

Artigo

## Estudo de Caso de um Evento Extremo de Incursão de Ar Frio em Julho de 2013 sobre a Bacia Amazônica Brasileira

Liviany Pereira Viana<sup>1</sup> , Dirceu Luis Herdies<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.*

Receito em 13 de Julho de 2016 – Aceito em 1 de Janeiro de 2018

### Resumo

A bacia Amazônica está localizada na região tropical cujas características principais são os elevados valores de temperatura e umidade do ar. Entretanto, incursões de massa de ar frio e seco também adentram a região, como ocorreu em julho de 2013. Essa quarta onda de frio que atuou sobre o continente sul-americano ocasionou neve em cidades da região Sul, caracterizando uma intensa massa polar com deslocamento até a região Norte. O presente trabalho analisou o comportamento de variáveis meteorológicas com intuito de investigar a intensidade do efeito dessa friagem. Os dados empregados foram de observações e das reanálises disponíveis. A anomalia negativa da temperatura máxima em Rio Branco foi de 15,9 °C, em Manicoré de 6,7 °C e Manaus de 2,0 °C. Nesse evento, os valores mais expressivos ocorreram na temperatura máxima. Também destaca-se uma contribuição mensal nas taxas de precipitação, cujos valores foram maiores que 13,0 mm.dia<sup>-1</sup>. Desse modo, conclui-se que, o evento de julho de 2013 foi um caso de intensa friagem devido deslocar-se até a região central da Amazônia e ocasionar quedas abruptas, principalmente, na temperatura máxima, favorecimento da precipitação nas regiões tropicais, bem como alterações na pressão em superfície, umidade e vento.

**Palavras-chave:** friagem, Amazonas, Acre, temperatura máxima, precipitação.

## Case Study of a Cold air Outbreak Incursion Extreme Event in July 2013 on Brazilian Amazon Basin

### Abstract

The Amazon basin is located in the tropical region whose main characteristics are the high values of temperature and humidity of the air. However, cold and dry air incursions also penetrate the region, as occurred in July 2013. This fourth cold wave that affected the South American continent caused snow in cities of the South region, characterizing an intense polar mass with displacement to the North. The present work analyzed the behavior of meteorological variables in order to investigate the intensity of this effect. The dataset used were observations and reanalyses. The negative anomaly of the maximum temperature in Rio Branco was 15.9 °C, in Manicoré of 6.7 °C and Manaus of 2.0 °C. In this event, the most expressive values occurred at the maximum temperature. Also worth mentioning is a monthly contribution in precipitation rates, whose values were higher than 13.0 mm.day<sup>-1</sup>. Thus, it is concluded that the event of July 2013 was a case of intense cold, due to the fact that it moved to the central region of Amazonia and caused abrupt drops, mainly in maximum temperature, favoring rainfall in the tropical regions, as well as changes in surface pressure, humidity and wind.

**Keywords:** friagem, Amazonas, Acre, maximum temperature, precipitation.

### 1. Introdução

A Amazônia é a maior floresta tropical úmida do mundo, com grandes extensões territoriais e vasta biodiversidade. Devido estar posicionada próximo à região equatori-

al, existem intensas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície continental e a atmosfera, além de desempenhar importante papel nos balanços globais de carbono e água entre as superfícies mencionadas acima (Grace *et al.*, 1998; Malhi *et al.*, 1998; Cox *et al.*, 2004; Marengo, 2006a,b).

No entanto, mesmo posicionada na região tropical, a bacia Amazônica sofre com incursões de ar frio principalmente durante o inverno austral (Junho-Julho-Agosto). Essas massas frias que adentram a floresta amazônica são oriundas de sistemas transientes que são conhecidos por ciclones (Bjerknes, 1919) e que localmente são chamadas de friagem. Fisch (1996) verificou que entre abril e setembro há uma frequência de 6-7 eventos de friagem na região Amazônica. Alguns estudos, tais como Molion (1987), Fisch (1996), Marengo *et al.* (1997a,b), Longo (2004) e Ricarte *et al.* (2015) foram realizados para compreender as modificações ocorridas na atmosfera com a incursão de ar frio que se propaga intensamente, por vezes, até a região central da Amazônia. A diminuição brusca da temperatura média na região é a principal característica da incursão de ar frio, proveniente dos sistemas frontais no sul da América do Sul e de seu anticiclone na retaguarda, que ganham intensidade e alteram-se durante seu deslocamento, tanto para o leste em direção ao Oceano Atlântico quanto para o norte do Brasil (Hamilton e Tarifa, 1978). Além dessas características há a redução significativa da temperatura mínima e umidade específica, assim como alteração no campo de vento e pressão.

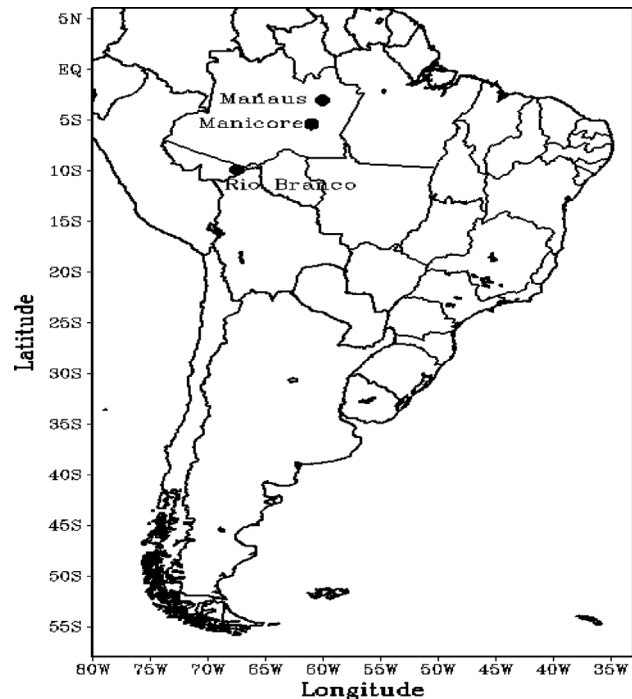
Como o deslocamento do anticiclone acontece desde o sul da América do Sul, as cidades que estão situadas na parte do sul e sudoeste da bacia Amazônica são as que mais sofrem alterações nas variáveis meteorológicas. Assim, analisar o impacto desse deslocamento até a Amazônia Central corresponde a verificação do abrupto decaimento na temperatura, e assim, em qual variável meteorológica o efeito torna-se expressivo da passagem do sistema sobre as baixas latitudes. Uma vez que, havendo o deslocamento para as latitudes baixas, as propriedades da massa polar tornam-se enfraquecida. Desta forma, poderia um evento frio conduzir instabilidades na atmosfera local (tal como, precipitação) e influenciar o comportamento mensal da temperatura?

Impulsionados por estes questionamentos e investigando principalmente as variáveis dos extremos de temperatura e precipitação, a presente pesquisa realizou análises das condições sinóticas associada a uma incursão de ar frio em julho de 2013. Esse estudo de caso foi escolhido primeiramente, devido a consequência do efeito na população local ocasionada pelas reduções abruptas nas temperaturas, e pela identificação proporcionada pelo trabalho de Viana (2015). Logo, buscou-se explorar a intensidade da friagem, o comportamento das variáveis meteorológicas e a defasagem do impacto durante o deslocamento entre as cidades de interesse.

## 2. Material e Método

### 2.1. Região de estudo

As cidades empregadas para esse estudo de caso (Fig. 1) estão localizadas na região Amazônica distribuídas



**Figura 1** - Localização das cidades nos estados do Acre e Amazonas sobre a região Amazônica.

em três partes: na parte sudoeste da região escolheu-se a cidade de Rio Branco (9° S; 67° W; 160 m), situada no estado do Acre, e nas partes sul e central da região encontram-se as cidades de Manicoré (5° S; 61° W, 50 m) e Manaus (3° S; 59° W; 67 m), respectivamente, ambas no estado do Amazonas. Como características importantes, essas cidades apresentam os valores de temperatura e umidade relativamente elevados, bem como da precipitação acumulada, principalmente durante o inverno amazônico. Essas cidades foram escolhidas para averiguar o efeito da massa de ar frio e seco ao penetrar a região próxima a linha do Equador e enfatizar outras cidades na Amazônia que sofrem por redução abrupta dos extremos da temperatura.

A Tabela 1 apresenta os valores calculados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da normal climatológica do Brasil para o período de 1961-1990 para o mês de julho, os quais destacam-se: valores da temperatura máxima, mínima, pressão em superfície e precipitação acumulada para cada uma das cidades de estudo.

### 2.2. Dados

Os dados diários observados do evento de julho de 2013 foram provenientes do INMET e das reanálises do Era-Interim do European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF, Dee *et al.*, 2011) com resolução espacial de 0,75 x 0,75 graus. A resolução temporal foi obtida a cada 6 h para os horários de 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC. Utilizaram-se essa base de dados devido à alta confiabilidade na coleta de dados sobre a região da Amazônia, uma vez que o INMET admite as normas técni-

**Tabela 1** - Valores normais climatológicos para as cidades de Rio Branco, Manicoré e Manaus localizadas nos estados do Acre e Amazonas sobre a região Norte do Brasil. Fonte: INMET.

