



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

INPE
São José dos Campos

2020
RESUMO

Padrões de teleconexões, tais como El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o Modo Anular Sul (SAM) afetam a circulação e, conseqüentemente, o clima da América do Sul. Alguns trabalhos mostram que esses padrões podem estar relacionados a variações na ocorrência de sistemas transientes, tais como, as frentes frias. A extensão de gelo marinho antártico também afeta a circulação em todo o Hemisfério Sul. Porém, não há um estudo analisando os impactos em conjunto do ENOS, do SAM e do gelo marinho antártico na atuação das frentes frias na América do Sul. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a frequência de frentes frias na América do Sul nos anos com anomalias do gelo marinho antártico com e sem a atuação das fases do SAM e do ENOS. Espera-se com isso, contribuir para o melhor entendimento dos impactos desses padrões na América do Sul e também para a previsão climática.

Palavras-chaves: sistemas frontais, gelo marinho antártico, padrões de teleconexão

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| 2.1 Média mensal de Extensão de Gelo marinho antártico (1981-2018) | 7 |
| 4.1 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão. | 12 |
| 4.2 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão. | 13 |
| 4.3 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); b) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); c) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). | 15 |
| 4.4 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). | 16 |
| 4.5 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão. | 18 |
| 4.6 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão | 19 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.7 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM e ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa do ENOS (La Niña); c) Fase negativa SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña)..... | 21 |
| 4.8 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); c) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña)..... | 22 |
| 4.9 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão. | 26 |
| 4.10 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão. | 27 |
| 4.11 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). | 28 |
| 4.12 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). | 29 |
| 4.13 | Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão. | 31 |

- 4.14 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão. 32
- 4.15 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). 33
- 4.16 Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña). 34

LISTA DE QUADROS

| | <u>Págs</u> |
|--|-------------|
| 4.1 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro..... | 8 |
| 4.2 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro..... | 8 |
| 4.3 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria..... | 9 |
| 4.4 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria..... | 10 |
| 4.5 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro. | 23 |
| 4.6 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro..... | 24 |
| 4.7 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro..... | 24 |
| 4.8 Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria..... | 25 |
| 6.1 Conclusões das análises de frequência máxima de frentes frias na AS em conjunto dos padrões de teleconexões e os extremos de gelo marinho antártico para MBA e MWD..... | 35 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos Geral e Específicos | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 2 |
| 3. DADOS E METODOLOGIA | 5 |
| 4. RESULTADOS | 7 |
| 4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)..... | 7 |
| 4.1.1 Fevereiro – MBA | 10 |
| 4.1.2 Setembro – MBA | 17 |
| 4.2 Mar de Weddel (MDW) | 23 |
| 4.2.1 Fevereiro – MWD | 25 |
| 4.2.2 Setembro – MWD | 30 |
| 5. PROJETOS RELACIONADOS | 34 |
| 6. CONCLUSÕES | 35 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 37 |

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 no Sudeste e Sul do Brasil (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009). Os fenômenos 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 sub-superficial 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 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 no restante do continente não são evidentes.

A Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation- AAO*) 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). Gillet et al. (2006) demonstraram impactos do SAM na AS, relacionando a fase positiva do SAM a um significativo aquecimento na Argentina e secas no sul continente mencionado. 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 das extensões de gelo marinho e seus impactos nos principais padrões de teleconexões. Pezza et al. (2012), utilizando modelos, verifica as correlações de extensão de gelo marinho Sul no SAM e ENOS, apontando seus efeitos conforme o mar antártico analisado.

Alguns trabalhos mostram a relação do ENOS e do SAM, isoladamente, nas frentes frias na AS (e.g. FEDOROVA; CARVALHO, 2000; REBOITA et al., 2009). Entretanto, não há estudos que mostrem a relação conjunta deles e da influência da extensão do gelo marinho antártico nas frentes frias que atuam no continente. Uma vez que ambos os padrões possuem relação entre si e também influenciam o gelo marinho Antártico, espera-se que diferentes combinações desses três fatores (SAM, ENOS e gelo marinho) possam influenciar nas frentes frias que chegam ao continente.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

O principal objetivo deste projeto é identificar os impactos das anomalias de gelo marinho antártico nas frequências de frente frias da AS, com e sem a atuação das fases do SAM e do ENOS. Para isso, contará com os seguintes objetivos específicos:

- I. Identificar os anos com anomalias (positiva e negativa) de gelo marinho, em particular nas regiões dos mares de Weddell (MWD) e Bellingshausen-Amundsen (MBA);
- II. Separar os anos das anomalias de gelo marinho em que ocorre cada fase do SAM e do ENOS;
- III. Calcular a quantidade de frentes frias na AS nos anos de cada categoria (ENOS, SAM e anomalias do gelo marinho).

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. Nesse trabalho foi observado, na fase negativa do SAM, a trajetória dos ciclones em todo o hemisfério 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 sub-superficiais 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

ainda não são claros em todo continente. Tedeschi (2013) analisou os impactos dos El Niño Canônico e Modoki na precipitação sobre AS. Nestes resultados, destacou-se que os impactos se diferem nos dois tipos de El Niño na Região Sudeste. No verão e primavera, há uma anomalia de seca caracterizada nessa região, referente ao El Niño Modoki, que não se encontram presente no Canônico. Federova 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 foi maior 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, para o mês de fevereiro, que a frequência média mensal encontrava-se entre 1-6, com menores valores próximos às áreas localizadas no nordeste do Brasil. Para o mês de setembro, há um aumento da frequência em geral. Neste estudo também foram observados casos envolvendo o ENOS, ao analisar a variabilidade interanual, não observando padrão para um número máximo ou mínimo na região específica 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 phase3* (CMIP3), entre outros. Nesse estudo, observou-se a influência dos padrões de 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.

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 Mar de Weddell, positiva, e no Oceano Antártico entre os setores do Atlântico e Índico, com correlação negativa. Naquele estudo, foi observado as 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 atuam em união na extensão de gelo marinho antártico. 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).

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 foram pressão ao nível do mar, temperatura do ar e componente meridional do vento em 925 hPa. Estas saídas foram transformadas em médias diárias. Também foram utilizadas as séries temporais de extensão de gelo marinho antártico, que são determinadas a partir de estimativas de satélites, através do banco de dados e imagens do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC) – Comiso (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.

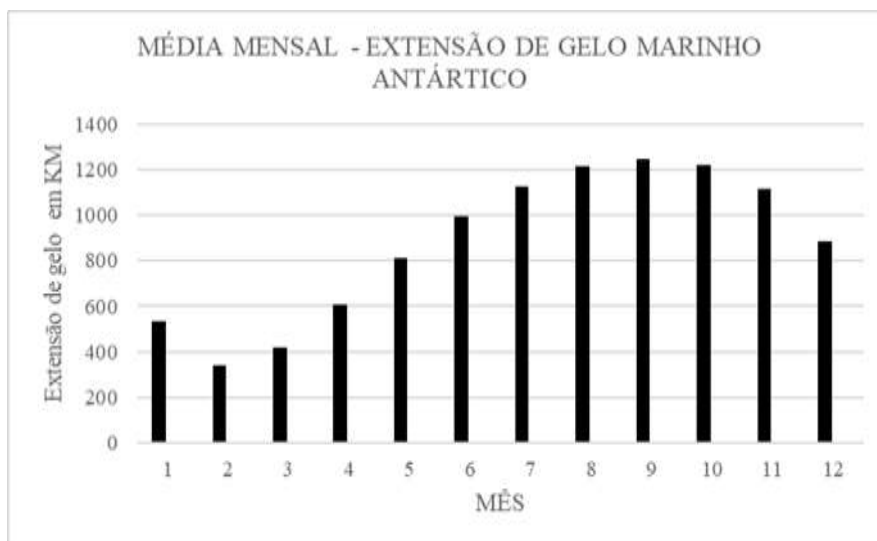
Este trabalho contou com a metodologia de detecção de frentes frias baseada no trabalho de Andrade (2005) e de outras literaturas, como Cavalcanti e Kousky (2003). Os critérios de Andrade (2005) não utilizavam limiares para as variações da pressão, do vento e da temperatura, porém estes foram utilizados em literaturas anteriores referentes ao tema. Cavalcanti e Kousky (2003), por exemplo, utilizaram um limite fixo de queda de temperatura (maior que 2°C) em 925 hPa, com a ocorrência de ventos de sul acima de 2m/s e aumento da pressão (2 hPa). Inicialmente, utilizou-se a abordagem de Andrade (2005), identificando como frentes frias, se houvesse no intervalo de um dia para o outro, queda da temperatura em 925 hPa, aumento da pressão a nível médio do mar e a mudança na componente meridional do vento em 925 hPa de norte (negativo) para de sul (positivo) – sem uso de limiares. Após os testes com esses critérios, observou-se uma alta detecção de frentes no Nordeste (não mostrado), o que não corresponde com estudos anteriores. Assim, adaptou-se o método, impondo limiares na queda de temperatura e aumento da pressão.

Desta forma, 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, 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).

Segundo a climatologia da extensão de gelo marinho antártico, o período com maior extensão de gelo ocorre no mês de setembro (Figura 2.1), enquanto o menor em fevereiro. Por esta razão, esses meses foram escolhidos para avaliar os compostos. Para a construção dos compostos, foram utilizadas anomalias do gelo marinho Antártico média na região do MBA (130° W a 60° W) e (60°W a 0°). O MWD atinge até a longitude 20°E (CAVALIERI; PARKINSON, 2008), porém neste trabalho, optou-se por fazer a média do MWD até 0°, pois é a região mais próxima da AS. A anomalia foi gerada em relação à climatologia de 1981-2010. Esses valores foram considerados em conjunto com os índices SAM e ENOS, de forma a criar categorias com as três variáveis. Por exemplo, extremo máximo (anomalias positivas) de gelo marinho no MWD, com SAM positivo e El Niño; extremo mínimo (anomalias negativas) de gelo marinho no MWD, com SAM negativo e El Niño, etc.

Figura 3.1: Média mensal de Extensão de Gelo marinho antártico (1981-2018).



4. RESULTADOS

4.1 Mar de Bellingshausen-Amundsen (MBA)

Para a identificação dos compostos, foram analisados os anos de anomalias de extensão do gelo marinho antártico para o MBA nos meses de fevereiro e setembro, no período de 30 anos (1981-2010). Assim, foram organizadas e categorizadas as máximas e mínimas extensão, em conjunto com padrões ENOS e SAM (isolados e combinados). Os Quadros 4.1 (fevereiro) e 4.2 (setembro) mostram os anos com máxima e mínima extensão de gelo no MBA em cada fase do SAM e em cada fase do ENOS, isoladamente.

QUADRO 4.1: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro.

| FEV | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|---------------------------------------|---|
| MÁX EXT | 2004, 2001, 1984, 1985, 1982, 1986 | 1988, 1998, 2005, 1987, 1981, 2000, 1983 |
| MÍN EXT | 2010, 1992, 2008 1995, 1993, 1990 | 2003, 2009, 1991, 2007, 1997, 1989, 1999, 2006, 2002, 1994, 1996 |
| FEV | EL NIÑO | LA NIÑA |
| MÁX EXT | 1988, 1998, 2005, 1987, 1983 | 2001, 1985, 2000 |
| MÍN EXT | 2010, 1992, 2003, 1995 | 2008, 2009, 1989, 1999, 2006 |

QUADRO 4.2: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro

| SET | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|--|---|
| MÁX EXT | 1995, 1984, 2008, 2001, 1990, 1985, 2010, 2004, 1986 | 1991, 2009, 2003, 1996, 2000, 1997, 1994 |
| MÍN EXT | 1992, 1993, 1982, 1995, 1984, 2008, 2001 | 2005, 1988, 2007, 2002, 2006, 1983, 1998, 1987, 1989, 1981, 1999 |
| SET | EL NIÑO | LA NIÑA |
| MÁX EXT | 1991, 2009, 1997, | 1995, 2000, 2010 |

| | | |
|----------------|----------------------------|---------------------------------|
| | 1994, 2004, 1986 | |
| MÍN EXT | 2002, 2006, 1987, 1982, | 1988, 2007, 1983, 1998, 1999 |

Na análise em conjunto dos fenômenos de teleconexões e das anomalias de extensão, houve casos em que os eventos não ocorreram, conforme o critério, como nos casos de El Niño e SAM positivo na máxima extensão de gelo marinho no mês de fevereiro (Quadro 4.3) e La Niña e SAM positivo na mínima extensão em setembro (Quadro 4.4). Analisando os Quadros 4.3 e 4.4, nota-se que, em ambos os meses, as maiores frequências de máxima extensão ocorrem em anos de SAM negativo com El Niño, enquanto que na mínima extensão, SAM negativo com La Niña. Esses resultados diferem de Pezza et al. (2012), onde eles associam o SAM positivo com La Niña a uma maior extensão de gelo marinho Antártico.

