



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Uma introdução à análise de massas de ar, frentes e ciclones extratropicais na América do Sul

Michelle Simões Reboita<sup>1</sup>, Natália Machado Crespo<sup>2</sup>, Luiz Felipe Gozzo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dr. Meteorologia, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, MG, reboita@unifei.edu.br; <sup>2</sup> Dr. Meteorologia, Department of Atmospheric Physics, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, nataliacrespo@alumni.usp.br; <sup>3</sup> Dr. Meteorologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Física e Meteorologia, Faculdade de Ciências, Bauru, luiz.gozzo@unesp.br

Artigo recebido em 02/06/2023 e aceito em 16/12/2023

### RESUMO

Massas de ar, frentes e ciclones extratropicais são sistemas meteorológicos que comumente afetam o tempo na América do Sul, incluindo o Brasil. A passagem de uma frente fria por uma dada região pode causar, por exemplo, nebulosidade, precipitação e variações bruscas na temperatura do ar. Como esses sistemas têm grande impacto no cotidiano das pessoas e, geralmente, são tópicos abordados na mídia, esse artigo tem como objetivo contribuir para a divulgação das características conceituais desses sistemas, introduzir a definição de algumas variáveis atmosféricas comumente utilizadas em suas identificações e aplicar tais definições em dados atmosféricos num estudo de caso de ciclone extratropical.

Palavras-chave: sistemas de escala sinótica, mudanças no tempo, precipitação

## An Introduction to the analysis of air masses, fronts, and extratropical cyclones in South America

### ABSTRACT

Air masses, fronts, and extratropical cyclones are meteorological systems that commonly affect the weather in South America, including Brazil. The passage of a cold front through a particular region can cause, for example, cloudiness, precipitation, and abrupt variations in air temperature. As these systems have a significant impact on people's daily lives and are often topics covered in the media, this article aims to contribute to the dissemination of the conceptual characteristics of these systems, introduce the definition of some atmospheric variables commonly used in their identification, and apply these definitions to atmospheric data in a case study of an extratropical cyclone.

Keywords: synoptic-scale systems, weather changes, precipitation.

### Introdução

A atmosfera é uma fina camada de gases e aerossóis que circunda a Terra e se estende por mais de 100 km de altura, sem uma altura limite para definir o seu topo. A atmosfera é subdividida em camadas, de acordo com seu perfil vertical de temperatura (Ahrens e Henson, 2021), que recebem a denominação de troposfera (a mais próxima da superfície), estratosfera (onde se encontra a camada de ozônio), mesosfera, termosfera e exosfera (a mais distante da superfície). A troposfera é a camada em que os seres vivos habitam e onde ocorre a maioria dos fenômenos atmosféricos, estendendo-se da superfície a cerca

de 10-15 km de altitude, dependendo da latitude e época do ano, e concentrando aproximadamente, 80% da massa da atmosfera.

Os fenômenos atmosféricos, tais como tempestades, pequenos turbilhões, redemoinhos de areia, brisas, frentes, ciclones e anticiclones, possuem diferentes escalas espaciais e temporais (Orlanski, 1975), portanto a Meteorologia divide-se em diferentes ramos especializados no estudo dos sistemas atmosféricos com base nestas escalas. Um desses ramos é a meteorologia sinótica, que se dedica ao estudo dos sistemas atmosféricos com escala espacial de cerca de  $10^3$  km e temporal de dias a semanas (Bluestein, 1992). Os ciclones e

anticiclones extratropicais e as frentes (fria, quente, oclusa e estacionária) são sistemas de escala sinótica. Entretanto, as frentes possuem uma dupla característica, pois em comprimento (~ 3000 km) elas se enquadram na escala sinótica e em largura (~ 500 km), na mesoescala.

Os sistemas atmosféricos de escala sinótica podem ser identificados tanto em imagens de satélite quanto em dados de reanálise e modelos numéricos da atmosfera. As reanálises correspondem a uma combinação de informações: dados meteorológicos medidos em estações de superfície, por aeronaves, radiossondas, satélites e a simulação de modelos de previsão de tempo (Copernicus ECMWF, 2019). Inicialmente os dados observados são assimilados (fornecidos a um programa computacional que os distribui em ponto de grade com espaçamento regular no espaço). Essa informação é então unida com a primeira previsão do modelo de previsão de tempo, que constitui o dado a ser disponibilizado. O nome reanálise é porque os dados citados são “reanalisados” (reprocessados) à medida que as técnicas computacionais de organização/controle de qualidade das observações são aprimoradas e/ou ocorrem melhorias nos modelos de previsão de tempo.

A elaboração das reanálises bem como de análises (que são dados processados em tempo quase real) usam informações meteorológicas obtidas ao nível da superfície terrestre e em camadas mais elevadas, que não são definidas com base na altura geométrica (por exemplo, 1 km acima do nível médio do mar, 2 km etc.) e sim em coordenada vertical de pressão, por exemplo, que é a mais comumente utilizada. Isso significa que as variáveis atmosféricas são registradas acompanhando uma superfície de pressão atmosférica constante. Suponha que o objetivo é conhecer os valores de temperatura na camada de 500 hPa. Na geração da reanálise, os pontos de grade com pressão igual a 500 hPa são selecionados e a temperatura do ar é registrada naquele nível. A distância entre a camada de pressão constante de 1000 hPa (próxima à superfície do planeta) e uma camada qualquer acima dela (também de pressão constante) é chamada de altura geopotencial. Como até cerca de 10 km acima da superfície a altura geopotencial é praticamente igual à geométrica, se utiliza como unidade o metro (ou metros geopotencial, mgp). Em geral, a altura geopotencial entre 1000 e 500 hPa é da ordem de ~ 5500 metros. A partir da altura

geopotencial pode-se obter uma outra variável que se chama espessura ou altura da camada, obtida através da diferença entre a altura geopotencial de duas superfícies de pressão constante (Wallace e Hobbs, 2006). A espessura da camada é uma variável extremamente útil, pois informa a estrutura térmica da atmosfera. Regiões com menor (maior) valor de espessura da camada indicam colunas de ar menos (mais) expandidas na vertical e, em geral, mais frias (quentes). Além disso, quando a espessura da camada é traçada nos mapas, sua configuração é similar ao da variável gradiente horizontal de temperatura (que mede os contrastes de temperatura), que é mais complexa de se calcular do que a espessura da camada. Portanto, a espessura da camada também é utilizada para identificação de zonas frontais (Escobar et al., 2019).

Ainda com relação às variáveis atmosféricas, o vento não é uma grandeza representada por um único valor como, por exemplo, a temperatura do ar. O vento tem associado a ele uma direção, sentido e intensidade, logo, é um vetor. Retomando a matemática e física básica, tem-se que um vetor pode ser decomposto em componentes sobre o plano cartesiano (x, y) (Winterle e Steinbruch, 2000). As bases de dados atmosféricos, em geral, fornecem os componentes do vetor vento ao invés da intensidade e direção. O componente do vetor vento sobre o eixo x do plano cartesiano é chamado de componente zonal do vento e possui valor positivo (negativo) para um movimento de oeste para leste (leste para oeste), o que segue a mesma definição do plano cartesiano. Já o componente do vetor vento sobre o eixo y é chamado de componente meridional do vento e possui valor positivo (negativo) para um movimento de sul para norte (norte para sul).

Quando as variáveis atmosféricas pressão ao nível médio do mar, espessura da camada e dados medidos em estações meteorológicas são representadas num mapa, seguindo horários padrões (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC), e sobre esse mapa o meteorologista faz uma interpretação e traça as frentes e indica o local dos sistemas de alta e baixa pressão, tem-se a chamada carta sinótica, que é a principal ferramenta para o entendimento dos sistemas atmosféricos em escala sinótica.

Esse trabalho tem dois objetivos: (1) apresentar didaticamente os conceitos de massas de ar, frentes e ciclones extratropicais que atuam na região da América do Sul e (2) mostrar como se

realiza a identificação desses sistemas em imagens de satélite e dados de reanálise. Para atender esse segundo objetivo também será incluído um estudo de caso de ciclone extratropical.

## Massas de Ar e Frentes

### Definição e Tipos de Massas de Ar

Como a Terra tem a forma de um geóide, os raios solares não atingem com o mesmo ângulo de incidência toda a superfície do planeta, e isto promove um aquecimento diferenciado entre polos e equador (Figura 1). Há excesso de energia na região tropical e déficit nas regiões polares e, assim, a superfície do planeta nos trópicos fica mais aquecida que as superfícies polares (Hartmann, 2015). Como a temperatura e a umidade da atmosfera são basicamente determinadas pela sua interação com a superfície do planeta, o ar que permanece por um tempo suficientemente longo sobre uma determinada superfície adquire as características termodinâmicas (temperatura e umidade) de tal superfície. Por exemplo, um volume de ar que fique um longo período (mais de uma semana) em contato com uma superfície muito fria adquire baixa temperatura, enquanto um volume de ar adjacente a uma superfície quente, por um tempo suficiente, acaba tornando-se mais quente. A esses grandes volumes de ar com temperatura e umidade praticamente homogêneas na horizontal, resultado da interação com a superfície, atribui-se o nome de massas de ar.

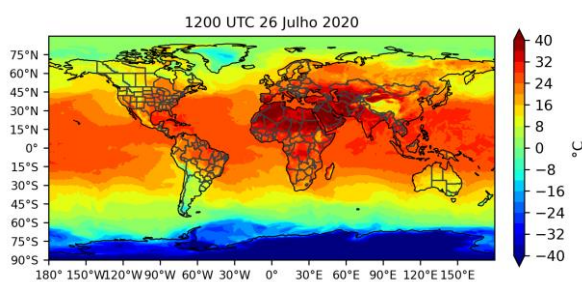


Figura 1. Temperatura do ar a 2 metros de altura (°C) às 1200 UTC do dia 26/07/2020 a partir de dados da reanálise ERA5.

As massas de ar mais quentes se formam em latitudes menores e são denominadas massas equatoriais e tropicais. As massas frias formam-se nas regiões próximas aos polos e são denominadas massas polares (árticas e antárticas). As massas de ar também possuem diferentes quantidades de

umidade, influenciadas pela sua região de formação: se formadas sobre o oceano como, por exemplo, a massa tropical marítima, o suprimento de vapor d'água da superfície oceânica lhes atribui a característica úmida. Se formadas sobre os continentes e em áreas menos vegetadas como, por exemplo, a massa tropical continental, são mais secas. No Brasil, a massa de ar equatorial continental (mEc), formada sobre a Amazônia, tende a cobrir a maior parte do território durante o verão; as massas de ar tropical marítima (mTm) e equatorial marítima (mEm) atuam basicamente sobre o litoral leste do país. Já no inverno, as massas marítimas e a massa tropical continental (mTc) ganham força e predominam sobre grande parte do Brasil, enquanto a mEc se retrai e atua apenas no extremo norte do país. As massas polares marítima e continental (mPm e mPc) avançam das altas para as baixas latitudes, afetando as regiões mais ao sul do Brasil.

