Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NA AMÉRICA DO SUL E SUA RELAÇÃO COM O MODO ANULAR SUL

CARDOZO, Amanda Balbino – amanda.balbinocardozo@gmail.com
Bacharela em Ciências Atmosféricas – IRN/UNIFEI (Brasil)

REBOITA, Michelle Simões – reboita@unifei.edu.br
Doutora em Meteorologia – IRN/UNIFEI (Brasil)

GARCIA, Sâmia Regina – samia@unifei.edu.br
Doutora em Meteorologia – IRN/UNIFEI (Brasil)

RESUMO: O presente estudo avalia a ocorrência de Frentes Frias (FFs) em oito localidades na costa leste da América do Sul, tendo como principais objetivos: (1) quantificar a ocorrência das FFs no período de 2007 a 2013 com base em análise visual de cartas sinóticas e com um método objetivo usando duas reanálises diferentes; (2) mostrar a necessidade de estudos pontuais para definição de limiares quando do emprego de métodos automáticos para a identificação de FFs e (3) relacionar a ocorrência de FFs com as diferentes fases do Modo Anular Sul (MAS). Os resultados mostraram que o número médio anual de FFs diminui das maiores para as menores latitudes. De acordo com a média sazonal, baseada nas análises das cartas sinóticas, a ocorrência de FFs nas cidades argentinas praticamente não apresenta variabilidade sazonal. Já no Brasil, todas as cidades mostraram maior ocorrência de FFs no inverno e menor no verão. Em geral, as climatologias baseadas no emprego de um método automático dirigido com as reanálises subestimam o número de FFs. A relação da ocorrência de FFs com as fases do MAS mostrou uma preferência pela ocorrência de FFs na fase positiva do MAS na estação de verão e na fase negativa nas estações de inverno e primavera, para quase todas as cidades do estudo. Portanto, trabalhos como esse são importantes para monitoramento climático e para previsão de tempo.

Palavras-chave: sistemas frontais, circulação extratropical, reanálises.

CLIMATOLOGY OF COLD FRONTS OVER SOUTH AMERICA AND ITS RELATION WITH THE SOUTHERN ANNULAR MODE

ABSTRACT: This study evaluates the occurrence of Cold Fronts (CFs) at 8 cities over the South America eastern coast and the purposes are: (1) determine the climatology of CFs from 2007 to 2013 based on visual analysis of synoptic charts and with an objective method using two different reanalysis; (2) show the necessity of specific studies to define thresholds for employing automated methods for identifying CFs and (3) relate the occurrence of CFs with the different phases of the Southern Annular Mode (SAM). The results showed that the annual average of CFs is larger in high latitudes and decreases for lower latitudes. According to the seasonal average, based on analyzes of synoptic chars, the occurrence of CFs in the Argentine cities has practically no seasonal variability. In Brazil, all the cities in the study show higher occurrence of CFs in winter and lower in summer. In general, the climatologies based on the use of an automatic method driven with reanalysis underestimate the number of CFs. The relation of the occurrence of CFs and the different SAM phases showed a preference for the occurrence of CFs in the SAM positive phase in summer and the negative phase in winter and spring, for almost all the cities of study. Therefore, studies like this are important for climate monitoring and weather prediction.

Keywords: frontal systems, extratropical circulation, reanalysis

1. INTRODUÇÃO

A América do Sul (AS) é influenciada por massas de ar polar provenientes da Antártica. Quando essas massas encontram o ar mais quente das latitudes menores ocorre a formação de frentes frias (FFs). Esses sistemas, em geral, contribuem para

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

precipitação nas áreas que atravessam. Algumas das FFs que se deslocam de latitudes altas conseguem chegar até o sudeste do Brasil.

Quando as massas de ar polar encontram o ar mais quente em menores latitudes ocorre a formação de frentes frias. Essas frentes são um dos distúrbios transientes mais comuns na circulação atmosférica e, em geral, contribuem para o aumento da precipitação média nas áreas que atravessam. A chegada de uma frente fria (FF) ocasiona mudança no tempo local. Há um decréscimo rápido da temperatura, a pressão atmosférica diminui seguida por um aumento e ocorre um giro na direção dos ventos de quadrante norte para quadrante sul no Hemisfério Sul (PETTERSSEN, 1956). Logo após a passagem do sistema frontal observa-se acentuada queda de temperatura, aumento da pressão e ventos predominantemente de quadrante sul. Dependendo da intensidade da massa de ar frio na retaguarda de uma FF pode ocorrer geada após a passagem da frente num determinado local.

Segundo Stech e Lorenzzetti (1992), durante o inverno, o campo de ventos superficiais na plataforma continental sul-sudeste brasileira, é altamente influenciado pela passagem de sistemas frontais frios. Esses sistemas podem provocar a alteração da circulação costeira e alterações no nível do mar. Rodrigues et. al. (2004) relataram que quando as marés são alteradas, as atividades marítimas de pesca e navegação são afetadas, dificultando operações em portos. Além disso, as alterações do nível do mar podem provocar erosão costeira que, por sua vez, favorece a destruição das orlas e intrusões salinas.

Um dos primeiros estudos que avaliaram globalmente as regiões frontogenéticas foi o de Satyamurty e Mattos (1989). Considerando a AS, esses autores verificaram que a área mais frontogenética ocorre no sul da Argentina durante o verão e que essa área se desloca para o norte, no inverno, ocupando o nordeste da Argentina e vizinhança. Resultados similares foram obtidos por Simmonds et al. (2012), que determinaram uma climatologia de FFs no Hemisfério Sul entre 1989 e 2009 usando um método objetivo para a identificação de tais sistemas. Os autores observaram que nos meses de verão (dezembro a fevereiro) as maiores frequências de FFs estão entre as latitudes de 40ºS e 60ºS. Dentro dessa faixa há uma maior ocorrência nas regiões oceânicas a leste da Patagônia, sudeste da África do Sul e sudoeste da Austrália. No inverno (junho a agosto), esse cinturão de maiores frequências de sistemas frontais frios sofre um sutil deslocamento para norte e apresenta uma série de assimetrias zonais nas regiões oceânicas citadas. Os autores também relataram que as frentes mais intensas são as que ocorrem a oeste do oceano Índico e essa intensidade tende a ser maior no inverno do que no verão. Já Catto et al. (2012) avaliaram, no período entre 1997 a 2008, a relação da precipitação com a ocorrência média anual de FFs em termos globais. Foi verificado que nas latitudes médias do Hemisfério Sul, mais de 50% da precipitação anual está associada com a ocorrência de FFs.

Focando os estudos realizados para a AS, Justi da Silva e Silva Dias (2002) determinaram uma climatologia de FFs na AS com base em pontos de grade, delimitados pelos paralelos 10° e 60ºS e pelos meridianos de 30° a 90ºW, e com dados de reanálise do NCEP no período de 1981 a 1999. A ocorrência de uma FF foi definida quando detectada a reversão no sinal da componente meridional do vento (ventos de norte (-) para ventos de sul (+)). Foi mostrado que a região entre 15º e 40ºS sobre o continente é fortemente frontogenética. Andrade (2007) também determinou uma climatologia de FFs na AS, mas considerou 11 setores e o período entre 1980 e 2002. Para isso, utilizou um critério de identificação de FFs baseado na queda de temperatura em 925 hPa, aumento da pressão ao nível médio do mar e da mudança do sinal da componente meridional do vento em 925 hPa de um dia para o outro. Em termos médios sazonais, no inverno há mais frentes frias passando pela costa leste da Argentina. Já nas regiões sul e sudeste do Brasil, a primavera é a estação de maior ocorrência de sistemas frontais, o que também concorda com o estudo de Cavalcanti e Kousky (2009), exceto no nordeste

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

de Minas Gerais, sul da Bahia e norte do Espirito Santo em que a maior ocorrência de FFs se dá no inverno. Por outro lado, estudos mais recentes realizados para o sul de Minas Gerais, indicam que nessa região as FFs têm maior frequência entre o inverno e primavera (PENNA, 2013; SILVA et al., 2014). De fato, no inverno os gradientes latitudinais de temperatura mais intensos estão deslocados para norte, propiciando o avanço dos sistemas frontais até latitudes mais baixas.

