos autores do estudo são membros)

01 de junho de 2021 às 1200 Z

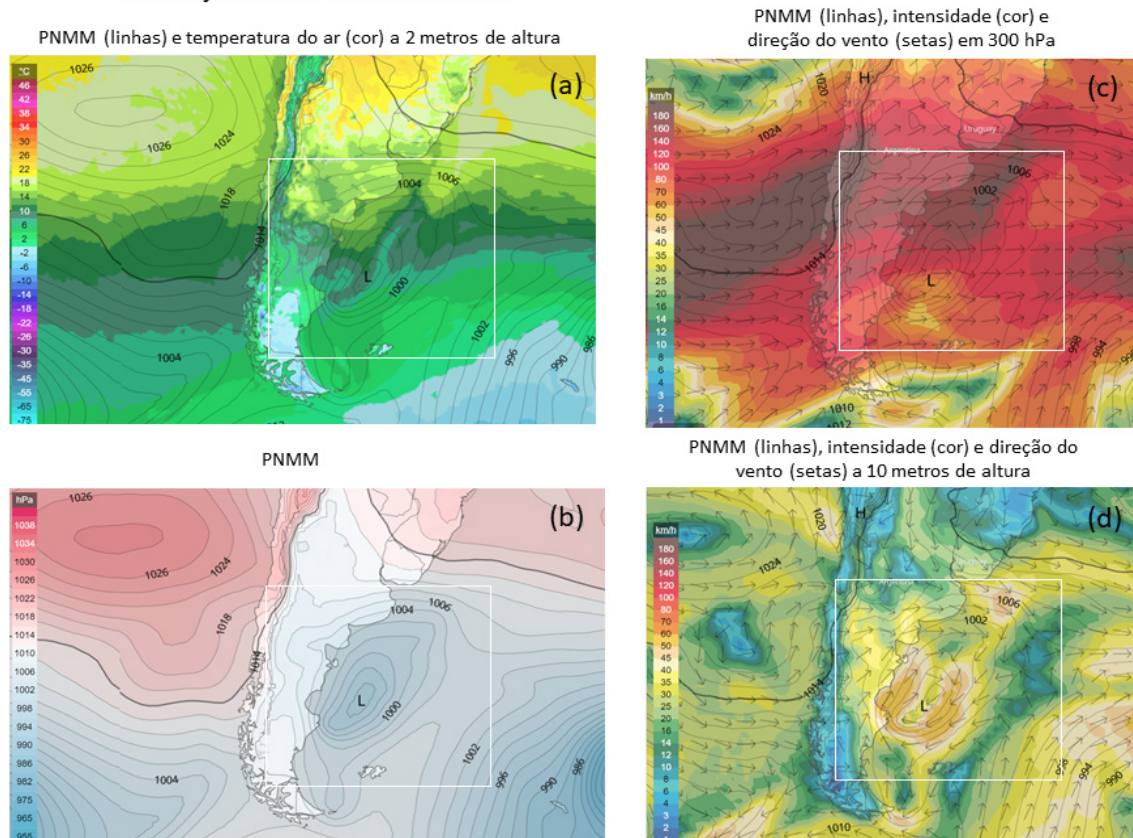


Figura 7. Exemplo de um ciclone (L) em processo de formação no dia 01 de junho de 2021 às 1200 Z: a) pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM em hPa, linhas) e temperatura do ar a 2 metros de altura (°C, colorido), b) PNMM (hPa), c) PNMM (hPa), intensidade ($m s^{-1}$, colorido) e direção (setas) do vento em 300 hPa e d) PNMM (hPa), intensidade ($m s^{-1}$, colorido) e direção (setas) do vento a 10 metros de altura. Adaptado de <https://www.meteoblue.com/en/weather/map>

analisa mensalmente a ocorrência dos ciclones no hemisfério sul com foco no oceano Atlântico Sul. Nas reuniões climáticas abertas ao público sempre são destacados os sistemas que causaram impactos na costa brasileira no período prévio ao da reunião, inclusive, sendo documentados os ciclones extratropicais mais relevantes em artigos científicos redigidos pelo grupo.

Um exemplo é o do ciclone ocorrido na primeira semana de maio de 2008 (Reboita et al., 2009). Esse ciclone se formou entre o Paraná e São Paulo e se deslocou para sul/sudeste, atuando por cerca de quatro dias na costa da região sul do Brasil. Assim, causou chuvas e ventos fortes nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que geraram muitos danos, tais como quedas de árvores, enchentes e desabamentos. Algumas estações meteorológicas, em apenas um ou dois dias, registraram chuvas acima da média climatológica mensal computada no período de 1961 a 1990. Em Porto Alegre, RS, a precipitação causada pelo ciclone foi de 160 mm enquanto o acumulado climatológico do mês de maio nessa localidade é de 95 mm. O ciclone também causou ventos que atingiram perpendicularmente à costa do sul do Brasil por mais de 3 dias e, neste período, chegaram a ter velocidade acima de 30 m s^{-1} (Reboita et al., 2009).