### Identificação das Massas de Ar

As imagens de satélite são muito úteis para a identificação dos tipos de nuvens e de sistemas atmosféricos (Conway, 1997). Os canais mais utilizados são o visível, infravermelho e vapor d'água, com imagens representadas em tons de cinza (Figura 2a) ou em cores (Figura 2b-c).

No canal visível, os satélites medem a quantidade de radiação solar refletida pelos corpos (albedo). Nesse canal, os tons claros indicam alta refletividade, enquanto os escuros, baixa refletividade. Assim, as nuvens aparecem com mais brilho (mais brancas) em comparação com a superfície. Massas de ar seco aparecem com tons escuros. O canal infravermelho mede a quantidade de energia infravermelha emitida pelos corpos de acordo com suas temperaturas. As áreas frias aparecem em tons mais esbranquiçados enquanto as áreas quentes aparecem em tons escuros. Os topos das nuvens com grande extensão vertical (que são bem frios) são facilmente distinguíveis na cor branca. Já o canal vapor d'água mede a concentração de vapor d'água entre 6 a 10 km de altitude. Esse canal não serve para a identificação dos tipos de nuvens, mas é extremamente útil para a identificação das massas de ar seco (menos vapor d'água representado em tons escuros quando as cores são apresentadas variando do branco ao preto) e úmido (muito vapor d'água representado em cores mais claras).

A Figura 2 ilustra como a atmosfera é vista através dos três canais mencionados e, nela,

também estão identificadas as massas de ar atuando no dia 28 de julho de 2021. Da esquerda para a direita têm-se as imagens do canal visível, infravermelho e vapor d'água. No canal infravermelho (Figura 2b), regiões sem nuvens ou

com nuvens pouco desenvolvidas aparecem em tons mais escuros ou acinzentados, respectivamente, e no canal do vapor d'água (Figura 2c), regiões mais secas (úmidas) são mais amarelas (azuis e brancas).

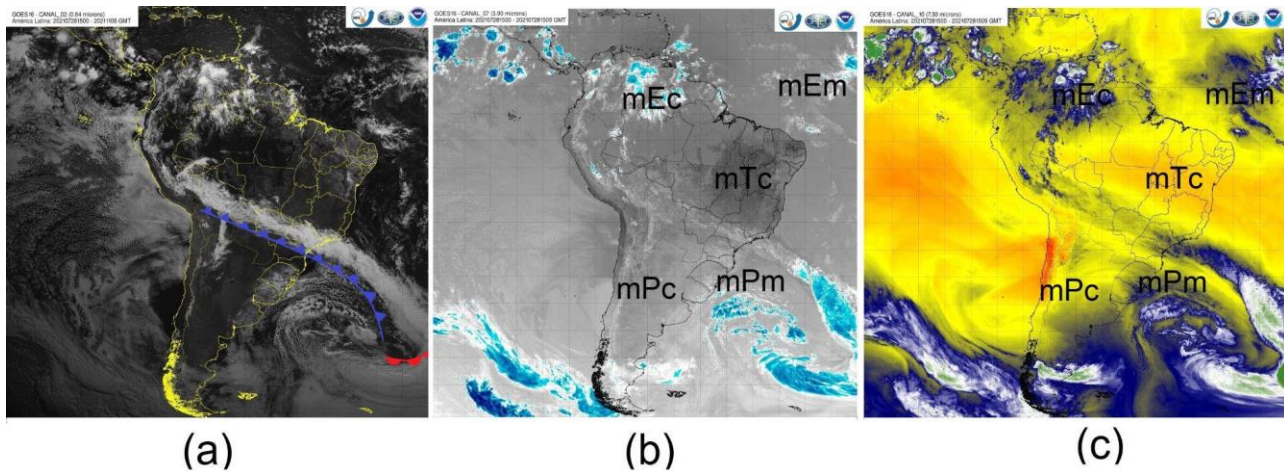


Figura 2. Massas de ar sobre a América do Sul às 1500 UTC de 28 de julho de 2021, nos canais (a) visível (0.64  $\mu\text{m}$ ), (b) infravermelho (3.9  $\mu\text{m}$ ) e (c) vapor d'água (7.3  $\mu\text{m}$ ) do satélite GOES-16; mEc = massa equatorial continental (quente e úmida); mEm = massa equatorial marítima (quente e úmida); mTc = massa tropical continental (quente e seca); mPm = massa polar marítima (fria e úmida); mPc = massa polar continental (fria e seca). Em (a) estão demarcadas as posições aproximadas das frentes fria (azul) e quente (vermelho). Fonte: CPTEC/INPE.

### Definição de Frentes

Devido ao aquecimento diferenciado entre polos e trópicos, há predominância de massas quentes próximas ao equador e de massas frias em latitudes altas (Figura 1). Para buscar equilíbrio/homogeneidade em suas propriedades, os fluidos geofísicos (ar na atmosfera e água dos oceanos) movem-se fazendo surgir as circulações atmosféricas e oceânicas, que transportam massas mais quentes em direção aos polos e massas mais frias em direção aos trópicos (Hartmann, 2015; Reboita e Ambrizzi, 2022).

O movimento horizontal das massas de ar é causado pela diferença de pressão nas massas com propriedades térmicas distintas. A diferença de pressão gera uma força chamada força do gradiente de pressão na horizontal que causa o deslocamento do ar e, assim, o vento. O ar vai se deslocar das regiões de maior pressão para as de menor pressão. Uma forma fácil de entender esse conceito é pensar num recipiente como um aquário e colocar uma divisória no centro dele em posição vertical. Se um lado do aquário estiver preenchido com água (maior pressão) e o outro não (menor

pressão), quando a divisória for removida, a água escoará para o lado em que não há esse fluido. Logo, há uma homogeneização do fluido geofísico.

A região de fronteira entre duas massas de ar com características termodinâmicas (temperatura e umidade) distintas é chamada de frente. Este nome, dado pelo grupo de meteorologistas noruegueses composto por Vilhelm Bjerknes, seu filho Jacob Bjerknes, Halvor Solberg e Tor Bergeron em 1917, surgiu em analogia às frentes de batalha (Figura 3) que eram o contato entre tropas inimigas, e avançavam pela Europa, durante a Primeira Guerra Mundial (Friedman, 1999).

A região de intenso contraste térmico nas latitudes médias, entre  $\sim 30$  e  $60^\circ$  de latitude, tanto no Hemisfério Norte quanto no Hemisfério Sul (Figura 1) marca a interface de grande escala entre o ar frio das regiões polares e o ar mais quente das regiões tropicais, sendo a região preferencial de ocorrência de frentes. Por isso, também é comumente chamada de região da Frente Polar (Bjerknes e Solberg, 1922). Ela não é uma linha contínua ao redor do globo. Como as massas de ar

frio podem avançar para latitudes mais baixas dependendo do local, a região da Frente Polar assume característica meandrante, com a

ocorrência de extensas frentes frias se deslocando, por exemplo, em direção ao Brasil (Figura 2).



Figura 3. À esquerda, frente de soldados franceses avançando contra áreas alemãs na Primeira Guerra Mundial (fonte: <https://www.ck12.org/c/earth-science/fronts/lesson/Weather-Fronts-HS-ES/>). À direita, nebulosidade associada a uma frente fria avançando sobre o oeste do Texas (EUA) em 08 de setembro de 2020. Fonte: NWS/NOAA.

#### Classificação das Frentes

As frentes se classificam em quatro tipos: fria, quente, estacionária e oclusa (Figura 4). As frentes frias (Cardozo et al., 2015) marcam a região de avanço de uma massa de ar frio em direção a uma massa de ar quente (Figura 4a). O ar frio, mais denso, tende a avançar por baixo do ar quente, em uma forma de cunha, levantando-o bruscamente. Com isso, forma-se uma banda estreita de nuvens ao longo da frente fria, e esta é uma característica marcante deste sistema em imagens de satélite.

Na Figura 2, o avanço da massa fria (mPm) por baixo da massa quente (mTc) gerou uma banda alongada de nebulosidade facilmente identificável nas imagens do canal visível, sobre os Estados brasileiros de São Paulo, Mato Grosso do Sul e estendendo-se até a Bolívia (Figura 2a). Quando o ar frio perde suas propriedades, a massa de ar quente pode se expandir. Nesse caso, a região fronteira é chamada de frente quente (Figura 4b) (Ribeiro et al., 2016). Como o ar quente é menos denso, ele tende a avançar por cima do ar frio, causando um levantamento menos abrupto do que no caso da frente fria, e uma área de nuvens mais espalhadas. As frentes oclusas formam-se quando uma frente fria ultrapassa a frente quente (Figura 4c). À medida que isso ocorre, o ar frio da retaguarda da frente fria, como é denso, força o ar quente (da retaguarda da frente quente) a ascender. Com o passar do tempo, a massa fria acaba

ocupando o local antes dominado pela massa quente. Esse tipo frontal só ocorre em associação com os ciclones extratropicais (como será mostrado na seção 3.2). As frentes estacionárias são fronteiras entre massas de ar que se mantêm praticamente sem movimento (Figura 4d).

As frentes frias e quentes podem se formar sem ou com a influência de um ciclone extratropical. Na Figura 5a é mostrada uma frente estacionária numa imagem de satélite no canal infravermelho e numa carta sinótica (mapa que mostra a pressão ao nível médio do mar - PNMM, traçado das frentes e indicação dos centros de baixa e alta pressão) sem associação com um ciclone extratropical. A existência dessa frente está associada com a circulação de dois centros de alta pressão. Como os sistemas de alta pressão possuem circulação anti-horária no Hemisfério Sul, o anticiclone no oceano Atlântico Sul com centro em ~ 30°S transporta ar quente no seu lado oeste que se encontra com o ar frio transportado pelo sistema de alta pressão no sul do continente. O encontro das duas massas de ar gera a frente. Situações como a da Figura 5a podem ocasionar a formação de um ciclone extratropical.

A Figura 5b exemplifica um caso de frente quente sem associação com ciclone extratropical. Quando as massas de ar sobre o Brasil central se tornam semi-estacionárias por um período de dias, ocorre o aquecimento delas de forma que o ar frio

das regiões mais externas acaba perdendo suas propriedades e aquecendo. Portanto, não é o ar quente que empurra o ar frio, é apenas o enfraquecimento da massa de ar frio que fornece a impressão de que o ar quente está empurrando o ar frio.