Para a cidade de São Paulo, Dametto e Rocha (2006) estabeleceram uma climatologia das FFs, no período de 1981 a 2002, aplicando critérios objetivos às observações da estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP). O critério utilizado para a identificação das FFs foi o giro do vento meridional de quadrante norte para o sul, com a permanência nesse quadrante por pelo menos um dia e a queda da temperatura entre o dia e mais dois dias após o giro do vento. Analisando somente as estações de verão e inverno os autores obtiveram que 59% da precipitação observada no inverno esteve associada à passagem de sistemas frontais frios e 41% no verão. Também mostraram que a estação com maior ocorrência de FFs (226) foi o inverno e que a média anual de passagens desses sistemas em São Paulo é de 35. Poucos dos sistemas que passam pelo sudeste do Brasil conseguem chegar à região nordeste. De acordo com Kousky (1979), no sul da Bahia a maior frequência de passagem desses sistemas ocorre nas estações de inverno e primavera. O autor também associou os anos em que há maior frequência de FFs com o aumento da precipitação na região. Diferente do nordeste, as FFs possuem menor variabilidade sazonal no sul do Brasil. Rodrigues et al. (2004) elaboraram uma climatologia da frequência de FFs para o litoral de Santa Catarina e obtiveram uma média de 10 FFs por estação do ano.

Reboita et al. (2009a) mostraram que as regiões frontogenéticas na AS e os cinturões ciclogenéticos no Hemisfério Sul são influenciados pelas diferentes fases do Modo Anular Sul (MAS). O MAS é o principal modo de variabilidade da circulação extratropical no Hemisfério Sul, caracterizado por estruturas zonais simétricas ou anulares, com perturbações de altura geopotencial de sinais opostos entre a Antártida e latitudes a cerca de 45º (THOMPSON e WALLACE, 2000). O *Climate Predcition Center* (CPC/NOAA) define a fase positiva (negativa) do MAS quando há anomalias negativas (positivas) de altura geopotencial ao redor da Antártica e positivas (negativas) em latitudes médias. O CPC/NOAA também desenvolveu um índice para identificar as fases do MAS baseado no primeiro modo obtido na análise de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) empregada a dados de altura geopotencial em 700 hPa nas regiões ao sul da latitude de 20ºS, no período de 1979 e 2000.

Reboita e Ambrizzi (2006) e Reboita et al. (2009a, 2014) relataram que quando a fase do MAS é positiva (negativa) há maior (menor) densidade ciclogenética próxima a Antártida e condições desfavoráveis (favoráveis) para a ciclogênese nos arredores de 45ºS. Já Reboita et al. (2009b, 2014) destacam que na verdade há um tripolo, isto é, na fase positiva do MAS há maior ocorrência de ciclones ao redor da Antártica, menor em latitudes médias e maior em latitudes próximas do sudeste do Brasil e o oposto na fase negativa do MAS. Assim, a fase negativa do MAS, com mais ciclogênese em latitudes médias, também está relacionada com mais condições favoráveis à frontogênese em todas as estações do ano sobre o sul do Brasil, Uruguai, partes do centro e nordeste da Argentina e Oceano Atlântico Sul comparada às fases neutra e positiva. O favorecimento (desfavorecimento) à ocorrência frontal no sul do Brasil durante a fase negativa (positiva) do MAS pode ser o responsável pelas anomalias positivas (negativas) de precipitação nessa região registradas nessa fase do MAS, conforme destacam Reboita et al. (2009a).

Com o propósito de relacionar a passagem de FFs na região sul de Minas Gerais com as fases do MAS, Penna (2013) encontrou que mais de 60% das frentes que atingem essa região nos meses de janeiro, fevereiro, outubro e dezembro estão

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

relacionadas com a fase positiva desse modo de variabilidade. Já nos meses de abril, junho e agosto é a fase negativa que está mais relacionada com as FFs. A análise sazonal mostrou que na primavera e verão há maior frequência de FFs durante a fase positiva do MAS, enquanto que no outono e inverno a frequência de FFs é similar em ambas as fases do MAS. Assim, ressalta-se a necessidade de estudos que identifiquem a relação de sistemas atmosféricos com o MAS a fim utilizá-lo como um indicador nas práticas de previsão de tempo e clima.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo identificar a ocorrência de FFs no leste da AS, em oito cidades, no período de 2007 a 2013 e a relação de tais sistemas com as fases do MAS. É importante ressaltar que o setor leste da AS foi escolhido para o estudo por ser uma região do Hemisfério Sul que possui condições frontogenéticas em todas as estações do ano (SATYAMURTY E MATTOS, 1989). Além disso, grande parte da população sul-americana vive na região costeira sendo frequentemente afetada pela passagem de FFs. Um objetivo secundário foi comparar a climatologia das FFs identificadas com base nas cartas sinóticas do CPTEC com as computadas por um código automático utilizando as variáveis atmosféricas da reanálise da ERA-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) e *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

2. METODOLOGIA

Dados

Nesse estudo foram utilizadas cartas sinóticas de superfície nos horários da 00, 06, 12 e 18 Z, disponibilizadas pelo Grupo de Previsão de Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) entre 2007 e 2013. Também foram utilizados dados de temperatura do ar a 2 m de altura, pressão ao nível médio do mar (PNMM) e componente meridional do vento a 10 m de altura, obtidos da reanálise ERA-Interim do ECMWF (DEE et al., 2011) e da reanálise R1 do NCEP (KALNAY et al., 1996) no período de 2007 a 2013. A reanálise ERA-Interim tem resolução espacial de 0,75° x 0,75° de latitude por longitude enquanto a R1 tem resolução espacial de 2,5° x 2,5° de latitude por longitude. Em ambas a resolução temporal é de 6 horas. Depois de obtidas as reanálises, foram calculadas as médias diárias a fim de eliminar ou reduzir a influência de circulações de mesoescala nos dados.

Região de Estudo

A região de estudo compreende o setor leste da AS, desde o sul da Argentina até as latitudes do sul de Minas Gerais. Os pontos de grade onde se localizam as cidades utilizadas na Figura 1 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pontos de grade da localização de cada cidade utilizada no estudo.

Cidade	***Latitude***	***Longitude***
Rio Gallegos	51,37ºS	69,17ºO
Bahia Blanca	38,42ºS	62,19ºO
Buenos Aires	34,35ºS	58,29ºO
Porto Alegre	30,01ºS	51,13ºO
Florianópolis	27,35ºS	48,34ºO
Paranaguá	25,31ºS	48,31ºO
São Paulo	23,37ºS	46,37ºO
Maria da Fé	22,3ºS	45,38ºO

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

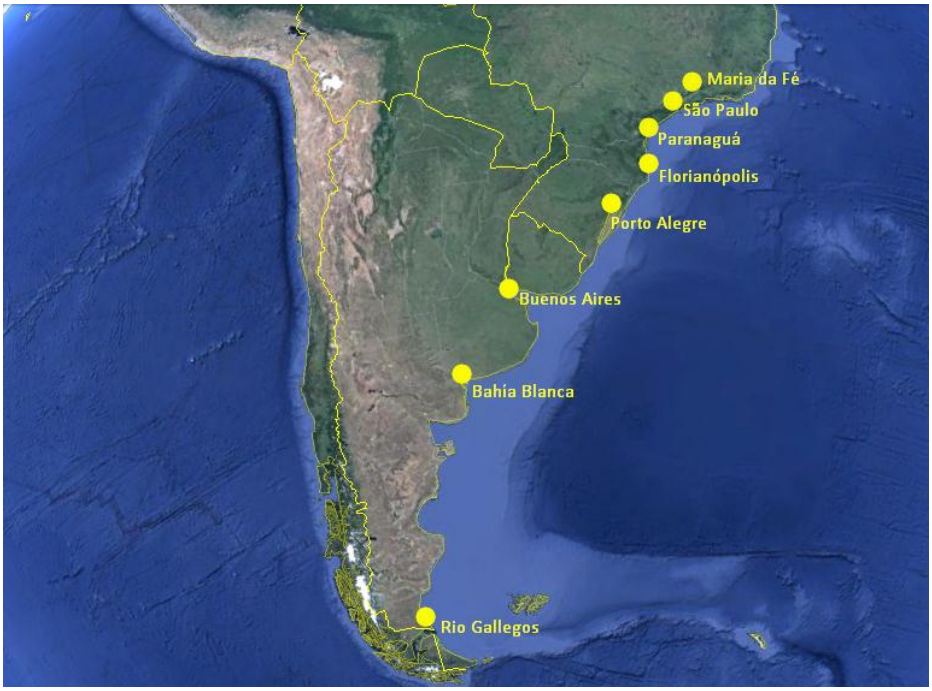

Figura 1 - Localização das cidades utilizadas no estudo. Fonte: GoogleEarth (2014).