	<i>T</i> <sub>máx</sub> (°C)	<i>T</i> <sub>mín</sub> (°C)	Precipitação (mm)	Pressão (hPa)
Rio Branco (AC)	31,3	16,5	43,7	996,8
Manicoré (AM)	32,0	21,2	74,7	—
Manaus (AM)	31,3	22,7	85,4	1005,4

Temperatura (Celsius); Precipitação (Milímetros) e Pressão (Hecto Pascal).

cas internacionais da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Outrossim, os dados do Era-Interim são reanálises cujas principais características são: o sistema de assimilação de dados com análise variacional de 4 dimensões (4D-VAR), resolução espacial de 80 km e 60 níveis na vertical com o topo em 0.1 hPa, representando dessa forma, as características espaciais observadas na estação convencional do INMET e os efeitos da friagem na região Amazônica.

Também foram utilizadas imagens de satélites GOES-13 do canal infravermelho pertencente a Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE). Deste modo, pode-se verificar a banda de nebulosidade que constitui o sistema frontal em latitudes média e a propagação do sistema de alta pressão para a região tropical.

As variáveis meteorológicas obtidas de estações de superfície do INMET foram temperatura máxima (*T*<sub>máx</sub>), temperatura mínima (*T*<sub>mín</sub>), precipitação e pressão em superfície. Para as análises dos campos de superfície e ar superior utilizaram-se a temperatura do ar (950 hPa), umidade específica (950 hPa), pressão em superfície (nível do mar) e campos de vento (850 hPa) obtidas através das reanálises do Era-Interim (ECMWF).

### 2.3. Metodologia

As metodologias associadas a detecção de friagem na região Amazônica estão associadas, geralmente, pelo campo da temperatura mínima. Dessa forma, buscando uma metodologia mais completa, utilizou-se a metodologia de Viana (2015) cujos extremos das temperaturas (mínima e máxima) são considerados, bem como a pressão em superfície, tornando-se eficaz na distinção de eventos de friagem que atingem não somente o sul da Amazônia como as que ultrapassam a linha do Equador. Essa metodologia considera a diferença entre a média de cada mês do inverno austral por dois (2) desvios-padrão (Eq. (1)). Os meses de inverno austral (maio, junho, julho, agosto e setembro) foram utilizados devido ser encontrado as maiores ocorrências de sistemas frontais na América do Sul, e então causar as friagens na Amazônia. (Satyamurty e Lima, 1994). Assim, o fenômeno de friagem era confirmado se, para o mesmo dia, as reduções eram simultâneas nas temperaturas (*T*<sub>máx</sub> e *T*<sub>mín</sub>)

e aumento na pressão em superfície. Mais detalhes podem ser obtidos em Viana (2015).

$$T_{(friagem)} = média_{(mensal)} - 2 * DP(Desvio - Padrão)_{(mensal)} \quad (1)$$

Na Eq. (1) a *T*<sub>(friagem)</sub> considera os valores de *T*<sub>mín</sub> e *T*<sub>máx</sub>, enquanto a *média*<sub>(mensal)</sub> considera os valores de cada mês – maio, junho, julho, agosto e setembro, bem como o *Desvio Padrão*<sub>(mensal)</sub>.

A partir da confirmação deste estudo de caso pela metodologia de Viana (2015), realizou-se a análise temporal (julho/2013) do comportamento das variáveis meteorológicas dos extremos das temperatura e precipitação. A análise espacial da pressão em superfície, temperatura do ar, campos de vento e umidade específica, obtida pelos dados das reanálises, foram utilizadas para comprovar a intrusão desse ar frio e seco na bacia Amazônica. Além disso, para a verificação do efeito da incurção de ar, optou-se por calcular a anomalia diária dos extremos da temperatura. A anomalia diária é definida pela diferença do valor registrado diário pela média mensal (julho) para cada uma das cidades. Desse modo, a média do mês de julho para este cálculo utilizada foi oriunda da normal climatológica disponibilizada pelo INMET para o período de 1961-1990.

### 3. Resultados e Discussões

A região Amazônica é caracterizada principalmente por elevados valores de temperatura do ar e umidade em baixos níveis atmosféricos. Uma redução brusca nas variáveis do estado indicaria influência ocasionada por fenômenos de mesoescala ou sinótica, tal como, incurção de ar frio e seco oriundos de sistemas frontais de altas latitudes. Abaixo as principais características obtidas para cada variável analisada neste estudo.

#### 3.1. Série temporal das temperaturas e anomalias

A passagem do sistema, durante os dias 23 a 26 de julho de 2013, na cidade de Rio Branco esteve associado com uma queda de 11,5 °C no campo da *T*<sub>mín</sub>, em um período de 72 h, como pode ser observado na Fig. 2a. A medida que o sistema foi avançando para a região central da Amazônia, foi perdendo intensidade (Figs. 2b-2c) e seus valores de anomalia negativa alcançaram 4,6 °C e 1,8 °C, respectivamente, em Manicoré e Manaus (Fig. 3b). O mesmo comportamento pode ser verificado para a *T*<sub>máx</sub>, porém a intensidade nessa variável foi mais significativa, cuja queda nos valores foi de 15,9 °C em Rio Branco, 6,7 °C em Manicoré e 2,7 °C em Manaus (Fig. 3a). Uma das principais características encontradas nesse estudo se refere ao declínio na *T*<sub>máx</sub>, indicando a intensidade desse evento. De acordo com Marengo *et al.* (1997a), a amplitude das mudanças originadas pela penetração do ar frio e seco implica na intensidade do fenômeno. Ricarte *et al.* (2015) observaram em seus estudos que os maiores decréscimos correspondentes aos eventos frios ocorrem na temperatura, em particular, na *T*<sub>máx</sub>. O mesmo foi verificado por Amorim

Neto *et al.* (2015), cujo declínio da  $T_{máx}$  em Manaus pode ser maior que na  $T_{mín}$ , ambos trabalhos corroborando com os resultados aqui encontrados.

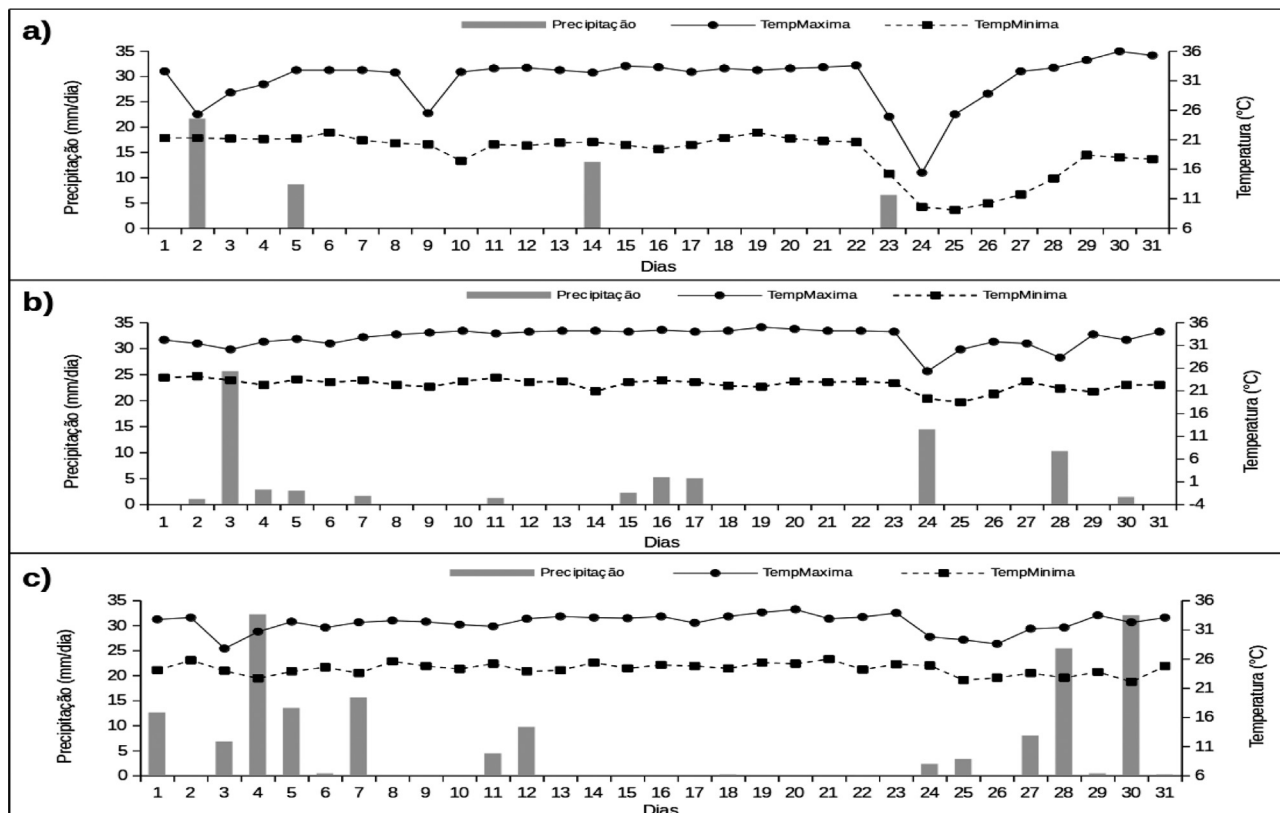
Esse comportamento de redução abrupta na  $T_{máx}$  foi discutido por poucos autores, muitos limitaram-se apenas a demonstrar a intrusão da massa polar na  $T_{mín}$ . Todavia, ressalta-se que a  $T_{mín}$  bem como o deslocamento da massa de ar frio são fundamentais para a confirmação de friagens nas latitudes baixas (Fisch, 1996; Marengo *et al.*, 1997; Longo *et al.* 2004, Ricarte *et al.*, 2015). Por exemplo, se forem observados apenas os registros de anomalia da  $T_{máx}$  para a cidade de Manaus, poderíamos afirmar que no dia 3 houve uma incursão fria na região, pois a anomalia negativa foi mais acentuada que a ocorrida no dia 26. No entanto, ao verificar os valores anômalos da  $T_{mín}$ , estes foram mais pronunciados no dia 26 que o dia 3, constatando que a redução no dia 3 esteve relacionada com outro fenômeno, provavelmente de escala local. Além disso, de acordo com o boletim CPTEC (2013) apenas uma massa continental de ar frio e seco atingiu as regiões sul e sudoeste da Amazônia, ocorrendo entre os dias 21 a 26, confirmando ainda mais esse estudo de caso.

