



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS**

GUILHERME FRANCISCO CAMARINHA NETO

**EVENTO DE FRIAGEM NA AMAZÔNIA CENTRAL E SUA INFLUÊNCIA NAS
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E NA QUÍMICA DA ATMOSFERA**

BELÉM-PARÁ

2018

GUILHERME FRANCISCO CAMARINHA NETO

**EVENTO DE FRIAGEM NA AMAZÔNIA CENTRAL E SUA INFLUÊNCIA NAS
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E NA QUÍMICA DA ATMOSFERA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Ciências Ambientais

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Júlia Clarinda Paiva Cohen

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Araújo Carioca

BELÉM-PARÁ

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo (a) autor(a)**

C172e Camarinha Neto, Guilherme Francisco Camarinha Neto.
Evento de friagem na Amazônia central e sua influência nas variáveis micrometeorológicas e na química da atmosfera / Guilherme Francisco Camarinha Neto Camarinha Neto. — 2018.
73 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Júlia Clarinda Paiva Cohen Cohen
Coorientador(a): Prof. Dr. Alessandro Araújo Carioca
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

1. Friagem na Amazônia. 2. Balbina (AM). 3. ATTO. 4. Circulação local. 5. JULES-CCATTBRAMS.
I. Título.

CDD 551.609811

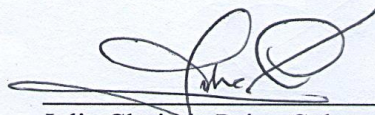
GUILHERME FRANCISCO CAMARINHA NETO

**EVENTO DE FRIAGEM NA AMAZÔNIA CENTRAL E SUA INFLUÊNCIA NAS
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E NA
QUÍMICA DA ATMOSFERA**

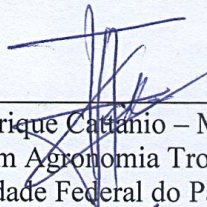
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Data de aprovação: 04/ 09 / 2018

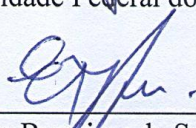
Banca Examinadora:



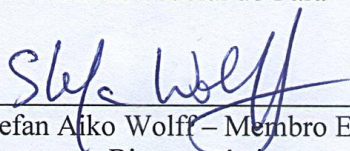
Julia Clarinda Paiva Cohen – Orientadora
Doutora em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal do Pará



José Henrique Cattanio – Membro Interno
Doutor em Agronomia Tropical
Universidade Federal do Pará



Everaldo Barreiros de Souza – Membro Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Stefan Aiko Wolff – Membro Externo
Doutor em Biogeoquímica
Max Planck Institute

Dedicado às minhas filhas

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, *Lilian Ayumi Kawagoe*, pelo apoio infinito, pela paciência inesgotável, pelo companheirismo absoluto, pela dedicação incondicional, por me levantar, me sacudir e me fazer acreditar, por todo amor maior que eu sinto. Seria impossível sem você.

Às minhas lindas filhas *Mariana e Miyuki*, pelas lições de cada dia, pelas palavras reconfortantes, pelos abraços infinitos de sempre, pelo mais puro e incondicional amor que já senti. Minhas pequenas *cumulus* de bom tempo eterno.

Aos meus pais, *Guilhermero José Pereira Camarinha e Maria de Fatima Costa Camarinha*. Obrigado pela inspiração, pelo amor, incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida.

À meu irmão e amigo, *Antônio Victor Costa Camarinha*, pela parceria, pelas conversas e conselhos. Minha referência de amizade e generosidade.

À meu primo e amigo, *Manoel Gustavo*, pelo apoio e incentivo de sempre.

À meu grande amigo, *Dr. Paulo Henrique Galvão*, pela amizade, conselhos e boas referências.

À colega *Adayana Maria Queiroz De Melo*, pelo apoio e pelas valiosas contribuições nesta pesquisa.