Um outro evento que impactou de forma indireta, mas com severidade, o sul do Brasil foi o ciclone ocorrido entre 30 de junho e a primeira semana de julho de 2020 (Reboita et al., 2021). O centro do ciclone se manteve sobre o oceano (Fig. 1) enquanto a frente fria associada a ele sobre o sul do Brasil. Os sistemas atmosféricos “embebidos” na frente fria causaram chuvas e ventos muito fortes, principalmente em Santa Catarina, levando ao óbito mais de 10 pessoas. Sobre o oceano, a pressão no centro do ciclone decaiu mais de 24 hPa em 24 horas, o que lhe atribuiu o status de ciclone extratropical explosivo ou bomba (Sanders & Gyakum, 1980).

Como os ciclones causam ventos intensos, o efeito sobre as águas oceânicas é de torná-las agitadas, com ondas de maior altura, transporte de água (*storm surges* ou pista de ventos) e empilhamento na região costeira (da Rocha et al., 2004, Candella & Souza, 2013, Machado & Calliari, 2016, Lima et al., 2020). Por exemplo, Parise et al. (2009) descrevem a ocorrência de marés meteorológicas e erosão costeira no extremo sul do Brasil associadas com ocorrência de ciclones extratropicais sobre o oceano. Além disso, alguns ciclones extratropicais,

dependendo de sua posição em relação à costa, podem gerar tsunamis meteorológicos (Oliveira et al., 2020, Candella & Araújo, 2021). Ainda com relação ao Estado do Rio Grande do Sul, quando os ciclones promovem uma pista de vento de quadrante sul para norte, contribuem para o transporte de água oceânica para a Lagoa dos Patos (Möller & Casting, 1999, Saraiva et al. 2003, Seiler, 2014, Marques 2005), o que pode elevar o nível dessa e causar inundação na orla da cidade de Rio Grande. Por outro lado, a incursão de água oceânica salgada na Lagoa dos Patos (RS) é boa para o desenvolvimento do camarão. Aqui cabe salientar que a Lagoa dos Patos, apesar de ser uma laguna, uma vez que se comunica com o oceano por intermédio de um canal, sua denominação é de Lagoa. Os ventos intensos produzidos pelos ciclones extratropicais sobre o oceano também podem prejudicar as atividades ligadas ao transporte marítimo, pesca e operações em plataformas de petróleo.

Embora as regiões costeiras possam ter impactos associados aos ciclones extratropicais, em geral, a população sabe quando esses sistemas irão atuar devido à previsão numérica do tempo. No Brasil, além do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), há vários centros regionais de previsão que contribuem na divulgação dos prognósticos e alertas à comunidade.

Climatologia de Ciclones Extratropicais no Hemisfério Sul

Desde 2004, o GrEC faz o monitoramento mensal dos ciclones extratropicais ocorridos no hemisfério sul e os disponibiliza num banco de dados hospedado em www.grec.iag.usp.br. O GrEC também implementou o cálculo das anomalias na densidade da trajetória dos ciclones considerando como climatologia o período de 1980 a 2012. Para isso, as análises eram realizadas com dados da reanálise 1 do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). A fim de produzir informações mais acuradas para o monitoramento mensal dos ciclones, aqui se apresenta a nova metodologia utilizada no monitoramento dos ciclones extratropicais no hemisfério sul bem como alguns resultados de análises climatológicas.

Dados e Metodologia

São utilizados dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM), no período de 1991 a 2020, com

freqüência de 6 horas obtidos da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (Bell et al., 2019). O período mencionado corresponde ao mais atual para o cálculo das normais climatológicas segundo as orientações da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017). Como o foco do estudo são os ciclones de escala sinótica (diâmetro de cerca de 3000 km e duração de dias a semanas), antes da utilização do algoritmo para a identificação e rastreamento desses sistemas, a reanálise foi interpolada da sua resolução espacial original de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para a resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ seguindo Kodama et al. (2019). Isso evita a identificação de ruído como sendo um ciclone quando utilizados dados em alta resolução.

O esquema utilizado para identificar e rastrear os ciclones nesse estudo é o de Murray & Simmonds (1991a, 1991b), desenvolvido na Universidade de Melbourne - Austrália. Esse algoritmo tem sido utilizado desde 2004 pelo GrEC e mostra boa performance na identificação dos ciclones extratropicais no hemisfério sul (Pezza & Ambrizzi, 2003, Reboita et al., 2015, Marrafon et al., 2021) e em outras regiões do globo (Leckebusch & Ulbrich, 2004, Pinto et al., 2005, Leckebusch et al., 2006, Kruschke et al., 2014, Befort et al., 2016).

