



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

IMPACTO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO, DO ENOS E DO SAM SOBRE OS SISTEMAS FRONTAIS NA AMÉRICA DO SUL

Catharine Freire de Caldas

Relatório Final de Iniciação Científica do
programa PIBIC/INPE, orientado pela Dra. Iracema
Fonseca de Albuquerque Cavalcanti e Dra.
Fernanda Cerqueira Vasconcellos

URL do documento original:

INPE
São José dos Campos

2022

**IMPACTO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO, DO ENOS E DO SAM SOBRE
OS SISTEMAS FRONTAIS NA AMÉRICA DO SUL**

Catharine Freire de Caldas

Relatório Final de Iniciação Científica do
programa PIBIC/INPE, orientado pela Dra. Iracema
Fonseca de Albuquerque Cavalcanti e Dra.
Fernanda Cerqueira Vasconcellos

INPE
São José dos Campos
2022

RESUMO

Os padrões de teleconexões afetam a América do Sul (AS), tanto de leste-oeste quanto de norte-sul, impactando no clima deste continente. A Oscilação Antártica (Antarctic Oscillation) ou Modo Anular do Sul (SAM - Southern Hemisphere Annular Mode) e o El Niño Oscilação Sul (ENOS) são dois importantes padrões de teleconexão que influenciam a AS. Ambos os padrões possuem impactos sobre o gelo marinho antártico. No estudo anterior, foram observadas as influências conjuntas do gelo marinho no Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA) e no Mar de Weddell (MWD) durante combinações das fases do SAM e do ENOS na frequência das frentes frias na AS e no Oceano Atlântico e adjacente, durante o mês de setembro. Para entender os mecanismos físicos relacionados às configurações com máxima frequência de frentes frias foram realizados compostos de diversas variáveis. Os resultados mostraram que durante as máximas frequências de frentes frias sobre o continente, em ambos os mares, houve uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS, sugerindo uma área mais propensa à atuação de sistemas transientes, enquanto categoria dos compostos de máxima frequência de frentes frias sobre o oceano, foi observada uma intensificação da ASAS, favorecendo a formação de sistemas transientes mais ao sul no oceano. Trens de ondas contribuíram para essas anomalias. Também foi verificado um gradiente positivo anômalo de temperatura do ar nas regiões de maior frequência de frentes, observado em todas as configurações de máxima frequência. Além de um gradiente positivo de temperatura da superfície do mar (TSM) entre a região extratropical e subtropical do Atlântico Sul. Continuando as análises desses mecanismos, foram observados através da divergência do Fluxo de Takaya e Nakamura regiões de fontes de ondas de Rossby, sendo coerente com os resultados encontrados anteriormente. Identificou-se regiões com aumento de nebulosidade próximas aos locais de máxima frequência de frentes frias, diminuindo a incidência de onda curta e reduzindo a emissão de ondas longas em todas as categorias. As anomalias dos fluxos de calor latente e sensível apresentaram comportamentos opostos nas categorias de máxima frequência no continente para ambos os mares. Indicando em geral uma maior liberação de calor latente na região. A mesma relação não foi observada para os compostos de máximas frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente, com exceção do MBA.

Palavras-chaves: Teleconexões; Gelo Marinho Antártico; Frente Fria; Balanço de Energia

LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (tstudent). 12
- Figura 4.2: Fase do SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa; 13
- Figura 4.3: Fase do SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. 14
- Figura 4.4: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Mínima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student). 15
- Figura 4.5: Fase do SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa; 16
- Figura 4.6: Fase do SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B)

Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas17

Figura 4.7: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico. Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student).18

Figura 4.8: Fase do SAM positivo, La Niña, máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM ($^{\circ}C$); D) Velocidade Potencial ($10^6 m^2 s^{-1}$ - linha) e vento divergente ($m s^{-1}$ - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN ($10^{-6} m s^{-2}$ colorido) e função corrente ($m^2 .s^{-1}$ - linha) em 200 hPa19

Figura 4.9: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.21

Figura 4.10: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student).22

Figura 4.11: Fase do SAM negativo, El Niño e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM ($^{\circ}C$); D) Velocidade Potencial ($10^6 m^2 s^{-1}$ - linha) e vento divergente ($m s^{-1}$ - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN ($10^{-6} m s^{-2}$ colorido) e função corrente ($m^2.s^{-1}$ - linha) em 200 hPa;23

- Figura 4.12: Fase do SAM negativo, El Niño e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.24
- Figura 4.13: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro fase SAM positivo, La Niña Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico).....25
- Figura 4.14: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM ($^{\circ}C$); D) Velocidade Potencial ($10^6 m^2 s^{-1}$ - linha) e vento divergente ($m s^{-1}$ - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN ($10^{-6} m s^{-2}$ colorido) e função corrente ($m^2.s^{-1}$ - linha) em 200 hPa;26
- Figura 4.15: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.27
- Figura 4.16: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase do SAM positivo, La Niña – Mínima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico).....28
- Figura 4.17: Fase do SAM positivo, La Niña e Mínima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM ($^{\circ}C$); D) Velocidade Potencial ($10^6 m^2 s^{-1}$ - linha) e vento divergente ($m s^{-1}$ - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN ($10^{-6} m s^{-2}$ colorido) e função corrente ($m^2 s^{-1}$ - linha) em 200 hPa;29

Figura 4.18: Fase do SAM positivo, La Niña e Mínima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas30

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MBA...	9
Tabela 3.2: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MWD.	10

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos Geral e Específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3. DADOS E METODOLOGIA	8
4. RESULTADOS	11
4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)	11
4.1.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente).....	11
4.1.2 SAM negativo, El Niño, Mínima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente).....	15
4.1.3 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no oceano).....	18
4.2 Mar de Weddell (MWD).....	21
4.2.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no continente).....	21
4.2.2 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano).....	24
4.2.3 SAM positivo, La Niña, Mínima extensão do gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano).....	27
5. CONCLUSÃO.....	31
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas frontais afetam a América do Sul (AS) durante todo o ano (COURA DA SILVA; CAVALCANTI, 2002; ANDRADE, 2005), influenciando o tempo e o clima sobre este continente e algumas vezes causando geadas e friagens (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009). Os padrões de teleconexões também possuem impactos sobre o clima deste continente tanto de leste-oeste, quanto de Norte-Sul (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2009). O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um importante padrão de teleconexão que tem impactos em todo planeta, inclusive na AS. Esse fenômeno ocorre através de uma alteração no sistema oceano-atmosfera na região do Pacífico tropical (TEDESCHI, 2013). Os períodos positivos do ENOS (El Niño) ocorrem quando há o aquecimento anormal na temperatura superficial e subsuperficial das águas do Pacífico equatorial central e leste, já na fase negativa (La Niña) ocorre o oposto, isto é, o resfriamento anormal dessas águas (PHILANDER, 1990). Alguns trabalhos como o de Vera et al. (2004) e Tedeschi (2013) relacionam os impactos do ENOS ao regime de precipitação na AS, considerando suas fases positivas ao valor abaixo do normal no norte e nordeste da AS, e acima no Sudeste da AS (SEAS). Na La Niña, os inversos na precipitação foram notórios. No entanto, seus impactos na precipitação no restante do continente não são evidentes. A Oscilação Antártica ou Modo Anular do Sul (*Southern Hemisphere Annular Mode - SAM*) é o principal modo de variabilidade climática que afeta a região extratropical no Hemisfério Sul (HS), sendo caracterizado como uma “gangorra” de massa entre as latitudes médias e polares (THOMPSON; WALLACE, 2000; FOGT; MARSHALL, 2020). Gillett et al. (2006) demonstraram os impactos do SAM no HS, relacionando a fase positiva do SAM a um significativo aquecimento na Argentina e secas no sul da AS. Vasconcelos et al. (2019) analisaram o impacto, mês a mês, das fases do SAM na AS. Os resultados indicam que o SEAS e parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são as regiões mais afetadas pelo SAM. Entretanto, seu impacto difere mês a mês e nem sempre há uma influência oposta entre as fases do SAM. As mudanças na extensão de gelo marinho podem afetar todo o planeta, evidenciando a complexidade nas interações no sistema gelo-atmosfera. O gelo marinho possui inúmeros efeitos marcantes no HS (YUAN; MARTINSON, 2000). Estudos recentes fazem análises 2 das extensões de gelo marinho

e seus impactos nos principais padrões de teleconexões. Pezza et al. (2012), verificou através de modelos as correlações de extensão de gelo marinho Antártico com o SAM e o ENOS, apontando seus efeitos conforme o mar antártico analisado. No primeiro ano do projeto (CALDAS, 2020; CALDAS ET AL., 2020), mostrou-se a relação dos padrões de teleconexão em conjunto com a extensão de gelo marinho antártico para o Mar de Weddell (MWD) e o setor do Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA) na frequência de frentes frias na AS. Nessas análises, foram observadas diferenças nas atuações das frentes sobre o continente e o Oceano Atlântico adjacente. Em geral, pode ser notada a atuação da La Niña e SAM positivo nas análises de frequências máximas sobre o Oceano Atlântico adjacente à AS, variando somente a extensão do gelo marinho. No continente, foi observada a fase positiva do ENOS, junto com a fase negativa do SAM em ambas as extensões mínima e máxima do gelo marinho no MBA. Já para o MWD, foram observadas as máximas frequências no El Niño e SAM negativo, mas somente na máxima extensão de gelo marinho. No estudo posterior, envolvendo os possíveis mecanismos básicos, foi observada a intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) nos compostos envolvendo máxima frequência de frente fria no oceano considerando as categorias com ambos os mares (MBA e MWD). Isso fez com que as frentes ficassem concentradas mais ao oceano (CALDAS, 2021). Além disso, os resultados apresentaram um gradiente positivo de TSM entre extratropicos e subtropicos do Oceano Atlântico Sul em todas as categorias.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

O projeto tem como principal objetivo avaliar as frequências de frentes frias na AS, nos extremos de gelo marinho antártico para o MBA e MWD, com e sem a atuação de fases do SAM e do ENOS. Assim, no presente trabalho pretende-se investigar os mecanismos envolvidos na máxima frequência de frentes frias para o mês de setembro, resultados encontrados no primeiro ano do projeto (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020) e como continuação das análises iniciadas em Caldas (2021). Mantendo foco nas categorias onde foram encontradas as maiores frequências de frentes frias: para o MBA, SAM negativo,

El Niño e Máxima extensão de gelo marinho, SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho, ambos para o continente; SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho, no Oceano Atlântico adjacente à AS. Para o segundo mar de estudo (MWD), as fases SAM negativo, El Niño e Máxima extensão, no continente e SAM positivo, La Niña e Máxima extensão; SAM positivo, La Niña e Mínima extensão, ambas as categorias para o Oceano Atlântico no MWD. Nesta etapa, como continuação das análises dos mecanismos físicos (CALDAS, 2021) o presente relatório conta com os seguintes objetivos específicos:

- I. Realizar a construção de compostos referentes ao cálculo do Balanço de Energia na região da AS e do Atlântico Sul adjacente em cada categoria.
- II. Confeção de compostos da divergência do fluxo de atividade ondulatória, usando a metodologia de Takaya e Nakamura (2001).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os padrões de teleconexões impactam toda a AS, afetando o clima desse continente (CAVALCANTI; AMBRIZZI, 2009). O SAM é um importante modo de teleconexão que influencia a AS (GILLET et al., 2006; VASCONCELLOS, 2012; VASCONCELLOS et al., 2019). Os Modos Anulares atuam em ambos os hemisférios. No Hemisfério Norte (HN) é nomeado de Modo Anular Norte ou Oscilação Ártica, já no HS, SAM (THOMPSON; WALLACE, 2000). Eles atuam no campo da pressão, caracterizando uma “gangorra” N-S de massa atmosférica. Em sua fase positiva, a pressão é inferior às normais nas regiões polares e superior nas latitudes médias. Na fase negativa ocorre o oposto, as latitudes médias encontram-se com pressão abaixo do normal, enquanto as polares, acima. Reboita et al. (2009) fizeram a análise sazonal entre os sistemas ciclônicos no HS e o SAM, durante o período de 1980 a 1999. Neste trabalho foi observado, na fase negativa do SAM, a trajetória dos ciclones em todo o HS movendo-se mais para norte, comparada à fase positiva. Para a AS e Atlântico Sul, observou-se na fase negativa do SAM intensas atividades frontogenéticas e anomalias positivas de precipitação na costa

do SEAS. Em geral, na fase positiva, os autores observaram condições inversas. Vasconcelos et al. (2019) analisaram o impacto, mês a mês, das fases do SAM na AS. Os autores encontraram em diversos meses, anomalias positivas (negativas) de temperatura no SEAS e em parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil durante a fase negativa (positiva) do SAM. Entretanto, a abrangência dessas anomalias difere entre os meses. Em fevereiro e dezembro, há um dipolo de anomalia de temperatura, com anomalias positivas (negativas) no SEAS e negativas (positivas) ao norte na fase negativa (positiva) do SAM. Esse trabalho também indicou um enfraquecimento (intensificação) da Zona de Convergência do Atlântico Sul na fase negativa (positiva) do SAM. A região do SEAS mostra anomalias positivas (negativas) de precipitação na fase negativa (positiva) do SAM, durante os meses de março a junho e dezembro. O ENOS é uma alteração no sistema oceano atmosfera, com impactos no tempo e clima de todo o globo. Na fase positiva, El Niño, ocorre o aumento anormal na temperatura das águas superficiais e subsuperficiais do Pacífico equatorial central e leste, resultando em mudanças na atmosfera próxima ao oceano; enquanto na fase negativa, La Niña, ocorre o resfriamento dessas águas (PHILANDER, 1990; TEDESCHI, 2013). Alguns estudos apontam as influências do ENOS na AS (GRIMM, 2003; VERA et al., 2004; TEDESCHI, 2013). De acordo com Grimm (2003) e Vera et al. (2004), durante o El Niño (La Niña), há precipitação abaixo do normal no norte da AS, e acima do normal na região do SEAS. Nos períodos de La Niña ocorre o oposto, isto é, acima do normal no norte da AS e abaixo no SEAS. No entanto, os efeitos desse padrão de teleconexão na precipitação ainda não são claros em todo continente. Tedeschi (2013) analisou os impactos dos El Niños Canônico e Modoki na precipitação sobre AS. Nestes resultados, destacou-se que os impactos se diferem nos dois tipos de El Niño. Por exemplo, no verão e primavera, há uma anomalia de seca caracterizada nessa região, referente ao El Niño Modoki, que não se encontra presente no Canônico. Fedorova e Carvalho (2000) analisaram a relação das frentes com ENOS. Os resultados mostram que as ocorrências das frentes frias de latitude entre 20 e 40°S foram maiores no ano de El Niño do que de La Niña. Ainda sobre o estudo de climatologia de frentes frias, Andrade (2005) buscou avaliar as frequências de frentes frias a partir de 11 áreas na AS no período de 1980 a 2002. As análises se deram a partir

das estações do ano, obtendo valores em torno de 3-6 frentes em média. Observou-se também que, para o mês de setembro, há maiores frequências das frentes frias sobre a AS, quando comparado a fevereiro, sendo as maiores frequências ao sul da AS. Neste estudo também foram observados casos envolvendo o ENOS, ao analisar a variabilidade interanual, não observando padrão para um número máximo ou mínimo em eventos de El Niño e La Niña. No entanto, observa-se que para o sul e sudeste do Brasil, o máximo ocorreu em 1984, no período que se iniciou uma La Niña. Estudos apontam o vínculo entre o SAM e ENOS. Carvalho et al. (2005), por exemplo, mostraram que no verão, as fases negativas SAM são predominantes quando as anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM), convecção e circulação são semelhantes ao El Niño, ocorrendo o oposto em sua fase negativa. Cai et al. (2011) avaliaram simulações envolvendo comparações entre modelos do *Coupled Model Intercomparison Project phase 3* (CMIP3), entre outros. Nesse estudo, observou-se a influência dos padrões de 5 teleconexões mencionados, numa relação estatisticamente significativa, demonstrando a ideia de que os sinais do ENOS são direcionados e projetados para o SAM. Na maioria dos modelos, foi observado uma correlação negativa entre o SAM e o ENOS, i.e., quando o índice ENSO é positivo e o índice SAM negativo e vice-versa. Essa relação entre o ENOS e SAM ocorre por meio de variações na célula Hadley e na circulação média meridional no HS. A localização da quebra da onda de Rossby no setor do Pacífico muda acentuadamente durante os eventos ENOS, que influenciam a polaridade do SAM (FOGT; MARCHALL, 2020). As mudanças na extensão de gelo marinho têm influência em todo o globo. O gelo marinho tem impactos no clima do HS, o seu isolamento ajuda a preservar o calor dos oceanos e afetando as correntes oceânicas e o equilíbrio do clima (YUAN; MARTINSON, 2000). Alguns trabalhos têm destacado a variação espacial e temporal da extensão de gelo marinho Antártico com padrões de variabilidade, particularmente o ENOS e o SAM (PEZZA et al., 2008; PEZZA et al., 2012; CLEM; FOGT, 2013; CLEM et al., 2016, entre outros). No estudo de Pezza et al. (2012), foram verificadas as maiores correlações positivas entre o ENOS e o gelo marinho no Mar de Bellingshausen e maiores correlações negativas no Pacífico Sul/Mar de Ross. Outras áreas de correlação moderada ocorrem no MWD, positiva, e no Oceano Antártico entre

os setores do Atlântico e Índico, com correlação negativa. Naquele estudo, foram observadas correlações positivas entre o gelo marinho e o SAM para todas as áreas, com exceção do Mar de Bellingshausen/Weddell Oeste. Assim resultando, que o ENOS e o SAM atuariam em união na extensão de gelo marinho antártico. Em Oliva et al. (2021), analisou-se as relações entre os padrões de teleconexões tropicais, subtropicais e extratropical em conjunto com a extensão de gelo marinho antártico no setor de MWD, utilizando a técnicas de estatísticas e análises de compostos para o extremo de gelo marinho. Assim, foi verificada que a fase negativa do SAM estaria associada às maiores extensões de gelo, enquanto a fase oposta a menores extensões. Conexões climáticas entre a variabilidade do gelo marinho na Antártica e o clima de diversas regiões da AS têm sido muito investigadas nas últimas décadas, principalmente devido à importância do continente antártico no equilíbrio do sistema climático global, bem como no controle da circulação atmosférica do HS (e.g. HALL; VISBECK, 2002; RAPHAEL et al., 2010; PEZZA et al., 2012; CARPENEDO; AMBRIZZI, 2016). O estudo de Carpenedo e Ambrizzi (2016) verificou que, para o setor do MWD, nos eventos extremos de retração (expansão), identificou-se um aquecimento (resfriamento) da temperatura da superfície do mar (TSM) neste setor e no Atlântico Sul. Também foi verificado, durante os eventos extremos de expansão um reforço do ramo descendente da 6 célula Polar ao sul de 70° S e enfraquecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel entre 70° e 50° S. Já para a célula de Hadley, notou-se um enfraquecimento do ramo ascendente da célula de Hadley em 10° e 20° N, enquanto o ramo descendente intensifica na região equatorial. No setor do MBA, nos extremos de retração (expansão), observou-se um aquecimento (resfriamento) da TSM neste setor e no Pacífico Sul. Para as células de circulação meridional, durante os eventos de expansão, notaram-se um fortalecimento do ramo ascendente da célula de Ferrel em toda a troposfera, enquanto houve um enfraquecimento do ramo descendente da célula Polar. Na célula de Hadley, foi visualizado na região equatorial há um fortalecimento do ramo ascendente da célula de Hadley entre 5° N e 10° N. No entanto, durante os eventos extremos de retração há um fortalecimento do ramo descendente de Hadley em toda a troposfera em torno de 35° S, enquanto o ramo ascendente da célula de Ferrel, notou-se enfraquecimento em torno de 40° S, indicando

um possível deslocamento para sul da célula de Ferrel. No estudo de Parise et al. (2022), foi utilizado o Modelo CM2.1 e extremos de gelo marinho positivo para avaliar os impactos no clima da AS, com foco na região com maiores índices de precipitação e em sistemas atmosféricos de cada estação do ano no HS. Os resultados mostraram mudanças significativas na sazonalidade do regime de precipitação, temperatura do ar e umidade impulsionada por mudanças de circulação do vento e os níveis inferior e superior. No ano anterior do projeto, realizou-se compostos com as frequências de frentes frias para cada categoria de (ex. máxima extensão de gelo em anos de El Niño e SAM negativo, máxima extensão de gelo em anos de La Niña e SAM negativo, etc). Neste, foram observadas as seguintes características nas frequências das frentes para MBA: no continente, foram observadas maiores frequências nas fases do SAM negativo, El Niño e em ambos os extremos de gelo marinho; no oceano Atlântico adjacente, as maiores frequências ocorreram nas fases SAM positivo, La Niña e máxima extensão de gelo marinho. Para o MWD: no continente, as maiores frequências de frentes frias foram encontradas nas fases do SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo marinho; para o oceano, as maiores frequências ocorreram no SAM positivo, La Niña e máxima e na mínima extensão de gelo marinho (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). Em Caldas (2021), foram analisados os possíveis mecanismos físicos que explicassem esses resultados. Assim, foram observadas para a categoria dos compostos de máxima frequência de frentes frias sobre o oceano, uma intensificação da ASAS, favorecendo a formação de sistemas transientes mais ao sul no oceano. Enquanto para as máximas frequências de frentes frias sobre o continente, em ambos os mares, houve uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS, sugerindo uma área mais propensa à atuação de sistemas transientes. Trens de ondas contribuíram para essa anomalia. Também foi notória a presença de um gradiente positivo de anomalia de TSM no Atlântico Sul entre os extratropicais e subtropicais em todas as categorias.

3. DADOS E METODOLOGIA

Neste estudo utilizou-se saídas a cada 6 horas da Reanálise Era-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), para o período de 1981-2010 (DEE et al., 2011). As variáveis abordadas incluem geopotencial e componentes meridional e zonal do vento em 200 hPa, cobertura total de nuvens, fluxo líquido de radiação de solar na superfície, fluxo líquido de radiação terrestre na superfície, fluxo de calor sensível na superfície e fluxo de calor latente na superfície. Na TSM, foram utilizados os dados da NOAA, *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5* (ERSSTv5 – HUANG ET AL., 2017). Para a identificação dos padrões de teleconexão, utilizou-se o índice ENOS (região Niño 3.4, disponível em <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) e o índice SAM usado em Vasconcellos et al. (2019), obtido por comunicação pessoal. Para os extremos de gelo marinho antártico, os dados também foram obtidos por comunicação pessoal, onde foram delimitadas as seguintes longitudes para o MBA de -130,573 até -61,249 e para o MWD de -60,235 até 0,165, usados em Oliva et al. (2021) e Vasconcellos et al. (2022). Para esse estudo, focou-se o mês de setembro, que é caracterizado pela máxima extensão climatológica de gelo marinho antártico (CAVALIERI; PARKINSON, 2008). Os critérios estabelecidos para a identificação automática das frentes frias neste trabalho foram que houvesse, no intervalo de um dia para o outro, queda da temperatura do ar em 925 hPa de no mínimo 2°C, aumento da pressão a nível médio do mar maior que 2 hPa e a mudança na componente meridional do vento em 925 hPa de norte (negativo) para de sul (positivo). Para a elaboração desse método objetivo que detectasse frentes para cada ponto de grade da AS e Oceano Atlântico adjacente, um programa utilizando a linguagem computacional python – jupyter foi criado. Os dados em cada ponto de grade da região (50°S-10°N e 85°-30°W) foram transformados em matrizes (tamanho referente a latitude e longitude) em cada saída de média diária do mês correspondente. O programa realizou uma busca em que cada ponto de grade onde os critérios da frente fria fossem obedecidos, foi somado o valor 1 ao ponto correspondente em uma matriz de mesmo tamanho. Essa matriz inicialmente continha em cada ponto o valor zero. Quando os critérios ocorreram em mais

de um dia seguido no mesmo ponto de grade, foi contabilizado como a mesma frente (somado somente 1 na matriz de frequência mensal). A data da frente foi considerada como o dia em que a frente iniciou naquele ponto de grade. Ou seja, caso uma frente em um ponto de grade tenha iniciado no final de um mês e terminado no início do mês seguinte, ela foi contabilizada como do mês em que ela iniciou. O cálculo da frequência mensal de frentes frias em cada ponto de grade foi realizado para os 30 anos (1981-2010) (CALDAS, 2020; CALDAS et al., 2020). Para identificar a máxima frequência de frentes frias em cada setor, foram realizados mapas com a frequência de frentes frias para cada composto envolvendo anomalias de gelo marinho positiva e negativa em conjunto com as fases do ENOS e SAM, para o mês de setembro. Como visto no relatório anterior, a máxima frequência de frentes frias em setembro considerando o MBA encontra-se na fase SAM negativo, El Niño, tanto na máxima quanto na mínima extensão de gelo marinho no MBA. Já para o Oceano Atlântico adjacente, a máxima frequência de frentes ocorre na fase de SAM positivo, La Niña, máxima extensão no MBA (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MBA

SAM negativo, El Niño, MBA Máxima extensão de gelo marinho	1991, 2009, 1997, 1994
SAM negativo, El Niño, MBA Mínima extensão de gelo marinho	2002, 2006, 1987
SAM positivo, La Niña, MBA Máxima extensão de gelo marinho	1995, 2010

Considerando o MWD, também para setembro, observou-se maior frequência de frentes nas fases para a AS durante SAM negativo, El Niño, máxima extensão de gelo marinho no MWD e para o oceano SAM positivo, La Niña, tanto na máxima quanto na mínima extensão de gelo marinho (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Anos envolvendo cada categoria em que foram observadas máximas frequências de frentes frias no mês de setembro, na análise com o MWD.