Determinação da Ocorrência de FF

Análise das Cartas Sinóticas

Toda vez que as cartas sinóticas de superfície do CPTEC mostravam a passagem de uma FF por uma das cidades em estudo (Tabela 1) durante o período selecionado (2007-2013), a sua data e horário de ocorrência eram computados em uma planilha. A Figura 2 mostra um exemplo de carta sinótica de superfície. Nessa, nota-se a presença de uma FF (linha azul com triângulos) atuando em Paranaguá – PR e outra no extremo sul da AS. Portanto, a FF em Paranaguá foi incluída na planilha de ocorrência de sistemas frontais nessa localidade.

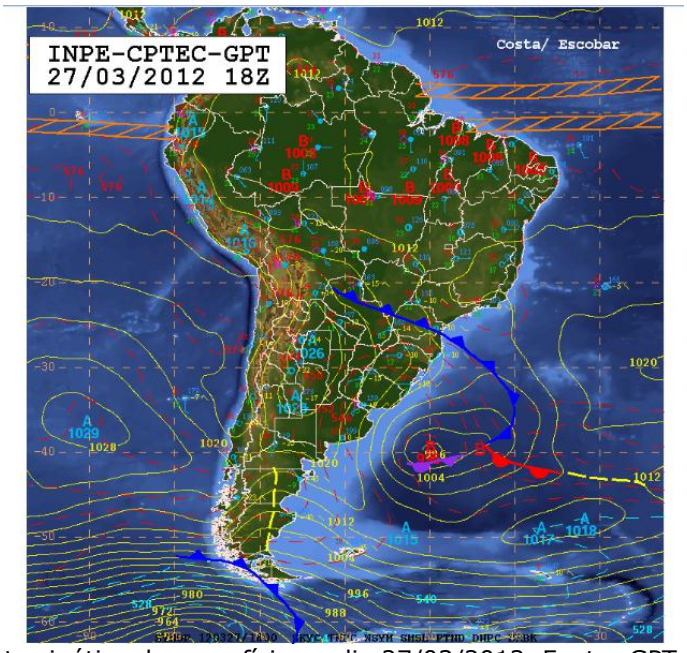

Figura 2 - Exemplo de carta sinótica de superfície no dia 27/03/2012. Fonte: GPT-CPTEC.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Análise Objetiva

As passagens de FFs sobre as cidades mostradas na Tabela 1 também foram identificadas através de um código automático similar ao de Rodrigues et. al. (2004) e de Silva et al. (2014). Esse código computa a passagem de uma FF quando ocorrem simultaneamente:

i) Mudança no sinal da componente meridional do vento, isto é, giro do vento do quadrante norte (valores negativos) para o quadrante sul (valores positivos);

ii) A temperatura do ar decresce em relação ao dia anterior ao do giro do vento ou no dia posterior;

iii) A pressão atmosférica aumenta em relação ao dia anterior e posterior ao do giro do vento.

Esses critérios foram aplicados nos pontos de grade mostrados na Tabela 1. Na Figura 3 tem-se um exemplo de como o método automático identifica as FFs. Na figura estão representadas as variáveis da reanálise ERA-Interim: componente meridional do vento, temperatura do ar e PNMM. A análise foi feita no mês de setembro de 2012 para a cidade de Maria da Fé. De acordo com as variações ao longo dos dias, nota-se que no dia 26 houve uma passagem de FF, pois o vento meridional mudou de quadrante norte para sul (de valores negativos para positivos), a temperatura do ar diminuiu e a PNMM aumentou com relação ao dia anterior ao do giro do vento. A carta sinótica do CPTEC comprova a passagem da FF nesse dia. Portanto, no presente estudo, os resultados obtidos no método automático são validados com base na análise das cartas sinóticas. É importante destacar que quando se utiliza códigos de detecção automáticos na identificação de sistemas atmosféricos, em geral, há um erro de até 20% na identificação dos sistemas (REBOITA, 2008; REBOITA et al., 2010).

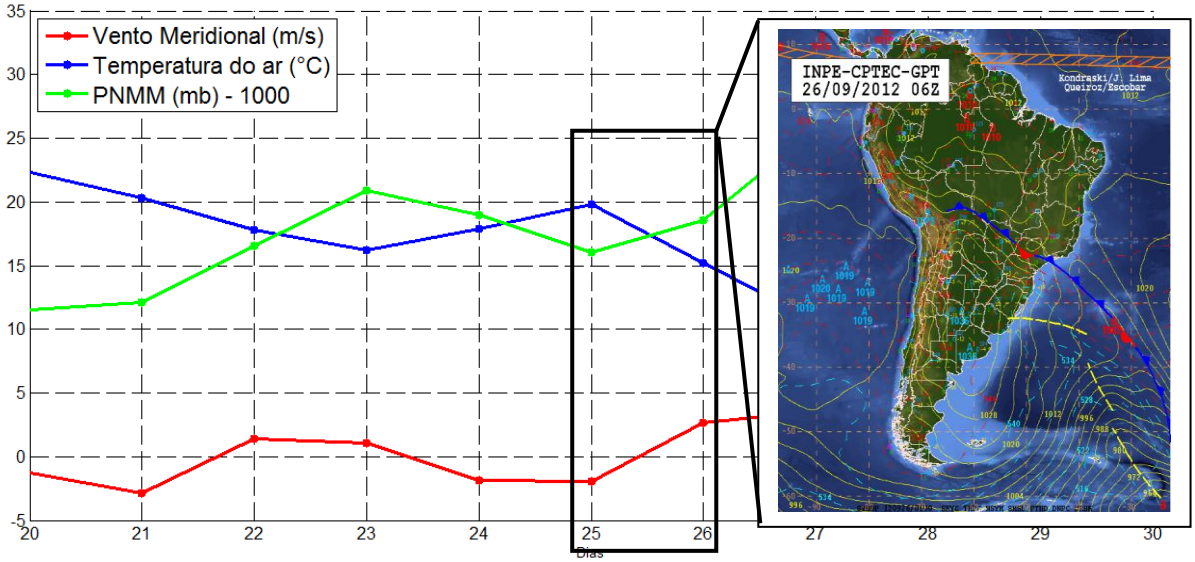

Figura 3 - Passagem de uma **FF** no dia 26 de setembro de 2012 em Maria da Fé de acordo com o código automático. Na figura à esquerda, a linha vermelha indica a componente meridional do vento (m/s) a 10 m de altura, a linha azul a temperatura do ar (°C) a 2 m de altura e a linha verde a PNMM (hPa) subtraída de 1000 hPa para ajuste à escala das demais variáveis. A carta sinótica do CPTEC (à direita) comprova a passagem da **FF** no dia 26/09/2012.

Frente Fria e o Modo Anular Sul

Para verificar a relação da ocorrência das FFs com o MAS, primeiramente obteve-se o índice diário do MAS para o período de estudo no sítio do *Climate Prediction Center* (CPC-NOAA ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks). A Figura 4 mostra a série mensal do índice do MAS de 2007 a 2013 com um destaque para o índice diário em junho de 2013, a fim de exemplificar o comportamento desse índice. O índice do MAS tem variação intra-mensal, isto é, em geral de 10 a 15 dias possui valores positivos (ou negativos) que são seguidos por valores de sinal contrário. No período de 2007 a 2013, em 1130 dias

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

predominou a fase negativa do MAS enquanto que em 1427, a fase positiva, o que implica numa diferença de 20% mais dias com fase positiva.

A etapa seguinte consistiu em verificar em que fase do MAS cada FF ocorreu e, com essa informação, foi possível identificar a possível relação entre as FFs e o MAS. É importante destacar que a relação de FFs com as fases do MAS não foi influenciada pela diferença de 20% mais dias com fase positiva, uma vez que os cálculos foram realizados proporcionalmente à quantidade de dias em cada fase. Assim, o número de FFs que ocorreram na fase positiva (negativa) foi dividido pela quantidade de dias da fase positiva (negativa) e multiplicado por 100 para se ter a informação em porcentagem. Para análise sazonal, o número de FFs em cada estação do ano em uma dada fase do MAS foi dividido pelo total de FFs obtidos naquela fase do MAS.