QUADRO 4.3: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria.

| MÁX EXT | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|------------------|---------------------------------|
| EL NIÑO | - | 1988, 1988, 2005, 1987, 1883 |
| LA NIÑA | 2001, 1985 | 2000 |
| MÍN EXT | SAM POS | SAM NEG |
| EL NIÑO | 2010, 1992, 1995 | 2003 |
| LA NIÑA | 2008 | 2009, 1989, 1999, 2006 |

QUADRO 4.4: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MBA em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria.

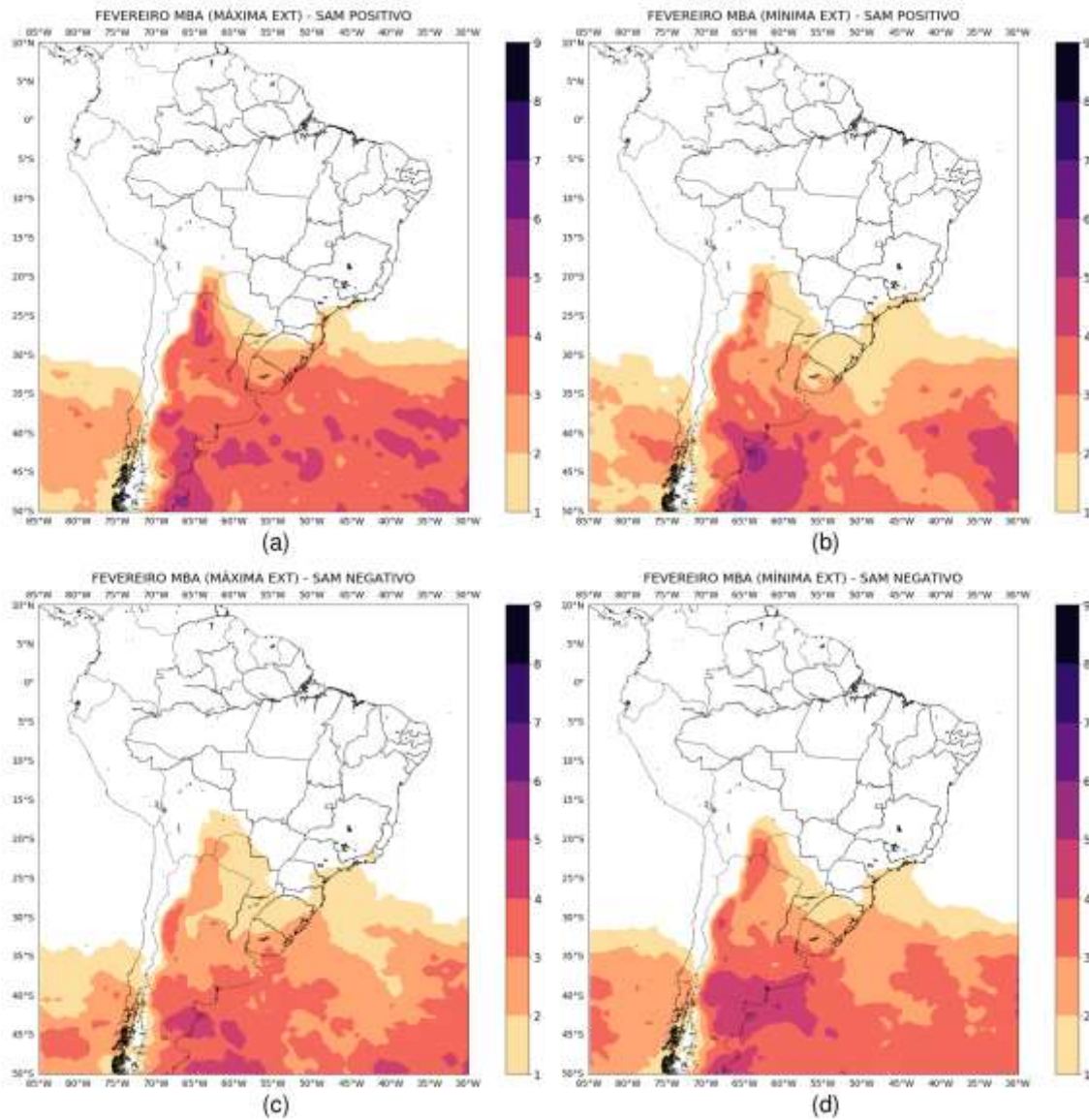
| MÁX EXT | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|----------------|---------------------------------|
| EL NIÑO | 2004, 1986 | 1991, 2009, 1997, 1994, |
| LA NIÑA | 1995, 2010 | 2000 |
| MÍN EXT | SAM POS | SAM NEG |
| EL NIÑO | 1982 | 2002, 2006, 1987 |
| LA NIÑA | - | 1988, 2007, 1983, 1998, 1999 |

Para compreender os impactos das teleconexões estudadas, foram plotadas as frequências médias de frentes frias para os anos de cada categoria estabelecida nos compostos, descritos nos Quadros 4.1 a 4.4.

4.1.1 Fevereiro– MBA

Inicialmente, para o mês de fevereiro e avaliando somente a relação extensão do gelo marinho e o SAM (Figura 4.1), podemos notar que as maiores frequências de frentes, em geral, ocorrem na fase positiva do SAM com extensão máxima do gelo marinho (maior área com valores de 3-4 frentes por mês, Figura 4.1a). Exceções ocorrem sobre o sul da Argentina e no litoral sudeste Brasileiro. Na fase negativa do SAM com mínima extensão (Figura 4.1d), o sul da Argentina encontra-se com áreas correspondentes ao valor de 4-5. No sudeste brasileiro, notamos que os impactos nas frentes estão principalmente nos casos com mínima extensão e SAM positiva (Figura 4.1b), com as frentes alcançando o norte do estado do Rio de Janeiro.

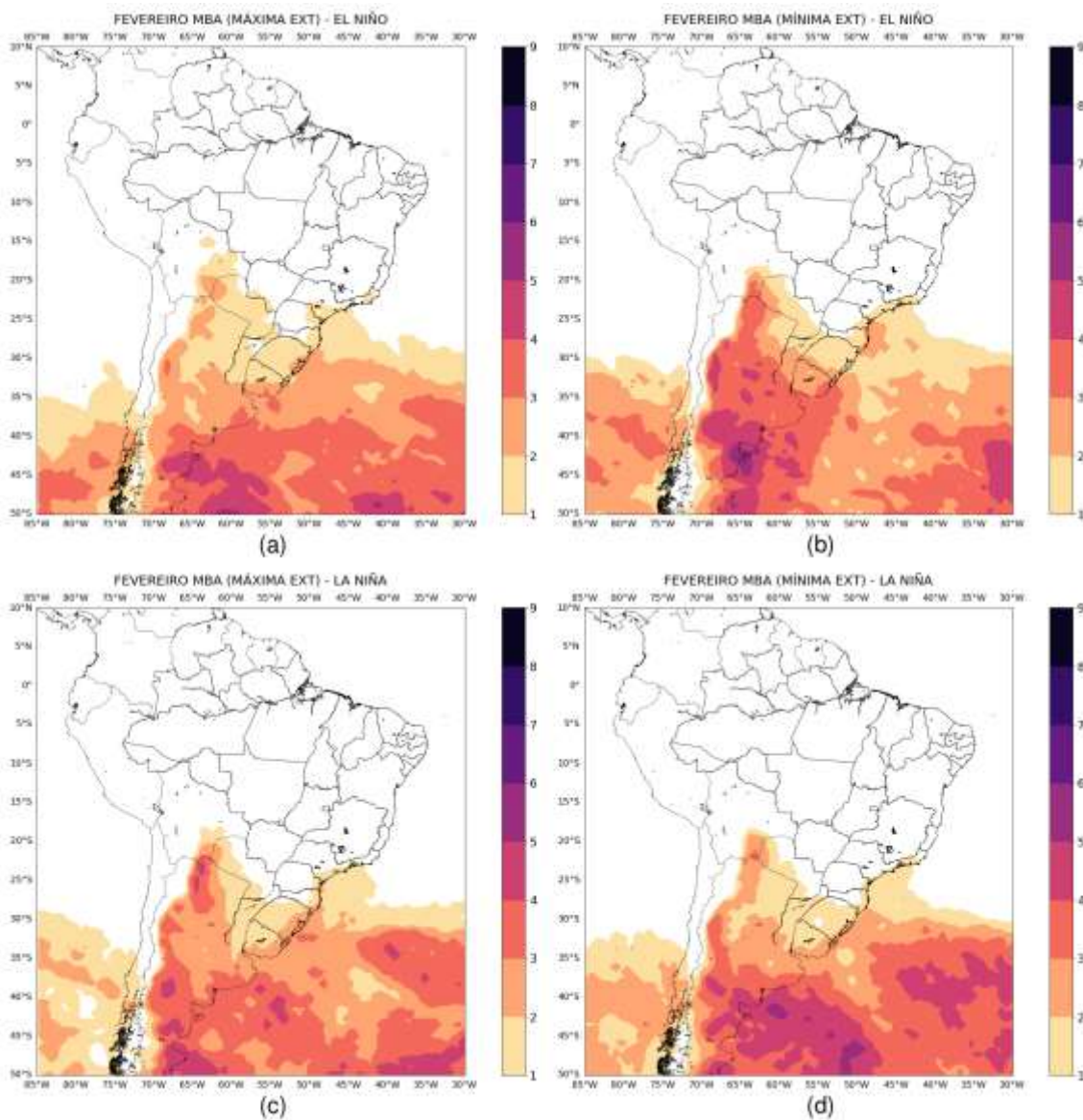
Figura 4.1: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão.