SAM negativo, El Niño, MWD Máxima extensão de gelo marinho	2009, 1997, 2006, 1991, 1987
SAM positivo, La Niña, MWD Máxima extensão de gelo marinho	1995
SAM positivo, La Niña, MWD Mínima extensão de gelo marinho	2010

Assim, para o estudo dos mecanismos físicos das máximas frequências de frente frias de cada setor, utilizando os anos das categorias mencionadas (Tabela 3.1 e 3.2), foram criados compostos, a fim de entender as possíveis causas para as configurações encontradas. No ano anterior, iniciou-se as análises através da criação de compostos com diversas variáveis, tais como: TSM, geopotencial em 700 hPa, componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical (ω) e temperatura do ar em diversos níveis. Neste ano do projeto, continuou-se esse estudo. Para a realização dos compostos utilizou-se o programa computacional OpenGrads, na versão 2.2.1. Os seguintes compostos para as componentes do Balanço de Energia em superfície foram criados: fluxo líquido de radiação solar, fluxo líquido de radiação terrestre, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Vale ressaltar, que para os fluxos analisados as saídas fornecidas pela reanálise utilizada possuem como padrão valores positivos para baixo, enquanto os valores negativos são para cima. Compostos de cobertura total de nuvens também foram confeccionados para ajudar na interpretação dos resultados do Balanço de Energia. Confeccionou-se também compostos da divergência do fluxo de atividade ondulatória (TN), usando a metodologia de Takaya e Nakamura (2001). A formulação do Fluxo TN pode ser elaborada em coordenadas cilíndricas no plano de latitude e longitude. Para isso, são usadas as componentes meridional e zonal do vento, sendo a componente estacionária do fluxo de 200 hPa uma função (por exemplo, com a subtração da média Euleriana), utilizando a latitude, longitude, raio da terra e pressão (200 hPa). Assim, para avaliar onde as fontes de ondas são emitidas ou ocultadas, a divergência de TN é usada, onde TN é dado por:

$$\begin{aligned}
W = \frac{pcos\Phi}{2|U|} & \left\{ \frac{U}{a^2cos^2\Phi} \left[\left(\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda^2} \right] \right. \\
& + \frac{U}{a^2cos^2\Phi} \left[\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \frac{\partial\Psi'}{\partial\Phi} - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda\partial\Phi} \right] \frac{U}{a^2cos^2\Phi} \left[\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \frac{\partial\Psi'}{\partial\Phi} - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda\partial\Phi} \right] \\
& \left. + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda^2} \right] \right\} + C_u M
\end{aligned}$$

Onde, U e V são as médias da componente zonal e meridional do vento, respectivamente; Ψ' é a componente estacionária da função corrente em 200 hPa, Φ é a latitude, λ é a longitude, a é o raio da Terra, p o nível de pressão (200 hPa). A quantidade C_v e M , representam a velocidade de fase na direção zonal e a transferência de momento por onda, respectivamente. Então $C_v M$ nos dá o efeito de propagação de fase da onda atmosférica. Neste trabalho, temos como principal interesse nas ondas estacionárias, para isso $C_v M$ é zero. Os valores positivos (negativos) da divergência do fluxo de TN indicam regiões de fonte (sumidouro) de ondas de Rossby. Para a melhor compreensão dos resultados da divergência do fluxo de TN, eles foram plotados em conjunto com compostos de função corrente em 200 hPa. Além disso, de anomalias de linha de corrente em 200 hPa e 850 hPa, TSM, Velocidade Potencial e vento divergente em 200 hPa, resultados do ano anterior, também foram apresentados nesse relatório para uma análise conjunta e completa da parte de fontes e atividades ondulatórias. Os compostos de Balanço de Energia e TSM contaram com a significância estatística, para isso foram utilizadas o teste t-student, com nível de confiança de 95% (WILKS, 2006), exceto para os compostos que contém somente um ano em sua categoria.

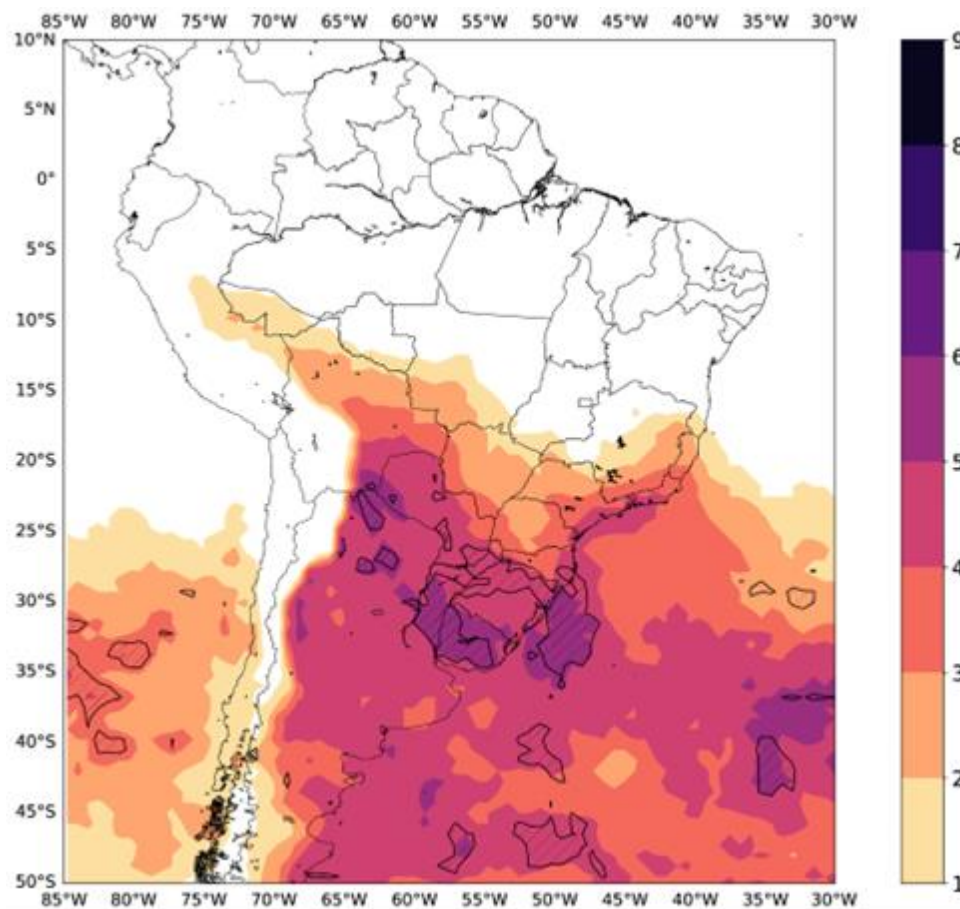
4. RESULTADOS

4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)

4.1.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente)

Iniciaremos as análises dos compostos para MBA com a fase do SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo (Figura 4.1), categoria em que foram observadas as maiores frequências de frentes frias na AS (CALDAS, 2020; CALDAS et al.; 2020). Nota-se que os maiores valores ocorrem no SEAS.

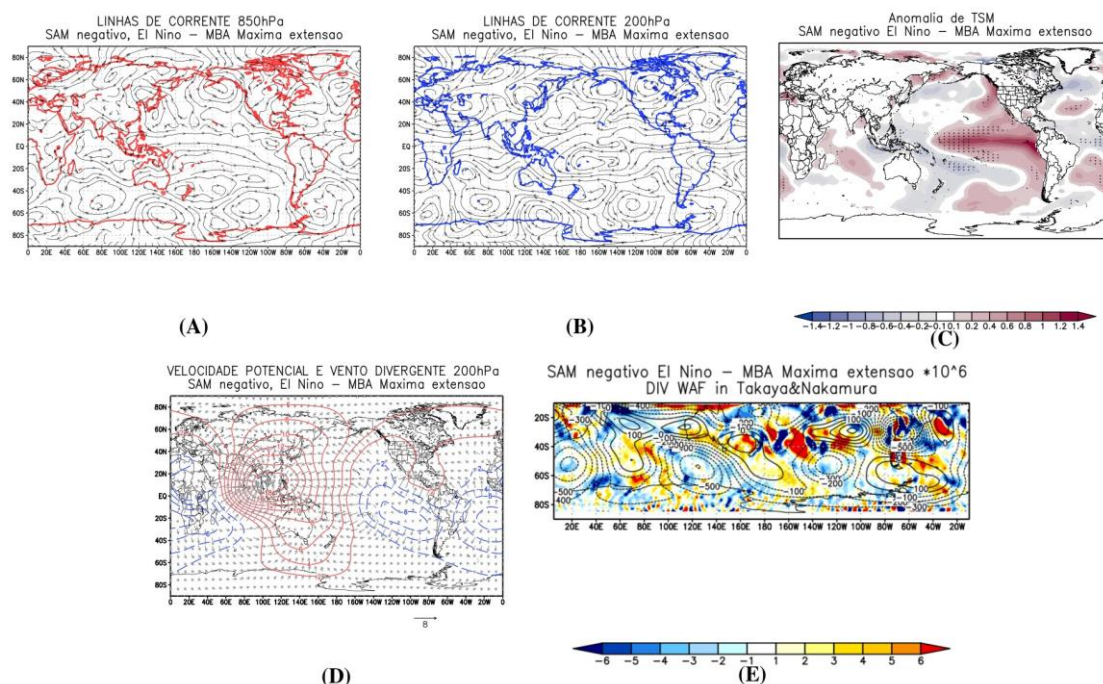
Figura 4.1: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (tstudent).



Na Figuras 4.2C, foram observados em baixos níveis um padrão de onda 3 em latitudes médias e altas, gerando uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul extratropical e no sul da AS. Nota-se também em baixos níveis (Figura 4.2A) no continente uma anomalia do norte da Amazônia até o SEAS e uma anomalia anticiclônica na região tropical. (CALDAS, 2021). O padrão de onda 3 em latitudes médias e altas também foi observado em altos níveis, indicando uma configuração barotrópica (Figura 4.2D). Além disso, é possível visualizar na Figura 4.2D um trem de ondas tipo-PSA iniciando com uma

anomalia anticiclônica na região do Oceano Pacífico Equatorial, alcançando o Atlântico e a AS. No Pacífico equatorial, nota-se na Figura 4.2B uma anomalia positiva de TSM, típica de episódios de El Niño. Esse aquecimento gera uma convergência em baixos níveis, e, conseqüentemente, uma divergência em altos níveis, como é visto na Figura 4.2E. Esses resultados se mostram coerentes com a Figura 4.2C (Figura 4.2D), indicando a presença de uma anomalia ciclônica (anticiclônica) em baixos (altos) níveis. A divergência do Fluxo de TN (Figura 4.2A) apresenta valores positivos nessa região, confirmando uma possível fonte das ondas de Rossby.