A PNMM a cada 6 horas é o dado de entrada no algoritmo. Aqui não serão fornecidos muitos detalhes técnicos do algoritmo, mas o leitor pode encontrá-los, por exemplo, em Reboita et al. (2015) e Marrafon et al. (2021). Basicamente, o algoritmo procura por um máximo no Laplaciano da pressão (o que pode ser pensado como um mínimo da pressão atmosférica) nos dados em pontos de grade (Fig. 8) e, uma vez encontrado um máximo, ele tenta achar sua sequência no tempo a fim de fornecer o ciclo de vida dos ciclones.

O algoritmo fornece a trajetória de cada ciclone, que é a informação da latitude e longitude a cada passo de tempo ao longo do ciclo de vida, bem como dados estatísticos em relação à densidade da trajetória (SD), pressão central (PC), raio (R) e profundidade (D), que também é considerada como uma medida da intensidade dos ciclones. A SD corresponde ao número de sistemas que passam numa determinada área sendo normalizado pela área, enquanto a PC é a pressão no centro do ciclone. A medida da intensidade do ciclone é provida pelo campo do Laplaciano da pressão e, de acordo com Simmonds & Murray (1999) e Messmer & Simmonds (2021), deve exceder a $0,2 \text{ hPa } (^\circ \text{ lat})^{-2}$ para o sistema não ser descartado. Embora D tenha

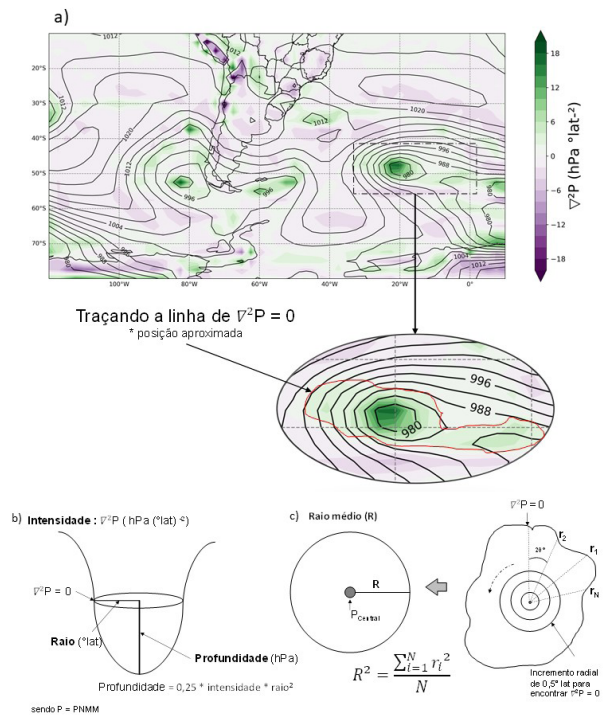


Figura 8. Informações para o entendimento do algoritmo de identificação e rastreamento dos ciclones extratropicais. (a) As isóbaras, linhas que unem pontos com mesma pressão atmosférica (hPa), são apresentadas na cor preta. O centro do ciclone corresponde ao menor valor de pressão atmosférica. Essa grandeza varia, em média no globo, de 950 hPa a 1030 hPa. Como a pressão atmosférica em sua escala não tem valor zero, uma forma mais fácil de identificar os ciclones com códigos computacionais é através da grandeza chamada Laplaciano da pressão atmosférica, que é calculada com base na pressão atmosférica. Note que na figura, o centro dos ciclones aparece com o valor máximo do Laplaciano (em cores), enquanto que as extremidades do ciclone apresentam valor zero. Com o Laplaciano da pressão fica fácil delimitar a área de um ciclone, como mostrado menor com a linha vermelha. (b) Como o ciclone não é um círculo, o raio do ciclone será um valor médio calculado a partir dos vários raios traçados no sistema (c).

uma expressão para seu cálculo (Fig. 8), essa grandeza pode ser pensada como a diferença da pressão atmosférica entre o centro do sistema e a sua borda (isóbara mais externa do ciclone), que é definida como a região em que o Laplaciano se tornou zero (Simmonds & Keay, 2000). Já o R é a distância entre o centro do sistema e a região em que o Laplaciano se tornou zero (o que dá a ideia de isóbara mais externa, sendo o raio dado em graus; Lim & Simmonds, 2007, 2009). As informações estatísticas são obtidas para cada tempo dos ciclones e apresentadas em grade com resolução horizontal de 2.5° .

Tanto no monitoramento mensal do GrEC quanto aqui no presente estudo, só são incluídos os ciclones que apresentam tempo de vida igual ou superior a 24 horas e que se formaram ao sul de 20°S; evitando a inclusão de sistemas tropicais. A frequência dos ciclones é definida como o número de sistemas por mês.