Muitos ciclones extratropicais podem se formar por influência da atmosfera superior. Nesses casos, após a formação do ciclone, sua circulação horária no Hemisfério Sul transporta ar frio para o seu lado oeste, gerando a frente fria, e ar quente, para o seu lado leste, gerando a frente quente. Como a frente fria possui deslocamento mais rápido do que a quente, acabará tomando o lugar da frente quente, configurando a frente oclusa. A Figura 2 mostra um exemplo de frente fria e quente que se formaram devido à circulação de um ciclone extratropical (cujo centro pode ser visto pela distribuição de nuvens sobre o Atlântico Sul, a sudeste do Uruguai).

#### Identificação das Frentes

As Figuras 2 e 5 mostram que as frentes, associadas ou não a ciclones extratropicais, podem ser identificadas de forma relativamente fácil nas imagens de satélite pelas bandas de nebulosidade. Entretanto, também existem situações em que as massas de ar são secas e não há formação de banda de nebulosidade. Assim, recomenda-se fazer a identificação das regiões frontais a partir de variáveis atmosféricas utilizando cartas sinóticas.

Ao longo de uma região frontal, em geral, ocorre um mínimo de pressão (pois a região da frente está sempre associada ao levantamento do ar, portanto abaixamento de pressão em superfície), contraste horizontal de temperatura (pois é a fronteira entre massas de ar com propriedades termodinâmicas distintas) e o encontro dos ventos

que sopram de sentidos diferentes a norte e a sul da frente, que é tecnicamente chamado de convergência de massa (ou do vento). Matematicamente, a divergência horizontal é definida como (Stull, 2017):

$$D = \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

D = divergência de massa (s<sup>-1</sup>)  
 Δ = variação  
 u = componente zonal do vento (m/s)  
 v = componente meridional do vento (m/s)  
 x e y indicam as posições no plano cartesiano (que posteriormente são convertidas para coordenadas esféricas)

Para o fácil entendimento dos termos convergência e divergência, pode-se fazer uma analogia com o horário escolar. Considere que às 13h as aulas iniciam numa da escola; os alunos partem de diferentes locais em direção à escola. Portanto, a escola é um ponto de convergência. Às 18h as aulas são finalizadas e os alunos partem do ponto comum, que é a escola, para suas residências que são distribuídas pela cidade. Isso indica que a escola agora é um local de divergência. O conceito de convergência está associado com o acúmulo de massa e tem sinal negativo por definição. Já o conceito de divergência está associado com a remoção de massa e tem sinal positivo por definição.

A Figura 6b mostra que na região frontal, de encontro entre os dois escoamentos, o vento tende a fazer um “giro”. A variável que quantifica este giro (rotação) do fluido é chamada vorticidade. Quando apenas a rotação do fluido é considerada (sem a influência da rotação da Terra), a vorticidade recebe o nome de vorticidade relativa e é expressa matematicamente, como (Stull, 2017):

$$\zeta = \frac{\Delta v}{\Delta x} - \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

ζ = vorticidade relativa (s<sup>-1</sup>)  
 Δ = variação  
 u = componente zonal do vento  
 v = componente meridional do vento e y indicam as posições no plano cartesiano (que posteriormente são convertidas para coordenadas esféricas)

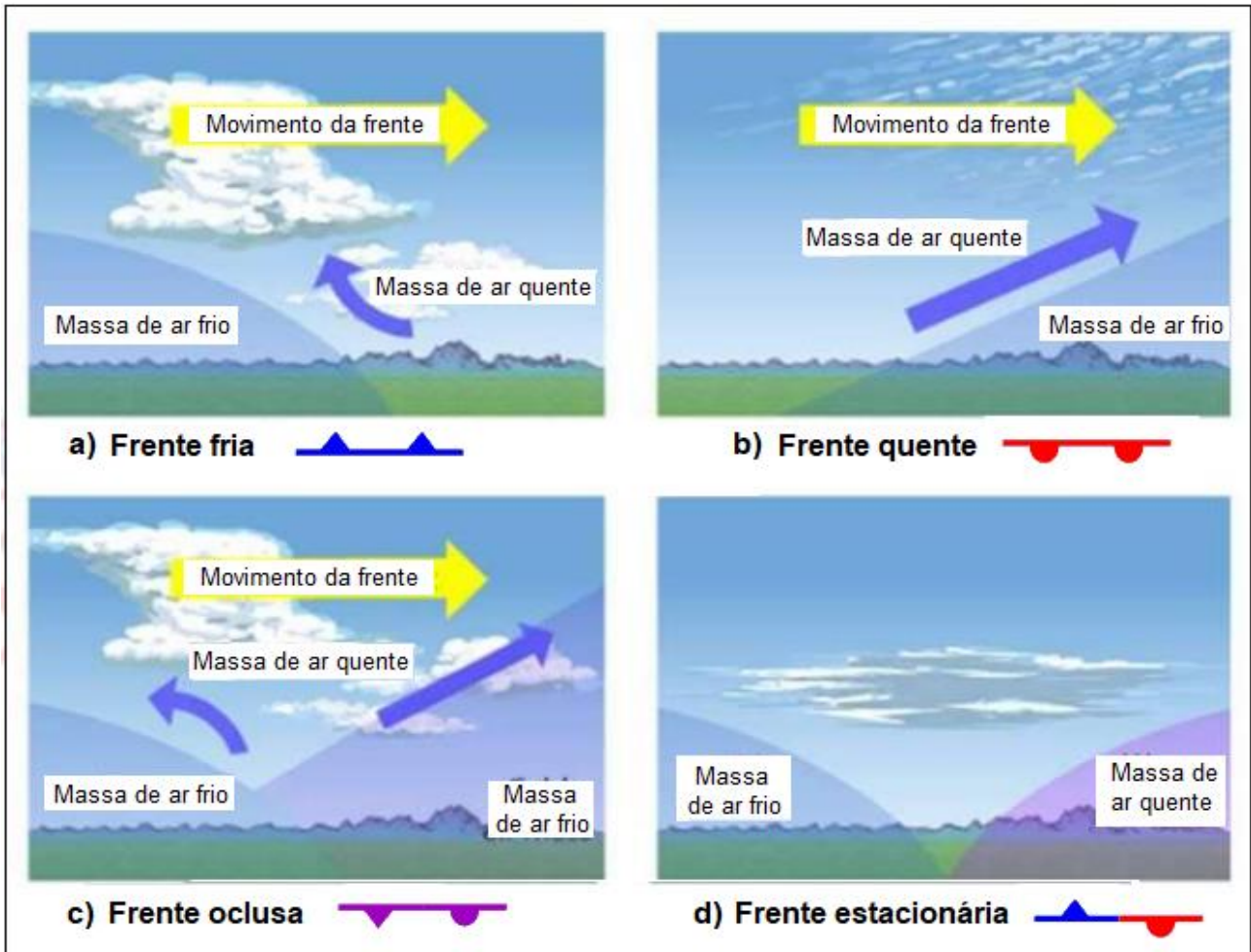
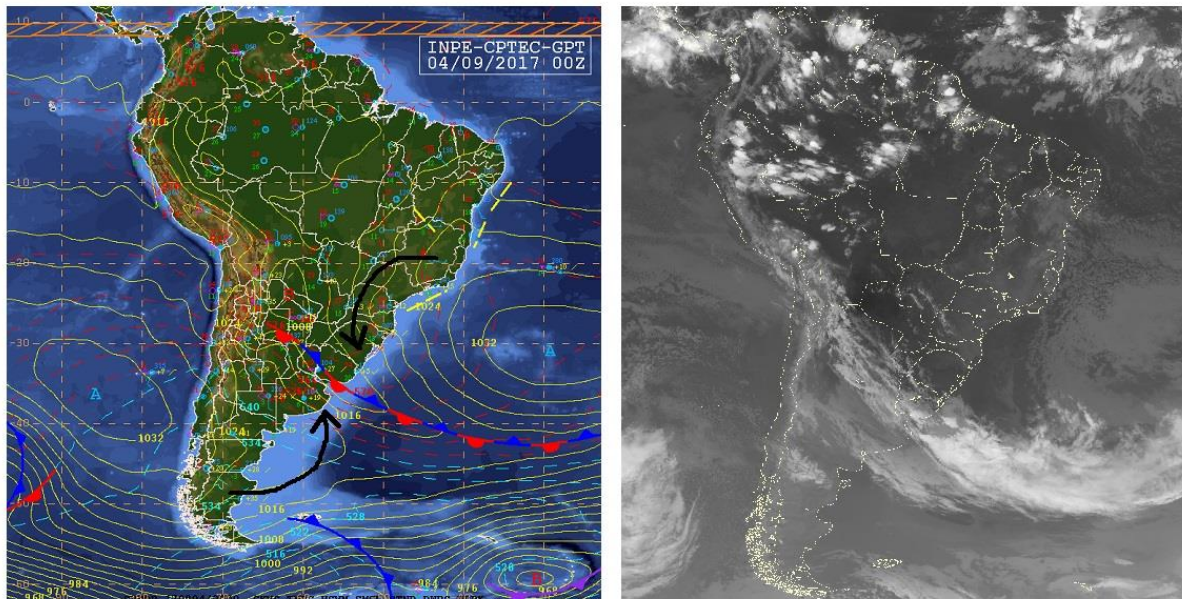


Figura 4. Seção transversal dos quatro tipos de frentes. A seta amarela indica a direção de movimento da frente, e as setas azuis indicam os movimentos verticais do ar forçados pelas frentes. Ao lado do nome de cada frente tem-se o símbolo que é utilizado para demarcá-las em cartas sinóticas. Adaptado de Mishra (2017).