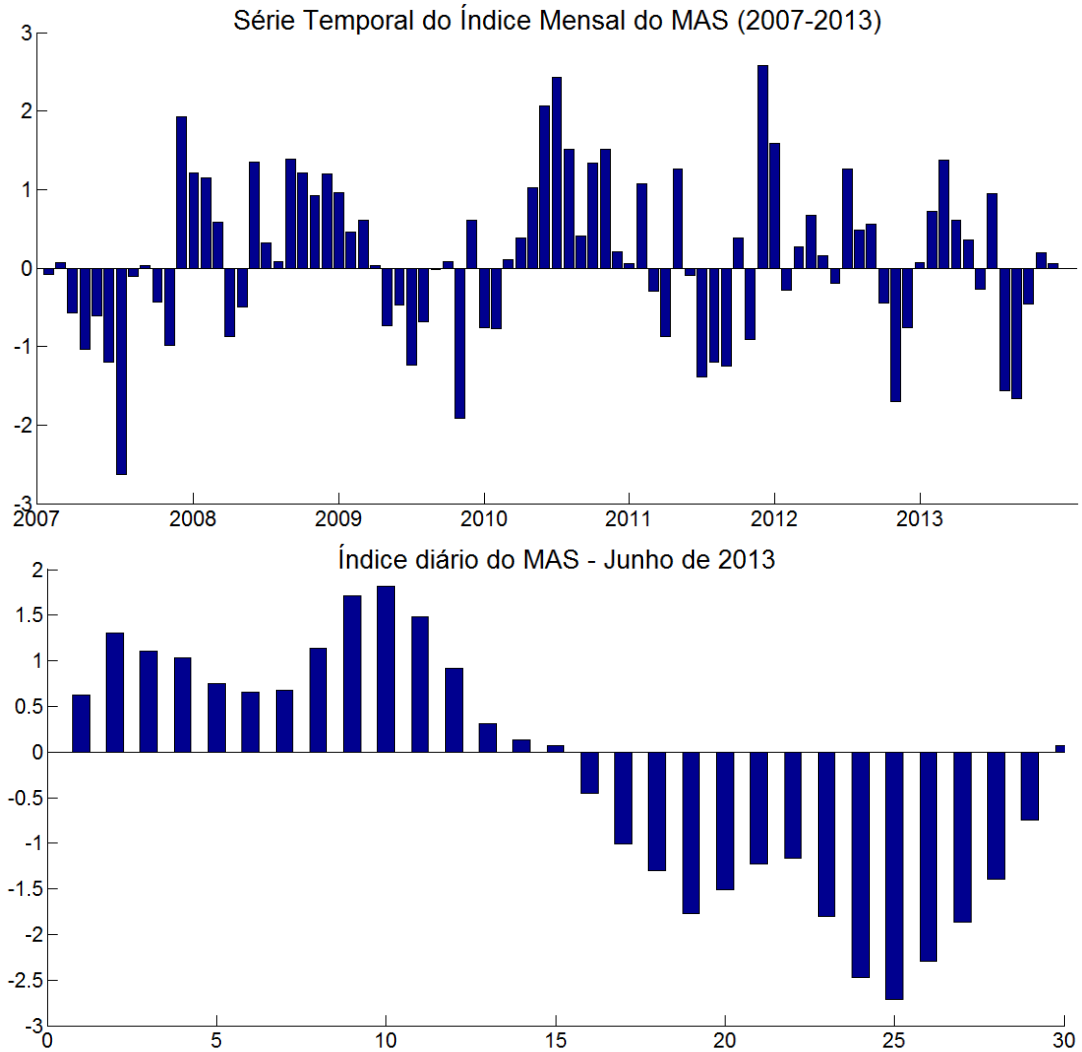

Figura 4 **-** Série temporal do índice mensal do **MAS** entre 2007 e 2013 (quadro superior) e um destaque para o índice diário de junho de 2013 (quadro inferior).

3. RESULTADOS

Média Anual da Ocorrência de Frentes Frias

De acordo com os registros das passagens de FFs nas cartas sinóticas do CPTEC para toda região de estudo, no período de 2007 a 2013, nota-se que o número médio anual de sistemas diminui das maiores para as menores latitudes (Figura 5), o que é

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

coerente com Andrade (2007) e Cavalcanti e Kousky (2009). De Rio Gallegos para Maria da Fé a diferença é de 82 sistemas frontais frios na média anual. O principal motivo dessa diferença é que Rio Gallegos está inserido numa região de latitudes médias a qual é caracterizada por intensos gradientes horizontais de temperatura os quais são essenciais para a gênese das FFs. Além disso, à medida que os sistemas se deslocam das latitudes mais altas em direção às mais baixas, como o movimento é para leste ou nordeste, os mesmos podem se dirigir ao oceano ou perder intensidade e não conseguir chegar com tanta frequência ao sudeste do Brasil.

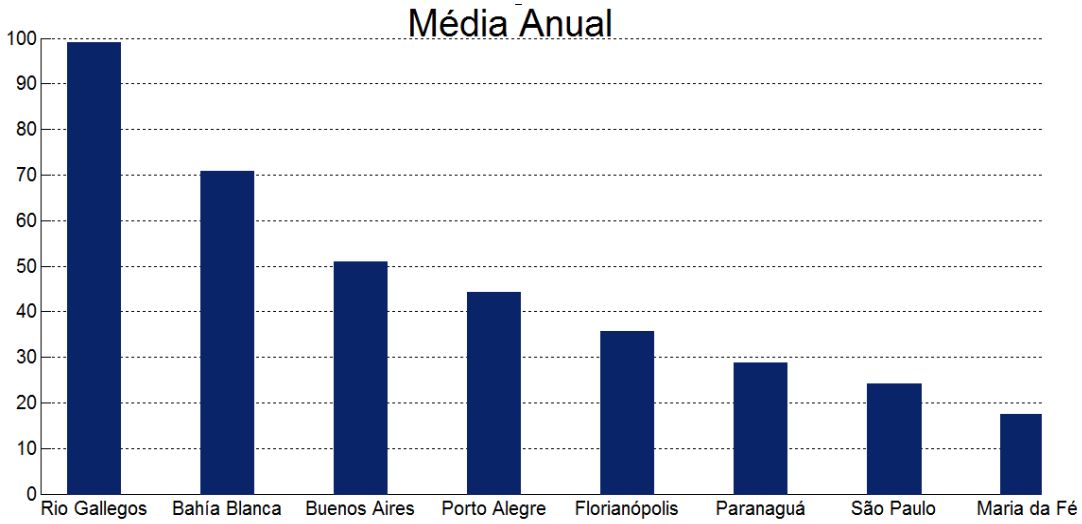

Figura 5 **-** Média anual da passagem de **FFs** no setor leste da AS, no período de 2007 a 2013, de acordo com as cartas sinóticas do CPTEC.

Média Sazonal da Ocorrência de FF

Com relação à variabilidade sazonal da ocorrência de **FFs** (Tabela 2), tem-se que, em Rio Gallegos, a mesma praticamente não é observada, uma vez que na estação de maior ocorrência (outono) há 25,7 **FFs** na média enquanto que na estação de menor ocorrência (primavera), há 23,3 sistemas. Em Bahia Blanca, apesar da fraca variabilidade sazonal das **FFs**, nota-se que as estações com maior ocorrência foram verão e outono, assim como em Buenos Aires, com 13,8 e 14,0, respectivamente. Já no Brasil, em todas as cidades de estudo, o inverno foi a estação de maior ocorrência de **FFs**. Em Porto Alegre, a segunda estação de maior ocorrência é a primavera; já o verão é a estação que possui menor atuação desses sistemas. A mesma variabilidade sazonal (mas com diferenças em valores) ocorre para Florianópolis, Paranaguá, São Paulo e Maria da Fé. Com relação às médias sazonais de **FFs** em Maria da Fé, Penna (2013), utilizando as cartas sinóticas do CPTEC, encontrou resultados semelhantes para a região sul de Minas Gerais: o inverno é a estação de maior passagem de **FFs** (média de ~6 sistemas) e o verão é a estação menos influenciada por esses sistemas (~2 **FFs**).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 2 - Média sazonal da passagem de **FFs** no setor leste da AS no período de 2007 a 2013, de acordo com as cartas sinóticas do CPTEC.

Cidades	***Outono***	***Inverno***	***Primavera***	***Verão***	***Total***
Rio Gallegos	25,7	25,5	23,3	24,5	99,0
Bahia Blanca	19,3	16,0	17,0	18,3	70,6
Buenos Aires	14,0	11,3	11,8	13,8	50,9
Porto Alegre	10,0	14,0	12,0	7,8	43,8
Florianópolis	8,0	13,3	9,3	5,0	35,6
Paranaguá	6,7	11,0	8,3	2,5	28,5
São Paulo	5,0	9,5	7,0	2,3	23,8
Maria da Fé	4,0	7,0	5,0	1,3	17,3

Comparação com o Código Automático

A comparação da média sazonal da ocorrência de FFs de acordo com os registros das cartas sinóticas e com os registros feitos pelo código automático, usando dados do NCEP e ECMWF, é mostrada na Figura 6.