À *Prof. Dra. Júlia Clarinda Paiva Cohen*, pela orientação e pelos exemplos de seriedade e comprometimento com a ciência. Pela imensa dedicação, compreensão e paciência. Obrigado por depositar sua confiança em mim.

Ao *Prof. Dr. Alessandro Araújo Carioca*, pela co-orientação, pelos valiosos conselhos e inspirações.

Ao *Dr. Cléo Quaresma*, pela imensa ajuda, por apontar novas e valiosas perspectivas à esta pesquisa.

Ao *Dr. Paulo Kuhn* e ao Laboratório de Modelagem da Amazônia (LAMAZ), pelo auxílio técnico prestado e ajuda com as simulações do modelo JULES-CCATT-BRAMS.

Aos amigos meteorologistas, *Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes (Garibaldi)*, *Alex Antônio Ribeiro de Oliveira (Pirata)* e *Ronaldo da Silva*

Rodrigues (Pancho), pela grande amizade e pela parceria nas aventuras que a ciência proporcionou.

Ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

Ao Programa da Larga Escala Biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA) pelos dados cedidos do sítio de pesquisa do *Amazon Tall Tower Observatory (ATTO)*.

Ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* pelos dados de reanálises cedidos.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) por disponibilizarem o modelo de mesoescala JULES-CCATT-BRAMS.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado concedida.

RESUMO

O foco central deste estudo foi compreender melhor as interferências ambientais causadas pelo fenômeno de Friagem numa região de floresta no centro da Amazônia, tendo em vista os aspectos micrometeorológicos e da química da atmosfera. Para tanto foram utilizados dados do sítio de pesquisa do *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO), que faz parte do Programa da Larga Escala Biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA), dados das estações de superfície dos aeroportos internacionais de Porto Velho-RO e Manaus-AM, além das reanálises do ECMWF Era-Interim (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e simulações numéricas de alta resolução concebidas pelo modelo de mesoescala JULES-CCATT-BRAMS. Primeiramente investigou-se os impactos do avanço da Friagem no ambiente da escala da Bacia Amazônica através das reanálises ERA-interim, com essas informações observou-se uma onda de ar frio e seco penetrando a região amazônica no sentido Sul/Norte, entre os dias 6 e 11 de julho de 2014. As reanálises do dia 11 mostraram que o escoamento de Sudoeste relacionado a Friagem convergiu com os ventos de Leste na região central da Amazônia, e as imagens do canal infravermelho do satélite GOES-13 mostraram que a interação entre essas duas massas de ar distintas gerou forte atividade convectiva nesta região, quando também foi registrada uma precipitação de 21mm no sítio ATTO. Analisou-se então, a temperatura do ar e direção do vento próximo a superfície em Porto Velho e Manaus e acima do dossel no sítio ATTO, notando-se que a chegada da Friagem causou queda brusca de temperatura e predominância de ventos no quadrante Sul nestas três localidades, sendo que esses efeitos foram vistos em Porto Velho entre os dias 7 e 8 de julho e em Manaus e sítio ATTO entre os dias 9 e 11 de julho. A partir daí as análises foram concentradas nos dados coletados no sítio ATTO, onde observou-se que a redução da radiação incidente devido a atividade convectiva no dia 11 de julho, implicou em redução nas concentrações de O₃ a partir das 15:00 UTC deste dia, indicando uma interferência indireta da Friagem na química da atmosfera. Por fim, as simulações numéricas revelaram que o escoamento relacionado a Friagem é pouco profundo e restrito aos níveis verticais inferiores a 500 m, além disso, as simulações mostraram também que as circulações de brisa do lago da Balbina não influenciaram na química

atmosférica na região do sítio ATTO na ocasião da Friagem, ainda que o centro do lago tenha apresentado maiores concentrações de NO₂, CO e O₃ em comparação a superfície da floresta no seu entorno.

Palavras-chave: Friagem na Amazônia. Balbina (AM). ATTO. Circulação local. JULES-CCATT-BRAMS.