(a)



(b)

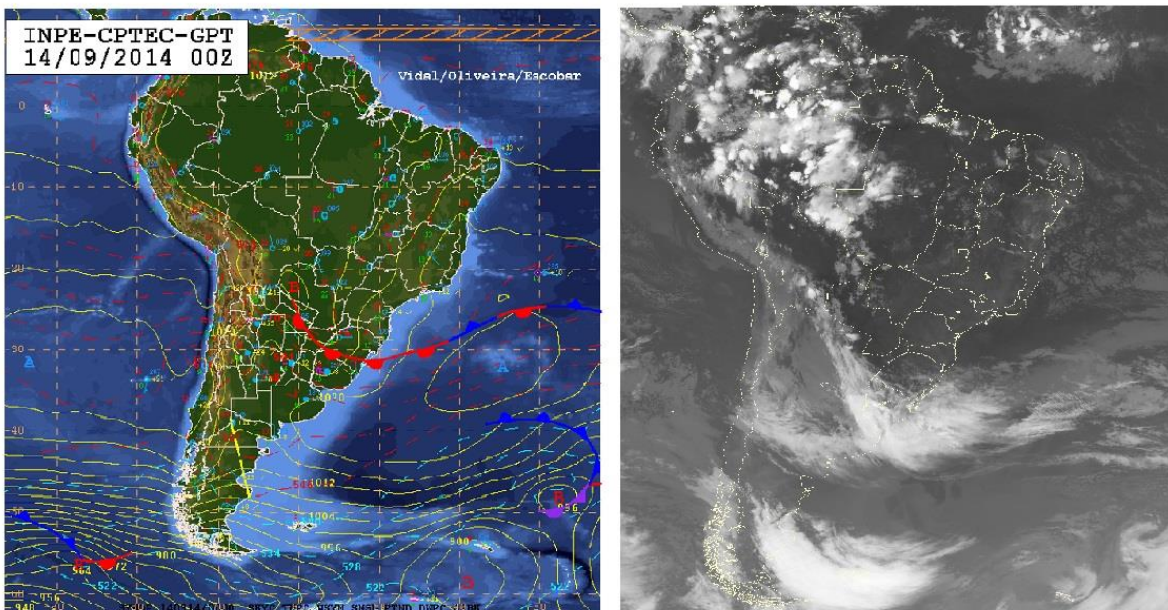


Figura 5. Cartas sinóticas (PNMM em linha amarela, espessura da camada 1000/500 hPa em linha azul tracejada e indicação das frentes) e imagens de satélite do canal infravermelho (10.7  $\mu\text{m}$ ) do satélite GOES-13 referentes a (a) uma frente fria sobre o oceano Atlântico, com ramo estacionário sobre o sul do Brasil, em 04 de setembro de 2017 às 0000 UTC e a (b) uma frente quente em 14 de setembro de 2014 às 0000 UTC. Fonte: CPTEC/INPE. A seta em preto apontando para sul (norte) no painel superior esquerdo indica o transporte de ar quente (frio) realizado pelos anticiclones (centros identificados pelas letras A em azul).



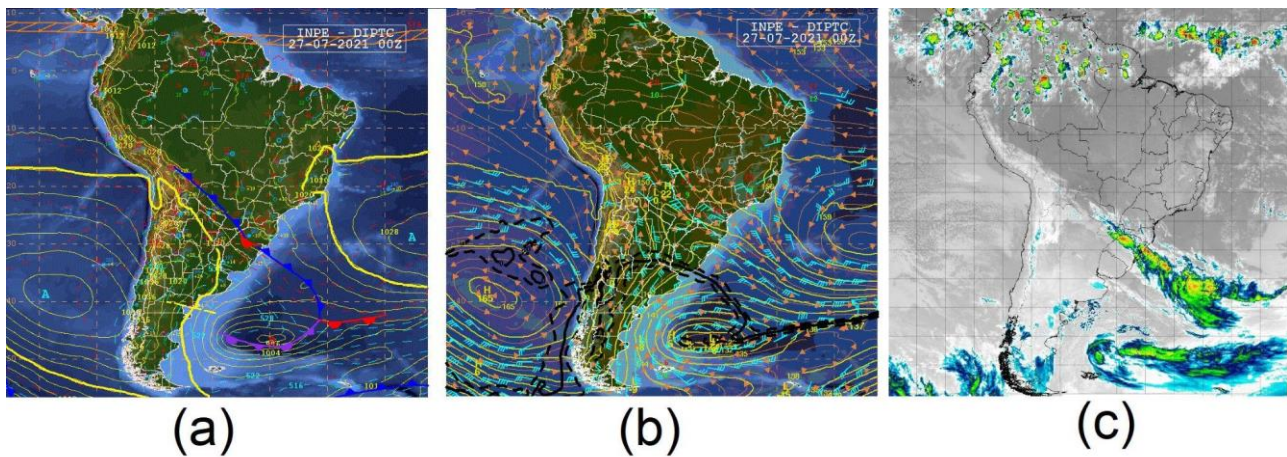


Figura 6. Campos sinóticos e imagem de satélite para as 0000 UTC de 27 de julho de 2021. (a) Carta sinótica de superfície - as linhas em amarelo representam as isóbaras, as linhas tracejadas representam a temperatura do ar (acima de 0°C em vermelho, abaixo de 0°C em azul), e as frentes são representadas pela forma usual; (b) Carta sinótica em 850 hPa - as linhas laranjas representam o vento horizontal, as linhas amarelas são a altura geopotencial, e as linhas em preto representam a isoterma de 0°C; (c) Imagem do satélite GOES-16 no canal infravermelho - as cores representam a profundidade das nuvens, quanto mais quentes forem as cores, maior é a profundidade da nuvem.

A vorticidade relativa no mesmo sentido dos ponteiros do relógio, tem sinal negativo por convenção e indica uma circulação ciclônica (baixa pressão) no Hemisfério Sul. Já a vorticidade relativa no sentido anti-horário possui sinal positivo e indica uma circulação anticiclônica (alta pressão) no Hemisfério Sul.

Na retaguarda, ou seja, na parte traseira das frentes frias (quentes) no Hemisfério Sul, o vento sempre vai soprar de sul (norte) enquanto que na dianteira, ou seja, à frente, soprará de norte (sul). Devido a alguns processos físicos, esse encontro dos ventos acaba adquirindo um giro no sentido horário (giro ciclônico). Portanto, regiões alongadas de vorticidade ciclônica também são utilizadas para identificar a posição de frentes.

Algumas das variáveis mencionadas podem ser observadas em cartas sinóticas e em imagem de satélite (canal infravermelho) como mostra a Figura 6 para às 0000 UTC do dia 27 de julho de 2021. Na Figura 6a, carta de superfície, os contrastes térmicos indicativos das regiões frontais são mostrados através das linhas tracejadas, que correspondem à espessura da camada 1000-500 hPa (que é proporcional aos gradientes horizontais de temperatura). Quanto mais próximas estiverem as linhas tracejadas, mais intensos são os gradientes horizontais de temperatura do ar. A Figura 6a permite identificar a posição das frentes relacionadas a um ciclone extratropical. Desde o

ciclone (indicado pela letra “B” de baixa pressão) e se estendendo até a Bolívia, há uma frente fria; sobre o oceano Atlântico, uma frente quente; e sobre o oceano próximo ao centro do ciclone extratropical (50°W-50°S), a frente oclusa, isto é, a região onde a frente fria já ultrapassou a frente quente. Pode-se observar pelo campo de espessura da camada fortes contrastes de temperatura nas proximidades das regiões frontais frias e quentes; na frente oclusa, não há variações tão evidentes de temperatura, pois neste caso toda a massa de ar já é fria. A figura também mostra que as regiões frontais possuem menor pressão atmosférica em relação às suas redondezas. As isolinhas de pressão referentes a 1020 hPa estão destacadas em linhas amarelas mais fortes. As pressões são inferiores a 1020 hPa na região das frentes e do ciclone, enquanto mais afastado deles, as pressões são maiores.

A Figura 6b mostra diferentes variáveis no nível de 850 hPa (correspondendo a aproximadamente 1500 m de altura acima do solo): altura geopotencial em linhas amarelas, linhas de corrente em cor laranja e barbelas da intensidade e direção do vento em ciano. Além disso, a linha preta contínua indica a isoterma (i.e. linha de mesma temperatura) de 0°C e as linhas pretas tracejadas, as isotermas de -2°C (ao sul da linha de 0°C) e 2°C (ao norte da linha de 0°C). Nota-se que o escoamento converge nas regiões frontais, isto é, o vento proveniente de diferentes direções se

encontra próximo às frentes fria e quente (Figura 6b). Se fosse calculada a variável convergência, essa apareceria com valor negativo nas regiões frontais e nos ciclones. Na imagem de satélite (Figura 6c), observa-se uma faixa estreita de nuvens muito profundas na região da frente fria (próxima ao Estado do Rio Grande do Sul e se estendendo para leste no oceano Atlântico Sul), uma região de nuvens menos profundas e mais espalhadas na região da frente quente (sobre o oceano Atlântico) e nuvens mais vigorosas na região da frente oclusa, porém igualmente espalhadas (sobre o oceano Atlântico, ao sul do centro do ciclone).

## Ciclones

### Tipos e Características Gerais

A definição básica de ciclone está relacionada a um sistema de menor pressão no centro do que nas regiões mais distantes deste, com rotação (circulação fechada dos ventos) no mesmo sentido do giro da Terra (sentido horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte). Em escala sinótica, os ciclones dividem-se em três tipos: extratropicais, tropicais e subtropicais (também chamados de híbridos) (da Rocha et al. 2019; Wood et al., 2023). Essa classificação se dá principalmente devido às diferentes características térmicas e processos de formação desses sistemas (Tabela 1). Outras características como intensidade, tempo de vida e impactos que causam podem variar de acordo com a região do globo em que se formam.

Em termos de frequência, os ciclones tropicais ocorrem comumente durante o período de verão e outono do hemisfério de referência, pois dependem basicamente do calor para facilitar a evaporação do oceano e é nesse período que a superfície do mar está mais aquecida. No oceano Atlântico Norte, o período entre junho a novembro é conhecido como a temporada de furacões (ciclones tropicais em que os ventos são superiores a 119 km/h). Os ciclones subtropicais também são mais comuns durante esse período, pois como já mencionado são sistemas híbridos, e o transporte de umidade e calor são de extrema importância para sua formação. Tanto os ciclones tropicais quanto subtropicais são mais raros sobre o oceano Atlântico Sul. Climatologicamente ocorrem cerca de sete ciclones subtropicais por ano nessa região (da Rocha et al., 2019), enquanto que os tropicais são raríssimos, sendo que até o momento apenas dois foram documentados na literatura: o Catarina

(Pezza e Simmonds, 2005) e o Iba (Reboita et al., 2021).

### Ciclones Extratropicais

Os ciclones extratropicais são os mais comuns dentre os três tipos e ocorrem durante o ano todo em ambos os hemisférios. Quando as coordenadas geográficas do centro desses sistemas são registradas, é possível gerar mapas de trajetórias. A Figura 7 é um exemplo das trajetórias dos ciclones extratropicais no Hemisfério Sul no mês de julho de 2020. Note que esses sistemas se concentram preferencialmente na região de maior contraste térmico mostrada na Figura 1. Portanto, aqui se tem um dos processos formadores dos ciclones extratropicais: contrastes térmicos na horizontal, denominados gradientes horizontais de temperatura, que na verdade estão associados com as frentes e, conseqüentemente, com as massas de ar com propriedades termodinâmicas distintas.