Para as cidades de Rio Gallegos, Bahia Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre o código subestima as passagens de FFs em todas as estações do ano com os dois tipos de dados. Para as três cidades argentinas, as subestimativas do código são maiores: em Rio Gallegos as cartas sinóticas registraram um número superior a 20 FFs em todas as estações do ano enquanto que o código, tanto para os dados do NCEP quanto para os do ECMWF, não chegou a computar 8 FFs na média sazonal.

Para Porto Alegre, o desempenho do código com os dados do NCEP foi um pouco melhor apesar de ainda subestimar a ocorrência de FFs. O inverno foi a estação de maior ocorrência desses sistemas tanto nas cartas sinóticas quanto com os dados do NCEP. Já com os dados do ECMWF, as estações com maior frequência de FFs foram outono e primavera. O verão foi a estação que o código melhor representou a ocorrência de FFs com os dois tipos de dados.

Em Florianópolis, a única estação do ano que o código superestimou a ocorrência de FFs foi no verão. Nessa estação, a média sazonal com as cartas sinóticas registraram 5 FFs enquanto que o código com os dados do ECMWF registrou 7 FFs e com os dados do NCEP, 5,5 sistemas. A primavera e outono foram as estações do ano em que o código, usando dados do ECMWF, melhor simulou as FFs.

Em Paranaguá, o código usando dados do NCEP só superestima a ocorrência de FFs no verão e mostra pequena variabilidade sazonal na passagem de FFs; enquanto que, usando dados do ECMWF, a superestimação ocorre no verão e outono e a maior frequência de FFs ocorre no inverno, padrão similar ao registrado nas cartas sinóticas.

Para a cidade de São Paulo, a ocorrência de FFs no outono e verão foi superestimada pelo código com os dois tipos de dados; no inverno foi subestimada com os dois tipos dados e na primavera foi subestimada com os dados do NCEP e superestimada com os dados ECMWF. Praticamente não há variabilidade na ocorrência de FFs nas estações de outono, inverno e primavera com os dados do ECMWF, já com os dados do NCEP o inverno é a estação de maior ocorrência desses sistemas o que concorda com as cartas sinóticas.

Em Maria da Fé, a média sazonal da ocorrência de FFs é superestimada pelo código usando os dois tipos de dados (exceto no inverno com o ECMWF). Enquanto as

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

cartas sinóticas mostram maior ocorrência de FF no inverno e primavera e menor no verão, o NCEP e ECMWF mostram um máximo sutil na primavera comparado ao outono e inverno e um mínimo no verão.

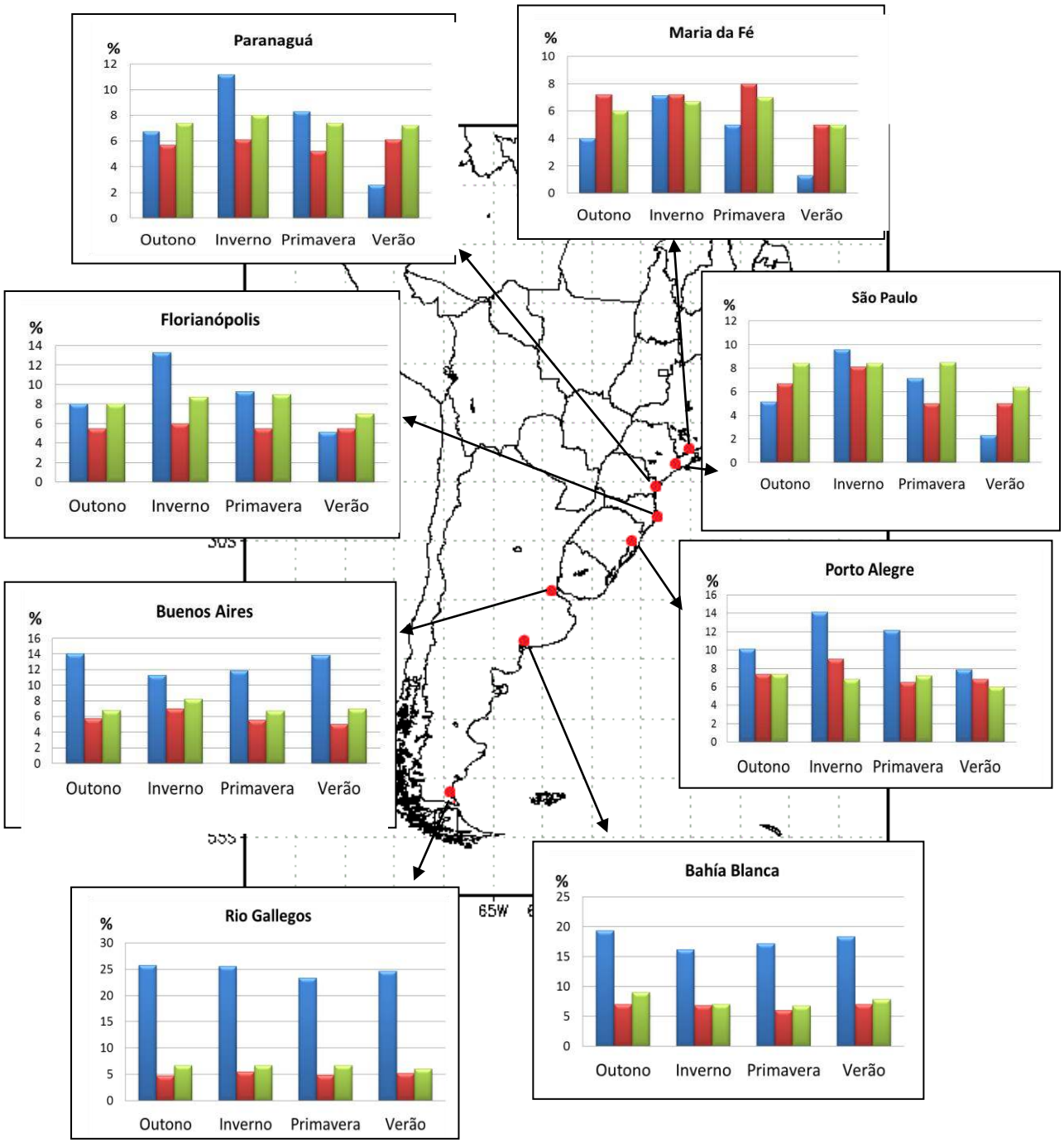

Figura 6 - Média sazonal da ocorrência de **FFs** registradas pelas cartas sinóticas do CPTEC (barra azul) e as computadas pelo código automático com os dados do **NCEP** (barra vermelha) e dos **ECMWF** (barra verde), para toda região de estudo (pontos vermelhos) no período de 2007 a 2013.

Para entender o motivo de o código automático ser mais eficiente ou não em certas regiões da AS e em determinadas épocas do ano é preciso analisar a série temporal das variáveis atmosféricas nessas regiões, para os dois tipos de dados. Aqui só serão mostrados dois exemplos: um para Maria da Fé e outro para Rio Gallegos.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Na estação de verão tanto o NCEP quanto o ECMWF superestimam a ocorrência de FFs registradas nas cartas sinóticas (Figura 6). Grande parte das FFs identificadas pelo código automático nessa estação do ano não estão associadas diretamente com as FFs e sim (erroneamente) com o surgimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Embora a evolução temporal das variáveis atmosféricas mostradas na Figura 7, com os dados do NCEP e ECMWF, indiquem características típicas de uma FF no dia 13/02/2009, na realidade ocorreu uma ZCAS como identificou a análise sinótica do CPTEC (Figura não mostrada). Durante a ZCAS, há redução da PNNM que favorece a nebulosidade e anomalias ciclônicas em superfície no Atlântico Sudoeste nas cercanias da região sudeste do Brasil. A nebulosidade, por sua vez, faz a temperatura decrescer em superfície e as anomalias ciclônicas em baixos níveis da atmosfera podem gerar um escoamento proveniente de sul para São Paulo e sul de Minas Gerais. O ar mais frio, como é mais denso, pode influenciar o aumento da pressão atmosférica sobre as regiões em que atua. Portanto, essas características, podem ser confundidas com as de FFs pelo código automático.