Nos períodos de ENOS, podemos notar a diferença entre o oceano e o continente em relação às frequências máximas de frentes frias. No El Niño com mínima extensão de gelo marinho (Figura 4.2b), há uma maior área com valores de 3-4 frentes por mês sobre o continente, com avanço do mesmo até a Bolívia. O sul da Argentina também sofre impactos nesta categoria, possuindo áreas com maiores frequências em relação aos outros compostos, enquanto as menores frequências de frentes frias no continente

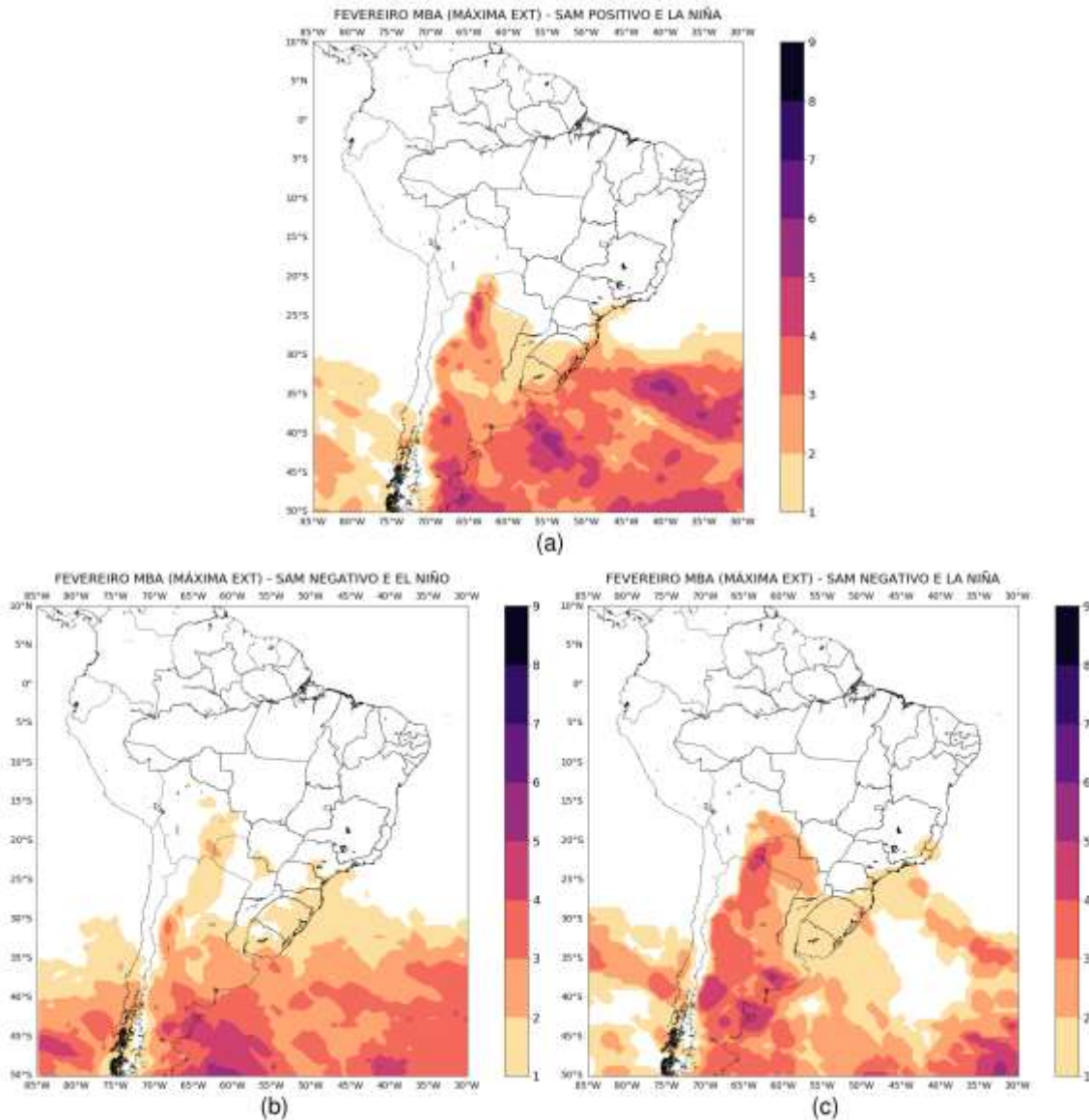
encontram-se no El Niño na máxima extensão (Figura 4.2a). Já durante La Niña em mínima extensão (Figura 4.2d), encontra-se com uma maior frequência de frentes sobre o oceano, possuindo uma área extensa com valores acima de 4-5 frentes por mês.

Figura 2: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão.



Ao analisar os compostos com os padrões de teleconexão em conjunto durante a máxima extensão de gelo do MBA (Figura 4.3), podemos notar a ausência do SAM positivo em união com El Niño. As imagens foram obtidas através do Quadro 4.4, onde podemos observar que não houve anos que atendesse essa categoria. Conforme foi mencionado na análise anterior, nas frequências máximas das frentes, pode-se observar a diferenciação entre o oceano e continente. No continente, podemos notar maiores frequências no SAM negativo com La Niña (Figura 4.3c), com o avanço de maiores valores na região da Bolívia, além de possuir regiões com valores acima de 4 frentes por mês na Argentina. Pode-se destacar também uma maior frequência (2-3 frentes por mês) em grande parte do Paraguai. Em relação ao oceano, na fase positiva do SAM e La Niña (Figura 4.3a), notamos as frequências máximas das frentes, possuindo a maior parte com valores acima de 3 frentes por mês.

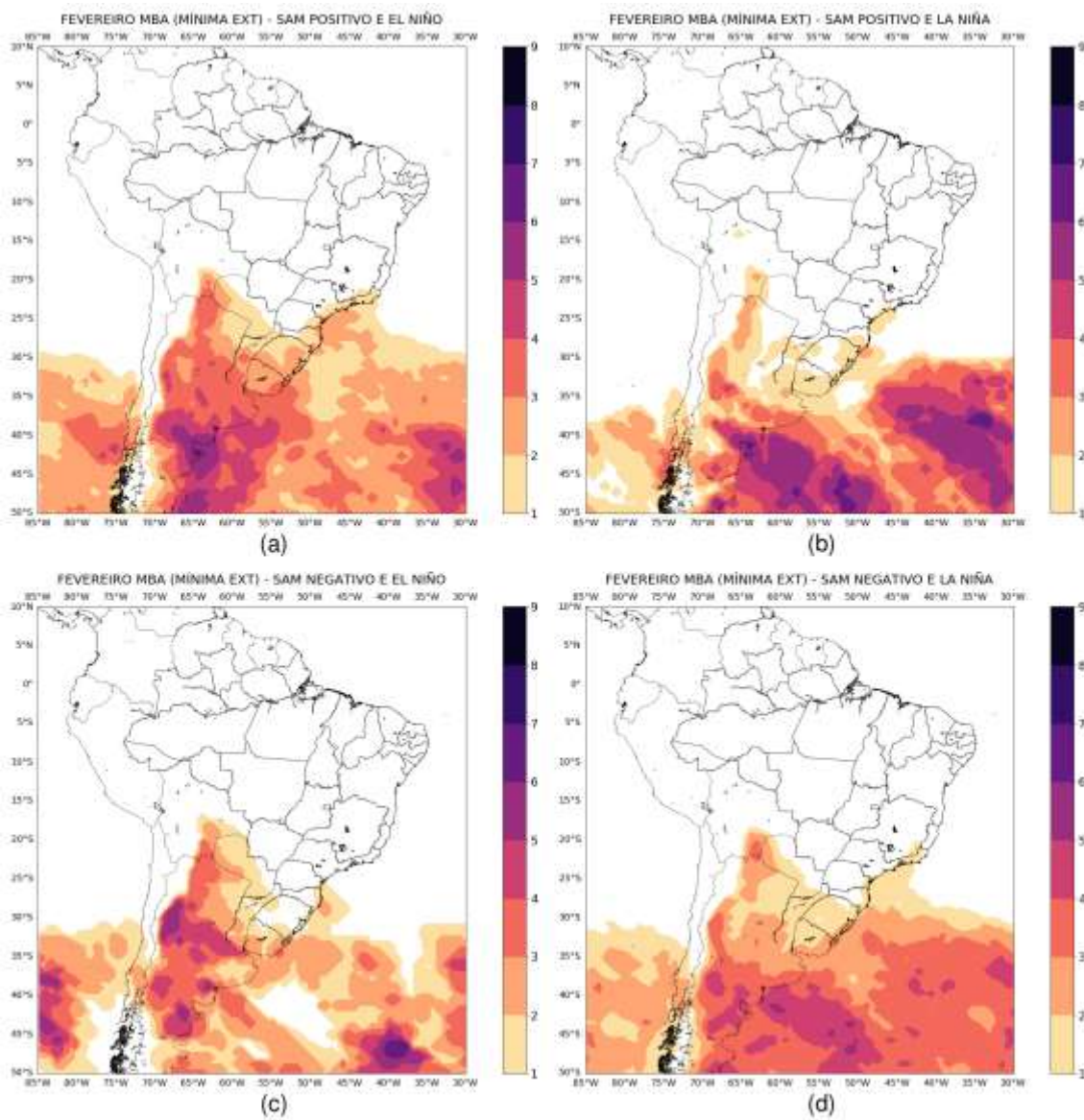
Figura 4.3: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro. a) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); b) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); c) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Na mínima extensão de gelo marinho, de forma notória podemos visualizar a atuação do SAM positivo e La Niña (Figura 4.4 b) na atuação das máximas frequências sobre o oceano, possuindo maiores áreas com valores acima de 5 frentes frias por mês. Na região do continente, podemos visualizar nas fases positivas do SAM e do ENOS (Figura 4.4.a) o número maior de frentes. Neste, é possível notar a Região Sul e a parte costeira do Sudeste possuindo valores de até 3 frentes por mês, enquanto que a parte sul

do continente possui valores mais altos, sofrendo maiores impactos. Na fase negativa do SAM com El Niño (Figura 4.4c) encontramos pequenas áreas de valores acima de 5 frentes por mês. No entanto, em geral, os valores são mais baixos que nas outras categorias.

Figura 4.4: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).

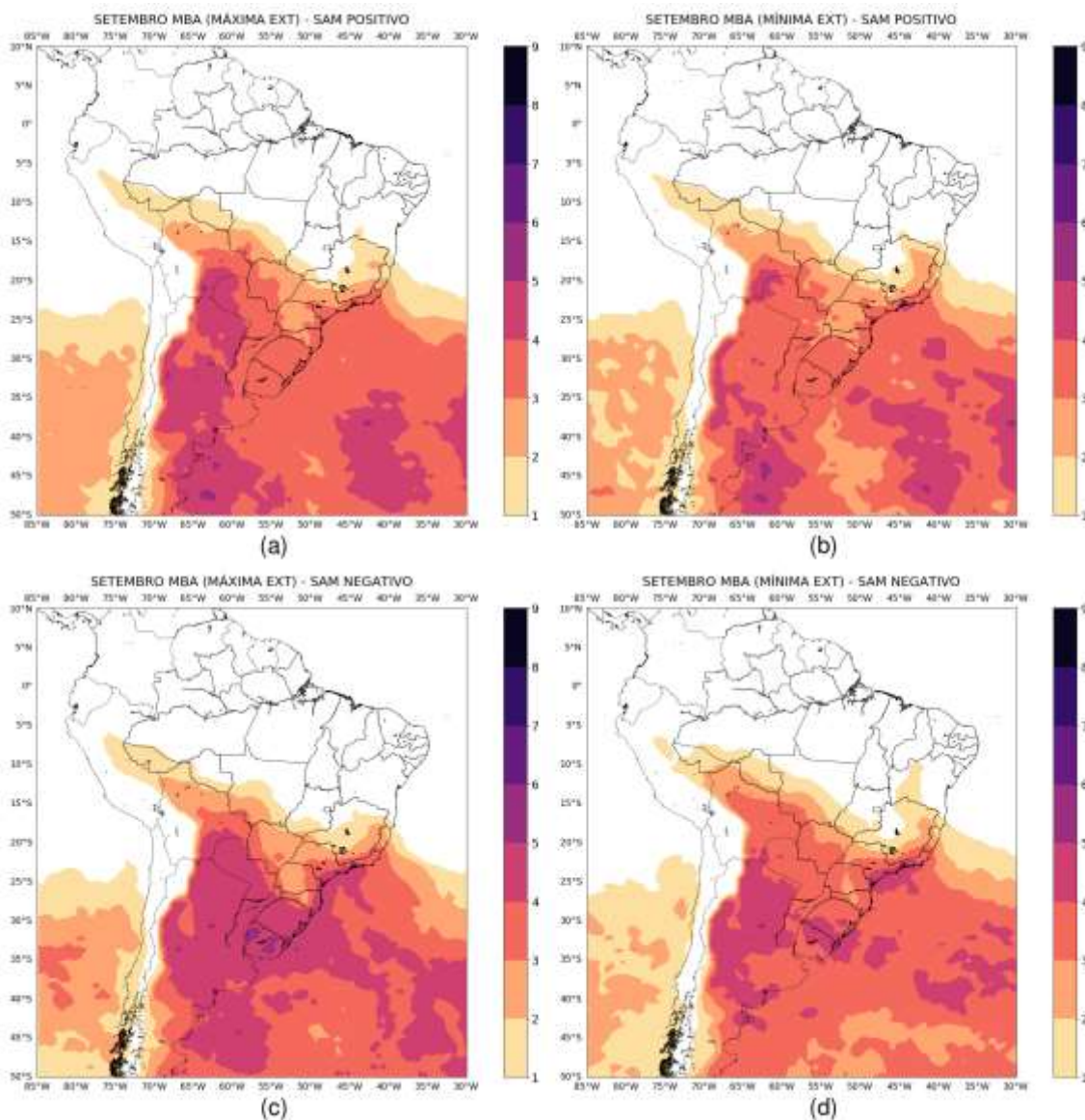


No mês de fevereiro, foi perceptível as influências dos fenômenos de teleconexões em conjunto com as anomalias de extensão do MBA, destacando-se as diferenças entre as atuações das frentes frias sobre o Oceano e o Continente. Sobre a atuação no oceano concluímos que em geral as maiores frequências encontravam-se na fase positiva do SAM e La Niña, durante a mínima extensão do gelo marinho, seguida pela mesma configuração, mas para a máxima extensão. Enquanto, no continente as maiores frequências ocorreram também na mínima extensão na fase positiva do SAM, porém em anos de El Niño. Esse resultado sugere que as categorias citadas acima impactam na trajetória mais continental ou oceânica do avanço das frentes frias.