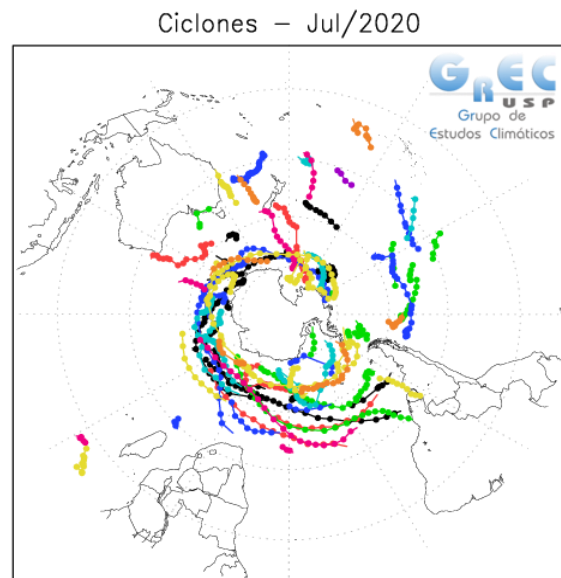


Figura 7. Ciclones extratropicais rastreados no Hemisfério Sul para o mês de julho de 2020. Os pontos referem-se às posições dos ciclones detectados pelo algoritmo de rastreamento. Cada cor corresponde a diferentes ciclones e suas trajetórias constituem os pontos ligados pelas linhas de mesma cor. Fonte: Grupo de Estudos Climáticos - IAG/USP (Bueno et al., 2023).

A Figura 8 mostra o processo de formação e desenvolvimento de um ciclone extratropical associado com regiões de gradientes horizontais de temperatura do ar. Parte-se da presença de uma região frontal. Quando essa região é perturbada (uma massa tende a se deslocar mais rápido), há formação de uma ondulação e, a partir daí, os

gradientes horizontais de pressão começam a atuar dando origem à circulação ciclônica (sentido horário no Hemisfério Sul). Esse processo, descrito no início do século XX (pelo grupo de meteorologistas noruegueses citados na seção 2.3), é chamado de Teoria da Frente Polar. Este modelo é utilizado até hoje nas previsões de tempo, e descreve a interação entre massas de ar quente e fria. A Teoria da Frente Polar recebe este nome pois os ciclones extratropicais ocorrem justamente na região da Frente Polar (seção 2.3), ou seja, na região de maiores gradientes de temperatura (região das latitudes médias entre ~ 30 e 60° de latitude em ambos os hemisférios).

Ressalta-se que um ciclone extratropical pode se originar tanto a partir da presença de uma frente quanto se formar por influência da atmosfera superior e, então, originar as frentes quente e fria. Nesse caso, uma onda em níveis altos contribui para remoção de massa da coluna atmosférica causando redução da pressão em superfície,

favorecendo a formação e/ou intensificação dos ciclones extratropicais (Figura 9). Entretanto, os ciclones extratropicais também podem se formar associados à ocorrência concomitante de gradientes horizontais de temperatura em superfície e ondas em níveis médios/altos da atmosfera, que é a situação mais comum.

Ao leitor que queira aprofundar seu conhecimento dos ciclones extratropicais (o tipo mais frequente na costa leste da América do Sul), recomendam-se os seguintes estudos: Seluchi (1995), Gan e Reboita (2012); Reboita et al. (2012, 2017a,b); Reboita e Marrafon (2021); Crespo et al. (2021); de Jesus et al. (2021). Na próxima seção, será apresentado um estudo de caso de ciclone extratropical na região do Atlântico Sul, que irá ilustrar e unificar os conceitos apresentados até aqui.

**Tabela 1.** Principais características dos três tipos de ciclones.  
Fontes: Reboita et al. (2012) e Gozzo et al. (2014).

	<i>Extratropical</i>	<i>Tropical</i>	<i>Subtropical</i>
<i>Região preferencial de formação</i>	Latitudes médias a altas	Entre equador e trópicos	Entre ~ 20°S e 40°S
<i>Diâmetro</i>	Entre 1500 e 5000 km	Menor que 1000 km	Varia entre o tamanho do extratropical e tropical
<i>Forçantes principais para formação</i>	Contrastes horizontais de temperatura e ondas em níveis médios e altos da atmosfera	Transferência de energia do oceano para a atmosfera	Sobre o oceano Atlântico Sul estão associados com ondas em níveis médios e transporte horizontal de umidade das regiões tropicais para as subtropicais
<i>Estrutura</i>	Núcleo frio	Núcleo quente	Núcleo quente em baixos níveis e frio em médios/altos níveis da atmosfera

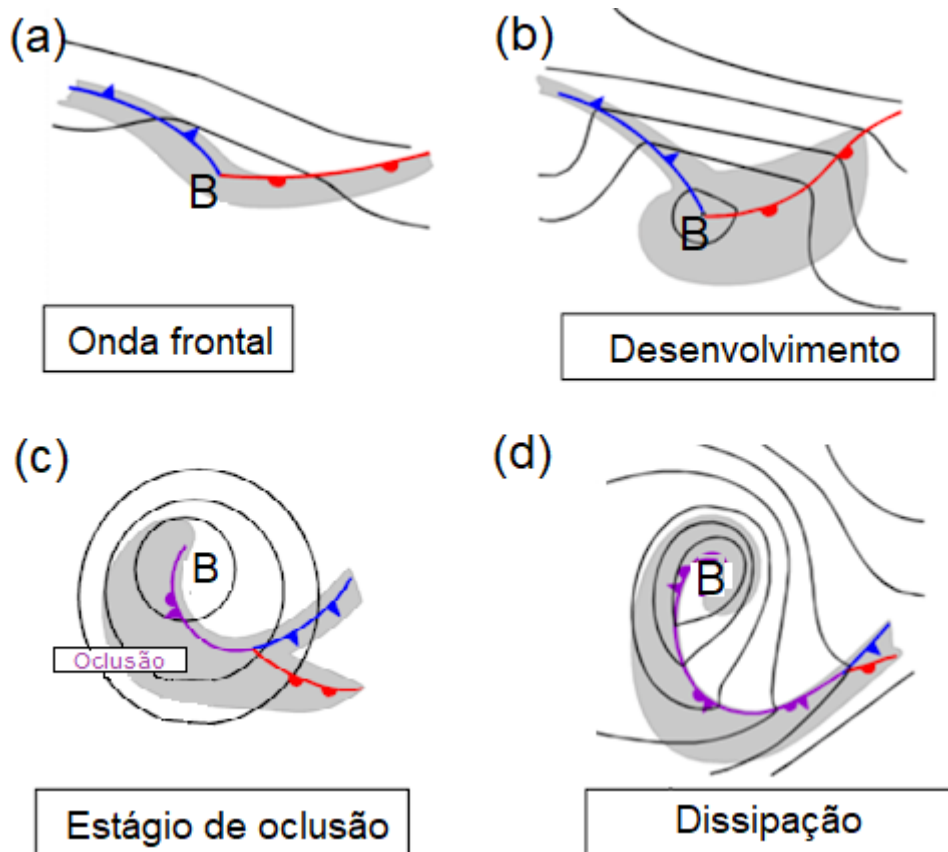


Figura 8 Esquema da evolução de um ciclone extratropical. (a) estágio inicial: perturbação no campo de pressão e aumento do gradiente de temperatura; (b) estágio de intensificação: a baixa pressão e circulação ciclônica intensificam-se e organizam as bandas de nebulosidade e precipitação (frentes); (c) estágio de maturação: a frente fria se move mais rapidamente alcançando a frente quente e formando a região de oclusão, o ciclone atinge seu máximo aprofundamento e seu centro permanece no lado frio do sistema; (d) estágio de dissipação: a pressão começa a aumentar, e a frente oclusa entra em decaimento. A letra B refere-se à baixa pressão, as linhas pretas referem-se às linhas de pressão, as linhas azul, vermelha e roxa referem-se às frentes fria, quente e oclusa, respectivamente e o sombreado refere-se à região com nebulosidade. Adaptado de EUMETRAIN.

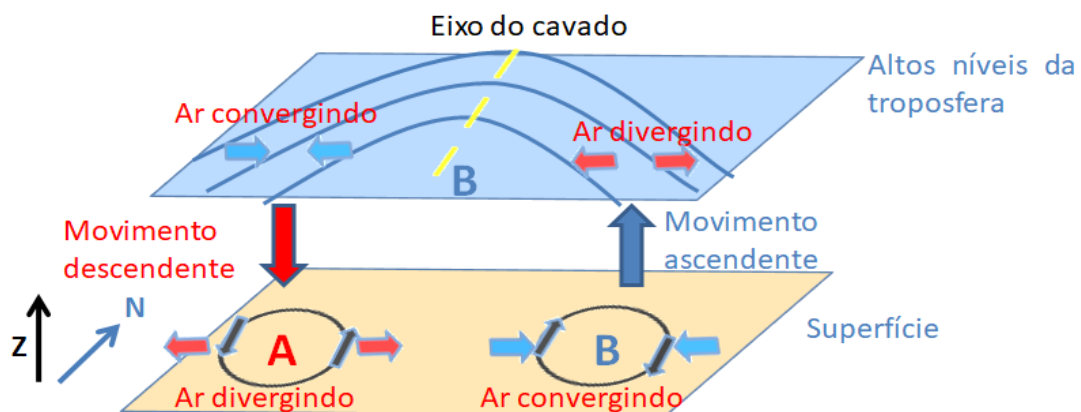


Figura 9 Esquema tridimensional da troposfera na presença de uma onda em altos níveis e ciclone e anticiclone em superfície no Hemisfério Sul. B (A) indica baixa (alta) pressão e as setas mostram sua circulação ciclônica (anticiclônica). A flecha vertical azul (vermelha) para cima (baixo) indica movimento ascendente (descendente). A linha amarela tracejada indica o eixo do cavado.

## Estudo de Caso de um Ciclone Extratropical

### Dados e Scripts

Nessa seção é apresentado o estudo de caso de um ciclone ocorrido entre os dias 23 e 25 de julho de 2020. Para tanto, foram utilizados dados da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Hersbach et al., 2018). O procedimento para *download* dos dados é descrito passo-a-passo no Material Suplementar (MS01). As variáveis selecionadas foram pressão ao nível médio do mar (PNMM), temperatura do ar no nível de 850 hPa, altura geopotencial e componentes zonal e meridional do vento em 1000, 850, 500 e 250 hPa. Embora a ERA5 possua dados com resolução horizontal de  $0,25^\circ$  de latitude e longitude, para estudos em escala sinótica, podem ser utilizados dados com maior espaçamento de grade (i.e. menor resolução espacial). Diante disso, as variáveis foram obtidas com resolução horizontal de  $1^\circ \times 1^\circ$  e para os horários padrões sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC, que correspondem às 21 h do dia anterior, 03, 09 e 15 horas no horário de Brasília (UTC-3).