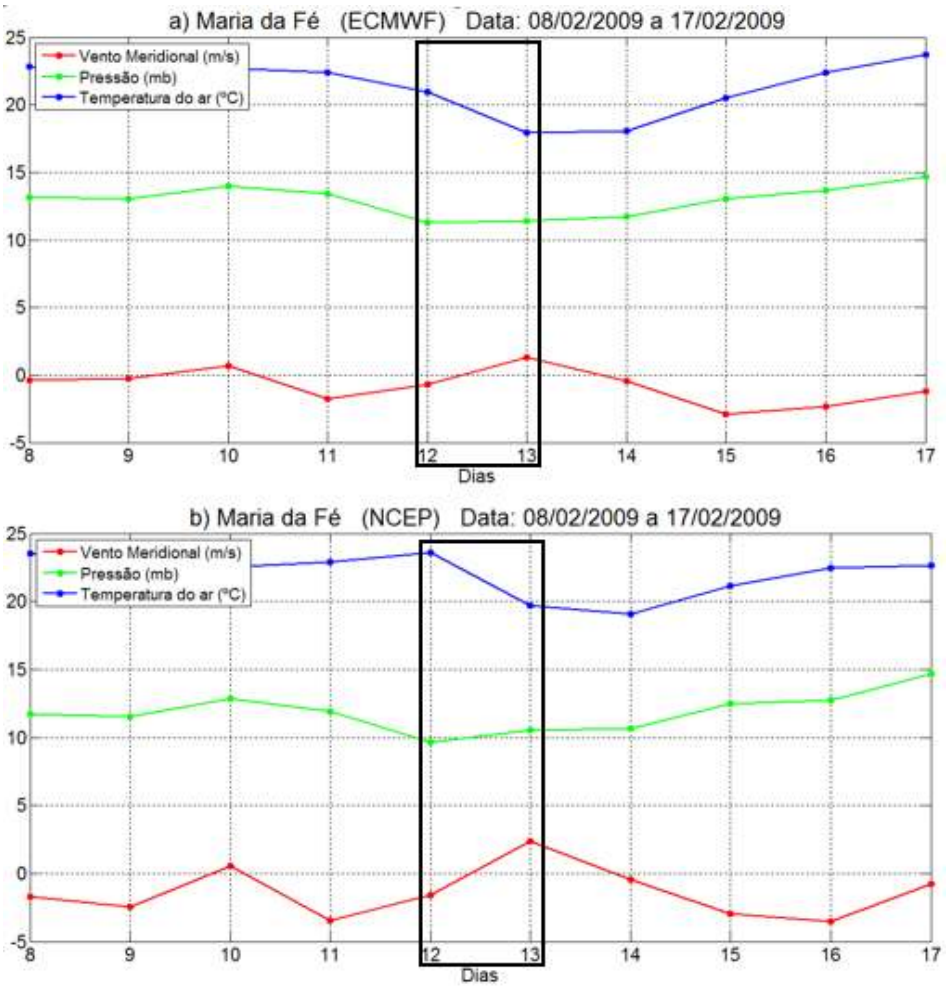

Figura 7 - Série temporal das variáveis atmosféricas: componente meridional do vento (m/s) a 10 m de altura, temperatura do ar (°C) a 10 m de altura e PNMM (hPa) na cidade de Maria da Fé no mês de janeiro de 2013. (a) dados do **ECMWF** e (b) dados do **NCEP**. Para manter a mesma escala gráfica a PNMM (hPa) foi subtraída de 1000 hPa.

Em Rio Gallegos, a Figura 6 mostrou uma grande subestimativa da ocorrência de FFs quando utilizado o código automático. Como essa cidade está situada numa região de grande baroclinia e, portanto, grande ocorrência de FFs, as características informadas ao código automático não são eficientes para a detecção das FFs, pois pode ocorrer a passagem de FF em dois dias consecutivos ou mais e, nesse caso, o código não consegue capturar o giro do vento de um dia para o outro e, portanto, as FFs. Além disso, a PNMM

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

também pode estar mostrando queda sucessiva ao invés de um aumento. A Figura 8 ilustra algumas dessas situações.

A série temporal das variáveis atmosféricas em julho de 2013 para os dados do NCEP e ECMWF em Rio Gallegos é mostrada na Figura 8. As datas destacadas na figura (16, 18 e 19) indicam a passagem de FFs de acordo com as cartas sinóticas do CPTEC. Observa-se que para esses dias o código automático não computou a ocorrência de FFs. Isso porque as condições necessárias para o registro destas não foram satisfeitas. Nota-se que do dia 15 para o 16 a temperatura do ar diminuiu, houve o giro do vento de norte (-) para sul (+), mas a PNMM também diminuiu. Do dia 17 para o dia 18 não se obteve giro de quadrante norte para sul do vento, o mesmo também ocorreu no dia 19 e a PNMM também diminuiu significativamente. Portanto, as características informadas ao código automático para identificação de FFs em latitudes médias não são satisfatórias, pois as condições que definem a passagem de uma FF variam de formas diferentes a daquelas descritas no código, principalmente em passagem de frentes consecutivas, como as dos dias 18 e 19.

Essas análises indicam que para a utilização de códigos automáticos que detectem a passagem de FFs deve ser realizado um estudo pontual em cada região de interesse para definição de limiares e índices apropriados, pois do contrário as climatologias poderão apresentar erros. Outro fato que é importante destacar é a utilização de diferentes tipos de dados nos códigos automáticos. Quando comparados os resultados entre dois conjuntos podem haver diferenças que provêm da "geração" dos dados como: tipo de interpolação utilizada, resolução horizontal etc.

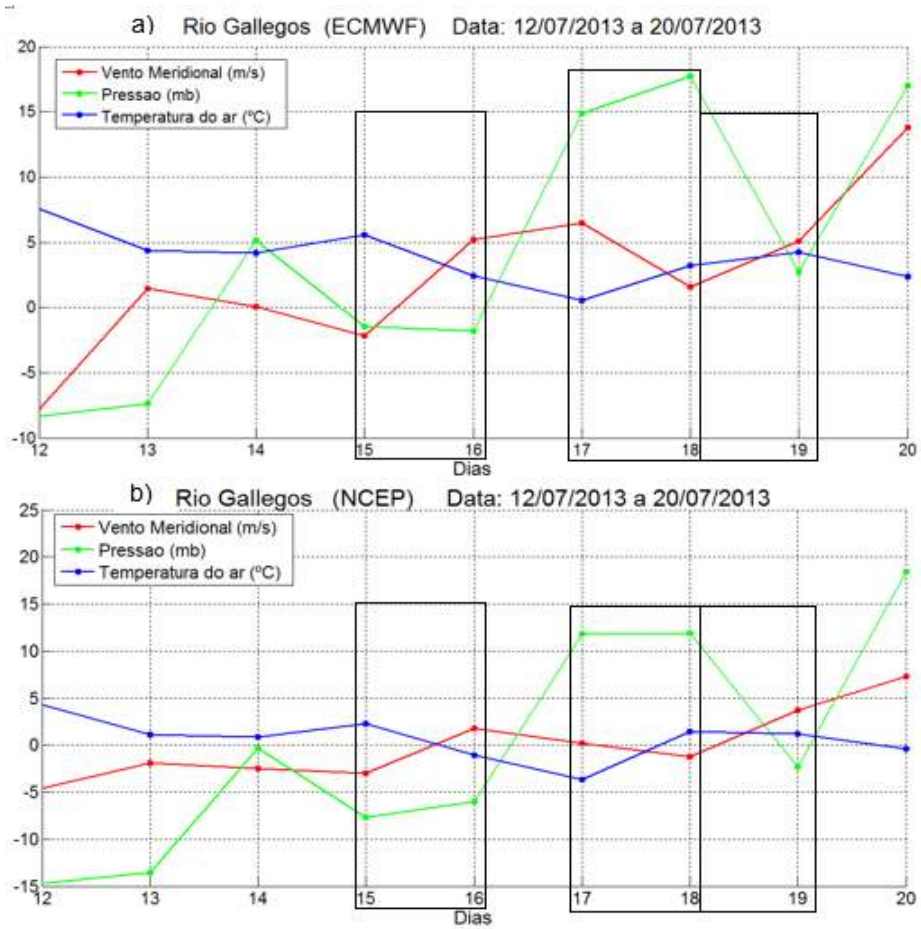

Figura 8 - Série temporal das variáveis atmosféricas: componente meridional do vento (m/s) a 10 m de altura, temperatura do ar (°C) a 10 m de altura e PNMM (hPa) na cidade de Rio Gallegos no mês de julho de 2013. (a) dados do **ECMWF** e (b) dados do **NCEP**. Para manter a mesma escala gráfica a PNMM (hPa) foi subtraída de 1000 hPa.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Relação das FFs com o Modo Anular Sul

A relação da passagem de FFs com o MAS foi obtida através da análise das cartas sinóticas do CPTEC e do índice do MAS fornecido pelo CPC-NOAA. Para cada ocorrência de FF foi registrado o valor do índice do MAS e considerada como fase positiva os valores acima de zero e como fase negativa os valores abaixo de zero. Após, verificou-se anualmente e sazonalmente o número de ocorrências de FFs em cada fase do MAS.