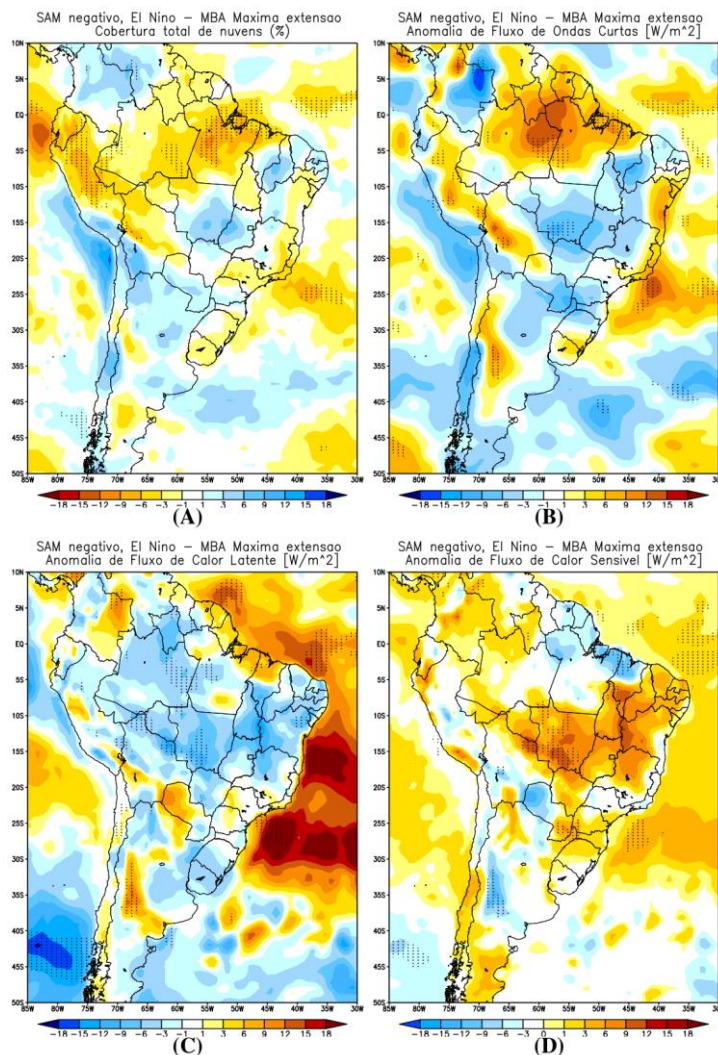
Figura 4.2: Fase do SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa;



O composto de anomalia de cobertura total de nuvem mostra a presença da nebulosidade no SEAS, região de máxima frequência de frentes frias (Figura 4.3A). Iniciando as análises do Balanço de Energia com a anomalia de fluxo líquido de onda curta em superfície (Figura 4.3B), podemos observar valores negativos em grande parte do continente, principalmente na região onde foram encontradas a máxima frequência de frentes frias para as fases em análise. Esses valores indicam que há uma menor chegada

de radiação de onda curta na superfície, causadas pela presença da nebulosidade na região (Figura 4.3A). Para os fluxos de calor latente e sensível (Figuras 4.3C-D, respectivamente), podemos identificar relações opostas entre eles em todo o continente. Ou seja, regiões com anomalias negativas (positivas) no fluxo de calor latente indicando maior (menor) liberação do fluxo para a atmosfera, e anomalias positivas (negativas) no fluxo de calor sensível, indicando menor (maior) liberação de calor sensível para a atmosfera. Nota-se que a maior contribuição do calor latente ocorre no continente, com contribuição também do Atlântico extratropical.

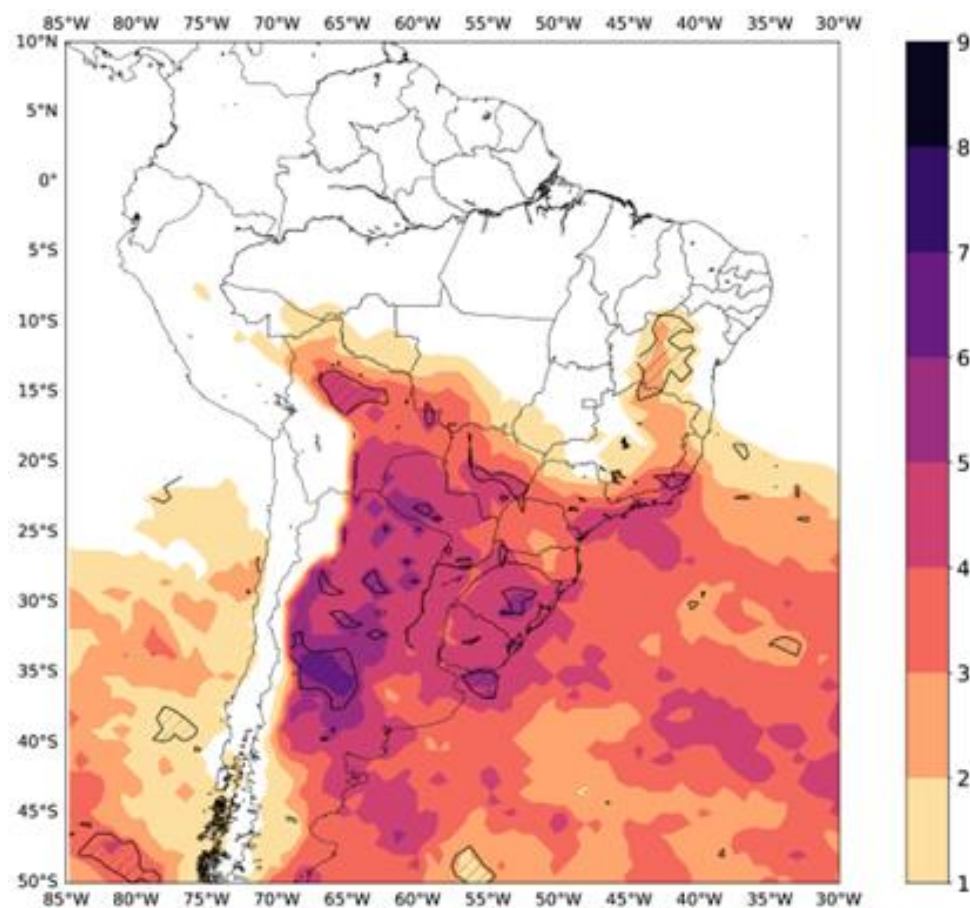
Figura 4.3: Fase do SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.



4.1.2 SAM negativo, El Niño, Mínima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no continente)

Para a análise da fase do SAM negativo, El Niño, Mínima extensão de gelo marinho antártico no MBA, podemos notar na Figura 4.4, assim como na fase de máxima extensão (Figura 4.1), a mínima extensão também apresentou maiores frequências de frente fria no continente (CALDAS, 2020; CALDAS et. al, 2020). Entretanto, a máxima frequência ocorre na Argentina em torno de 35°S. Nota-se também uma maior atuação de frentes frias em latitudes mais baixas.

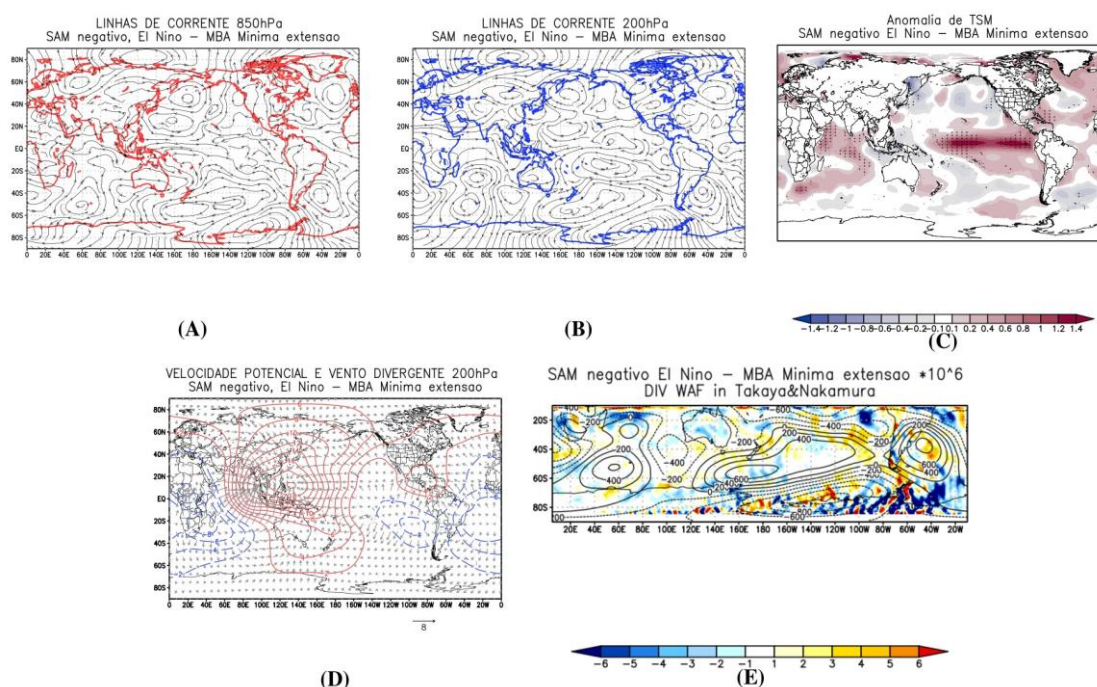
Figura 4.4: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Mínima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student).



Analisando os campos de linhas de corrente em 200 hPa (Figuras 4.5A-B), podemos identificar dois trens de ondas, um em latitudes médias em baixos e altos níveis, com

estrutura barotrópica, e outro trem de ondas tipo-PSA em altos níveis, vindo do Pacífico Central tropical até a AS. Esses trens de ondas influenciam a formação de uma anomalia ciclônica alcançando o Atlântico e a maior parte da AS, favorecendo a atuação de frentes frias. O trem de ondas de origem tropical é proveniente da divergência anômala em 200 hPa (Figura 4.5D). A divergência anômala em altos níveis pode ser explicada pela anomalia positiva de TSM (Figura 4.5C), onde o aquecimento geraria convergência (divergência) em baixos (altos) níveis (Figura 4.5D). Na divergência do fluxo de TN (Figura 4.5E), podemos visualizar anomalias positivas na região onde foram observados o início do trem de ondas de origem tropical, confirmando a fonte das ondas de Rossby.

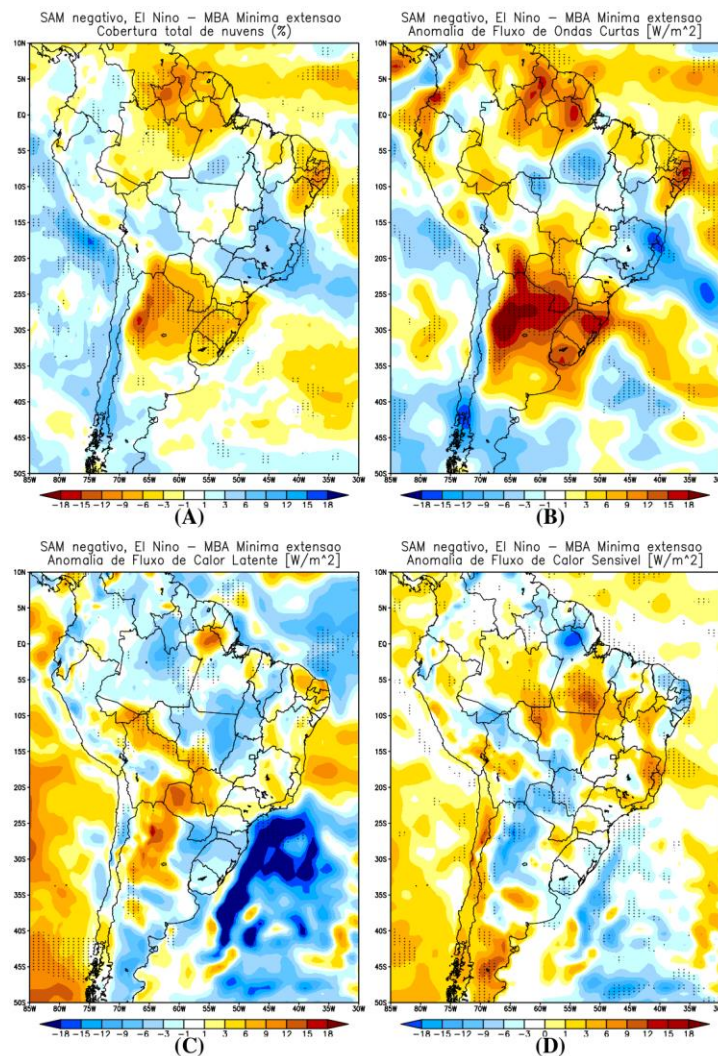
Figura 4.5: Fase do SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa;



Na Figura 4.6A, podemos notar uma maior nebulosidade numa faixa com orientação NW-SE passando pela Bolívia até a Região Sudeste do Brasil e Atlântico. Também há maior nebulosidade no continente ao sul de 35°S. Esses resultados são coerentes com uma maior atuação de frentes em latitudes mais baixas e com o máximo de frentes frias próximo de 35°S (Figura 4.4). Por outro lado, há uma menor nebulosidade na região do SEAS. O

composto de anomalia de radiação líquida de onda curta (Figura 4.6B) apresenta-se coerentes com a nebulosidade (Figura 4.6A). Há uma menor (maior) radiação solar incidente, i.e. valores negativos (positivos). A região ao sul de 35°S apresenta maior fluxo de calor latente (valores negativos) e menor de calor sensível (valores positivos), indicando uma maior contribuição do calor latente (Figuras 4.6C-D, respectivamente). Enquanto região com a banda de nebulosidade com orientação NW-SE, ocorre o oposto, mostrando uma contribuição do calor sensível, apesar da nebulosidade. Nota-se uma grande liberação de calor latente Atlântico extratropical e subtropical, o que pode ajudar a alimentar as frentes frias.