Resultados

O objetivo dessa seção é apresentar uma visão geral da climatologia dos ciclones no hemisfério sul no período de 1991 a 2020, pois é a partir dessa climatologia que serão avaliadas as anomalias mensais nas reuniões do GrEC.

A Figura 9 mostra a densidade da trajetória mensal dos ciclones e, também, fornece uma ideia da sazonalidade, uma vez que cada linha da figura indica uma estação do ano, iniciando com o verão. Em todos os meses do ano, a maior densidade de ciclones se encontra entre 45°S e latitudes mais altas ao redor da Antártica e isso é uma resposta ao padrão dos gradientes horizontais de temperatura discutidos nas seções prévias e mostrado também em Lim & Simmonds (2007). Simmonds & Keay (2000) também mencionam que a grande densidade de ciclones nas cercanias da Antártica é consistente com imagens de satélite.

Além da maior densidade de sistemas ao redor da Antártica, nota-se uma banda de grande frequência de ciclones que se estende do sudeste da Austrália em direção ao oceano Atlântico. A costa leste da América do Sul também apresenta uma grande densidade da trajetória de ciclones em todos os meses do ano. Considerando todo o hemisfério, sazonalmente, há maior densidade de ciclones nos meses de inverno, tanto sobre os oceanos de latitudes médias quanto ao redor da Antártica, e menor no verão. Entretanto, na costa sudeste do Brasil, é no verão que a densidade da trajetória dos ciclones é maior. Os resultados apresentados, de forma geral, são concordantes com os de estudos que utilizaram outras bases de dados (ERA40, NCEP1 e NCEP2) como, por exemplo, Simmonds & Keay (2000), Lim & Simmonds (2007), Reboita et al. (2015) e Marrafon et al. (2021).

Entre meados do inverno e meados da primavera, os ciclones extratropicais possuem os menores valores de pressão central, indicando que são mais profundos do que no verão (Fig. 10). Fato que está relacionado com os gradientes horizontais de temperatura do ar mais intensos no período de

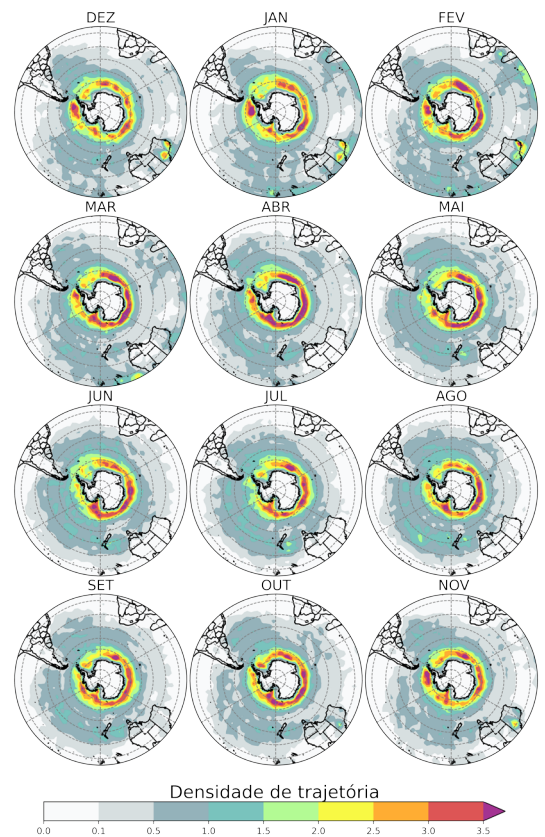


Figura 9. Média mensal da densidade da trajetória (10^{-3} ciclones graus lat^{-2}) dos ciclones no hemisfério sul entre 1991 a 2020

inverno. A oeste da península Antártica a pressão central atinge valores menores do que 965 hPa entre setembro e outubro. Na costa sul e sudeste do Brasil, as pressões mais baixas ocorrem entre a primavera e o verão. A pressão central não é uma variável muito apropriada para avaliar a intensidade dos ciclones uma vez que ela é afetada pelo ambiente (*background*). Por exemplo, um ciclone com pressão central de 1010 hPa pode ser intenso afetando a costa brasileira, enquanto que em latitudes médias, os ciclones possuem pressões muito mais baixas. Isso está associado com o padrão climatológico do globo em que predominam pressões menores em direção às latitudes mais altas. Já a profundidade (D), definida como uma medida da variação da pressão atmosférica entre o centro e a extremidade dos ciclones, é livre desse viés sendo mais adequada para avaliar a intensidade dos ciclones (Simmonds & Keay, 2000) (Fig. 11). A distribuição espacial da profundidade na Figura 11 mostra que os ciclones mais intensos, na maioria das latitudes do hemisfério Sul, ocorrem nos meses de inverno (entre 30°S e a