A porcentagem de FFs ocorridas em cada fase do MAS para todas as cidades em estudo está apresentada na Tabela 3. Em Rio Gallegos, Florianópolis, Paranaguá, São Paulo e Maria da Fé a passagem de FFs foi ligeiramente maior durante a fase positiva do MAS. Já em Bahía Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre, foi na fase negativa. Com base nos resultados apresentados e nos estudos de Reboita et al. (2009a, 2014) pode-se ter as seguintes suposições:

- em Rio Gallegos, em termos de quantidade total de casos, a ocorrência das FFs é ligeiramente superior na fase positiva do MAS e, tal resultado, é influenciado pela estação de verão como mostra a Figura 9. Cabe ressaltar que, como há predomínio de anomalias positivas de geopotencial na região de Rio Gallegos na fase positiva do MAS, tem-se que as condições para passagem das FFs não seriam propícias. Desta forma, algum outro mecanismo pode estar favorecendo a ocorrência das FFs na fase positiva do MAS. Assim, ainda são necessários estudos para explicar os processos físicos que ocorrem na fase positiva do MAS durante o verão para influenciar a ocorrência de FFs.

- as latitudes de Bahia Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre durante a fase positiva do MAS, em geral, são dominadas por anomalias positivas de geopotencial, o que desfavorece a formação de FFs. De fato, Reboita et al. (2009a) mostraram em sua Figura 2 que há uma notável redução nas condições frontogenéticas nessa região durante a fase positiva do MAS e tal fato pode ser a explicação para as anomalias negativas de precipitação no Uruguai e sul do Brasil durante a fase positiva do MAS. Como as condições descritas são opostas na fase negativa do MAS, a maior porcentagem de FFs mostradas na Tabela 3 na fase negativa do MAS em Bahia Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre está consistente com os resultados da literatura.

- em Florianópolis, Paranaguá, São Paulo e Maria da Fé, a ligeira predominância da ocorrência de FFs na fase positiva do MAS deve-se ao fato de que nas latitudes dessas cidades as anomalias de geopotencial, em geral, tornam-se negativas com MAS positivo e há mais condições para a formação de ciclones com seus ramos frontal frio e quente associados. Assim, tais sistemas frontais frios podem acabar influenciando as cidades mencionadas.

Tabela 3 - Percentual de **FF** observadas nas fases negativa (-) e positiva (+) do **MAS**.

Cidade	***MAS (-)***	***MAS (+)***
Rio Gallegos (51,37ºS; 69,17ºO)	26,0%	27,6%
Bahía Blanca (38,42ºS; 69,19ºO)	20,4%	18,6%
Buenos Aires (34,35ºS; 58,29ºO)	15,9%	12,5%
Porto Alegre (30,01ºS; 51,13ºO)	13,3%	11,1%
Florianópolis (27,35ºS; 48,34ºO)	9,2%	10,0%
Paranaguá (25,31ºS; 48,31ºO)	6,8%	8,4%
São Paulo (23,37ºS; 46,37ºO)	5,8%	7,2%
Maria da Fé (22,3ºS; 45,38ºO)	4,3%	4,9%

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

O percentual da passagem de FFs em cada fase do MAS por estação do ano está representado na Figura 9, sendo que a quantidade de FFs observadas em cada estação do ano dentro de uma dada fase do MAS foi dividida pelo número total de FFs ocorrido em tal fase. Por exemplo, em Rio Gallegos, no outono, ocorreram 93 FFs durante a fase positiva do MAS. Então, esse número foi divido pelo número total de FFs ocorrido na fase positiva nessa localidade (394 FFs); o que indica que 23,6% das FFs nessa fase do MAS, ocorreram no outono. O mesmo foi feito para as outras estações. Assim, somando-se a porcentagem de ocorrência de FFs em determinada fase, em cada estação do ano (Figura 9) deve-se obter 100%.

Em geral, a variabilidade sazonal mostrada na Figura 9 assemelha-se à da Figura 6 considerando os dados provenientes das cartas sinóticas (barras azuis da Figura 6). O aspecto a ser analisado agora é o domínio da ocorrência das FFs em determinada fase do MAS ao longo das estações do ano. Em Rio Gallegos há uma preferência pela ocorrência das FFs na fase negativa do MAS do outono até a primavera e na fase positiva no verão. Não é apenas em Rio Gallegos que as FFs no verão ocorrem mais durante a fase positiva do MAS. Isso também é registrado nas demais cidades em estudo (Figura 9). Com relação às cidades localizadas na costa brasileira, isso pode estar relacionado com o favorecimento à ciclogênese no oceano Atlântico nas latitudes de tais cidades na fase positiva do MAS e pelo verão ser a estação de maior gênese desses sistemas (REBOITA, 2008; REBOITA et al., 2010). Como a maioria dos ciclones nessa região estão associados a FFs, tem-se que os mesmos acabam influenciando tais cidades, devido à formação de nuvens, precipitação, ventos fortes e bruscas mudanças na temperatura (REBOITA, 2008).

Em todas as cidades o número de passagem de FFs no inverno e primavera foi maior na fase negativa do MAS, exceto em Maria da Fé. Em Bahía Blanca e São Paulo, no outono as FFs ocorrem preferencialmente na fase positiva do MAS, já em Rio Gallegos e Maria da Fé nessa mesma estação do ano, as FFs ocorreram na fase negativa. Na cidade de Maria da Fé há um padrão diferente daquele encontrado na estação de inverno nas outras localidades, nessa cidade a maior ocorrência de passagens de FFs no inverno ocorre na fase positiva do MAS. É importante ressaltar que esse estudo é praticamente inédito, o que indica que ainda são necessárias mais análises para explicar a física da atmosfera associada com os resultados apresentados.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