Para a geração das figuras é utilizado o *software* GrADS, versão para *Windows*, que está disponível para *download* em [https://sourceforge.net/projects/opengrads/files/grads2/2.2.1.oga.1/Windows/grads-2.2.1.oga.1-win32\\_superpack.exe/download](https://sourceforge.net/projects/opengrads/files/grads2/2.2.1.oga.1/Windows/grads-2.2.1.oga.1-win32_superpack.exe/download) (se você é usuário de Linux, também há versão para esse sistema operacional). O GrADS é um *software* extremamente amigável para se trabalhar com dados no formato *netcdf*, que é o formato dos dados da reanálise ERA5 e de inúmeros conjuntos de dados da área de geociências. Aqui não será apresentado um tutorial para utilização do GrADS, apenas serão fornecidos os *scripts* em “linguagem de programação GrADS” com comentários, a fim de facilitar a aprendizagem (MS02). Um curso completo de GrADS voltado para as Ciências Atmosféricas é provido em Reboita (2021). Uma recomendação para a geração dos *scripts* é a utilização de um bom editor de texto; sugere-se o *software* Notepad++, disponível em <https://notepad-plus-plus.org/downloads/>.

Os dados utilizados no estudo de caso bem como os *scripts* estão disponíveis em [https://drive.google.com/drive/folders/17jdPO\\_iYNfqUC7uUwJWB\\_-FtE1f\\_fyjM?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/17jdPO_iYNfqUC7uUwJWB_-FtE1f_fyjM?usp=sharing). Os *scripts* incluem um *looping* no tempo para gerar figuras a cada horário sinótico. Nem todas as figuras são

apresentadas aqui, somente as mais relevantes para o estudo de caso.

### Primeira “Olhadela” no Ciclone

A primeira “olhadela” no ciclone é realizada na imagem de satélite para verificar a área de interesse (Figura 10). O centro de baixa pressão encontra-se localizado entre a Argentina e o Uruguai, enquanto o ramo frontal frio se estende pelo sul do Brasil chegando à Bolívia. Já o ramo quente do sistema encontra-se quase na mesma banda latitudinal do centro do ciclone, mas estendido para leste.

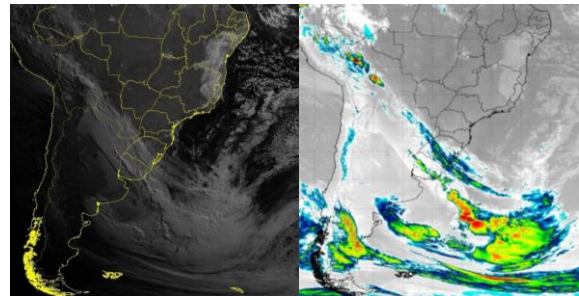


Figura 10 Imagens do satélite GOES16 nos canais visível (esquerda) e infravermelho (direita) no dia 24 de julho de 2020 às 1200 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

A Figura 11 mostra a interface do GrADS, a abertura do arquivo “*mssl\_era5.nc*”, as definições da área para o *plot* da PNMM e, por fim, o *display* da figura. O centro do ciclone, que é o local de menor PNMM, aparece com linha azul próximo à Argentina. A pressão foi dividida por 100 para transformar a unidade de Pascal (Pa) para hectoPascal (hPa). A caixa amarela destaca a localização do ciclone (essa não foi inserida com o *software* GrADS).

As informações mostradas na Figura 11 foram inseridas num *script* do GrADS, chamado de “*script\_01.gs*” (MS02). Algumas imagens de horários sinóticos da PNMM entre o dia 23/07/2020 e 25/07/2020, geradas com o *script*, são mostradas na Figura 12. No dia 22 às 1800 UTC ainda não havia isóbara fechada entre a Argentina e Uruguai (Figura 12a). A primeira isóbara fechada é registrada às 0000 UTC do dia 23/07/2020 (Figura 12b), caracterizando a ciclogênese (momento do surgimento do ciclone). Como no dia 25 às

0600 UTC o ciclone se conecta com uma outra área de baixa pressão (localizada a cerca de

40°W-60°S), esse tempo será considerado como o de decaimento do sistema (Figura 12f).

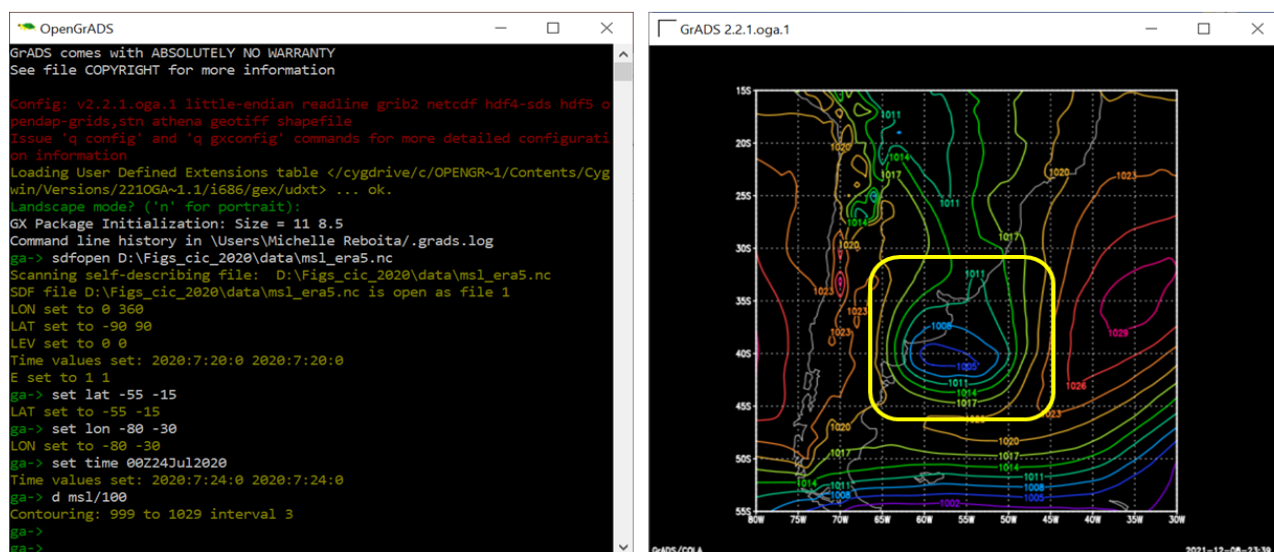


Figura 11. Ambiente de trabalho do *software* GrADS. No lado esquerdo tem-se a interface para digitação e execução de comandos e a direita, a janela gráfica.

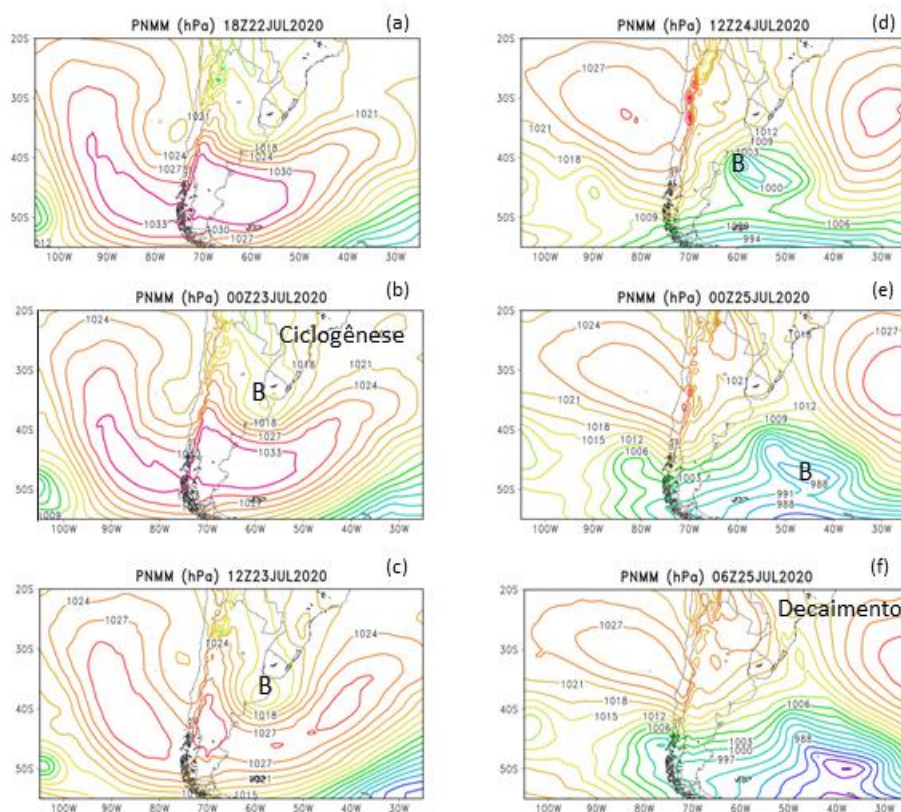


Figura 12. PNMM (hPa) entre os dias 22 e 25 de julho de 2020. A letra B indica o centro do ciclone (sistema de baixa pressão). Painéis gerados com o “script\_01.gs”.

Duas informações de grande importância quando se estuda ciclones são traçar a trajetória desses sistemas bem como conhecer a evolução temporal da PNMM no centro deles. Quando se trabalha com climatologia, em geral, se utilizam algoritmos que fazem essa tarefa, pois muitos ciclones são analisados (como mostra, por exemplo, a Figura 7). Entretanto, se o objetivo é um estudo de caso, a tarefa pode ser simplificada fazendo a extração das informações através da análise visual dos campos de PNMM na área geográfica. Uma vez gerados os mapas da PNMM como na Figura 12, poderão ser utilizadas no “script\_02.gs” as coordenadas da área que o

ciclone ocupa a cada passo no tempo. Esse *script* irá fornecer a coordenada (lon, lat) com o menor valor da PNMM num arquivo de texto (TXT). Essas informações, mostradas na Figura 13, podem ser utilizadas em outros *softwares*, como, por exemplo, no *Excel* para representar a série temporal da pressão no centro do ciclone (Figura 14a) e no *QGIS* para gerar o mapa da trajetória do sistema. Aqui, o *GrADS* foi utilizado para gerar a figura da trajetória do ciclone (Figura 14b); o script utilizado foi o “script\_03.gs”.

```

1 13 302 -36 1011.53
2 14 302 -37 1011.55
3 15 302 -38 1009.68
4 16 301 -39 1005.92
5 17 301 -40 1003.63
6 18 300 -40 999.208
7 19 301 -41 992.386
8 20 304 -42 988.906
9 21 315 -48 985.316
10 22 322 -50 975.652
11
    
```

Figura 13. Janela do *software* Notepad++ mostrando os dados gerados com o “script\_02.gs”. Localização geográfica do ponto de mínimo de pressão atmosférica em cada passo de tempo ao longo do ciclo de vida do ciclone. A coluna em cinza é um índice que indica o número da linha, a segunda coluna mostra o índice do tempo do arquivo de dados, na sequência tem-se longitude, latitude e pressão central.