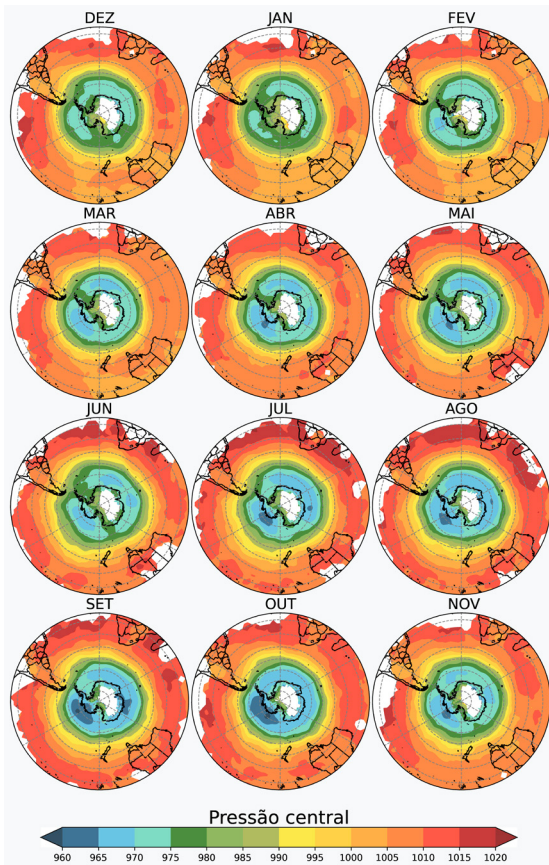


Figura 10. Média mensal da PNMM (hPa) central dos ciclones no hemisfério sul entre 1991 a 2020

Antártica a $D > 6$ hPa). Já no verão, os ciclones mais profundos se restringem às latitudes altas. Os resultados concordam com Simmonds & Keay (2000).

O raio dos ciclones (Fig. 12) mostra uma diferença bem marcada entre o verão e o inverno. Enquanto o verão é a estação do ano em que os ciclones possuem raio maior (excedendo a $7,5^\circ$) entre 45°S e a Antártica e menor em direção aos subtropicais ($\sim 5,5^\circ$), no inverno há um padrão mais homogêneo em grande parte dos oceanos de latitudes médias com os sistemas apresentando raio médio de cerca de 7° . Em geral, o raio dos sistemas é menor próximo às áreas continentais.

Embora os resultados da densidade da trajetória dos ciclones sejam bastante similares aos dos autores previamente mencionados, as demais características são mais intensas aqui, com a utilização da reanálise ERA5. Por exemplo, comparando-se os resultados com a ERA40 em Lim & Simmonds (2007), enquanto no inverno esses autores obtiveram o valor médio do raio dos ciclones entre 5 a 6 graus, aqui o valor obtido varia de 5,5 a 7,5 graus. Para a profundidade, os valores são de 6 a 12 hPa, enquanto aqui é de 6 a mais de 14 hPa.

Considerações Finais

Esse estudo teve como objetivo contribuir com a difusão do conhecimento científico no tema ciclones extratropicais. Além disso, apresentou uma climatologia de ciclones calculada para o período mais recente das normais climatológicas definidas pela Organização Meteorológica Mundial (1991–2020) e com dados de reanálise estado-da-arte (ERA5).

O estudo destaca que:

- Os ciclones extratropicais são sistemas frequentes na atmosfera.
- Na costa da América do Sul, incluindo o Brasil, há três regiões mais propícias para a formação de ciclones extratropicais.
- Os ciclones extratropicais, do ponto de vista de tempo, podem causar impactos negativos (ventanias, precipitação intensa, elevação do nível do mar etc.), mas, do ponto de vista climático, contribuem na redistribuição de calor e umidade entre as latitudes.
- A definição de ciclone extratropical é basicamente a presença de um centro de baixa pressão atmosférica.