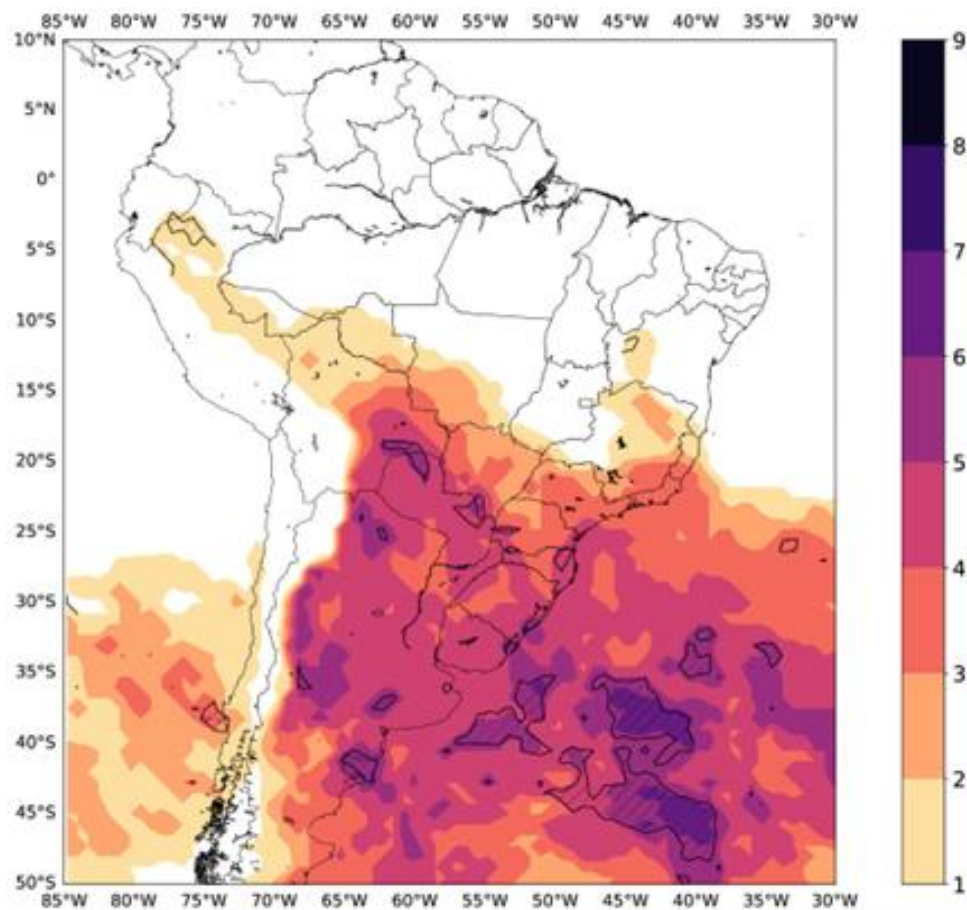
Figura 4.6: Fase do SAM negativo, El Niño e Mínima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas



4.1.3 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (máxima frequência de frentes frias no oceano)

Na fase do SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho antártico no MBA, Figura 4.7, podemos notar a maior frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente, principalmente ao sul de 35°S, possuindo também uma maior área significativa na região (CALDAS, 2020; CALDAS et. al, 2020).

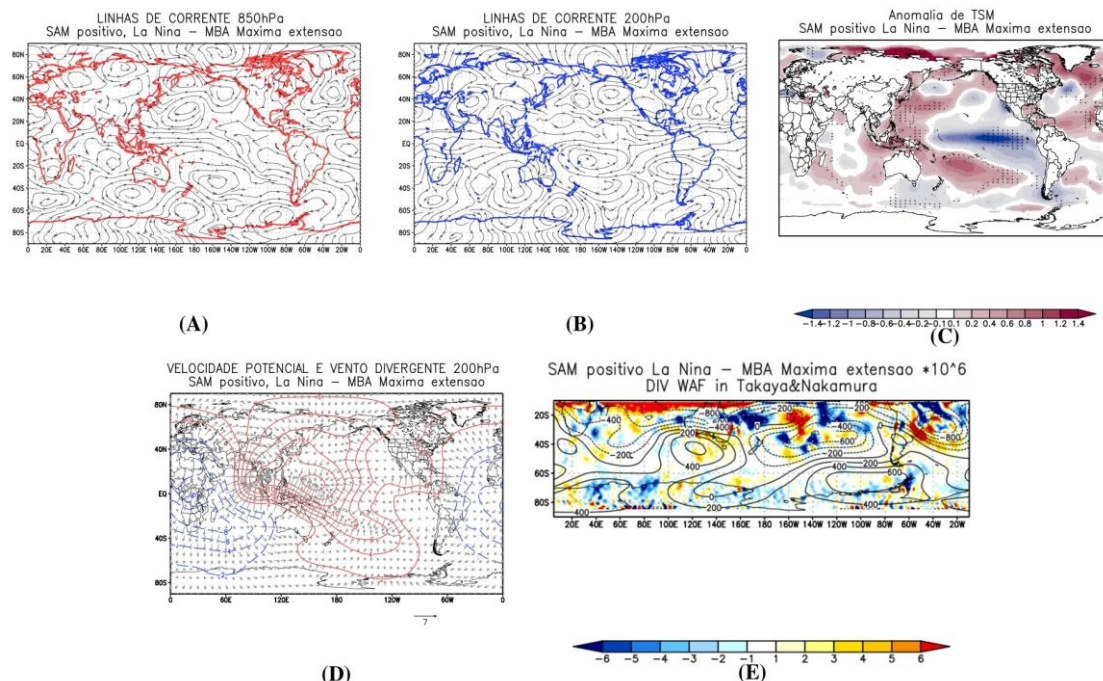
Figura 4.7: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MBA (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico. Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t-student).



Nas Figuras 4.8A-B, pode-se observar um padrão de onda 3 em latitudes médias e altas do HS tanto em baixos, quanto em altos níveis, numa configuração barotrópica (CALDAS, 2021). Também foi observado um trem de onda tipo-PSA em altos níveis (Figura 4.8B), porém iniciado no Índico próximo de Madagascar. Ambos os trens de onda

geraram um amplo centro anticiclônico anômalo em torno de 30°S na AS e oceanos adjacentes. Esses trens de ondas influenciam uma anomalia anticiclônica em baixos níveis sobre a região subtropical, que favorece a intensificação do ASAS (Figura 4.8A). O trem de ondas tipo-PSA é gerado devido ao aquecimento identificado nas anomalias positivas de TSM (Figura 4.8C) próxima a Madagascar, a oeste da Austrália e a leste da Nova Zelândia. O aquecimento gera convergência em baixos níveis (vide anomalias ciclônicas na Figura 4.8B) e divergência anômala em altos níveis. Tanto a região próxima de Madagascar, quanto a próxima da Austrália mostram ventos divergentes e velocidade potencial negativa (Figura 4.8D). Já a região a leste da Nova Zelândia mostra divergência do vento, embora apresente velocidade potencial positiva. A divergência do fluxo de TN apresenta valores positivos na região do Índico e a leste da Nova Zelândia (Figura 4.8E), indicando fontes de ondas de Rossby nessas regiões e corroborando os resultados anteriores.

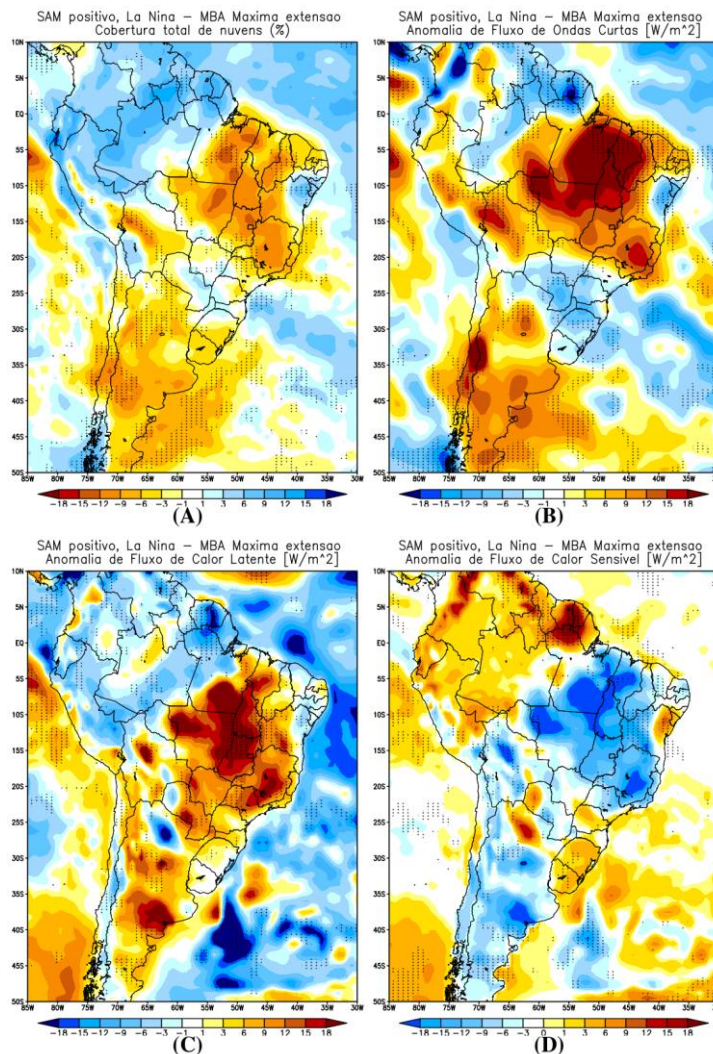
Figura 4.8: Fase do SAM positivo, La Niña, máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial (106 m² s⁻¹ - linha) e vento divergente (m s⁻¹ - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10⁻⁶ m s⁻² colorido) e função corrente (m² .s⁻¹ - linha) em 200 hPa



Para a análise da cobertura total de nuvens, Figura 4.9A, podemos observar a presença de nebulosidade próxima a região onde foram observadas as maiores frequências de frente

frias no oceano em torno de 40°W. Na Figura 4.9B, podemos visualizar anomalias negativas (menor radiação solar incidente) na região de 40°W, sendo coerente com a cobertura total de nuvens (Figura 4.9A). Na anomalia de fluxo de calor latente (Figura 4.9C), podemos visualizar anomalias negativas em quase todo o Atlântico, incluindo a região de máxima frequência de frentes, o que indicaria uma maior liberação do calor latente, ajudando a retroalimentar a frente nesta região. Na anomalia de fluxo de calor sensível (Figura 4.9D), podemos visualizar uma relação oposta, possuindo valores positivos. No entanto, em torno de 55-50°W podemos notar uma área de valores negativos para ambos os fluxos, indicando tanto a liberação do fluxo de calor latente quanto sensível (Figuras 4.9C-D, respectivamente). No geral, para o continente podemos notar valores negativos de calor latente e positivos de calor sensível. Ou seja, regiões com anomalias negativas (positivas) no fluxo de calor latente indicando maior (menor) liberação do fluxo para a atmosfera, e anomalias positivas (negativas) no fluxo de calor sensível, indicando menor (maior) liberação de calor sensível para a atmosfera.