No ciclone em estudo, nota-se que a PNMM decresce de 1011 hPa no dia 23 às 0000 UTC para 975 hPa no dia 25 às 0600 UTC (Figura 14a). Embora o dia 25 tenha sido indicado como o de decaimento (dissipação) do ciclone por conta da junção dele com outro centro de baixa pressão, a PNMM ainda é mais baixa nesse dia. Isso ocorre associado a dois fatos: (a) devido à junção com outra área de baixa pressão e (b) devido às latitudes médias serem um ambiente de mais baixa pressão,

assim, se o ciclone é “somado” a esse ambiente, a PNMM fica mais baixa (Figura 12f).

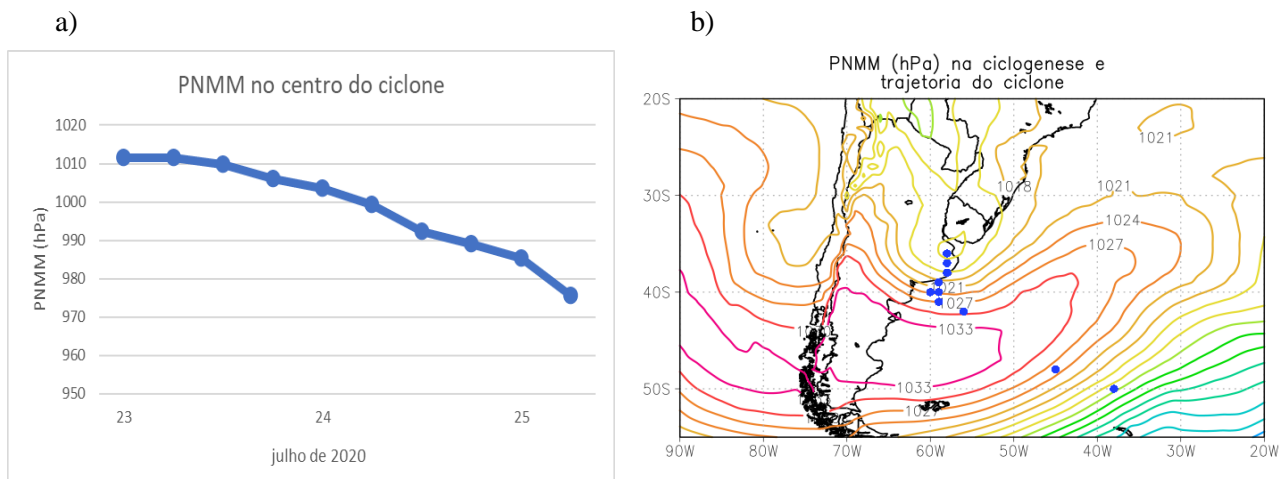


Figura 14. (a) Evolução temporal da PNMM (hPa) no centro do ciclone entre às 0000 UTC do dia 23 e 0600 UTC do dia 25 de julho de 2020 (figura gerada no *Excel*) e (b) PNMM (linhas) às 0000 UTC do dia 23 de julho de 2020 e a trajetória do ciclone (círculos azuis) indicada na Figura 13. A trajetória foi plotada com o “script\_03.gs”.

### Ciclogênese

O aparecimento de um ciclone (ciclogênese) no campo da PNMM é registrado quando surge a primeira isóbara (linha de mesma PNMM) fechada, como mostrado na Figura 12b. Entretanto, não basta apenas a identificação do ciclone. Muitas vezes é necessário compreender os processos físicos que levam a sua formação. Por isso, diferentes variáveis atmosféricas são representadas em mapas para auxiliar essa tarefa. A primeira investigação é referente à presença de contrastes térmicos em superfície. Para isso, na Figura 15a-b é apresentada a espessura da camada entre 1000 e 500 hPa, já que é uma variável com configuração similar a dos gradientes horizontais de temperatura do ar. Também é mostrada a PNMM e ventos com intensidade superior a 35 m/s em 250 hPa. A presença de linhas de espessura da camada muito próximas indica a presença de gradientes horizontais de temperatura e, isso, é mostrado na Figura 15a-b, principalmente entre o Uruguai e a Argentina. Se há gradientes horizontais de temperatura em superfície isso leva à formação dos jatos em altos níveis (Ynoue et al., 2018).

Os jatos são ventos horizontais em altitude com intensidade superior a 35 m/s (70 nós). Na mesma região com linhas de espessura da camada muito próximas, também se nota a existência de jatos na Figura 15a-b. O contraste térmico na região entre o Uruguai e a Argentina também é mostrado na Figura 15c-d através da temperatura do ar em 850 hPa. Na mesma figura também são

mostrados os vetores do vento e o campo da vorticidade relativa ciclônica (somente os valores negativos). Embora o campo da PNMM não apresentava isóbara fechada às 1800 UTC do dia 22, as variáveis vento e vorticidade relativa já mostravam a assinatura de um giro ciclônico na região entre Uruguai e Argentina. Os painéis do lado esquerdo (a-b) da Figura 15 foram obtidos com o “script\_04.gs” e os do lado direito (c-d) com o “script\_05.gs”.

Já foi mencionado que o ciclone teve contribuição dos contrastes térmicos em superfície para a sua formação. Porém, será que os níveis mais altos da atmosfera também não contribuíram para o desenvolvimento desse sistema? Para responder essa questão, as Figura 16a,c mostram a altura geopotencial e o campo de divergência/convergência em 250 hPa. Pode-se ver um cavado (ondulação no campo da altura geopotencial que está indicado com a linha preta tracejada) e a leste do eixo dos cavados em altos níveis ocorre divergência de massa (seção 3.2). Essa divergência atua removendo massa da coluna atmosférica, o que induz os movimentos ascendentes e a queda de pressão na superfície. A resposta desse processo é a formação do ciclone em superfície. À medida que a pressão atmosférica decresce em superfície, a força do gradiente de pressão da redondeza do sistema atua levando à ocorrência de convergência de massa na região do ciclone em superfície (nota-se que a convergência representada na cor azul na figura ocorre justamente sob a região de divergência



representada na cor laranja em altos níveis) - Figura 16b-d. Os painéis (a-c) da Figura 16 foram gerados

com o “script\_06.gs” e os painéis (b-d) com o “script\_07.gs”.

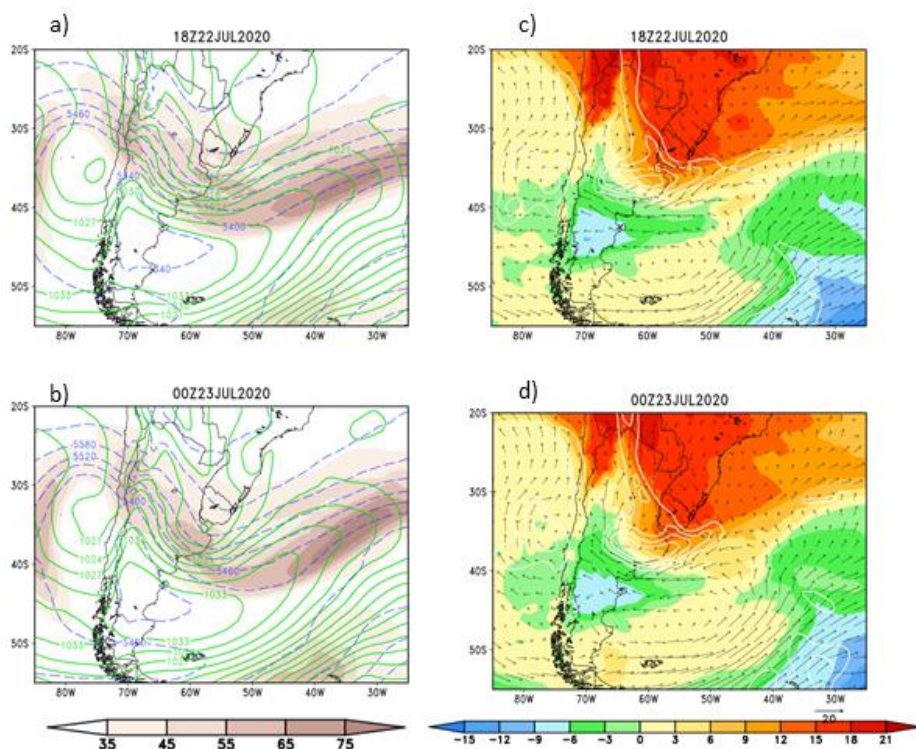


Figura 15. (a-b) PNMM (hPa; linha verde), espessura da camada (1000-500 hPa; linha azul tracejada) e ventos com intensidade superior a 35 m/s (colorido) em 250 hPa e (c-d) temperatura do ar (°C), vetores do vento (setas) e vorticidade relativa ciclônica ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; linhas brancas) em 850 hPa. Os painéis do lado esquerdo foram construídos com o “script\_04.gs” e os da direita com o “script\_05.gs”.

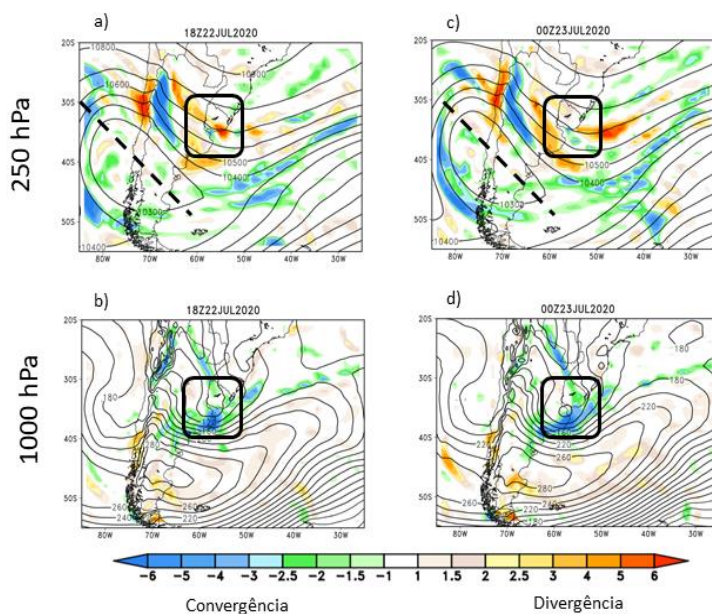


Figura 16. Altura geopotencial (mgp) e divergência de massa ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) no horário prévio à ciclogênese e no horário da ciclogênese: (a-c) 250 hPa e (b-d) 1000 hPa. Nos painéis (a-c), a linha preta tracejada indica a orientação do cavado. Os painéis superiores foram construídos com o “script\_06.gs” e os inferiores com o “script\_07.gs”.