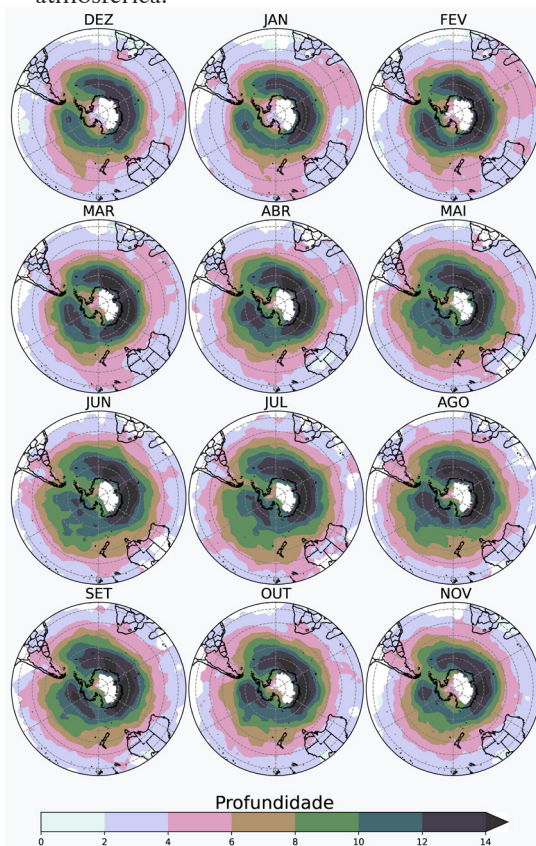


Figura 11. Média da profundidade (hPa) dos ciclones no hemisfério sul entre 1991 a 2020

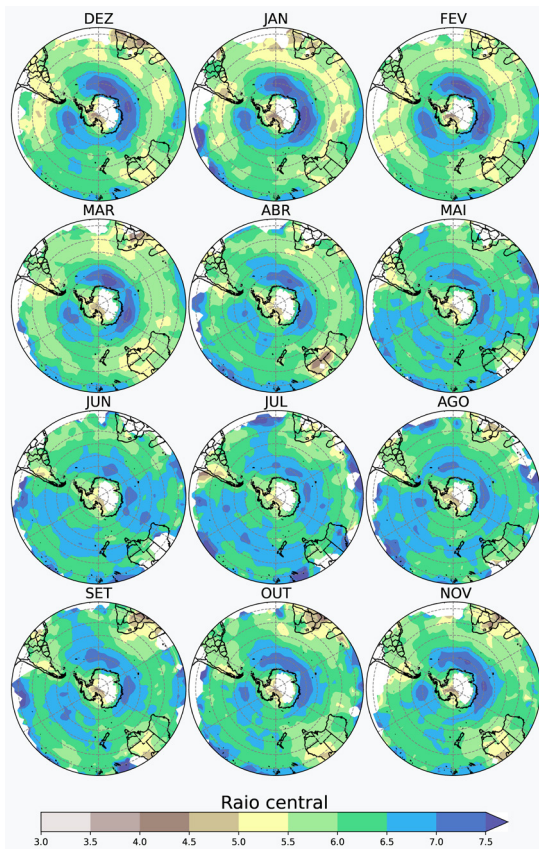


Figura 12. Média mensal do raio (graus) dos ciclones no hemisfério sul entre 1991 a 2020

- Os ciclones extratropicais são mais frequentes sobre o oceano, onde há condições mais homogêneas na superfície comparadas ao continente.
- Os principais mecanismos de gênese dos ciclones extratropicais são os contrastes acentuados de temperatura do ar e a presença de ondas que viajam na atmosfera superior.

Com relação à climatologia no *hemisfério Sul*, tem-se que os ciclones extratropicais são mais frequentes (maior densidade da trajetória) a sul de 45°S e, sazonalmente, são mais numerosos no inverno. Considerando a banda de maior frequência desses sistemas ao redor da Antártica, em média anual, a profundidade desses sistemas pode variar de 6 a mais de 14 hPa, enquanto que o raio entre 6,5 e 7,5 graus (se for considerado que 1 grau equivale a 110 km, tem-se valores da ordem de 715 a 825 km, em diâmetro seria 1.430 a 1.650 km). Porém, deve-se ter em mente que um ciclone não é um círculo perfeito e que o valor do raio é uma média de várias medidas feitas no ciclone. Portanto, em geral, o diâmetro do ciclone pode ser maior do que o valor apresentado aqui.

Considerando a região oceânica ao longo da costa sul-sudeste do Brasil, há maior densidade da trajetória de ciclones nos meses de verão. Nessa época, o raio dos ciclones é de cerca de 5,5 a 6 graus e são sistemas pouco profundos (2 a 4 hPa).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) pela reanálise ERA5, ao pesquisador Kevin Keay pelo suporte no uso do algoritmo de identificação e rastreamento de ciclones e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro.