Outro aspecto relevante foi a verificação quanto ao impacto ocasionado nas temperaturas e a sua distribuição geográfica. O primeiro impacto da entrada do sistema ocorreu no valor registrado da  $T_{máx}$ , no dia 24, nas cidades mais

ao sul e sudoeste da região Norte (Rio Branco e Manicoré), enquanto que, para Manaus, observou-se o efeito esperado, com impacto inicial na  $T_{mín}$ . Isto provavelmente ocorreu devido ao deslocamento da massa de ar frio e consequentemente, o efeito local registrado do horário que se realizou as medições dos extremos de temperatura. Como a  $T_{mín}$  ocorre geralmente no início da manhã, a mesma ainda não havia sido influenciada pela incursão de ar frio nas cidades ao sul da Amazônia (dia 24), sendo registrada apenas no dia seguinte (25). Já em Manaus foi possível verificar nas primeiras horas do dia 25 esta incursão (Fig. 3a).

Observa-se também na Fig. 3 os efeitos prolongados na atmosfera local, em que as anomalias das temperaturas apresentam uma persistência de valores anômalos positivos, caracterizando assim, um julho de 2013 mais quente que a normal climatológica. A mudança nesse comportamento ocorreu apenas quando a friagem atingiu as cidades destacadas, deixando em evidência o efeito da passagem do sistema em todos os extremos da temperatura (máxima e mínima), corroborando que essas incursões frias e secas realmente alteram a atmosfera local.

Além dos valores *in situ*, analisaram-se também os valores espaciais da temperatura do ar em 950 hPa (Fig. 4). Observou-se claramente a entrada da massa de ar frio atingindo a região sul da Bacia Amazônica desde o dia 23 (Fig. 4a). Em Rio Branco, a temperatura alcançou 21,0 °C,



**Figura 2** - Série temporal das temperaturas mínima (°C), máxima (°C) e precipitação (mm.dia<sup>-1</sup>) durante o mês de julho de 2013 para as cidades de: (a) Rio Branco, (b) Manicoré e (c) Manaus. Fonte: Dados da rede INMET.



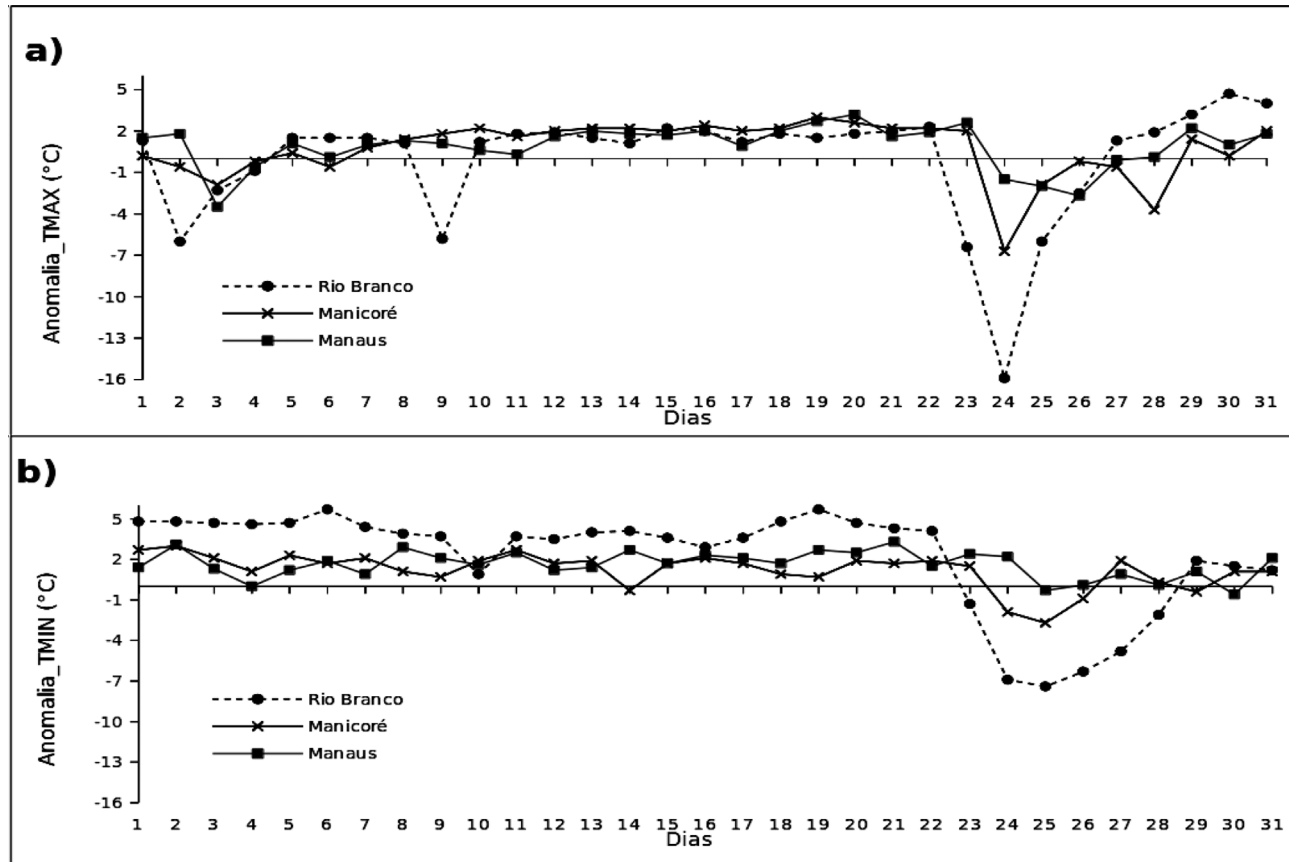


Figura 3 - Série temporal das anomalias (°C) das temperaturas (a) máxima e (b) mínima para as cidades de Rio Branco, Manicoré e Manaus. Fonte: Dados da rede INMET.