4.1.2 Setembro– MBA

No mês de setembro é possível notar um maior número de frentes na AS em comparação com fevereiro, avançando em direção ao Acre e em grande parte do continente. Em geral, a máxima frequência ocorre no SAM negativo com máxima extensão de gelo marinho no MBA (Figura 4.5c), principalmente sobre o continente. As diferenças entre o oceano e o continente não são marcantes nestes critérios. Ressalta-se que as frentes frias alcançam latitudes mais baixas na Região Nordeste em anos com mínima extensão de gelo no SAM negativo (Figura 4.5d).

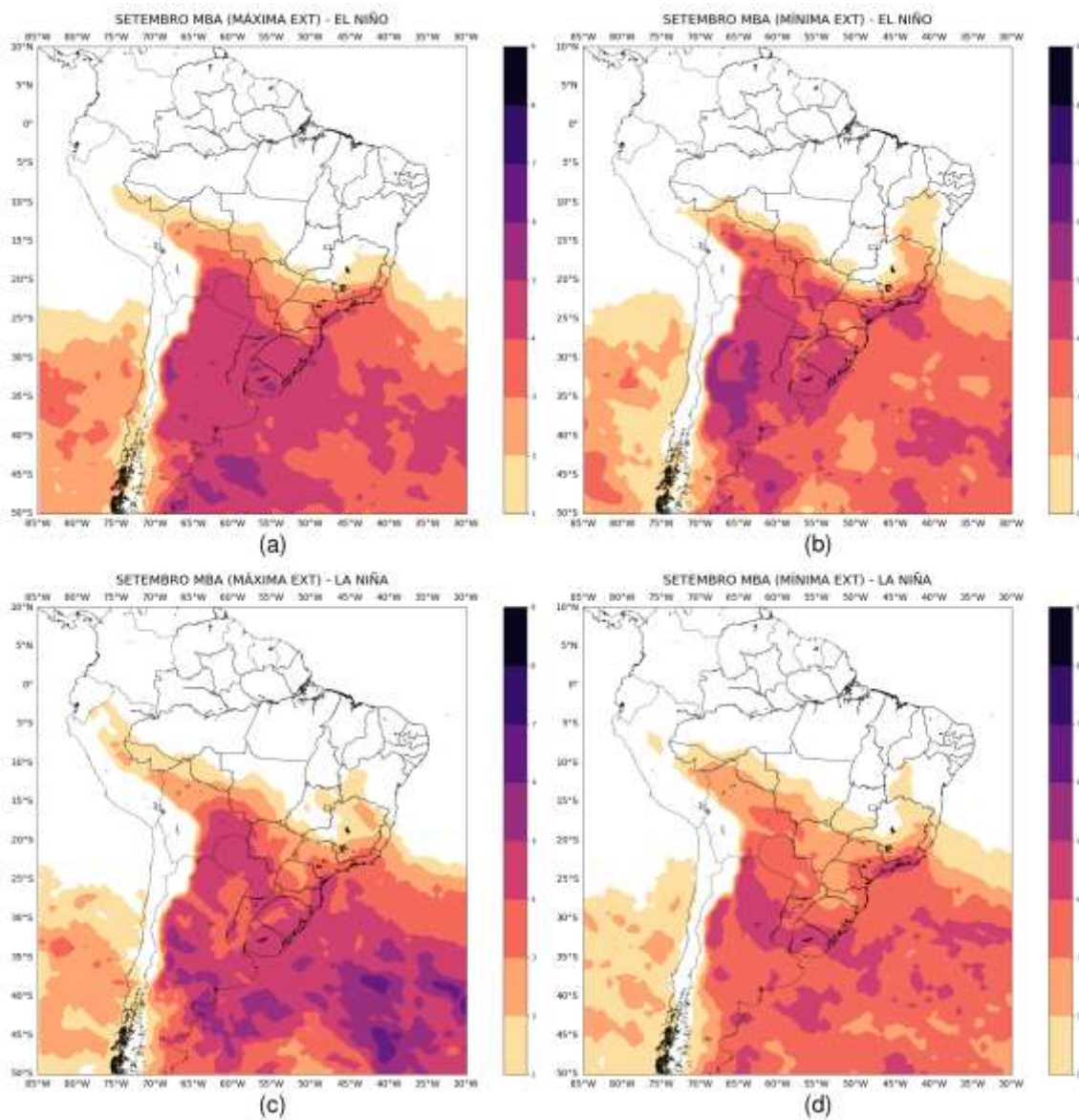
Figura 4.5: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão.



Para as fases do ENOS, no mês de setembro, podemos notar a diferenciação das frentes em relação ao continente e o oceano. No El Niño com mínima extensão de gelo marinho (Figura 4.6b), podemos notar um avanço considerável das frentes no Nordeste (1-2 frentes por mês) e maiores valores no continente em geral, principalmente sobre a

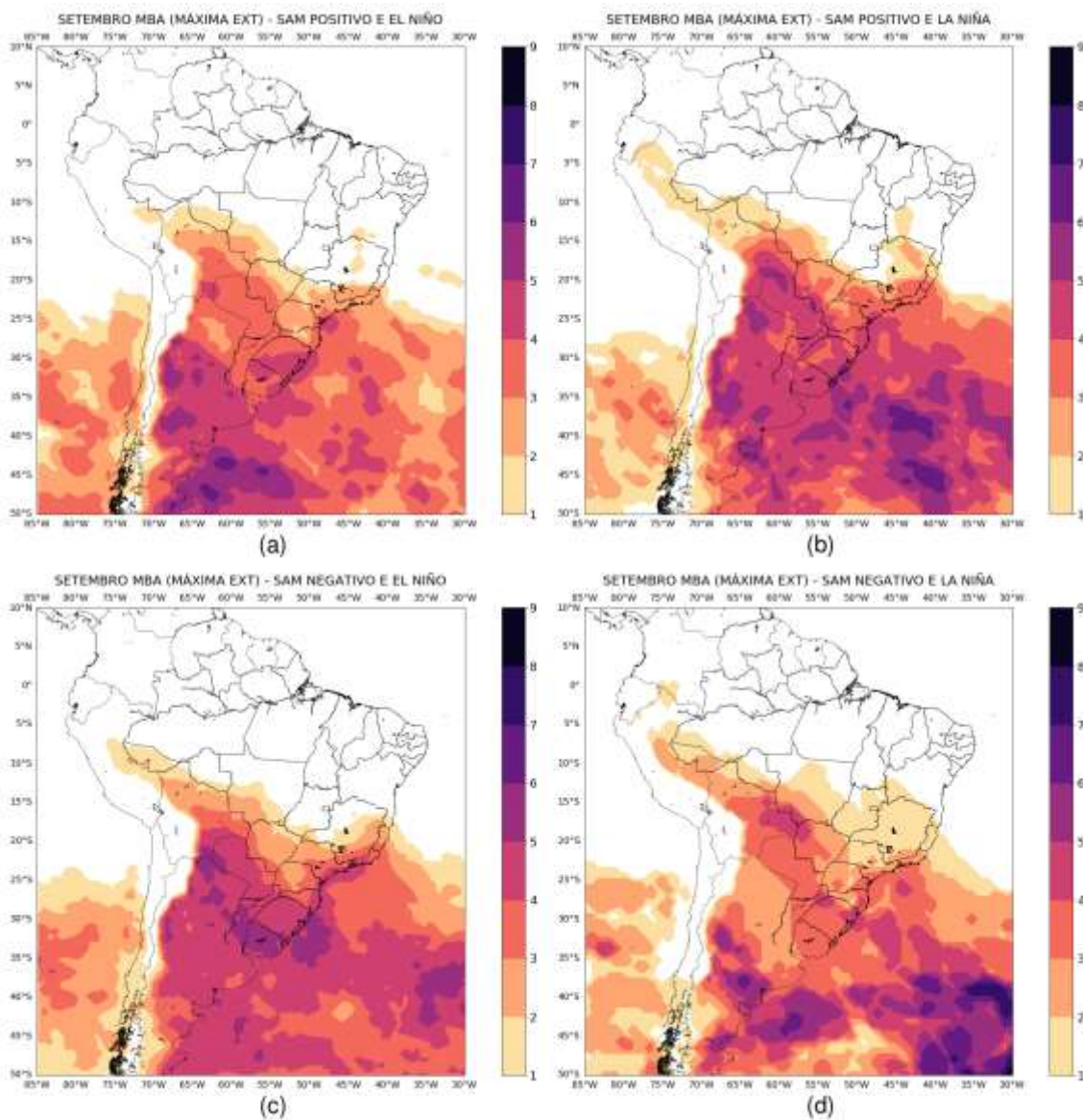
Argentina. Enquanto no oceano, é possível notar o maior número de ocorrência na máxima extensão do gelo na La Niña (Figura 4.6c). Essa categoria também apresenta um avanço das frentes para latitudes ao norte do Acre.

Figura 4.6: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão



Ao observar os compostos em análise combinada dos padrões de teleconexões (SAM e ENOS) durante a máxima extensão de gelo marinho na MBA podemos notar, em geral, a maior frequência de frentes na fase positiva do SAM em La Niña (Figura 4.7 b) no Oceano Atlântico. Entretanto, a fase negativa do SAM e La Niña (Figura 4.7 d) também possui algumas regiões com valores acima de 6 frentes por mês. No continente, duas categorias se destacam com valores altos de ocorrência de frentes: fase positiva do SAM em La Niña (Figura 4.7 b) e fase negativa do SAM em El Niño (Figura 4.7 c). Na primeira, há um avanço das frentes até o Nordeste, com valores maiores de 2-3 frentes sobre MG; avanço das frentes pelo Acre até o norte do Peru. Já na segunda categoria, há uma maior frequência no litoral do Sudeste, no Uruguai, RS e no norte da Bolívia.