Referências

- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2021). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage learning.
- Befort, D. J., Wild, S., Kruschke, T., Ulbrich, U. & Leckebusch, G. C. (2016). Different long-term trends of extra-tropical cyclones and windstorms in ERA-20C and NOAA-20CR reanalyses. *Atmospheric Science Letters*, 17(11), 586-595. doi: 10.1002/asl.694.
- Bell, S. S., Chand, S. S., Camargo, S. J., Tory, K. J., Turville, C., & Ye, H. (2019). Western North Pacific tropical cyclone tracks in CMIP5 models: Statistical assessment using a model-independent detection and tracking scheme. *Journal of Climate*, 32(21), 7191-7208. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0785.1.
- Bjerknes, J. (1919). On the structure of moving cyclones. *Monthly Weather Review*, 47(2), 95-99. doi: 10.1175/1520-0493(1919)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2.
- Bjerknes, J., & Solberg, H. (1922). Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys. Publik.*, 3(1), 1-18.
- Candella, R. N., & de Araujo, C. E. S. (2021). Meteotsunamis in Brazil: an overview of known occurrences from 1977 to 2020. *Natural Hazards*, 106(2), 1563-1579. doi: 10.1007/s11069-020-04331-y.
- Candella, R. N., & Souza, S. M. L. (2013). Ondas oceânicas extremas na costa Sul-Sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal em maio de 2011. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(4), 441-456. doi: 10.1590/S0102-77862013000400010
- Celemín, A. H. (1984). *Meteorología Prática*. Edición del Autor, Mar del Plata, República Argentina. 313p.
- Cyclogenesis*. <https://www.britannica.com/science/cyclogenesis>. Acesso 12.04.2021.
- Rocha, R. P., Sugahara, S., & da Silveira, R. B. (2004). Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and validation against altimeter data. *Weather and forecasting*, 19(2), 398-410. doi:

- 10.1175/1520-0434(2004)019<0398:SWGPEC>2.0.CO;2.
- Gan, M. A. & Rao V. B. (1991). Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119(5), 1293-1302. doi: 10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2.
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology*. 4 ed. International geophysics series. Burlington, Elsevier Academic Press. 535p.
- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2005). A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18(20), 4108-4129. doi: 10.1175/JCLI3570.1.
- Kodoma, C., Stevens, B., Mauritsen, T., Seiki, T., & Satoh, M. (2019). A New Perspective for Future Precipitation Change from Intense Extratropical Cyclones. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12435-12444. doi: 10.1029/2019GL084001.
- Kousky, V. E. & Elias, M. (1982). *Meteorologia Sinótica Parte I*. INPE-2605-MD/021, São José dos Campos. 118p.
- Kruschke, T., Rust, H. W., Kadow, C., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2014) Evaluating decadal predictions of northern hemispheric cyclone frequencies. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66(1), p. 22830. doi: 10.3402/tellusa.v66.22830.
- Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2004). On the relationship between cyclones and extreme wind-storm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 181-193, 2004. doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.011
- Leckebusch, G. C., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J. G., Spanghel, T., & Zacharias, S. (2006). Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research*, 31(1), 59-74. doi: 10.3354/cr031059.
- Lim, E. P., & Simmonds, I. (2007). Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979-2001. *Journal of Climate*, 20(11), 2675-2690. doi: 10.1175/JCLI4135.1.
- Lim, E. P., & Simmonds, I. (2009). Effect of tropospheric temperature change on the zonal mean circulation and SH winter extratropical cyclones. *Climate dynamics*, 33(1), 19-32. doi: 10.1007/s00382-008-0444-0.
- Lim, E. P., & Simmonds, I. (2009). Effect of tropospheric temperature change on the zonal mean circulation and SH winter extratropical cyclones. *Climate dynamics*, 33(1), 19-32. doi: 10.1007/s00382-008-0444-0.
- Lima, A. D. S., Khalid, A., Miesse, T. W., Cassalho, F., Ferreira, C., Scherer, M. E. G., & Bonetti, J. (2020). Hydrodynamic and waves response during storm surges on the Southern Brazilian coast: A hindcast study. *Water*, 12(12), 3538. doi: 10.3390/w12123538.
- Machado, A. A., & Calliari, L. J. (2016). Synoptic systems generators of extreme wind in Southern Brazil: atmospheric conditions and consequences in the coastal zone. *Journal of Coastal Research*, (75), 1182-1186. doi: 10.2112/SI75-237.1
- Marques, W. C. (2005). *Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil*. Universidade do Rio Grande. (Dissertação de mestrado). URL: <http://repositorio.furg.br/handle/1/3502>. Acesso 16.09.2021.
- Marrafon, V. H., & Reboita, M. S. (2019). Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3), 614-629. doi: 10.5380/abclima.v28i0.74460.
- Marrafon, V. H., Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, & Crespo, N. M. (2021). Ciclones Extratropicais no Hemisfério Sul: Comparação entre diferentes Reanálises. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28. doi: 10.5380/abclima.v28i0.74460.
- Messmer, M., & Simmonds, I. (2021). Global analysis of cyclone-induced compound precipitation and wind extreme events. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100324. doi: 10.016/j.wace.2021.100324.
- Meteoblue. <https://www.meteoblue.com/en/weather/map>. Acesso 14.05.2021.
- Möller, O. O. Jr., & Casting, P. (1999). Hydrographical Characteristics of the Estuarine Area of Patos Lagoon (301S, Brazil). In: Perillo, G. M. E. & Piccolo, M. D. (Eds.). (1999). *Estuaries of South America of South America (their Geomorphology and Dynamics)*. Environmental Science. Berlin, Springer. pp. 83-100.
- Murray, R. J. & Simmonds, I. (1991a). A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Australian Meteorological Magazine*, 39(3), 155-166.
- Murray, R. J., & Simmonds, I. (1991b) A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: application to January and July general circulation model simulations. *Australian Meteorological Magazine*, 39(3), 167-180.
- Oliveira, U. R., Simões, R. S., Romeu, M., Calliari, L. J., & Reboita, M. (2020). *Tsunamis Meteorológicos no Sul do Brasil: Processo de formação, áreas de ocorrência e impactos associados*. In: X Encontro da Rede BRAS-POR, 1, 43-44.
- Parise, C. K., Calliari, L. J., & Krusche, N. (2009). Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3), 175-188. URL: <https://www.scielo.br/j/bjoc/a/WfxcWmTHGq6pctypbZ-tYS9p/abstract/?lang=en>. Acesso 16.09.2021.
- Peixoto, J.P. & Oort, A.H. (1992). *Physics of Climate*. United States. 520p.
- Pezza, A. B. & Ambrizzi, T. (2003). Variability of Southern Hemisphere cyclone and anticyclone behavior: Further analysis. *Journal of Climate*, 16(7), 1075-1083. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<1075:VO SHCA>2.0.CO;2.
- Pinto, J. G., Spanghel, T., Ulbrich, U. & Speth, P. (2005). Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(6), 823-838. doi: 10.1127/0941-2948/2005/0068.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da & Ambrizzi, T. (2012). Dynamic and Climatological Features of Cyclonic Developments over Southwestern South Atlantic Ocean, In: Veress, B., Szigethy, J. (Orgs.). (2012). *Horizons in Earth Science Research*, 6, 135-160.

- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, Ambrizzi, T. & Gouveia, C. D. (2015). Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 45(7-8), 1929-1944. doi: 10.1007/s00382-014-2447-3.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, Ambrizzi, T. & Sugahara, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7-8), 1331-1347. doi: 10.1007/s00382-009-0668-7.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, de Souza, M. R., & Llopart, M. (2018). Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2□ ES and RegCM4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2866-2879. doi: 10.1002/joc.5468.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. da & Custódio, I. S. (2017a). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171-186. doi: 10.1590/0102-77863220010.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. da, & Custódio, I. S. (2017b). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 509-542. doi: 10.1590/0102-7786324002.
- Reboita, M. S., Iwabe, C. M. N., Rocha, R. P. da, & Ambrizzi, T. (2009). Análise de um ciclone semi-estacionário na costa sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 407-422. doi: 10.1590/S0102-77862009000400004.
- Reboita, M. S., Mattos, E. V., Nascimento, E., Capucin, B. C., Silva, B. A., Biscaro, T. S., Santos, A. P. P., & Enoré, D. P. (2021). Severe Weather in Southern Brazil associated with Synoptic and Mesoscale Systems. (Em prep.).
- Reboita, M. S., Reale, M., Rocha, R. P. da, Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R. B. L., Llopart, M., Torres, J. A. & Cavazos, T. (2020). Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach. *Climate Dynamics*, 1-17. doi: 10.1007/s00382-020-05317-z.
- Rocha, R. P., Sugahara, S., & da Silveira, R. B. (2004). Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and validation against altimeter data. *Weather and forecasting*, 19(2), 398-410. doi: 10.1175/1520-0434(2004)019<0398:SWGEBEC>2.0.CO;2.
- Sanders, F., & Gyakum, J. R. (1980). Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". *Monthly Weather Review*, 108(10), 1589-1606. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1589:SDCOT>2.0.CO;2.
- Saraiva, J. M., Bedran, C., & Carneiro, C. (2003). Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 323-331. URL: <https://www.jstor.org/stable/40928778>. Acesso 16.09.2021.
- Seiler, L. M. N. (2014). *Modelagem numérica da Lagoa dos Patos: variação espacial e temporal da qualidade da água* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). URL: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21136/tde-23042015-103406/en.php>. Acesso 16.09.2021.
- Simmonds, I. & Keay, K. (2000). Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5), 873-888. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0873:MSHECB>2.0.CO;2.
- Simmonds, I. R.J. & Murray, R.M. (1999). A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Australian Meteorological Magazine*, 28, 617-622.
- Ventusky. URL: ventusky.com. Acesso 20.05.2021.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey*. Elsevier. (v. 92).
- World Meteorological Organization (WMO). (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normals*. World Meteorological Organization.
- Ynoue, R. Y., Reboita, M. S., Ambrizzi, T., & da Silva, G. A. (2017). *Meteorologia: noções básicas*. Oficina de Textos.