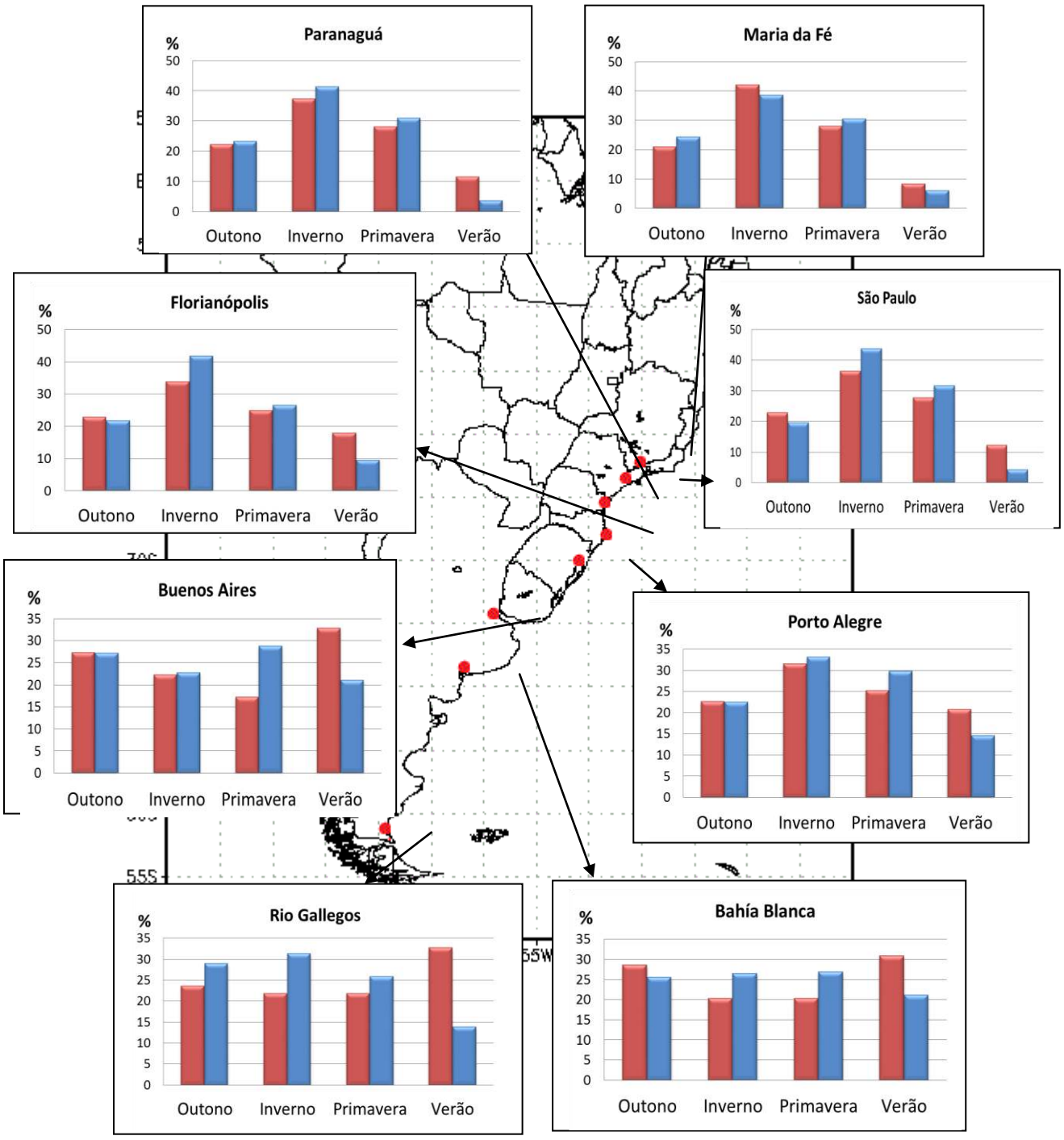

Figura 9 - Porcentagem sazonal de ocorrência de FF nas fases positiva (barra vermelha) e negativa (barra azul) do MAS no período de 2007 a 2013.

4. CONCLUSÕES

Considerando, inicialmente, as análises feitas com as cartas sinóticas do CPTEC, o número médio anual de sistemas frontais diminui das maiores para as menores latitudes. A diferença do número de **FFs** entre Rio Gallegos, cidade localizada em latitudes mais altas, e Maria da Fé, localizada em latitudes mais baixas, é de 82 **FFs**. De acordo com Cavalcanti e Kousky (2009), na região sul de Minas Gerais, o número médio anual é de 30 sistemas; porém, no presente estudo, em Maria da Fé o número anual foi

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

de 17 FFs. Sugere-se que um dos motivos da discrepância no número de FFs pode ser devido às diferentes metodologias de estudo, uma vez que tais autores utilizaram apenas um código automático para identificação das frentes que leva em consideração os dados fornecidos bem como os limiares de temperatura, vento e PNMM.

De acordo com a média sazonal de ocorrência de FFs, Rio Gallegos praticamente não mostrou variação sazonal. A estação de maior ocorrência (outono) apresentou 25,7 FFs e a primavera, estação de menor ocorrência registrou 23,3 sistemas. Em Bahia Blanca e Buenos Aires também houve fraca variação sazonal e as estações de maior ocorrência foram o verão e outono. No Brasil, todas as cidades de estudo obtiveram maior ocorrência de FFs no inverno, a segunda estação do ano com maior frequência foi a primavera. O verão foi a estação de menor ocorrência de FF.

Quando as climatologias de FFs obtidas com o código automático foram comparadas com a obtida com as análises das cartas sinóticas do CPTEC, verificou-se uma subestimativa da ocorrência de FFs em Rio Gallegos, Bahia Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre em todas as estações do ano tanto com os dados NCEP quanto com os do ECMWF. Já nas cidades de São Paulo e Maria da Fé a ocorrência de FFs no outono e verão foi superestimada pelo código com os dois tipos de dados. Portanto, ressalta-se que o estudo de FFs com base em códigos automáticos deve levar em consideração critérios e limiares característicos de cada localidade em estudo e não critérios gerais empregados numa grande área da AS.

A relação das FFs com as fases do MAS em termos valores totais mostrou uma ligeira preferência pela ocorrência desses sistemas na fase positiva em Rio Gallegos, Florianópolis, Paranaguá, São Paulo e Maria da Fé e na fase negativa em Bahía Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre. Em termos médios sazonais um resultado interessante foi que em todas as cidades analisadas, no verão, as FFs ocorrem preferencialmente na fase positiva do MAS. Como esse estudo é praticamente inédito, ainda são necessárias investigações adicionais para identificar a física da atmosfera associada com os resultados da relação entre as FFs e o MAS.

Referências

ANDRADE, K. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2007. 187 f. *Dissertação (Mestrado em Meteorologia)* – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

CATTO, J. L. et al. *Relating global precipitation to atmospheric fronts.* Geophysical Research Letters, doi: 10.1029/2012GL051736, 2012.

CAVALCANTI, I. F.; KOUSKY, V. E. *Configuração de Anomalias Associadas à Propagação de Sistemas Sinóticos sobre a América do Sul.* Congresso Brasileiro de Meteorologia, IX, Anais... Campos do Jordão, SP, p.1331-1332, 1996.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. *Parte I - Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: Frentes frias sobre o Brasil. In*: CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Alburquerque; FERREIRA, Nelson Jesus; SILVA, Maria Gertrudes Alvarez Justi da; SILVA DIAS, Maria Assunção Faus da Silva dias (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 135-147.

DAMETTO, G.; DA ROCHA, R. P. *Características Climáticas dos Sistemas Frontais na Cidade de São Paulo.* In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. Anais... 2006, 1-5.

DEE, D. P. et. al. *The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597, 2011.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

JUSTI DA SILVA, M. G. A; SILVA DIAS, M. A. F. *A Frequência de Fenômenos Meteorológicos na América do Sul: uma Climatologia. In*: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: SBMET, 2002.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, n.3, p. 437-471, Mar 1996.

KOUSKY, V. E. *Frontal Influences on Northeast Brazil*. Monthly Weather Review, n. 107, pp. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E.; ELIAS, M. *Meteorologia Sinótica: Parte 1.* INPE – 2605 – MD/021, pp 107, 1982.

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. *Meteorologia Fundamental.* Erichim, RS: EDIFAPES, 2001, 432 p.

PENNA, A. C. *Avaliação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais com base em Cartas Sinóticas e Método Objetivo.* 2013.51 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Itajubá, 2013.

PETTERSEN, S. *Weather analysis and forecasting.* New York: McGraw-Hill, 1956. v.1, 498p.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. D. *Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems.* Revista Brasileira de Meteorologia, 24(1), 48-55, 2009a.

REBOITA, M. S. *Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade.* 2008. 359 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG-USP, São Paulo. 2008.

REBOITA, M. S. et. al. *Southern Annular Mode Impacts in South America.* EGU General Assembly, Vol. 11, EGU2009-10978-2, 2009b.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. *Monitoramento dos Ciclones Extratropicais no Hemisfério Sul.* In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis, 2006.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C. D. *Trend and Teleconnection Patterns in the Climatology of Extratropical Cyclones over the Southern Hemisphere.* Climate Dynamics, doi: 10.1007/s00382-014-2447-3, 2014.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. *Climatologia de Frentes Frias no Litoral de Santa Catarina.* Revista Brasileira de Geofísica, v.22, n. 2, p.135-151, 2004.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. *Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes due to Horizontal Deformation and Divergence.* Monthly Weather Review, 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.

SILVA, L. J; REBOITA, M. S; ROCHA, R. P. *Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geada.* Revista Brasileira de Climatologia, v.14, n. 10, p.232-235, 2014.

SIMMONDS, I. et al. *Identification and Climatology of Southern Hemisphere Mobile Fronts in a Modern Reanalysis.* Journal of Climate, v.25, n.6, p.1953-1956, 2012.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

STECH, J. L; LORENZETTI, J. A. *The Rresponse of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts.* Journal Geophysical Research, v. 97, n. 66, p. 9507-9520, 1992.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. **Annular modes in the extratropical circulation**. *Part i: Month-to-month variability**. Journal of Climate, 13(5), 2000.

VAREJÃO, M. A. *Meteorologia e Climatologia.* Recife: 2005, 516 p.

Texto submetido à RBClima na data de 05/03/2015