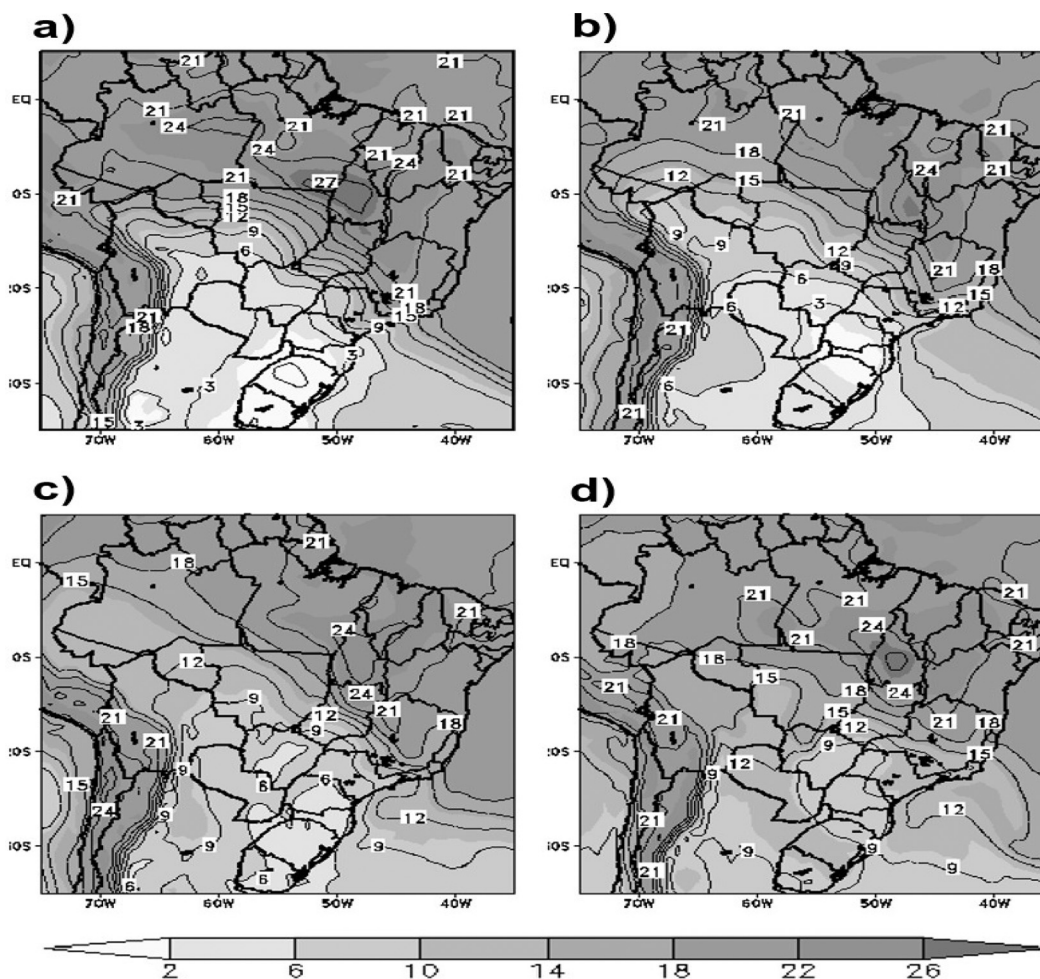
enquanto Manicoré e Manaus mantiveram temperaturas de 24,0 °C. No dia seguinte (24 de julho), as temperaturas reduziram-se significativamente e Rio Branco atingiu o valor de 11,0 °C. Manicoré apresentou decaimento com relação ao dia anterior (23) e registrou 18,0 °C e Manaus em 21,0 °C. Na Fig. 4c (25) pode-se observar que, os valores permaneceram reduzidos em Rio Branco, Manaus e Manicoré, porém, com uma extensão da massa de ar fria no sentido noroeste-sudeste, atingindo desse modo, as cidades localizadas a oeste da Bacia Amazônica. A partir do dia 26 (Fig. 4d), a temperatura em baixos níveis tendeu a retornar ao seu valor normal antes da passagem da massa de ar fria e seca. Isto concorda com os resultados encontrados por Galvão e Fisch (2000) cujos resultados mostraram influências por mais de 3 dias da friagem em Rondônia no ano de 1993. No presente estudo, os efeitos foram extensivos e duraram 4 dias sobre a região.

As imagens do canal infravermelho do satélite GOES-13 são mostradas na Fig. 5. É observado uma banda de nebulosidade sobre as regiões sudeste e centro-oeste do Brasil e uma faixa de nuvens mais estratiforme sobre o estado do Acre (Fig. 5a). Nos dias seguintes (Figs 5b-5d), a medida que esse sistema frontal avança para o leste com seu centro de baixa pressão posicionado no Oceano Atlântico, o centro de alta pressão, na sua retaguarda, prossegue na dire-

ção da região Amazônica, cujas características são de pouca nebulosidade e baixas temperaturas (Satyamurty e Lima, 1994). Assim, comprova-se que as reduções estiveram relacionadas com a passagem de um sistema frontal mais continental nas latitudes altas, que como consequência, influenciou os valores das temperaturas registrados.

### 3.2. Precipitação

A evolução temporal da precipitação pode ser observada na Fig. 2. Para a cidade de Rio Branco (Fig. 2a), no dia 23 (dia da chegada da friagem) verificou-se precipitação de 6,5 mm.dia<sup>-1</sup>. Essa quantidade de precipitação contribuiu para anomalia positiva sobre Rio Branco, (Tabela 1), uma vez que, desde o dia 15 não havia registro de precipitação acumulada. Na cidade de Manicoré (Fig. 2b), o total de precipitação no dia 24 foi de 14,3 mm.dia<sup>-1</sup>, o segundo valor mais abundante de todo o mês, ou seja, uma contribuição relevante para esta localidade. Em Manaus (Fig. 2c) observou-se um período de 11 dias (13-23) em que não houve precipitação e a partir do dia 24 (dias com chuva e período atuante da friagem) tornou-se a chover. De acordo com Garreaud (2000), as entradas dessas ondas de frio na época do verão, fortalece a convecção e precipitação. Neste caso, para o período de inverno, a provável explicação, portanto, para a ocorrência de precipitação durante este evento frio,



**Figura 4** - Campo de temperatura média do ar (°C) proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF) para os dias (a) 23, (b) 24, (c) 25 e (d) 26 de julho.

foi devido ao deslocamento da massa de ar que normalmente é fria e seca (estável) ao penetrar as regiões com o ar quente e úmido (comportamento padrão nas baixas latitudes), induz a um contraste térmico, o qual gera instabilidade na baixa troposfera e, conseqüentemente, produzindo precipitação.

Esses resultados concordam com o trabalho de Amorim Neto *et al.* (2015), confirmando que durante os eventos frios, a precipitação, em média, pode se tornar bem elevada ( $40,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ ). Para a cidade de Manaus, por exemplo, os mesmos autores identificaram uma média sete vezes maior que a média diária anual ( $6,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ ). Kousky (1979) mostrou que a penetração de sistemas frontais na parte sul da região Norte apresenta papel importante na precipitação, podendo auxiliar em significativa quantidade acumulada. De acordo com Marengo *et al.* (1997a), o máximo da chuva na região central da Amazônia (próximo de  $5^\circ \text{ S}$ ) pode estar associado com a penetração de sistemas frontais da região Sul, interagindo e organizando a convecção local.

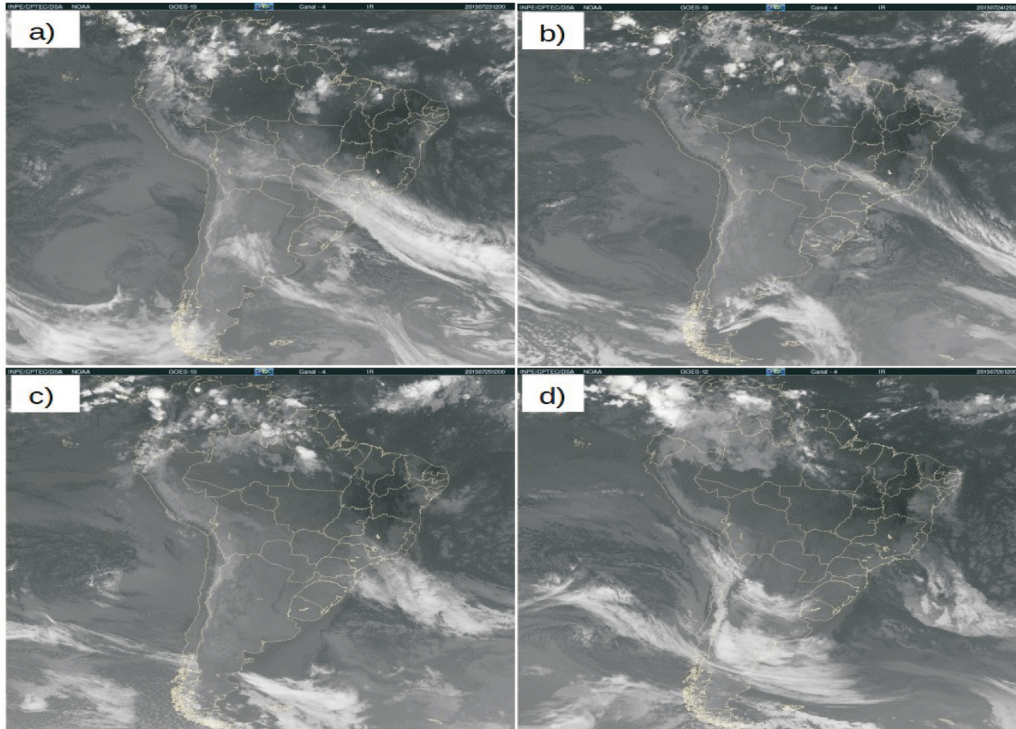
Desta maneira, pode-se enfatizar que parte dos totais de precipitação observado durante o evento de julho de

2013 esteve associado com a incursão de ar frio (dinâmica) e condições favoráveis (temperatura e umidade) sobre as cidades analisadas. Ressalta-se também que, os picos de anomalia de temperatura observados no dia 28 na cidade de Manicoré e nos dias 03 e 26 sobre Manaus estiveram relacionados com a precipitação na região, como verificado nas Figs. 2b e 2c, e não unicamente pela friagem.