Figura 4.9: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MBA para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

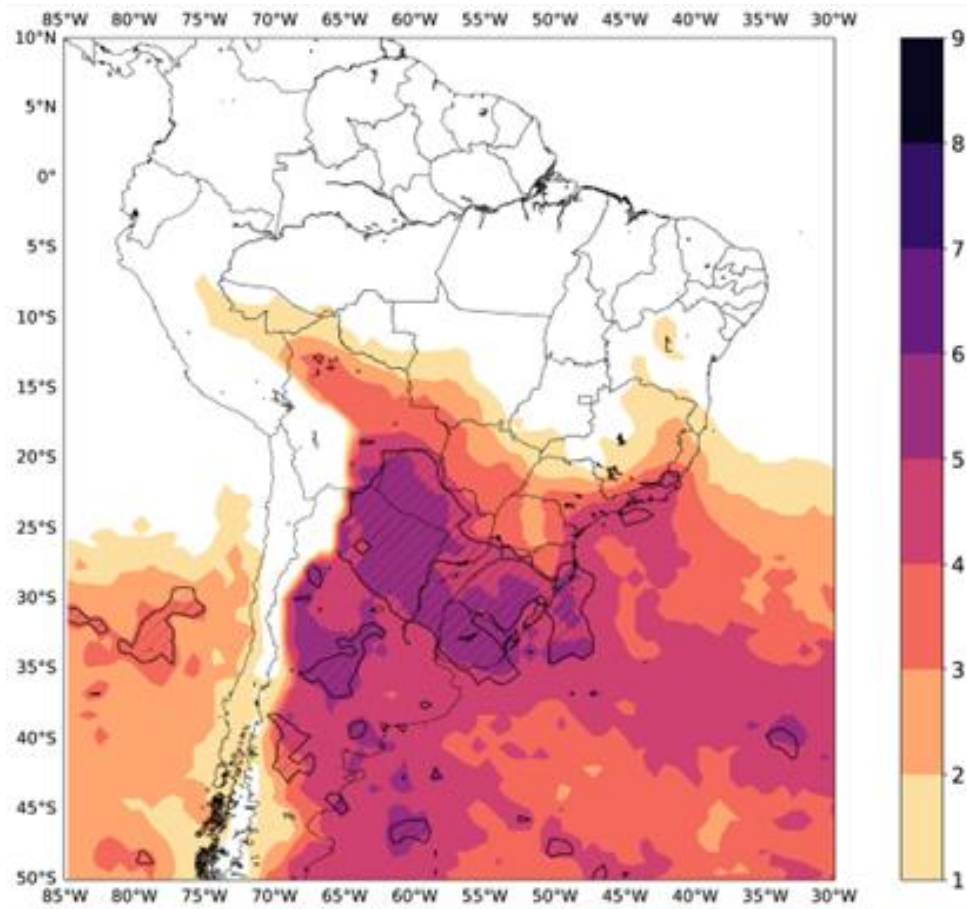


4.2 Mar de Weddell (MWD)

4.2.1 SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no continente)

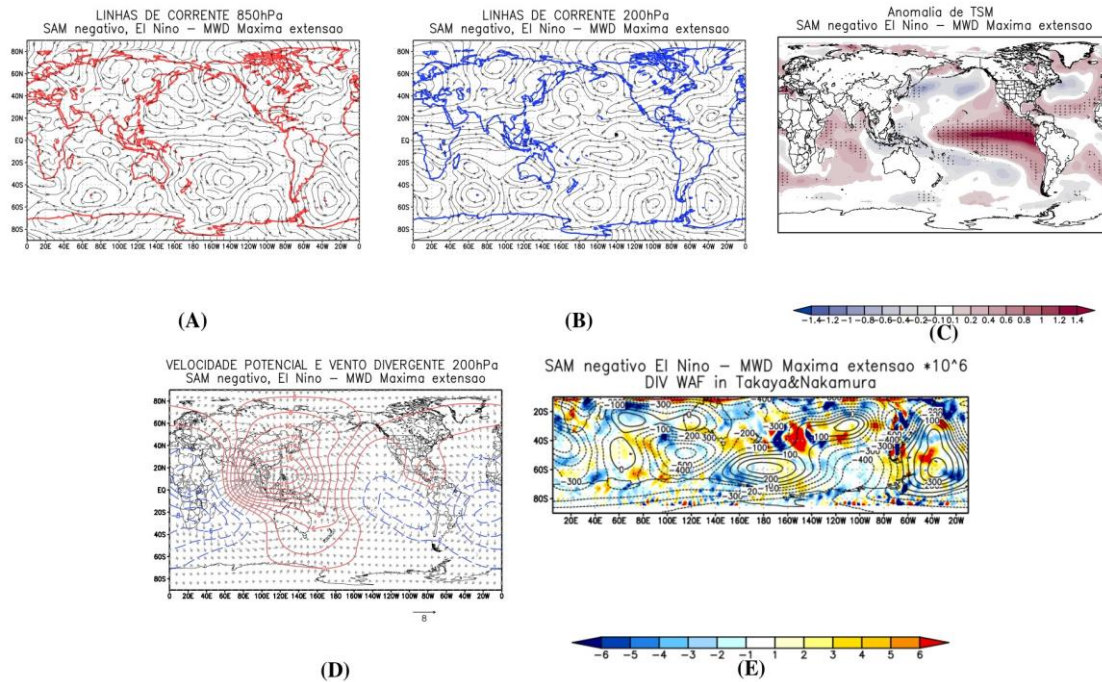
Iniciando as análises para o MWD, podemos visualizar na Figura 4.10 a máxima frequência de frentes frias no continente, nas fases do SAM negativo, El Niño, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (CALDAS, 2020; CALDAS et. al, 2020). Nota-se que o máximo ocorre na região do SEAS.

Figura 4.10: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase SAM negativo, El Niño Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no continente). Áreas hachuradas representam intervalo de confiança estatística de 90% (t student).



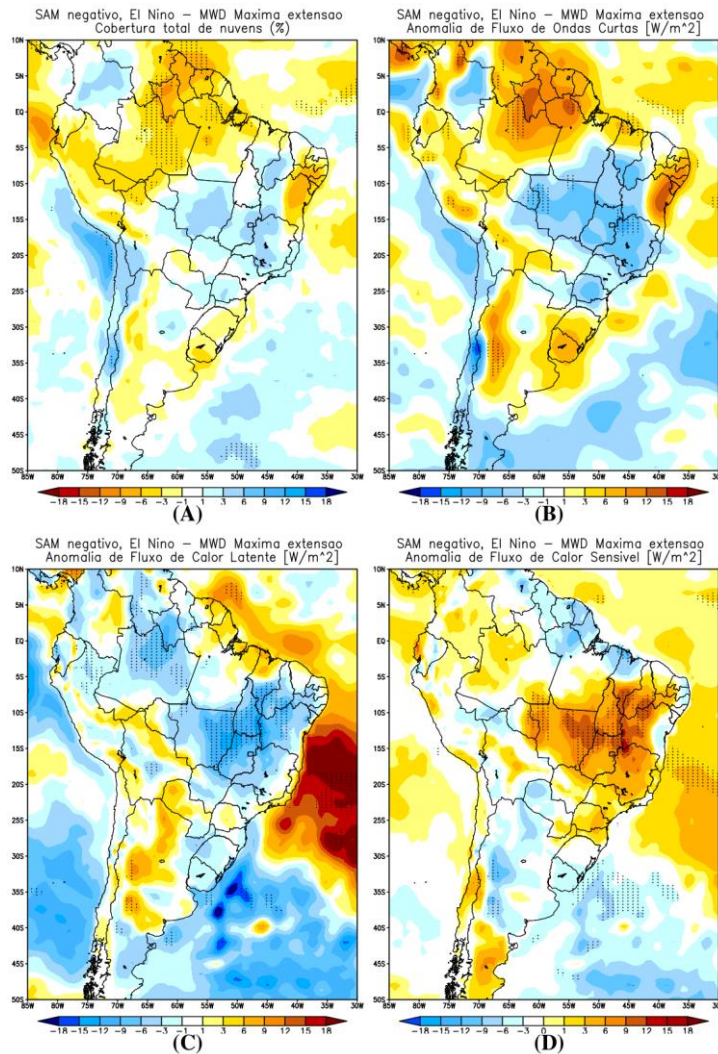
Em Caldas (2021), para os compostos de anomalias de linhas de corrente, Figura 4.11A, foi notado um padrão de onda 3 em latitudes médias e altas, gerando uma anomalia ciclônica no Atlântico Sul. O padrão de onda 3 também pode ser observado em altos níveis (Figura 4.11B) em uma estrutura barotrópica. Em altos níveis, notou-se um trem de ondas tipo-PSA. Analisando as anomalias de linhas de corrente em 200 hPa (Figura 4.11B), podemos visualizar um trem de ondas de origem tropical, iniciando no Oceano Pacífico central. Nessa mesma região, é possível visualizar na Figura 4.11D uma região de divergência em altos níveis, sendo causada pela anomalia positiva de TSM (Figura 4.11C). Para a divergência do fluxo de TN (Figura 4.11E), podemos notar uma região positiva no mesmo local, confirmando a área de início de ondas de Rossby.

Figura 4.11: Fase do SAM negativo, El Niño e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM ($^{\circ}\text{C}$); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ - linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa;



Na Figura 4.12A, podemos visualizar uma área de nebulosidade em grande parte do Brasil e norte da Argentina. Conseqüentemente, podemos encontrar os mesmos padrões apresentando menor incidência de onda curta (valores negativos, Figura 4.12B), coerentes com a figura de cobertura de nuvens. Essa área é compatível com as encontradas nas maiores frequências de frente frias. No entanto, o sul do Brasil apresenta comportamento oposto (cobertura de nuvens negativas, ondas curtas positivas). Para as anomalias de fluxos de calor latente e sensível no continente (Figuras 4.12C-D, respectivamente), podemos notar relação oposta em ambos os compostos na AS, assim, nas regiões que possuem anomalias negativas (positivas) de fluxo de calor latente, estaria indicando a liberação deste fluxo para a atmosfera, enquanto a anomalias positivas (negativas) no fluxo de calor sensível estaria indicando menor (maior) liberação para a atmosfera.

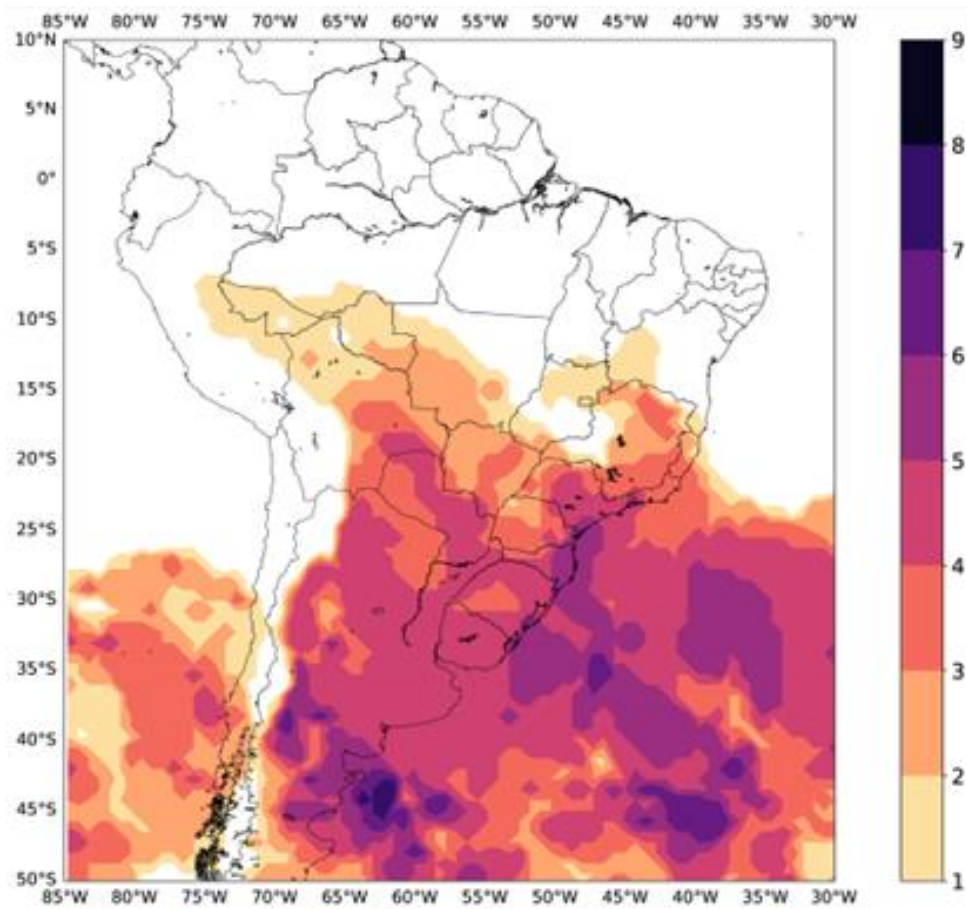
Figura 4.12: Fase do SAM negativo, El Niño e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.