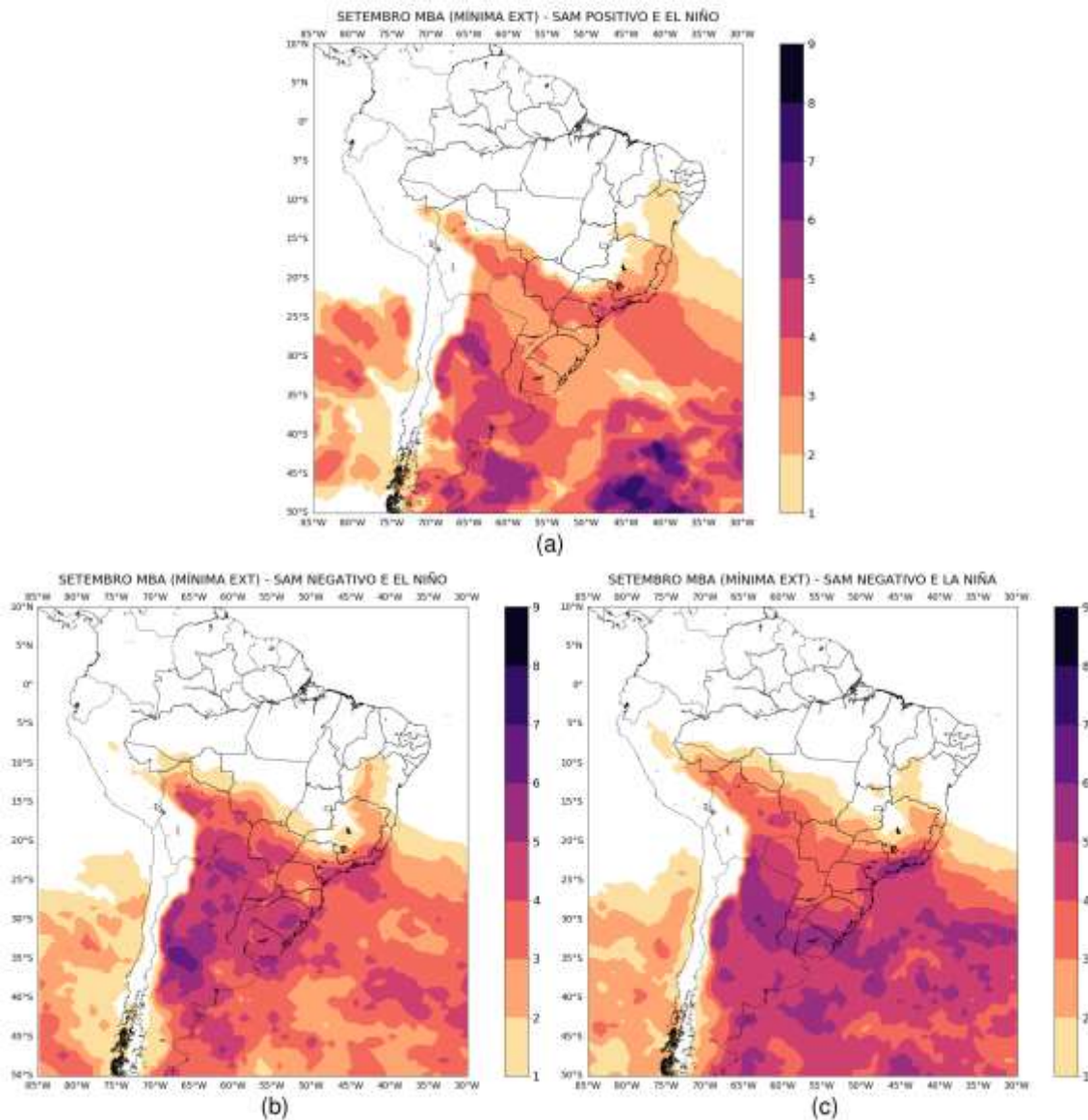
Figura 4.7: : Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM e ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa do ENOS (La Niña); c) Fase negativa SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Na análise combinada dos padrões de teleconexões (SAM e ENOS) para a mínima extensão de gelo marinho no MBA, os critérios na fase positiva do SAM e negativa do ENOS não foram atendidos, conforme o Quadro 4.4 demonstra. Observando a mínima extensão em conjunto com os fenômenos de teleconexões podemos identificar

novamente diferenças entre o continente e o oceano. Embora haja algumas regiões no oceano ao sul de 40°S com valores acima de 6 frentes por mês na categoria SAM positivo e El Niño (Figura 4.8 a), o Atlântico em geral apresenta uma maior área de alta frequência das frentes na fase negativa do SAM e La Niña (Figura 4.8 c). No continente, em geral, os maiores valores encontram-se na categoria SAM negativo e El Niño (Figura 4.8b).

Figura 4.8: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); c) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Ao analisar as Figuras 4.7 e 4.8, compostos em conjunto no mês de setembro para o MBA, pode-se concluir que no oceano há uma maior área com valores altos de ocorrência de frentes na máxima extensão com SAM positivo e La Niña, embora haja em outras categorias regiões menores com valores acima de 6 frentes por mês. No continente, as maiores frequências ocorrem, em geral, durante a mínima extensão com SAM negativo e El Niño, configuração completamente oposta a do oceano. Assim como em fevereiro, a sugestão é que essas combinações influenciem na trajetória das frentes mais oceânicas ou continentais.

4.2 Mar de Weddel (MDW)

No MWD, os mesmos métodos de organização e análise foram seguidos para os meses de setembro e fevereiro, envolvendo anomalias de extensão de gelo marinho e padrões de teleconexões, tanto separadamente (Quadros 4.5 e 4.6), quanto em conjunto (Quadros 4.7 e Quadro 4.8). Assim como no MBA, em ambos os meses, as maiores frequências de máxima extensão ocorrem em anos de SAM negativo com El Niño, enquanto que na mínima extensão, SAM negativo com La Niña. A exceção ocorre em fevereiro para a mínima extensão, onde tanto SAM negativo com La Niña, quanto SAM positivo com El Niño possuem a mesma quantidade de anos.

QUADRO 4.5: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro.

| FEV | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|--|--|
| MÁX EXT | 1993, 1994, 2009, 2002, 2008, 1995 | 1996, 1991, 2010, 1992, 2001, 2003, 2004 |
| MÍN EXT | 1985, 2005, 2000, 1982, 1988, 1989, 2007, 1998, 1990 | 1999, 1981, 1984, 1986, 2006, 1987, 1997, 1983 |
| FEV | EL NIÑO | LA NIÑA |
| MÁX EXT | 2010, 1992, 1995, 2003 | 1996, 2009, 2001, 2008, |
| MÍN EXT | 2005, 1987, 1988, 1998, 1983 | 1999, 1985, 2006, 2000, 1989 |

QUADRO 4.6: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD e os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro.

| | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|---|---|
| MÁX EXT | 1992, 1995 | 2009, 2000, 1996, 1997, 2005, 2006, 2007, 1991, 1981, 1988, 1987 |
| MÍN EXT | 1985, 1990, 1986, 1984, 1982, 2010, 2004, 2008, 2001, 1993 | 1989, 1989, 1994, 2003, 1983, 1999, 2002, 1998 |
| | EL NIÑO | LA NIÑA |
| MÁX EXT | 2009, 1997, 2006, 1991, 1987 | 2000, 2007, 1988, 1995 |
| MÍN EXT | 1994, 1986, 1982, 2002, 2004 | 2010, 1983, 1999, 1998 |

QUADRO 4.7: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para fevereiro.

| MÁX EXT | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|-------------------|------------------|
| EL NIÑO | 1995 | 2010, 1992, 2003 |
| LA NIÑA | 2009, 2008 | 1996, 2001 |
| MÍN EXT | SAM POS | SAM NEG |
| EL NIÑO | 2005, 1988, 1998, | 1987, 1983 |
| LA NIÑA | 1985, 2000, | 1999, 2006, 1986 |

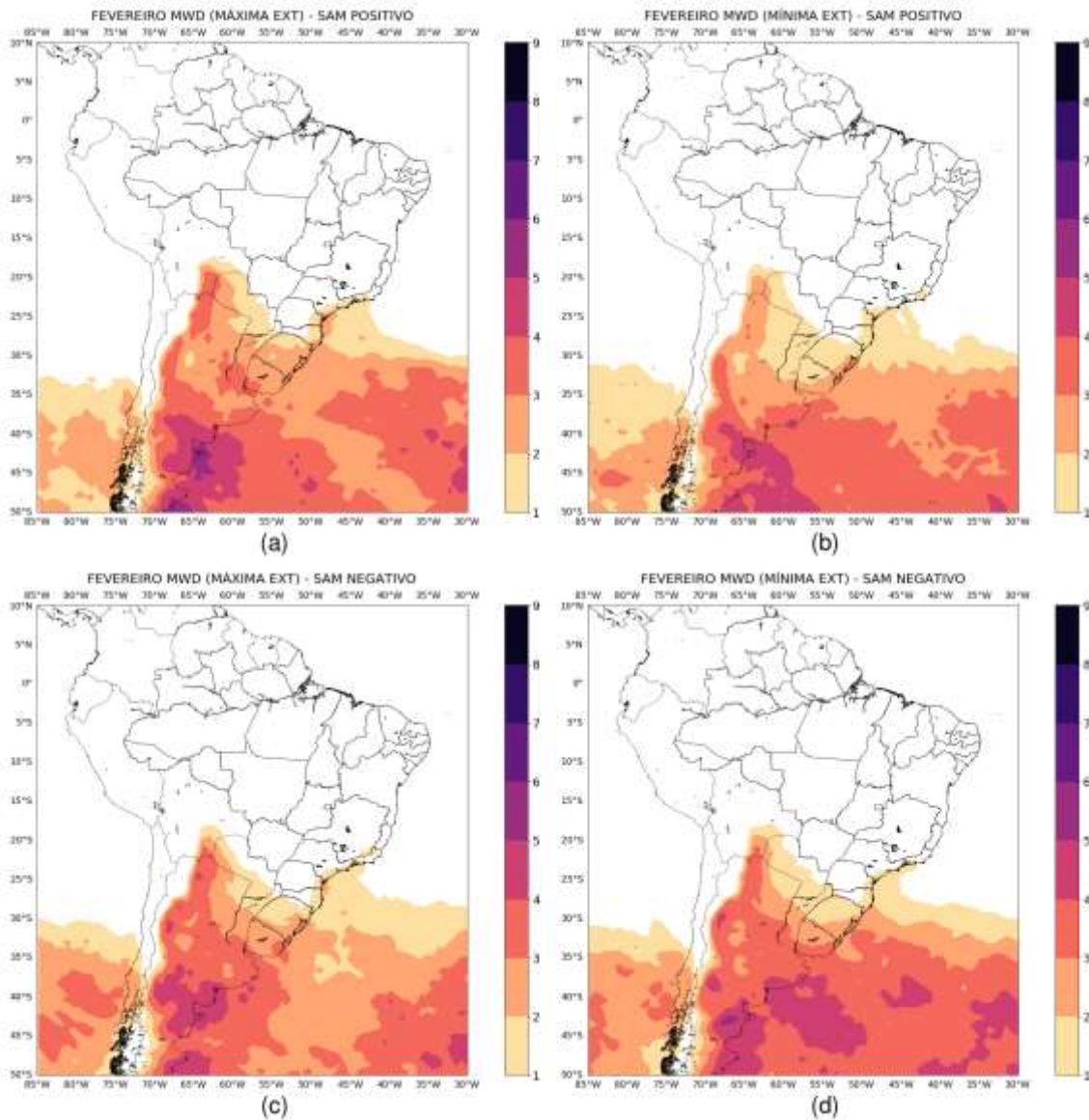
QUADRO 4.8: Anos envolvendo extensão de gelo marinho no MWD em conjunto com os padrões de teleconexões ENOS e SAM para setembro. Nas células preenchidas com “-” não houve anos na categoria

| MÁX EXT | SAM POS | SAM NEG |
|----------------|------------------|---------------------------------|
| EL NIÑO | - | 2009, 1997, 2006, 1991, 1987 |
| LA NIÑA | 1995 | 2000, 2007, 1988, |
| MÍN EXT | SAM POS | SAM NEG |
| EL NIÑO | 1986, 1982, 2004 | 1994, 2002, |
| LA NIÑA | 2010 | 1983, 1999, 1999, 1998 |