### 3.3. Umidade específica e campo de vento

Sobre a Bacia Amazônica, a umidade do ar e o comportamento do campo de vento são respectivamente, abundante e geralmente de leste, por isso, verificar os decréscimos ou mudanças repentinas dos mesmos, podem indicar possíveis eventos frios na região.

Observa-se na Fig. 6 as características obtidas pela umidade específica do ar, em que os valores médios anteriores ao evento (23 de julho) estiveram em  $12,0 \text{ g.kg}^{-1}$  para a cidade de Rio Branco e  $16,0 \text{ g.kg}^{-1}$  em Manicoré e Manaus. No dia 24 (Fig. 6b) esse valor começou a diminuir atingindo  $8,0 \text{ g.kg}^{-1}$  às 12 UTC para Rio Branco,  $12 \text{ g.kg}^{-1}$  para Manicoré e  $15 \text{ g.kg}^{-1}$  em Manaus. Os valores observa-



**Figura 5** - Série de imagens do GOES-13 do canal infravermelho para o dia (a) 23, (b) 24, (c) 25 e (d) 26 de julho de 2013 às 12UTC. Fonte: CPTEC/DSA.

dos, no geral, foram menores sobre a região no dia 25 (Fig. 6c), com decréscimo de  $2,0 \text{ g.kg}^{-1}$  e atingindo o extremo norte do estado do Amazonas. Além disso, notou-se que a redução média espacial da temperatura sobre a região ocorreu no dia 24, logo após a significativa redução da umidade específica. Esse comportamento de retardo da umidade específica quando comparada com a temperatura média do ar confirma com os resultados encontrado por Oliveira *et al.* (2004) e Viana e Mendonça (2012), ou seja, essas características demonstram a penetração das incursões frias nas baixas latitudes, alterando os valores normais da região Amazônica.

Ademais, como análise complementar dessa incursão de ar frio, gerou-se uma série temporal para cada uma das cidades do estudo conferida na Fig. 7. Os valores médios, em torno de  $17 \text{ g.kg}^{-1}$  para todas as cidades corrobora com outros estudos citados acima, um decréscimo induzido pela influência da friagem nos entornos da parte sul e sudoeste do Estado do Acre e Amazonas. Os valores atingiram  $8,0 \text{ g.kg}^{-1}$  (Rio Branco),  $12,5 \text{ g.kg}^{-1}$  (Manicoré) e  $13,2 \text{ g.kg}^{-1}$  (Manaus), uma redução de  $9 \text{ g.kg}^{-1}$  em 24 h para a cidade de Rio Branco – cidade mais afetada pela massa fria e seca.

Na análise espacial do campo de vento em 850 hPa, utilizou-se para os dias 21 a 26 (dois dias antes e depois da friagem alcançar Rio Branco) a verificação clara da inversão dos ventos ocasionada pela intrusão do ar frio na bacia Amazônica. Na Fig. 8, observa-se que, no dia 21 (Fig. 8a) houve o comportamento considerado padrão para essa região do Brasil em baixos níveis, cujos ventos geralmente

são de leste-nordeste, e para a região Centro-Oeste e Sudeste, os mesmos são predominantes de norte-noroeste. No entanto, sobre a Argentina e Paraguai os ventos são de sul relacionado com a passagem do sistema frontal em latitudes médias.

No dia seguinte (22 de julho), os ventos continuaram com o mesmo padrão na região Norte do Brasil, porém, sobre o Sul do país, observa-se uma configuração anticiclônica atingindo em sua borda o estado do Mato Grosso do Sul. No dia 23 (Fig. 8c), os ventos de sul alcançaram o estado de Mato Grosso e modificaram também o comportamento sobre os estados do Pará, Goiás e Rondônia. No dia do evento frio (24 de julho) verificaram-se ventos de sudeste e sul sobre o Acre e Amazonas, logo, atingindo as cidades de Rio Branco, Manicoré e Manaus. No dia seguinte (25 de julho) os mesmos permaneceram configurados de sudeste-sul, com uma extensão desde o Paraguai até o extremo Norte do Brasil e, no dia 26 eles enfraqueceram e retornaram ao comportamento normal (de leste) para a região de estudo.

Em termos da intensidade do vento, os valores médios espaciais modificaram de  $4 \text{ m.s}^{-1}$  (22 de julho) para  $8 \text{ m.s}^{-1}$  no dia do evento (24 de julho). Essa alteração na variável corrobora com a literatura, em que alguns autores [Fisch, (1996); Oliveira *et al.* (2004); Longo *et al.* (2004), Viana e Mendonça, (2012) e Amorim Neto *et al.* (2015)] encontraram aumento da velocidade dos ventos além de mudanças em sua direção oriundas de sul. Conforme o estudo de Marengo *et al.* (1997a) o aumento na velocidade do



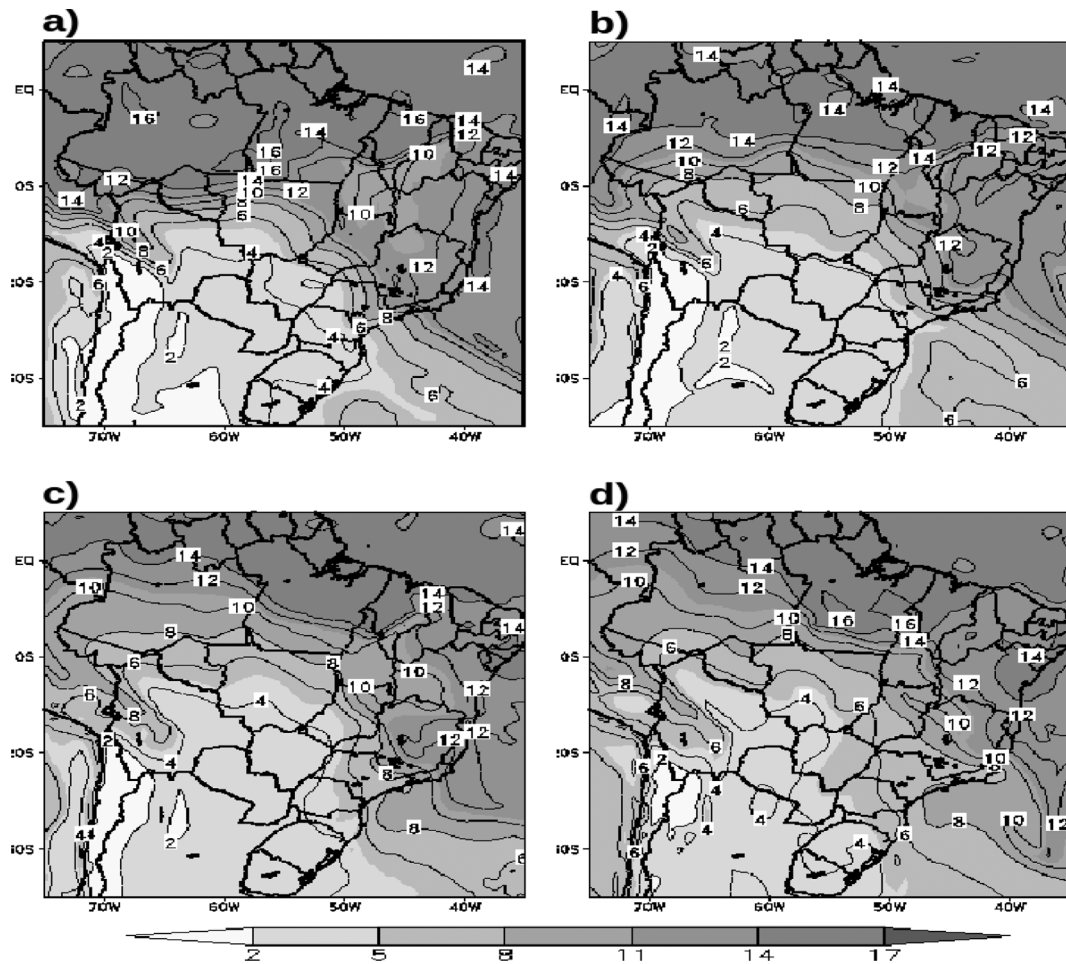


Figura 6 - Campo da umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF) para os dias (a) 23, (b) 24, (c) 25 e (d) 26 de julho de 2013.