4.2.2 SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano)

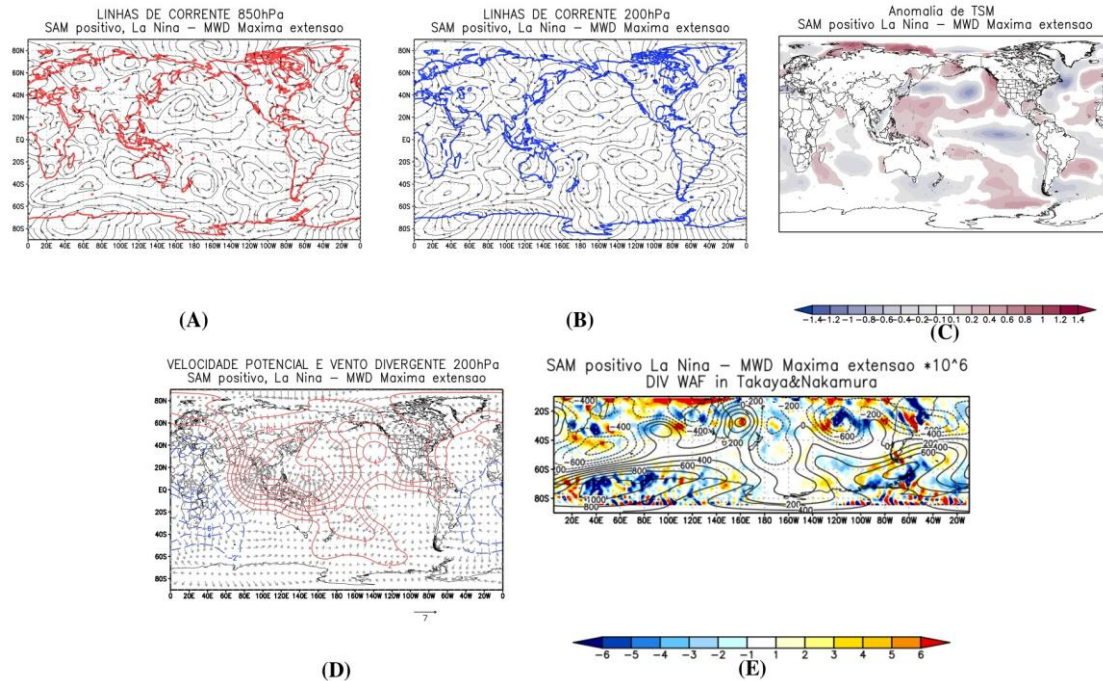
Considerando o MWD, as máximas frequências de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente ocorrem com a fase do SAM positivo, La Niña, Máxima extensão de gelo marinho antártico (Figura 4.13), vale ressaltar que somente um ano se encaixou no conjunto de teleconexões, sendo assim, os compostos a seguir não apresentam significância estatística. Nota-se os máximos valores no oceano ao sul de $40^{\circ}S$.

Figura 4.13: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro fase SAM positivo, La Niña Máxima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico).



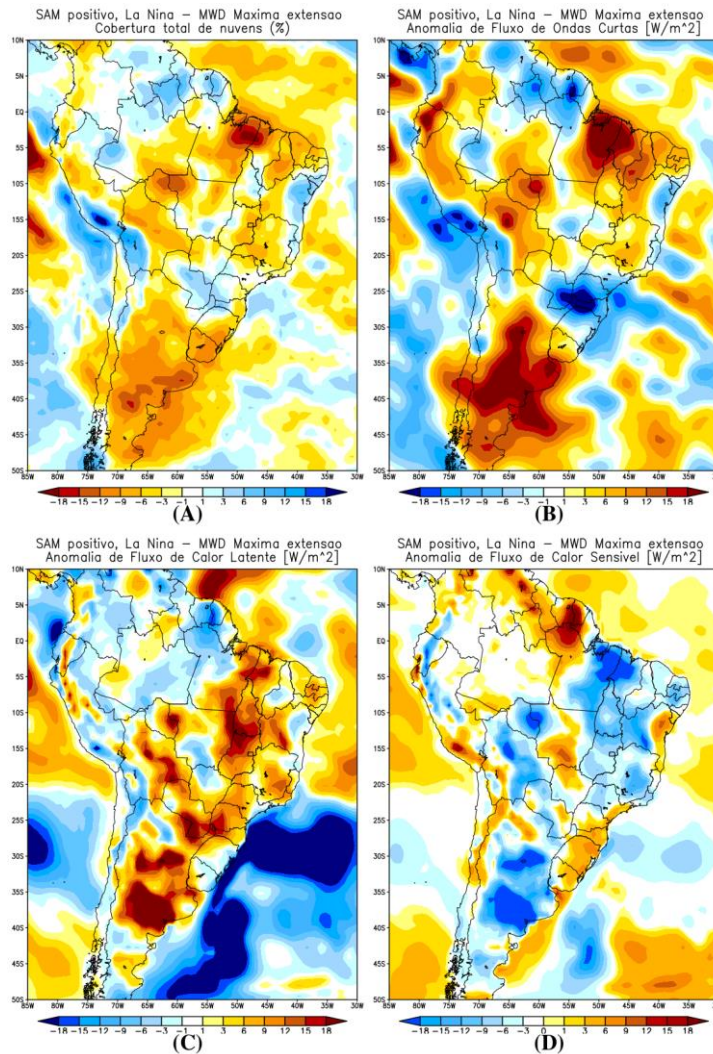
No composto de anomalia de linhas de correntes em 850 e 200 hPa (Figuras 4.14 A-B), foi observado um padrão de onda 2 em latitudes altas no HS, com estrutura barotrópica. Em altos níveis (Figura 4.14B), também é possível notar um trem de onda iniciando ao sul da África e outro iniciando no Pacífico Sul subtropical em aproximadamente 120°W (CALDAS, 2021). Esses trens de ondas são coerentes com as áreas de divergência em 200 hPa (Figura 4.14D). Essas áreas de divergência são originadas por anomalias positivas de TSM (Figura 4.14C). Ambos os trens de ondas apresentam anomalias positivas na divergência do fluxo de TN (Figura 4.14E), indicando fontes de ondas de Rossby.

Figura 4.14: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ - linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa;



Analisando a cobertura total de nuvens (Figura 4.15A), podemos visualizar áreas positivas no oceano e negativas em grande parte da AS, indicando um déficit de nebulosidade na região, resultando valores positivos de anomalias de ondas curtas (Figura 4.15B) e negativas em áreas com maior nebulosidade. Nas Figuras 4.15C-D, podemos notar comportamento semelhante em ambos os fluxos de calor latente e sensível no oceano, possuindo anomalias negativas, ou seja, ambos os fluxos estão sendo liberados para a atmosfera. Vale ressaltar, que essa categoria conta com somente um ano, o que explicaria os valores intensos em algumas regiões.

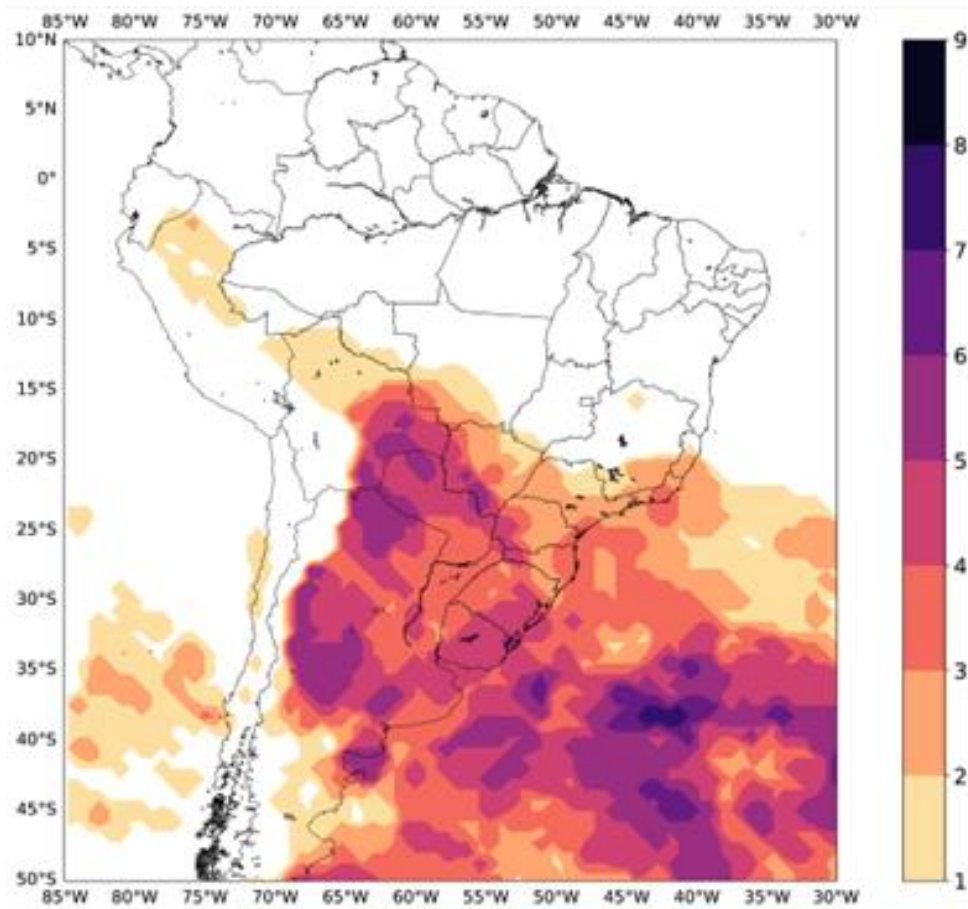
Figura 4.15: Fase do SAM positivo, La Niña e Máxima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.



4.2.3 SAM positivo, La Niña, Mínima extensão do gelo marinho no MWD (máxima frequência de frentes frias no oceano)

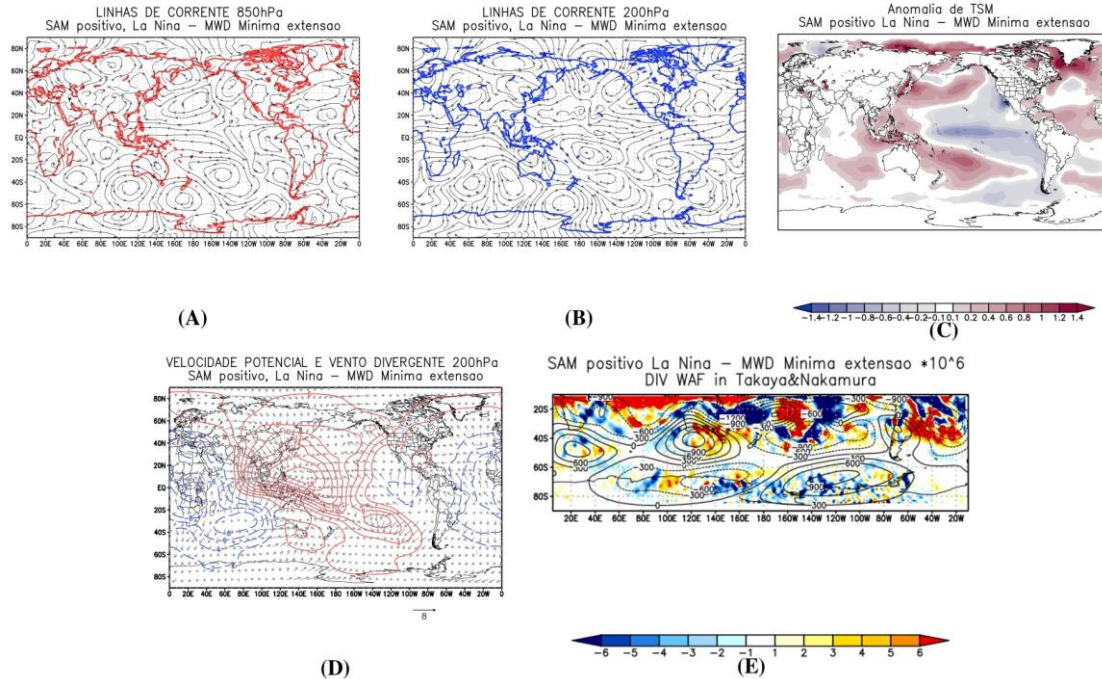
Finalizando as análises com a fase do SAM positivo, La Niña, Mínima extensão do gelo marinho MWD, composto de máxima frequência de frentes frias no Oceano Atlântico adjacente (CALDAS, 2020; CALDAS et. al, 2020). Nota-se que a máxima frequência ocorre principalmente ao sul de 35°S e à leste de 45°W.