4.2.1 Fevereiro – MWD

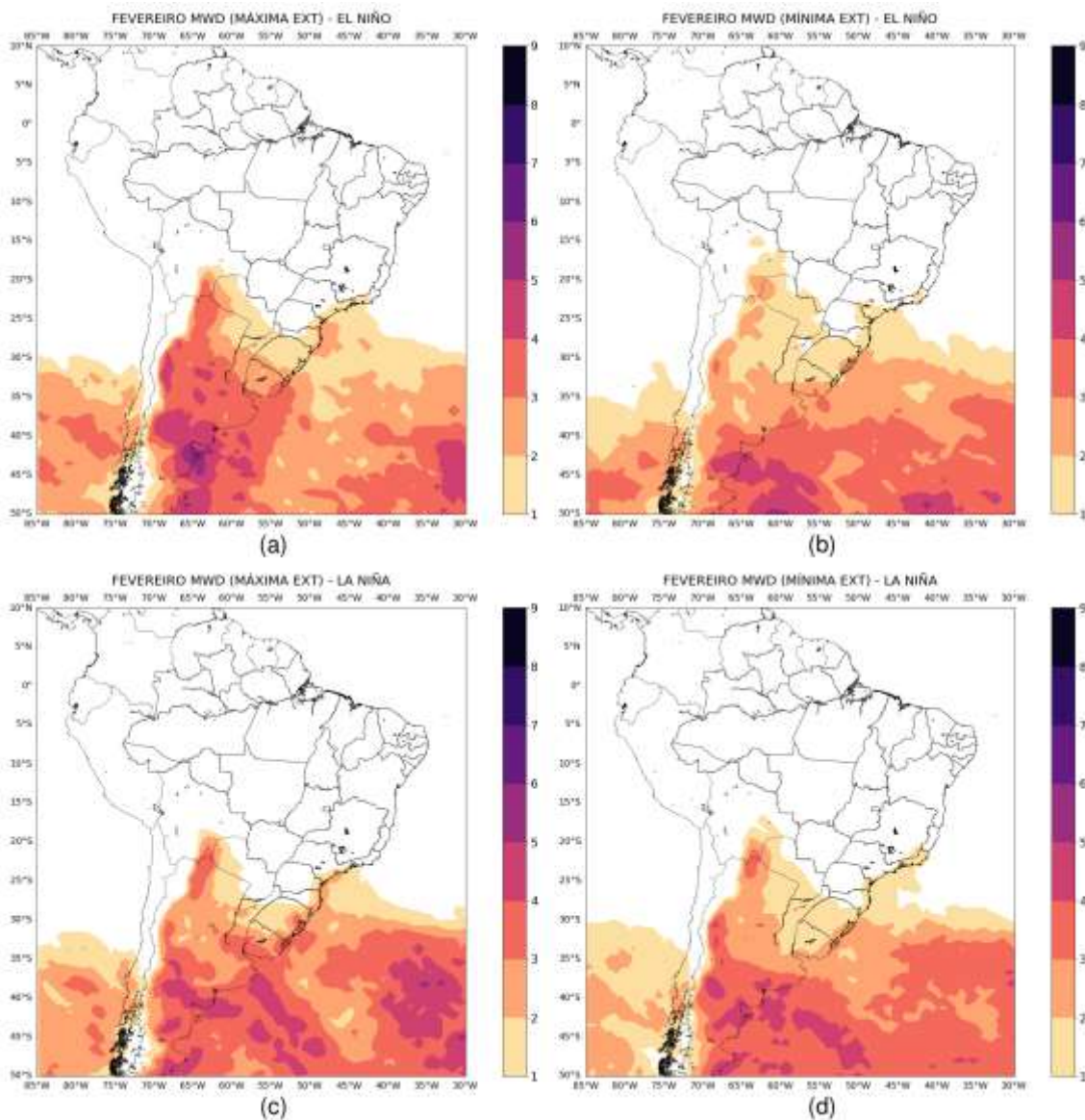
Para o segundo mar de estudo (MWD), foram realizadas as mesmas abordagens da análise anterior. No mês de fevereiro (Figura 4.9), podemos notar as maiores frequências de frentes frias no Atlântico durante a extensão mínima de gelo marinho na fase negativa do SAM (Figura 4.9 d). Já no continente, as maiores ocorrências são também na fase negativa do SAM, porém na máxima extensão (Figura 4.9c). Entretanto, para o continente não há muita diferença entre as categorias de SAM negativo com máxima (Figura 4.9c) e com mínima extensão (Figura 4.9d).

Figura 4.9: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão.



Nas categorias envolvendo ENOS, é possível encontrar no continente as maiores frequências de frentes frias durante El Niño com máxima extensão (Figura 4.10a). No oceano as frequências máximas ocorrem também na máxima extensão, mas na fase oposta do ENOS (La Niña - Figura 4.10 c). Na mínima extensão de gelo com El Niño (Figura 4.10b), podemos notar o avanço das frentes na região da Bolívia, apesar dos valores serem baixos quando comparados com as demais categorias.

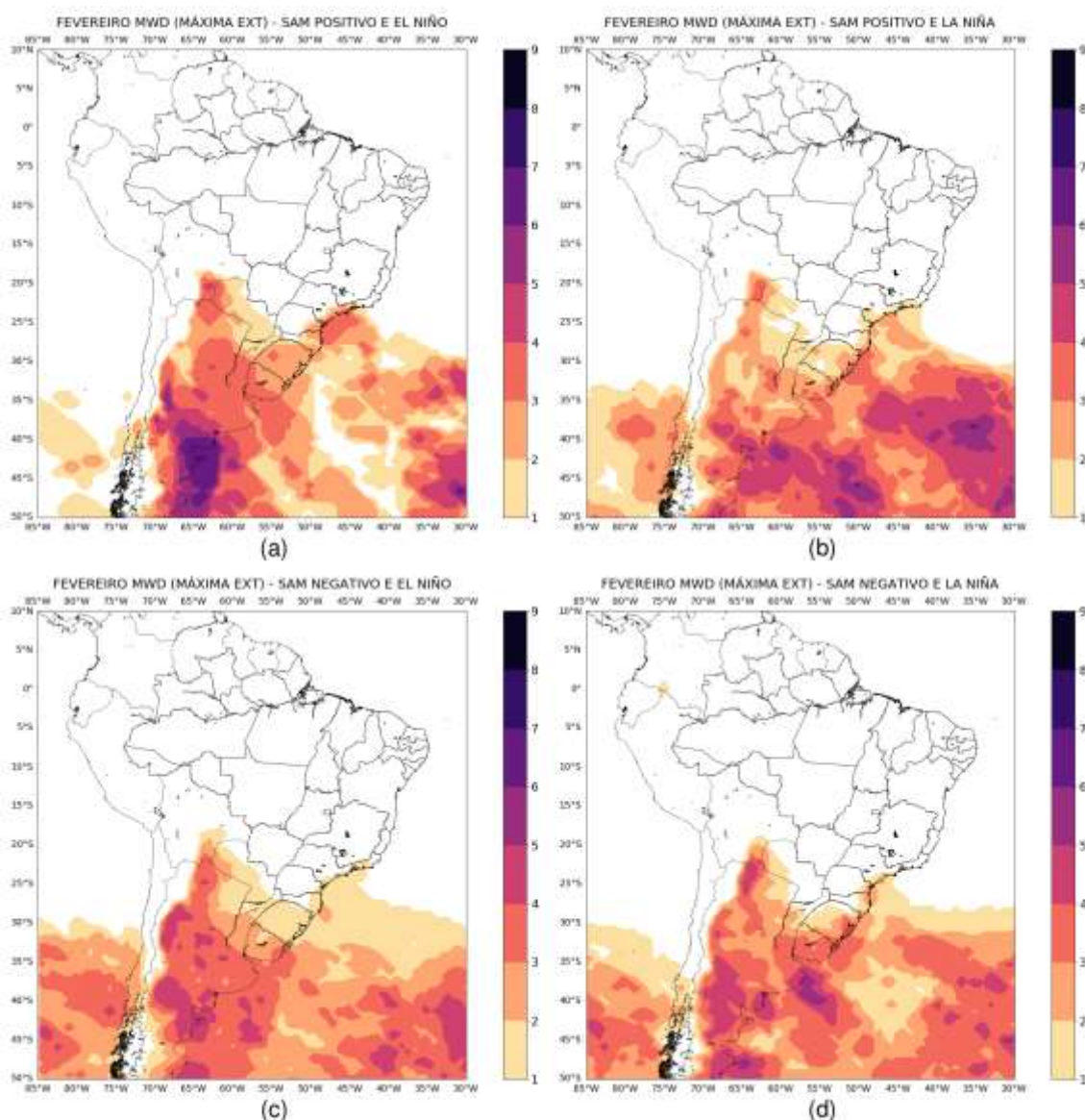
Figura 4.10: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão.



Na união dos padrões de teleconexão para o mês de fevereiro com máxima extensão de gelo marinho no MWD (Figura 4.11), podem ser notadas diferenças entre continente e oceano. As maiores frequências de frentes frias no continente ocorrem em SAM positivo e El Niño (Figura 4.11a), principalmente sobre o sul da Argentina. No entanto,

vale ressaltar que nesta categoria somente o ano de 1995 seguiu os critérios, conforme foi observado no Quadro 4.7. No oceano, as maiores ocorrências de frentes encontram-se na fase positiva do SAM, porém em La Niña (Figura 4.11b).

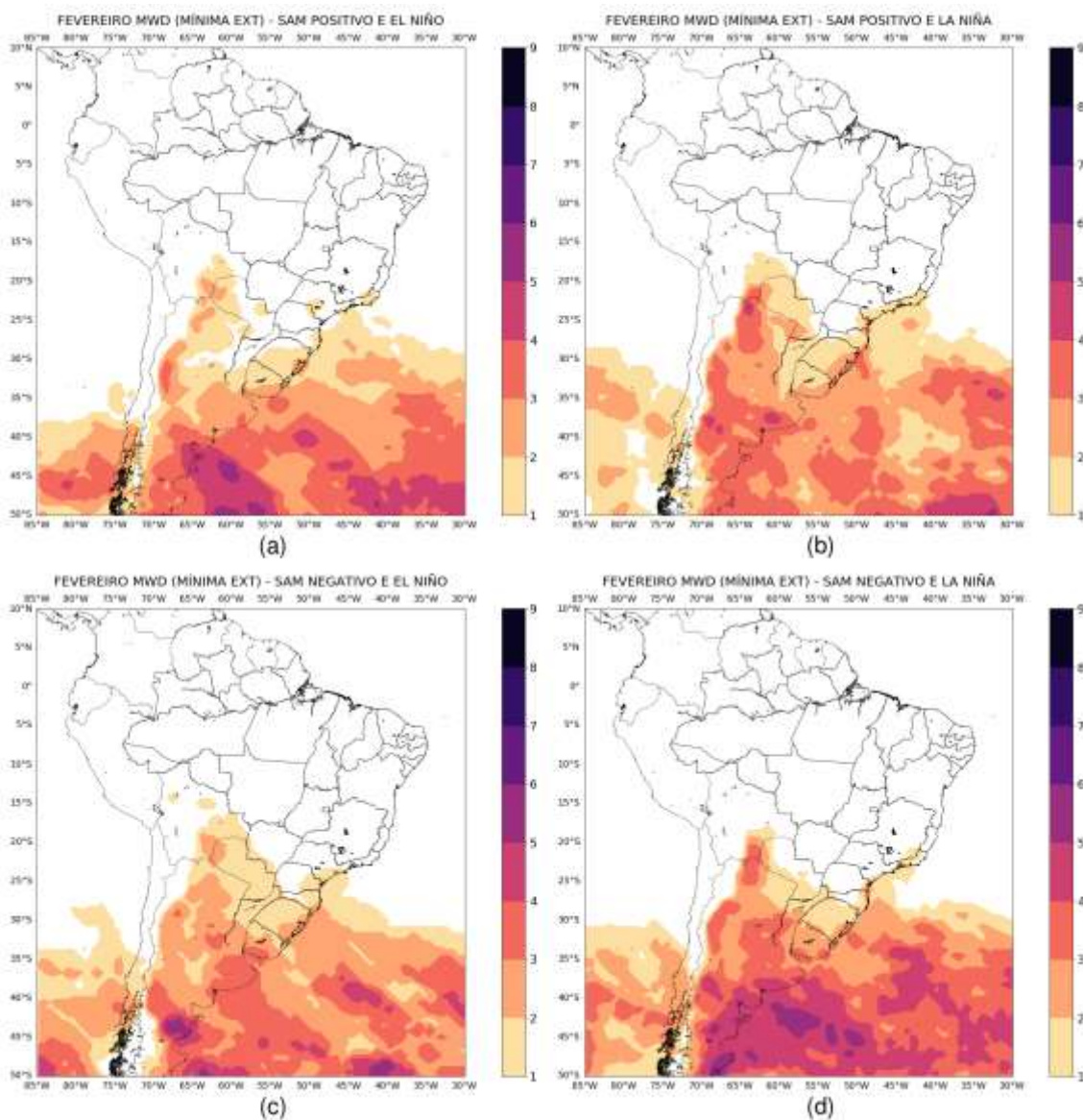
Figura 4. 11: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Na extensão mínima de gelo no MDW, podemos notar na Figura 4.12, que em geral há um maior número de frentes frias na fase negativa do SAM com La Niña, tanto no continente quanto no oceano (Figura 4.12d). Entretanto, na fase de SAM positivo e La

Niña (Figura 4.12b), nota-se um avanço das frentes na Região Sudeste do Brasil e um aumento de frentes no norte da Argentina.