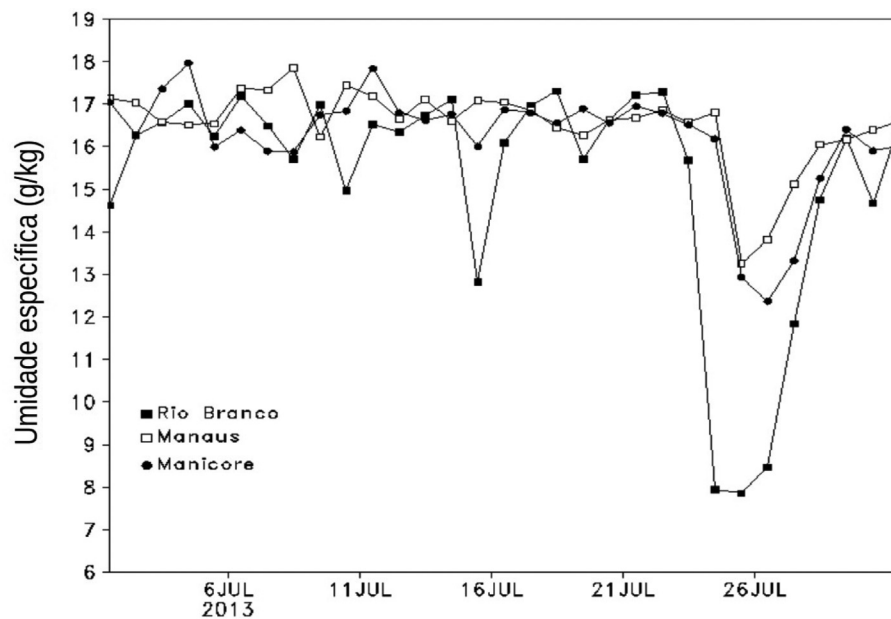
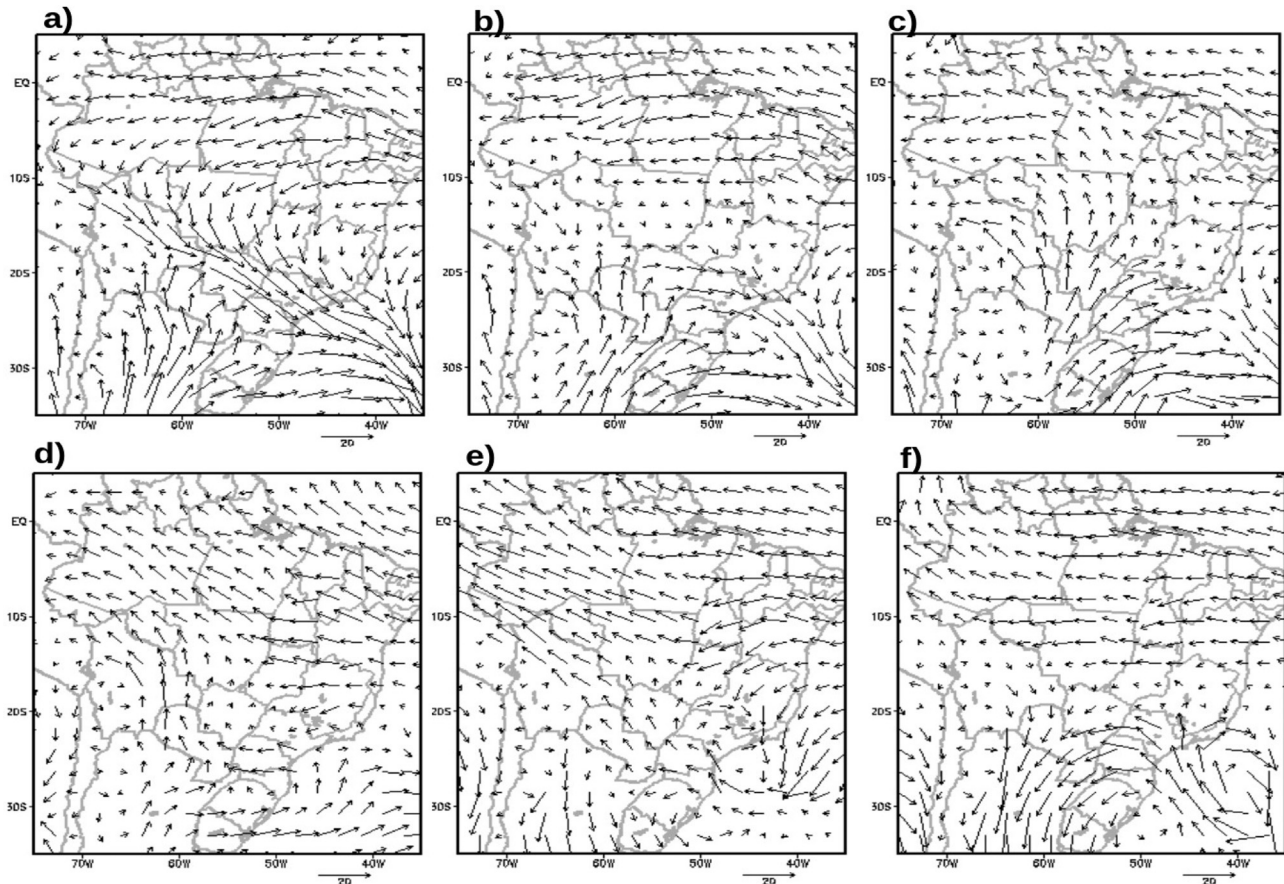


Figura 7 - Variação diária da umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para as cidades de Rio Branco, Manicoré e Manaus proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF) para julho de 2013.





**Figura 8** - Campo dos ventos ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) em superfície (850 hPa) proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF) para às 12UTC dos dias (a) 21, (b) 22, (c) 23, (d) 24, (e) 25 e (f) 26 de julho.

vento foi na ordem de duas vezes a intensidade do valor do dia anterior, atingindo  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  com direção predominante de sul. Oliveira *et al.* (2004) encontraram um aumento de aproximadamente  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no início da friagem, enquanto nos dias anteriores os valores eram iguais à  $4,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Esses ventos de sul apresentam uma função bem definida, pois carregam e transportam o ar frio e seco das latitudes altas para as latitudes baixas sobre a superfície, modificando desta maneira, a vida da população acostumada com temperatura e umidade elevadas. Na Fig. 9 essa característica é observada pontualmente, cujo comportamento meridional do vento foi plotado para todo o julho de 2013. De acordo com essa figura, evidências da alternância entre os valores positivos e negativos do componente meridional do vento na série temporal foram observadas, porém durante os dias da friagem todas as cidades apresentaram aumento nos valores do vento meridional. Esses valores atingiram mais que  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e predominância de ventos de sul entre os dias 22 a 26. Após esses dias de mudanças no comportamento do componente meridional do vento, os valores retornaram ao observado antes da chegada da friagem. Assim, os dados de reanálises sobre a Amazônia constituem papel fundamental para auxiliar nos estudos,

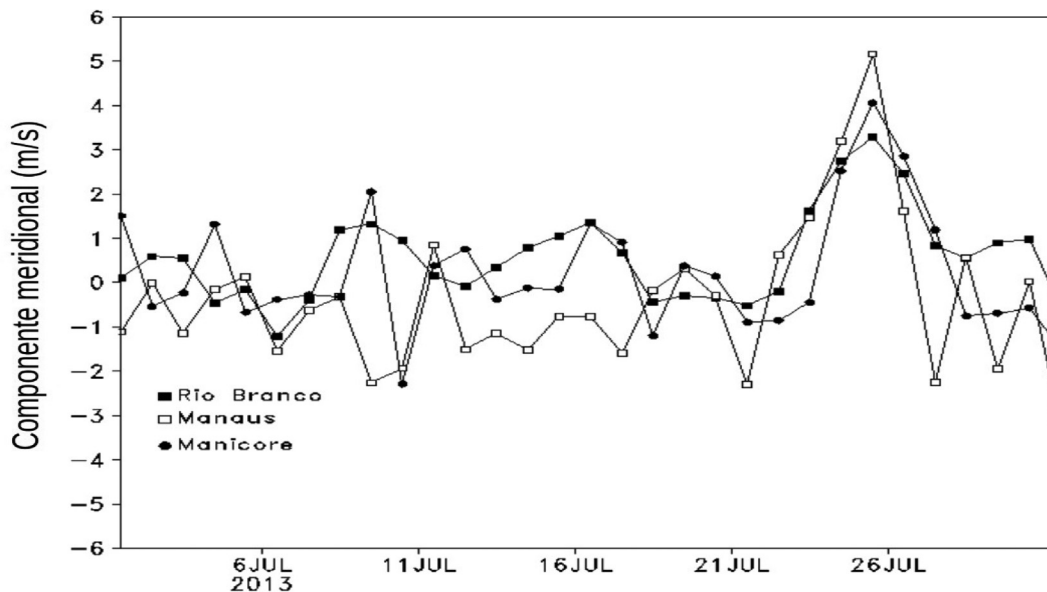
com respeito a essa temática, e na análise pontual do efeito desses eventos frio, além de outras linhas de pesquisa.

Confirma-se desta maneira a incurção de ar frio sobre as três cidades, pois a massa que penetrou durante os dias analisados foi característica de massa seca, e consequentemente, de incurção de ar frio, reduzindo assim a umidade específica da região. Além do campo de vento – tanto espacialmente como *in situ* também modificaram sua direção de norte para sul como também sua intensidade.