Figura 4.16: Composto da frequência de frentes frias para o mês de setembro na fase do SAM positivo, La Niña – Mínima extensão de gelo marinho no MWD (categoria com máxima frequência no Oceano Atlântico)



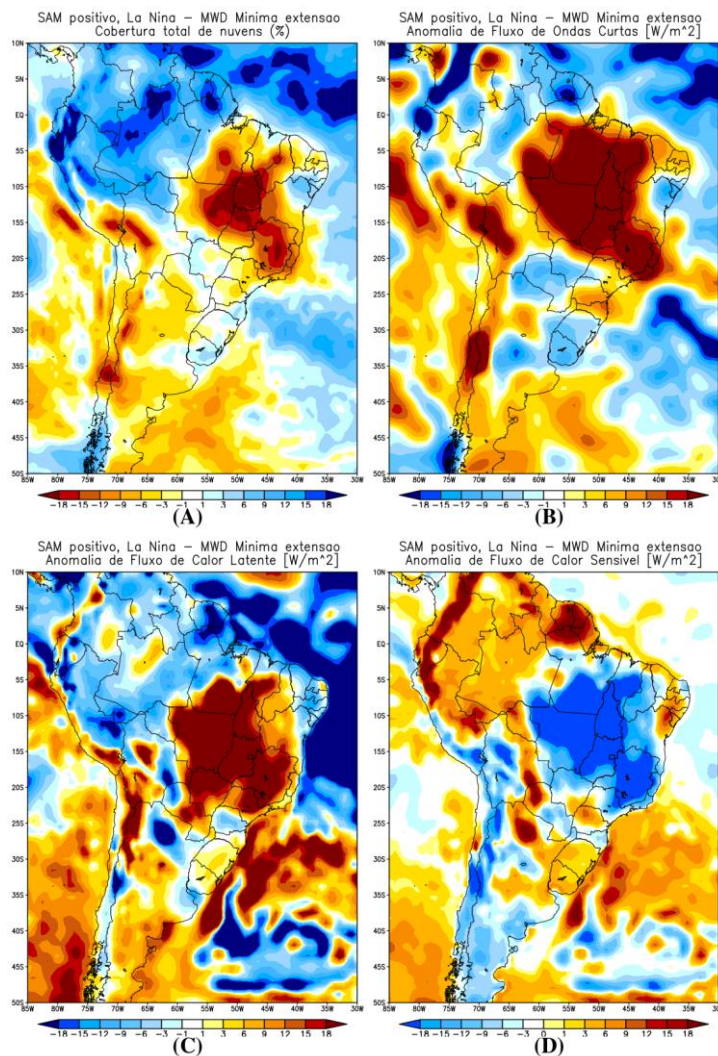
Para os compostos de anomalia de linhas de corrente (Figuras 4.17A-B), foram observados um padrão de onda 3 em latitudes médias e altas do HS tanto em baixos, quanto em altos níveis, com estrutura barotrópica (CALDAS, 2021). Também notou-se em altos níveis um trem de onda tipo U-shape iniciando no Pacífico próximo à AS em aproximadamente 20°S (Figura 4.17B). Analisando os campos de vento em 200 hPa (Figura 4.17B), podemos ver uma área de início de trens de ondas, próxima ao sul da África. Essas áreas são coerentes com as áreas de divergência em 200 hPa (Figura 4.17D). Essas divergências são originadas por anomalias positivas de TSM (Figura 4.17C). Analisando a divergência do Fluxo de TN (Figura 4.17E), observamos anomalias positivas, apontando as áreas de fontes de ondas de Rossby.

Figura 4.17: Fase do SAM positivo, La Niña e Mínima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalias de Linhas de corrente em 850 hPa; B) Anomalias de Linhas de corrente em 200 hPa; C) Anomalia de TSM (°C); D) Velocidade Potencial ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ - linha) e vento divergente (m s^{-1} - vetor) em 200 hPa. E) Divergência do fluxo TN (10^{-6} m s^{-2} colorido) e função corrente ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ - linha) em 200 hPa;



Para a Figura 4.18A, nota-se a presença de nebulosidade no Atlântico Sul à leste de 45°W e podemos observar anomalias negativas de ondas curtas na região (menor incidência de radiação solar). Vale ressaltar que a área em análise é a mesma onde foram identificadas as maiores frequências de frente fria no Oceano. Com a redução de radiação atingindo o solo, há a diminuição de radiação emitida, assim, podemos encontrar anomalias positivas de ondas longas na região analisada, podendo ser observada na Figura 4.18C. As Anomalias de fluxos de calor latente e sensível (Figura 4.18D-E, respectivamente) possuíram o mesmo comportamento na região de máxima frequência de frente no oceano, possuindo em maior parte valores positivos (negativos) ao norte (sul) de 40°S . Assim, para os valores negativos (positivos) há uma maior (menor) liberação de fluxo de calor latente e sensível para a atmosfera.

Figura 4.18: Fase do SAM positivo, La Niña e Mínima extensão de gelo marinho no MWD para o mês de setembro. A) Anomalia de Cobertura total de Nuvens (%); B) Anomalia de Fluxo de onda Curta ($W.m^{-2}$); C) Anomalia de Fluxo de calor latente à superfície ($W.m^{-2}$); D) Anomalia de fluxo de calor sensível à superfície ($W.m^{-2}$). Áreas hachuradas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas



5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisada a divergência do fluxo de TN, para os compostos onde foram identificadas as maiores presenças de frente fria para os setores do MBA e MWD em conjunto com as fases dos fenômenos de teleconexões. Os resultados indicaram fontes de ondas de Rossby coerentes com os trens de ondas encontrados. Para o Balanço de Energia foi visualizada a presença de nebulosidade na região de maiores frequências de frentes frias, tanto no continente da AS quanto no Oceano Atlântico adjacente. Os fluxos de onda curta se mostraram coerentes com a cobertura total de nuvens, ou seja, onde possui maior nebulosidade há uma menor entrada de radiação solar incidente, gerando menor fluxo de ondas curtas. As anomalias de fluxo de calor latente e sensível apresentaram comportamentos opostos nas categorias de máxima frequência de frente fria no continente de ambos os mares, sendo observado uma maior liberação de calor latente no continente. No entanto, somente as categorias do MBA apresentaram essa configuração para as máximas frequências de frentes no Oceano Atlântico adjacente. Os compostos para o MDW de fluxo de calor latente e sensível apresentaram características similares entre si.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185 p. IBI: <6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/Gt9nD>. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/Gt9nD>>.

CAI, W.; SULLIVAN, A.; COWAN, T. Interactions of ENSO, the IOS, and the SAM in CMIP3 models. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1688–1704, 2011.

CALDAS, C. F. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CALDAS, C. F. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CALDAS, C.F.; VASCONCELLOS, F. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, N. O.; LOPES, I. R. Impacto do gelo marinho antártico, do ENOS e do Modo Anular Sul sobre as frentes frias na América do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n.4, p. 229-237, 2020.

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Células de Circulação Meridional Durante os Eventos Extremos de Gelo Marinho Antártico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 251-261, 2016.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of Climate**, v. 18, n. 5, p. 702–718, 2005.

CAVALCANTI, I. F. A.; AMBRIZZI, T. Teleconexões e influências no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. p. 463. ISBN 9788586238925.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. p. 463. ISBN 9788586238925

CAVALIERI, D. J., PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-19. 2008.

CLEM, K. R.; FOGT, R. L. Varying roles of ENSO and SAM on the Antarctic Peninsula climate in austral spring. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, p. 11481-11492, 2013.

CLEM, K. R.; RENWICK, J. A.; MCGREGOR, J.; FOGT, R. L. The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 121, p. 9324-9341, 2016.

COURA DA SILVA, L. H. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Identificação de sistemas frontais em uma simulação de 10 anos com o modelo de Circulação Geral da Atmosfera CPTEC/COLA na Região Sul e Sudeste do Brasil, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553–597, 2011.

FEDOROVA, N., CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 57-72, 2000.

FOGT, R. L., MARSHALL, G. J.; The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. **WIREs Climate Change** v.11, p. 652, 2020.

- GILLETT, N. P.; KELL, T. D.; JONES, P. D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L23704, p. 4, 2006.
- GRIMM, A. M. The El Niño impact on summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, p. 263-280, 2003.
- HALL, A.; VISBECK, M. Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3043–3057, 2002.
- HUANG, B., THORNE, P. W., BANZON, V. F., BOYER, T., CHEPURIN, G., LAWRIK, J. H., MENNE, M. J., SMITH, T. M., VOSE, R. S., ZHANG, H-M. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. **Journal of Climate**, v. 30, p. 8179-8205, 2017.
- OLIVA, F. G., VASCONCELLOS, F. C., SILVA, T. M., PIZZOCHERO, R. M. Extremos de Gelo Marinho Antártico no Mar de Weddell e Relações com Padrões de Teleconexões Climática. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 05, p. 2739-2754, 2021.
- PARISE, C. K., PEZZI, L. P., CARPENEDO C. B., VASCONCELLOS F. C., BARBOSA, W. L., LIMA, L. G. Sensitivity of South America Climate to Positive Extremes of Antarctic Sea Ice. **Anais da Academia Brasileira de Ciências - Geosciences**, v. 94 (suppl 1), p. 1-22, 2022 Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210706>
- PEZZA A. B.; DURRANT, T. H.; SIMMONDS, I., SMITH, I. Southern Hemisphere synoptic behaviour in extreme phases of SAM, ENSO, sea ice extent and Southern Australia rainfall. **Journal of Climate**, v. 21, p. 5566-5584, 2008.
- PEZZA A. B.; RASHID, H. A.; SIMMONDS, I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 57–73, 2012.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña and the Southern Oscillation**. San Diego, California: Academic Press, 1990.

RAPHAEL, M. N.; HOBBS, W.; WAINER, I. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern Summer. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 1403–1417, 2010.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. D. Relationship between the Southern Annular Mode and the Southern Hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48–55, 2009.

TAKAYA, K.; NAKAMURA, H. A Formulation of a Phase-Independent Wave Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow. **Journal of the Atmospheric Sciences** v. 58. p. 608–627, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)0582.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)0582.0.CO;2)

TEDESCHI, R. G. **As influências de tipos diferentes de ENOS na precipitação e nos seus eventos extremos sobre a América do Sul - observações, simulações e projeções**. 2013. 254 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>. (sid.inpe.br/mtecm19/2013/04.16.16.57-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DTKRF2>

THOMPSON, D. W. J; WALLACE, J. M; Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. **Journal of Climate**, v. 13, p 1000-1017, 2000.

VASCONCELLOS, F. C. **A Oscilação Antártica - mecanismos físicos e a relação com características atmosféricas sobre a América do Sul/oceanos adjacentes**. 2012. p. 192 (sid.inpe.br/mtecm19/2012/10.09.19.33-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CPTMAL>>.

VASCONCELLOS, F. C.; OLIVA, F. G.; PIZZOCHERO, R. M.; SILVA, T. M.; PARISE, C. K., CALDAS, C. F. Combined performance of September's Weddell sea ice

extent, Southern Annular Mode, and Atlantic SST anomalies over the South American temperature and precipitation. *GEOSCIENCES An. Acad. Bras. Ciênc.*, 94 (suppl 1), 2022

VASCONCELLOS, F. C.; PIZZOCHERO, R. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Month to month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, p. 783-792, 2019.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; BARROS, V; CARRIL, A. differences in El Niño response over the Southern Hemisphere. **Journal of Climate**, v. 17, p. 1741–1753, 2004.

WILKS, D.S. 2006. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego, CA: Academic Press. 627p. (International Geophysics Series 91) ISBN 978-0-12-751966-1

YUAN X. J.; MARTINSON D. G. Antarctic Sea Ice Extent Variability and Its Global Connectivity. **Journal of Climate**, v. 13, p.1697–1717, 2000.