Figura 4.12: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



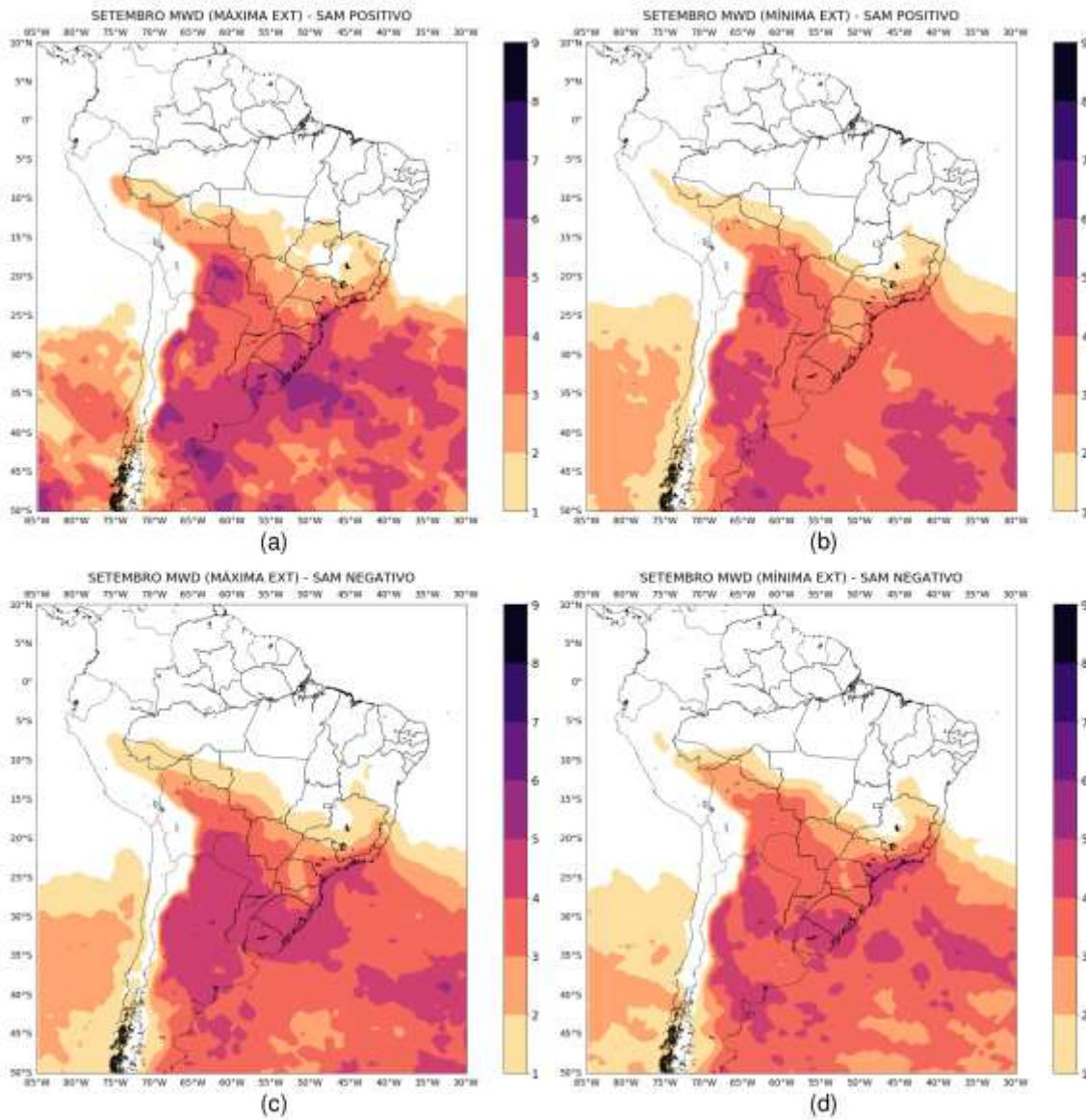
Podemos concluir que em fevereiro, no continente, a maior frequência de frentes ocorre na combinação de SAM positivo, El Niño e máxima extensão de gelo marinho, embora essa seja uma categoria com a menor frequência de frentes no oceano. Já no oceano,

duas categorias se destacaram: La Niña com SAM positivo e máxima extensão de gelo marinho e La Niña, com SAM negativo e mínima extensão de gelo marinho.

4.2.2 Setembro– MWD

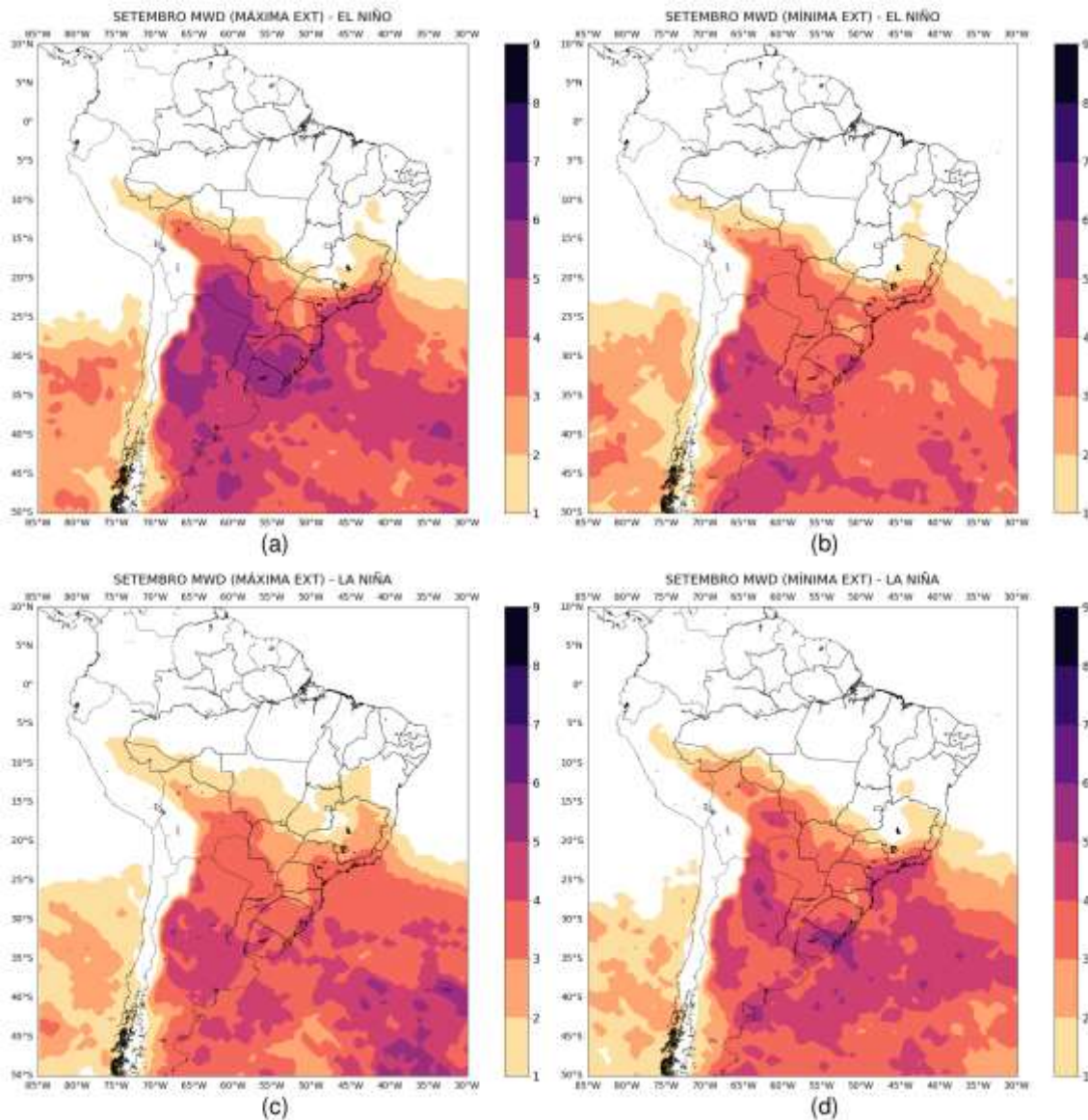
No mês de setembro, percebemos em geral o aumento do número de frentes frias em grande parte da AS, além do seu avanço adentro do continente, quando comparado com fevereiro. Observando os compostos com as fases do SAM, na fase positiva e máxima extensão de gelo marinho (Figura 4.13a), encontramos as maiores frequências, além de um maior avanço na Região Centro-Oeste. Entretanto, no continente, a fase negativa do SAM com máxima extensão também possui um número elevado de frentes, com valores de 4-5 frentes por mês em grande parte do Sudeste da AS (Figura 4.13c).

Figura 4.13: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: a) Fase positiva SAM durante a máxima extensão; b) Fase positiva do SAM durante mínima extensão; c) Fase negativa SAM durante máxima extensão; d) Fase negativa do SAM durante mínima extensão.



Ao analisar as fases do ENOS no mês de setembro para o MWD (Figura 4.14), em geral, podemos notar que o El Niño com máxima extensão de gelo possui sua maior atuação na frequência de frentes (Figura 4.14a). Entretanto, o Atlântico possui frequência similar também na La Niña com máxima e mínima extensão de gelo (Figuras 4.14c-d, respectivamente).

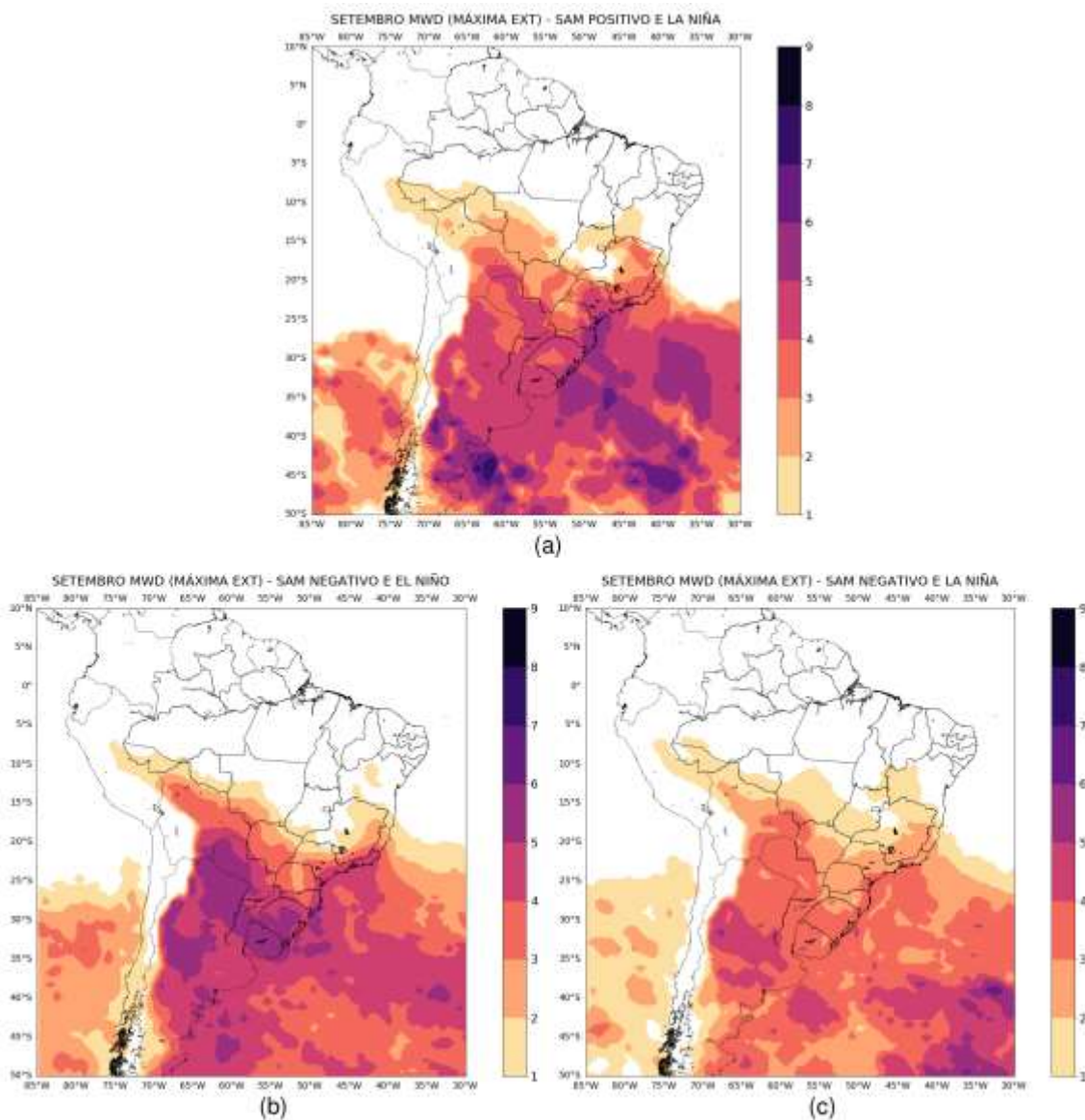
Figura 4.14: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima e mínima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de fevereiro: a) Fase positiva ENOS (El Niño) durante a máxima extensão; b) Fase positiva do ENOS (El Niño) durante mínima extensão; c) Fase negativa ENOS (La Niña) durante máxima extensão; d) Fase negativa do ENOS (La Niña) durante mínima extensão.