### 3.4. Campo de pressão em superfície

Um dos efeitos da friagem é o aumento do campo de pressão em superfície, evidenciando o deslocamento do anticiclone extratropical as regiões de latitude baixas. Desse modo, realizaram-se as análises do campo espacial de pressão sobre a América do Sul para os dias 21 a 26 (Fig. 10), como identificação do deslocamento do anticiclone antes e após a chegada da friagem na região.

Para o dia 21 (Fig. 10a), observa-se a existência de um centro de alta pressão sobre o oceano Pacífico posicionado a  $100^\circ \text{ W}$ - $80^\circ \text{ W}$ , com valor de 1040,0 hPa. Sobre o oceano Atlântico, há um centro de baixa pressão com intensidade de 1005,0 hPa entre as longitudes de  $55^\circ \text{ W}$  e  $45^\circ \text{ W}$ . No dia seguinte (22 de julho), o centro de baixa pressão in-



**Figura 9** - Série temporal do componente meridional do vento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) em 850 hPa para o mês de julho proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF).

tensifica para 995,0 hPa entre  $50^\circ$  W e  $40^\circ$  W e o centro de alta pressão permanece sobre as mesmas longitudes e intensidade do dia anterior. Dia 23 (Fig. 10c), o anticiclone desloca-se para leste estendendo desde  $100^\circ$  W a  $75^\circ$  W, ressalta-se que existe uma isolinha de alta pressão sobre a Argentina com intensidade de 1025,0 hPa. O ciclone sobre Atlântico desloca-se para leste impossibilitando sua visualização (Fig. 10c). Na Fig. 10d, o anticiclone atingiu valor de 1030,0 hPa e forma um outro centro de alta pressão sobre o Uruguai, Paraguai, Norte da Argentina e os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, parte oeste do Mato Grosso do Sul e São Paulo - cujo valor está em 1025,0 hPa.

Como indicado por Lichtenstein (1989) o ar frio ao penetrar no continente pelo sudeste, onde a elevação do mesmo é de aproximadamente 2000 m, não pode atravessar os Andes, então é forçado a girar em torno do obstáculo, aumentando sua curvatura anticiclônica. Esse centro de alta pressão deslocou-se para o norte e atingiu o sul da Bacia Amazônica, alcançando 1015,0 hPa. Dia 25 (Fig. 10e), a intensidade das isolinhas de alta pressão era de 1020,0 hPa em Rio Branco, e para ambas as cidades, Manicoré e Manaus, o valor alcançava 1015,0 hPa.

Além da verificação espacial do aumento das isolinhas de pressão em superfície sobre a região, realizaram-se também a análise temporal *in situ* dos valores diários observados da mesma, abrangendo apenas as cidades de Rio Branco e Manaus (Fig. 11). Para Manicoré, tal análise não pôde ser conferida devido à ausência dos dados observados. Em Rio Branco a média dessa variável para julho é de 996,8 hPa (Tabela 1), nota-se que, a partir do dia 23 (Fig. 11) os valores começaram a elevar-se (994,2 hPa no dia 22 para 998,9 hPa no dia 23) e atingiu seu ápice no dia

25 (1003,1 hPa) - uma anomalia positiva de 6,3 hPa. Na cidade de Manaus o valor médio é maior que a cidade de Rio Branco, correspondendo a 1005,4 hPa. Essas diferenças nas médias dos valores estão relacionadas, principalmente, as características topográficas, pois Rio Branco localiza-se a uma altitude mais elevada que Manaus. Observa-se ainda na Fig. 11, os acréscimos mais suaves de 1005,2 hPa (24 de julho) para 1008,2 hPa (26 de julho), o que corresponde a uma anomalia positiva de 2,8 hPa. Como é possível verificar, a ascensão da pressão em superfície na Amazônia central é pequena, o que pode não ser um forte indicativo dos efeitos da friagem, mas um complemento necessário para afirmar essas incursões frias. Ademais, devido ao efeito da friagem apresentar-se mais intenso em Rio Branco que Manaus, os valores anômalos positivos foram mais evidentes no sudoeste da Bacia, como averiguado pela temperatura do ar, umidade e vento.

Claramente constata-se que esse aumento de pressão na superfície fora ocasionado pela penetração do anticiclone extratropical que esteve na retaguarda do sistema frontal em latitudes médias, e que este acréscimo de pressão ocorreu juntamente com a queda da temperatura do ar e umidade específica nas respectivas cidades, características clássicas de friagem na região (Fig. 10). No dia seguinte (Fig. 10f), o anticiclone enfraquece e desloca-se para o oceano Atlântico, possibilitando o retorno dos valores normais para as localidades do estudo.

#### 4. Conclusões

Muitos casos de friagem atingem a região Amazônica, principalmente a parte sul da Bacia, os quais são atestados particularmente pelas mudanças na temperatura mínima, umidade específica e campo de vento. No presente

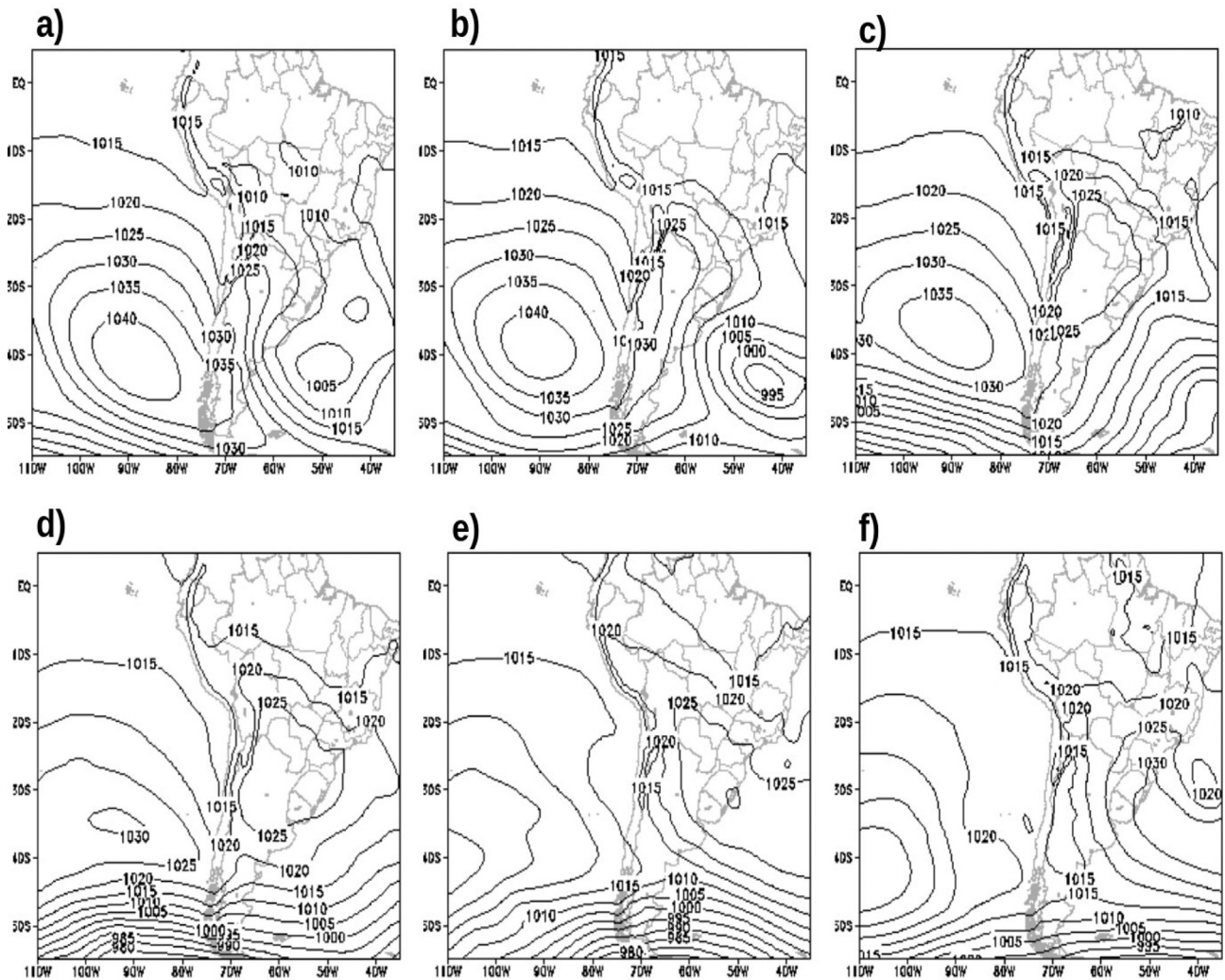


Figura 10 - Campo de pressão em superfície (1000 hPa) proveniente das reanálises do Era-Interim (ECWMF) para os dias (a) 21, (b) 22, (c) 23, (d) 24, (e) 25 e (f) 26 de julho sobre a América do Sul.