No caso em estudo, as frentes fria e quente só se configuraram a partir do desenvolvimento do ciclone. A convergência de massa também é uma variável muito útil para a localização das frentes (Figura 16b-d). Na Figura 17 é mostrado o traçado das frentes quente e fria sobre o campo da convergência de massa às 0600 UTC do dia 23 de julho de 2020.

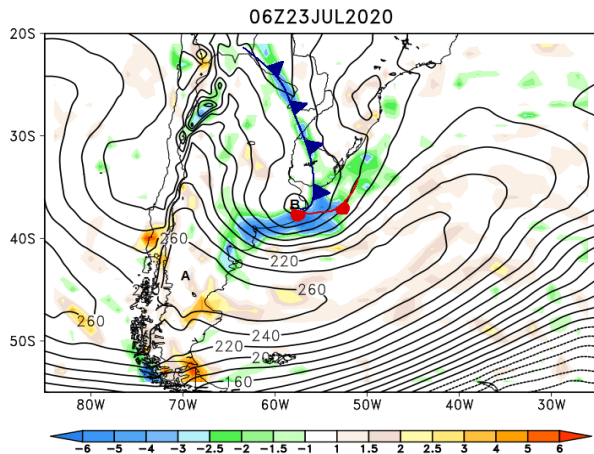


Figura 17. Traçado das frentes fria e quente com base no campo da convergência de massa em 1000 hPa às 0600 UTC do dia 23 de julho de 2020 (traçado foi feito manualmente sobre a imagem).

### Considerações Finais

Este estudo compilou as principais informações sobre os sistemas atmosféricos massas de ar, frentes e ciclones extratropicais, que são fenômenos que atuam constantemente na América do Sul, o que inclui o Brasil. Tais informações permitem ao leitor o entendimento e a análise crítica dos sistemas mencionados. Além disso, foi apresentado um conjunto de *scripts* para introduzir a análise de ciclogênese, mas muitas outras características das frentes e dos ciclones podem ser exploradas a partir deles. Com base nos *scripts* apresentados, é possível prosseguir as investigações do caso apresentado em tempos futuros para identificar, por exemplo, a fase de oclusão das frentes no estágio maduro do ciclone. Espera-se que esse trabalho seja de grande valia em todas as subáreas das Geociências e, também, para aqueles que têm interesse no tema.

### Agradecimentos

Os autores do estudo são especialistas em sistemas sinóticos e o conhecimento adquirido ao longo de suas jornadas nesse tema teve o suporte financeiro de diferentes agências: CAPES, CNPq, FAPESP, FAPEMIG e PETROBRAS. Assim, deixamos nossos agradecimentos a essas agências de fomento. Além disso, a primeira autora agradece o apoio da PROEX-UNIFEI e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ENGIE, que auxiliam projetos de pesquisa e desenvolvimento,

### Referências

- Ahrens, C. D., Henson, R., 2021. *Meteorology Today: an introduction to weather, climate, and the environment*, 12ed. Cengage Learning, Boston.
- Bjerknes, J., Solberg, H., 1922. *Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation*. Geofysiske Publikasjoner, 3, 3-18.
- Bluestein, H. B., 1992. *Synoptic-dynamic Meteorology in Midlatitudes: Observations and theory of weather systems (Vol. 2)*. Taylor & Francis.
- Bueno, P. G., Rehbein, A., Crespo, N. M., Cardoso, A. A., Gozzo, L. F., Tomaziello, A. C. N., Kovalski, M. L., Braga, H. A., Borges, I. V. G., Pinheiro, H. R., Carpenedo, C. B., Reboita, M. S., Drumond, A. R. de M., Pampuch, L. A., Silva, G. A. M. da, Pezza, A., Custodio, M., Llopart, M., Ambrizzi, T., Dutra, L. M. M., Rocha, R. P. da, 2023. *Climate studies group: 25 years of history and scientific production*. *Terræ Didática* 19, e023013. Disponível: <https://doi.org/10.20396/td.v19i00.8671983>. Acesso: 18 jul. 2023.
- Cardozo, A. B., Custódio, I. S., Reboita, M. S., e Garcia, S. R., 2015. *Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o modo anular sul (Climatology of cold fronts over South America and its relation with the southern annular mode)*. *Revista Brasileira de Climatologia*, 17, 9-26. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.40124>.
- Copernicus ECMWF. 2019. *What is reanalysis?* Disponível: <https://www.youtube.com/watch?v=FAGobvUGI24>. Acesso: 12 dez. 2022.
- Conway, E. D., 1997. *An introduction to satellite image interpretation*. JHU Press.

- CPTEC/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Boletim técnico. Disponível: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso: 10 dez. 2021.
- CPTEC/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Acervo de imagens de satélite. Disponível: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>. Acesso: 10 dez. 2021.
- Crespo, N. M., da Rocha, R. P., Sprenger, M., Wernli, H., 2021. A potential vorticity perspective on cyclogenesis over centre-eastern South America. *International Journal of Climatology*, 41, 663-678. <https://doi.org/10.1002/joc.6644>
- da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Dutra, L. M. M., de Jesus, E. M., 2019. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436, 138-156. <https://doi.org/10.1111/nyas.13927>
- de Jesus, E. M., da Rocha, R. P., Crespo, N. M., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., 2021. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America. *Clim Dyn*, 56, 537-557. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05490-1>
- Escobar, G. C. J., Reboita, M. S., Souza, A., 2019. Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. *Atmósfera*, 32(2), 129-141.
- EUMETRAIN. The classical "Polar Front Theory" - the classical "Norwegian Model". Disponível: [http://www.eumetrain.org/satmanu/polar\\_front\\_theory/short\\_description.html](http://www.eumetrain.org/satmanu/polar_front_theory/short_description.html). Acessado: 08 dez. 2021.
- Friedman, R.M., 1999. Constituting the Polar Front, 1919-1920. In: Shapiro, M.A., Grønås, S. (eds) *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*. American Meteorological Society, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-09-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-09-6_4).
- Gan, M. A., Reboita, M. S.. Cyclogenesis and Extra-tropical Cyclones Over Southeastern South America, 2012. Disponível: <http://www.eumetrain.org/satmanu/CM4SH/BrCg/index.htm>. Acesso: 12 dez. 2021.
- Gozzo, L. F., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Sugahara, S., 2014. Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. *Journal of Climate*, 27, 8543-8562. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00149.1>
- Hartmann, D. L., 2015. *Global physical climatology*. Vol. 103. Newnes.
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P., Biavati, G.; Horányi, A.; Muñoz Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Rozum, I.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Dee, D.; Thépaut, J-N., 2018. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present; ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Acesso: 08 dez. 2021. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47
- Mishra, P. K. Frontogenesis process: world patterns and associated weather. Disponível: [https://www.researchgate.net/publication/340916678\\_Frontogenesis\\_Process\\_World\\_Patterns\\_and\\_Associated\\_Weather](https://www.researchgate.net/publication/340916678_Frontogenesis_Process_World_Patterns_and_Associated_Weather) Acesso: 11 dez. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.13601.15207.
- Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56(5), 527-534.
- Pezza, A. B., Simmonds, I., 2005. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters*, 32, L15712. <https://doi.org/10.1029/2005GL023390>
- Reboita, M. S., 2021. Utilização do software GrADS em Ciências Atmosféricas. Disponível em: <https://docs.google.com/document/d/1sK59vcP0siZgO7wOnHeeKBJ-bFcXpaiR/edit?usp=sharing&oid=110268425224542830556&rtpof=true&sd=true>. Acesso: 24.07.2023.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., 2022. Climate system in a nutshell: An overview for understanding climate change. *Int. J. Dev. Res*, 12, 53365-53378.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., 2012. Dynamic and climatological features of cyclonic developments over southwestern South Atlantic Ocean, in Veress, B., Szigethy, J. (Eds.), *Horizons in Earth Science Research*. Nova Science Publishers, Hauppauge, 135-160.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., Custódio, I. S., 2017. Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I-revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 171-186. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., da Rocha, R. P., Custódio, I. S., 2017. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*,

- 32, 509-542. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324002>
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Silva, B. A., Capucin, B. C., da Rocha, R. P., 2021. Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033431. <https://doi.org/10.1029/2020JD033431>
- Reboita, M. S., Marrafon, V. H., 2021. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terræ Didática*, 17, e021032-e021032. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8666028>
- Ribeiro, B. Z., Seluchi, M. E., Chou, S. C., 2016. Synoptic climatology of warm fronts in Southeastern South America. *International Journal of Climatology*, 36, 644-655. <https://doi.org/10.1002/joc.4373>
- Seluchi, M. E., 1995. Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclogénesis sobre el este de Sudamérica. *Geofísica Internacional*, 34(2), 171-186.
- Stull, R., 2017. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*, version 1.02b. The University of British Columbia, Vancouver. Disponível: [https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical\\_Meteorology/prmet102/Practical\\_Meteorology-v1.02b-WholeBookColor.pdf](https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/prmet102/Practical_Meteorology-v1.02b-WholeBookColor.pdf). Acesso: 12 dez. 2021.
- Wallace, J. M., Hobbs, P. V., 2006. *Atmospheric science: an introductory survey*. Vol. 92. Elsevier.
- Winterle, P., Steinbruch, A., 2000. *Geometria Analítica*. Makron Books, São Paulo.
- Wood, K., Yanase, W., Beven, J. et al. 2023, Phase transitions between tropical, subtropical, and extratropical cyclones: A review from IWTC-10. *Tropical Cyclone Research and Review*. Doi: 10.1016/j.tcr.2023.11.002
- Ynoue, R. Y.; Reboita, M. S.; Ambrizzi, T.; Da Silva, G. A., 2017. *Meteorologia: noções básicas*, 1ed. Oficina de Textos, São Paulo.