Na Figura 4.15, conforme o Quadro 4.8, não houve anos que correspondessem aos critérios estabelecidos para máxima extensão de gelo nas fases positivas dos padrões de teleconexão (SAM e ENOS). Na fase positiva do SAM e La Niña (Figura 4.15a), podemos verificar as máximas frequências sobre o oceano. Na fase negativa do SAM e

El Niño (Figura 4.15b), observa-se a maior frequência no continente, principalmente no sudeste da AS. Entretanto, a Figura 4.15a mostra uma região de grande ocorrência no sul da Argentina e também um maior avanço das frentes no Acre.

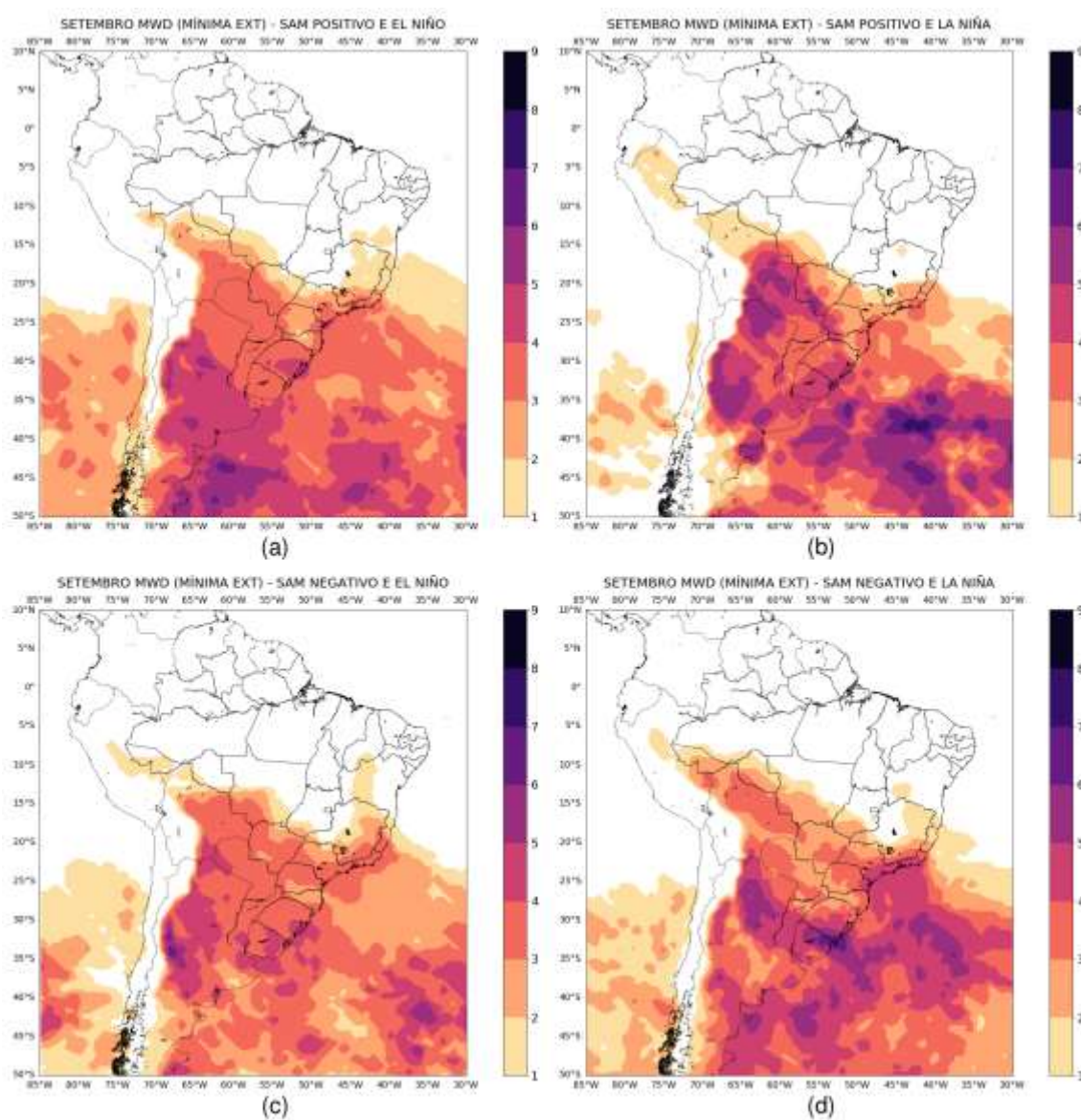
Figura 4.15: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de máxima extensão do gelo marinho no MBA, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Para a mínima extensão de gelo no MWD, no composto com fase positiva do SAM e La Niña (Figura 4.16b) é possível visualizar a máxima frequência de frentes frias em geral,

inclusive com um avanço das frentes para o norte do Peru. Entretanto, nota-se na fase negativa do SAM e positiva do ENOS (Figura 4.16c) um avanço das frentes no Nordeste do Brasil. Enquanto no litoral do Sudeste, o composto das fases negativas do SAM e do ENOS (Figura 4.16d) apresenta maiores frequências.

Figura 4.16: Compostos de frequências de frentes frias em períodos de mínima extensão do gelo marinho no MWD, para o mês de setembro: a) Fase positiva do SAM e positiva do ENOS (El Niño); b) Fase positiva do SAM e negativa ENOS (La Niña); c) Fase negativa do SAM e positiva do ENOS (El Niño); d) Fase negativa do SAM e do ENOS (La Niña).



Por fim, avaliando o mês de setembro para o MWD, conclui-se que no oceano as maiores frequências de frentes frias ocorrem no SAM positivo e La Niña, na máxima e na mínima extensão de gelo. Enquanto que no continente, em geral, as maiores frequências ocorrem no SAM negativo, El Niño e máxima extensão de gelo.

5. PROJETO RELACIONADO

Este trabalho é integrado ao projeto “interação gelo marinho-oceano-atmosfera-ondas no setor Atlântico do Oceano Austral e a relação com o Clima da América do Sul” (ATMOS – Antarctic Modeling and Observation System – CNPq/PROANTAR Processo 443013/2018-7)

6. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi realizado um programa de detecção de frentes frias para a AS no período de 1981-2010, para que pudéssemos contabilizar as frequências mensais de frentes nos meses caracterizados climatologicamente com extremos de gelo marinho antártico, fevereiro (mínima extensão) e setembro (máxima extensão). Assim, foram realizados para MBA e MWD, com e sem a atuação de padrões de teleconexões (SAM e ENOS) em análise conjunta. Apesar de utilizar critérios relativamente diferentes de Andrade (2005) para a contabilização da frequência mensal das frentes e analisar compostos em vez de médias climatológicas, os números de frentes foram em geral na mesma ordem deste trabalho prévio.

Os resultados dos compostos foram resumidos no Quadro 5.1. Nas análises, observamos a diferença nas atuações das frentes entre o continente e o Oceano Atlântico adjacente. Assim foram subdivididas as informações a fim de visualizar os impactos nas mesmas. Em geral, para ambos os meses e ambos os mares analisados, podemos notar a notória atuação da La Niña e SAM positivo em todas as análises de frequências máximas sobre o oceano, variando somente a extensão do gelo marinho. No continente, o El Niño domina as máximas frequências, junto com a fase positiva (negativa) do SAM em fevereiro (setembro) e com a mínima (máxima) extensão de gelo marinho no MBA

(MWD). As diferenças entre o oceano e continente indicam que os três fatores influenciam na trajetória das frentes, mais meridional continental ou mais marítima.

Os resultados apresentados aqui concordam parcialmente com os de Fedorova e Carvalho (2000), nas comparações envolvendo as fases do ENOS e as frentes frias. Em seu estudo, as maiores ocorrências de frentes frias na região de 20°-40°S estão presentes durante o El Niño. Nas análises mencionadas no presente trabalho podemos ver essa relação somente no continente (Quadro 5.1). Apenas para o mês de setembro no continente (em ambos os mares), os resultados aqui apresentados concordam com os de Reboita et al. (2009), onde mostram uma maior frequência de frentes associadas com a fase negativa do SAM. As diferenças apresentadas do atual trabalho para as publicações prévias reforçam que a atuação combinada entre gelo marinho, SAM e ENOS podem influenciar nas frentes que atuam na AS e Atlântico adjacente. Como continuação deste trabalho, pretende-se aprofundar o estudo, no intuito de entender a causa dessas diferenças.

QUADRO 6.1: Conclusões das análises de frequência máxima de frentes frias na AS em conjunto dos padrões de teleconexões e os extremos de gelo marinho antártico para MBA e MWD.

| Máxima frequência de frentes frias | | |
|---|--|---|
| | fevereiro | setembro |
| MBA | Continente: SAM positivo- El Niño - mínima extensão de gelo marinho Oceano: SAM positivo- La Niña - Mínima extensão do gelo marinho | Continente: SAM negativo- El Niño - Mínima extensão de gelo marinho Oceano: SAM positivo - La Niña - Máxima extensão de gelo marinho |
| MWD | Continente: SAM positivo- El Niño - Máxima extensão de gelo marinho Oceano:(duas configurações) SAM positivo- La Niña - Máxima extensão de gelo marinho e SAM negativo - La Niña - Mínima extensão de gelo marinho. | Continente: SAM negativo- El Niño - Máxima extensão de gelo marinho Oceano: SAM positivo - La Niña - Máxima e na Mínima extensão de gelo marinho |

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

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.

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, Mar. 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. Climatology of South American cold fronts. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 7., Wellington, New Zealand, 2003. **Proceedings...** New Zealand: American Meteorological Society, 2003. 1 CD-ROM.

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

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**. Cachoeira Paulista: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002 (Relatório PIBIC/CNPq/INPE)

CAVALIERI, D. J.; PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Geophysical Research Letters**, 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**, 118, 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**, 121, 9324-9341, 2016.

COMISO, J. C. 2017. *Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 3*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <<https://doi.org/10.5067/7Q8HCCWS4I0R>>

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.

GILLET, 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.

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, mar. 2009.

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/mtc-m19/2013/04.16.16.57-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.

192 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/10.09.19.33-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CPTMAL>>.

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.

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