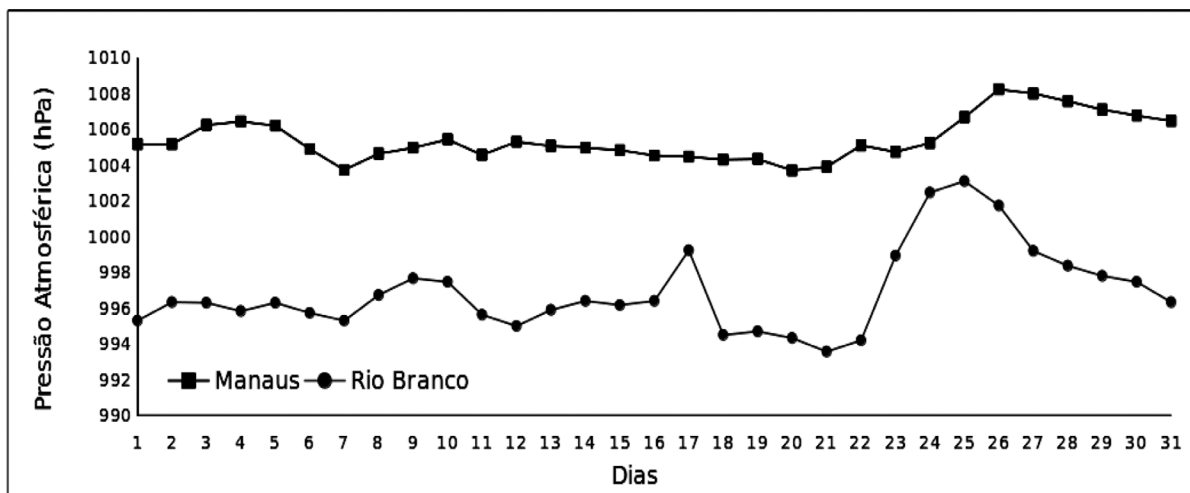


Figura 11 - Variação diária da pressão em superfície (1000 hPa) para as cidades de Rio Branco e Manaus para mês de julho. Fonte: Dados da rede do INMET.



trabalho, fez-se uma análise sinótica do evento de friagem de julho de 2013 identificado pela metodologia de Viana (2015), a qual destaca-se como evento frio as reduções ocorridas concomitantemente nos extremos de temperatura. Deste modo, averiguou-se a intensidade e o impacto durante seu deslocamento dessa friagem em três cidades localizadas em distintas parte da região Amazônica sudoeste, sul e central da região.

Para as cidades localizadas ao sudoeste e sul da bacia Amazônica (Rio Branco e Manicoré) a queda pronunciada do valor indicativo da incursão de ar frio ocorreu primeiramente na  $T_{máx}$ , enquanto em Manaus foi na  $T_{mín}$ . Além disso, comprovou-se que, o maior efeito da friagem foi observado na  $T_{máx}$  com anomalias negativas de 15,9 °C em Rio Branco, 6,7 °C em Manicoré e 2,0 °C em Manaus, mostrando que a massa fria e seca ao deslocar-se para as regiões de baixa latitude perde suas propriedades iniciais atingindo com diferentes intensidades as cidades localizadas sobre essa região. Constatou-se também que este evento frio favoreceu a instabilidade atmosférica para todas as cidades, auxiliando a precipitação local, uma vez que, observou-se período de até 11 dias com ausência de chuva antes da chegada da friagem. A pressão em superfície aumentou significativamente na cidade de Rio Branco (+6,3 hPa), enquanto em Manaus foi pequena, acima de 2,0 hPa, todavia, auxilia a identificação desse evento nas latitudes acima de 5° S. Os campos espaciais de umidade específica, pressão em superfície, vento e temperatura do ar também apresentaram modificações durante o efeito da friagem na região.

Diante dessa análise observacional e de reanálise, conclui-se que o evento de julho de 2013 realmente foi um caso característico de intensa friagem (reduções significativas nos extremos de temperatura), uma vez que conseguiu deslocar-se até a região Central da Amazônia (Manaus). Ademais, as alterações derivadas das friagens na atmosfera locais, tornam-se mais evidente nos valores da temperatura máxima, além de favorecer a precipitação nas regiões tropicais.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a bolsa de pesquisa do CNPq pelo auxílio financeiro, a disponibilidade dos dados observados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), das reanálises do Era-Interim do European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) e as imagens de satélite do GOES-13 (canal infravermelho) da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

### Referências

AMORIM NETO, A.C.; SATYAMURTY, P.; CORREIA, F.W. 2015. Some observed characteristics of frontal systems in the Amazon Basin. **Meteorological Applications**, v. 22, n. 3, p. 617-635, 2015.

- BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones, **Monthly Weather Review**, v. 47, n. 2, p. 95-99, 1919.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Climanálise boletim de monitoramento e análise climática**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/rclimanl/boletim/>. Acesso em: 22 Abr. 2016, 2013.
- COX, P.M.; BETTS, R.A.; COLLINS, M.; HARRIS, P.P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C.D. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 137-156, 2004.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P. *et al.* The Era-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- FISCH, G.F. Camada Limite Amazônica: Aspectos Observacionais e de Modelagem. 180 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.
- FORTUNE, M.A.; KOUSKY, V.E. Two severe freezes in Brazil: Precursors and synoptic evolution. **Monthly weather review**, v. 111, n. 1, p. 181-196, 1983.
- GALVÃO, J.A.C.; FISCH, G. Balanço de energia em área de floresta e pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000.
- GARREAU, R.D. Cold air incursions over subtropical South America mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 7, p. 2544-2559, 2000.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MIRANDA, A.C.; GASH, J.H.C. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over a C4 pasture in southwestern Amazonia (Brazil). **Functional Plant Biology**, v. 25, n. 5, p. 519-530, 1998.
- HAMILTON, M.G.; TARIFA, J. Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July 1972. **Monthly Weather Review**, v. 106, n. 11, p. 1545-1556, 1978.
- KOUSKY, V.E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.
- KRISHNAMURTI, T.N.; TEWARI, M.; CHAKRABORTY, D.R.; MARENGO, J.; SILVA DIAS P.L.; SATYAMURTY, P. Downstream amplification: A possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. **Weather and Forecasting**, v. 14, n. 2, p. 242-270, 1999.
- LICHTENSTEIN, E.R. Some influences of the Andes Cordillera on the synoptic scale circulation. In: **Extended Abstracts, Third Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography**, p. 146-148, 1989.
- LONGO, M.; CAMARGO, R.; SILVA DIAS, M.A.F. Análise das Características Dinâmica e Sinóticas de um Evento de Friagem Durante a Estação Chuvosa no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 59-72, 2004.
- LUPO, A.R.; NOCERA, J.J.; BOSART, L.F.; HOFFMAN, E.G.; KNIGHT, D.J. South American Cold Surges: Type, Composites and Case Studies. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1021-1041, 2001.
- MALHI, Y.; NOBRE, D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.; CULF, A.; ECOTT, S. Carbon dioxide transfer over a



- Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 31593-31612, 1998.
- MARENGO, J.A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: MMA, 2006a.
- MARENGO, J.A. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: A historical review and current State-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 1-19, 2006b.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon Basin. **Theoretical and Applied Climatology**, n. 73, p. 223-242, 1997a.
- MARENGO, J.; CORNEJO, A; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.; SEA, W. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 11, p. 2759-2786, 1997b.
- MARENGO, J.A. Interannual variability of deep convection in the tropical South America sector as deduced from ISCCP C2 data. **International Journal of Climatological**, v. 15, p. 995-1010, 1995.
- MYES, V. A cold front invasion in southern Venezuela. **Monthly Weather Review**, v. 92, n. 11, p. 513-521, 1964.
- OLIVEIRA, P.J.; ROCHA, E.J.; FISH G.; KRUIJT, B.; RIBEIRO, J.B.M. Efeitos de um Evento de friagem Efeitos de um Evento de friagem nas condições meteorológicas da Amazônia: um estudo de caso. **Acta Amazônica**. v. 34, n. 4, p. 613-619, 2004.
- PARMENTER, F. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 57, n. 12, p. 1435-1440, 1976.
- RICARTE, R.; HERDIES, D.; BARBOSA, T. Patterns of atmospheric circulation associated with cold outbreaks in southern Amazonian. **Meteorological Applications**, v. 22, n. 2, p. 129-140, 2015.
- VIANA, L.P. Estudo Observacional dos eventos de friagens e tendências climáticas na Bacia Amazônica brasileira. 129 p. **Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, São José dos Campos. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3JD5U85>. Acesso em 14 Mai 2015.
- VIANA, L.P.; MENDONÇA DA SILVA, M. Efeito de incurção de ar frio na Amazônia em julho de 2010. Estudo de Caso. **In: Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 17, 2012, Gramado, RS. Anais 2012. 2012.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.