ABSTRACT

The central focus of this study was to better understand the environmental interference caused by the “Friagem” phenomenon in a forest region in the center of the Amazon, considering the micrometeorological and atmospheric chemistry aspects. In order to do so, we used data from the *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO) research site, which is part of the *Large scale Biosphere-Atmosphere program in the Amazon* (LBA), data from the surface stations of the international airports of Porto Velho-RO and Manaus-AM, in addition to the reanalysis of ECMWF Era-Interim (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) and high-resolution numerical simulations designed by JULES-CCATT-BRAMS, we investigated the impacts of the advance of the Friagem in the environment of the Amazon basin scale through the ERA-interim reanalysis, with this information a cold and dry air wave was observed penetrating the Amazon region in the South/North direction, between the days 6 and 11 July, 2014. The reanalyses of day 11 showed that the south-west flow related to the coldness converged with the easterly winds in the central region of the Amazon, and the images of the infrared channel of the satellite GOES-13 showed that the interaction between these two distinct air masses generated strong convective activity in this region, when a precipitation of 21mm was also recorded in the ATTO site. The air temperature and wind direction near the surface in Porto Velho and Manaus and above the canopy in the ATTO site were analyzed, and the arrival of the “Friagem” caused a sudden fall in temperature and a predominance of winds in the South quadrant in these regions. three localities, and these effects were seen in Porto Velho between 7 and 8 July and in Manaus and ATTO site between 9 and 11 July. From this, the analyzes were concentrated in the records of the *Instant tower* at the ATTO site, where it was observed that the reduction of the incident radiation due to convective activity on July 11, implied a reduction in O₃ concentrations from 15:00 UTC of this day, indicating an indirect interference of the “Friagem” in the chemistry of the atmosphere. Finally, the numerical simulations revealed that the cold-related flow is shallow and restricted to vertical levels of less than 500 m, in addition, the simulations also showed that the breeze circulations of the Balbina lake possibly did not influence the atmospheric chemistry in the region of the ATTO site at the time of the cold, although the center of the lake

presented higher concentrations of NO₂, CO and O₃ in comparison to the surface of the forest in its surroundings.

Key words: Friagem in the Amazon. Balbina – AM. ATTO. Local circulation. JULES-CCATT-BRAMS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1 – Normais climatológicas de temperatura do ar e precipitação da cidade de Manaus (1961 a 1990).18
- Figura 1.2 – Precipitação mensal registrada no sítio *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO) para os anos de 2012 a 2014 em comparação as normais climatológicas de Manaus.19
- Figura 1.3 – Rosas dos ventos para (a) estação seca (de junho a novembro) e (b) estação úmida (de dezembro a junho) com base nas médias registradas no período de 2012 a 2014.20
- Figura 1.4 – Modelo conceitual da dinâmica das circulações de brisa entre a superfície da floresta e de um rio durante o dia (brisa de rio) e no período noturno (brisa de floresta).....23
- Figura 2.1 – Localização do sitio ATTO e do lago de Balbina. A linha vermelha tracejada indica a distância do sitio ATTO em relação ao lago de Balbina e a cidade de Manaus. As linhas amarelas representam as estradas e as linhas em azul representam a malha dos rios nesta região.....33
- Figura 2.2 – Domínio da grade da simulação do modelo JULES-CCATT-BRAMS mostrando a distribuição da topografia (metro) e localização do lago de Balbina (linha preta), sítio ATTO (ponto preto) e rio Uatumã (linha tracejada).....37
- Figura 2.3 – Distribuição da temperatura do ar (°C, sombreado) e vento (m/s, vetor) na superfície, em Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A), às 12:00 UTC entre os dias 6 e 11 de julho de 2014 obtidos com as reanálises ERA-interim.....40
- Figura 2.4 – Distribuição da razão de mistura (g/kg, sombreado) e vento (m/s, vetor) na superfície, em Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A), às 12:00 UTC entre os dias 6 e 11 de julho de 2014 obtidos com as reanálises ERA-interim.....41
- Figura 2.5 – Comportamento do vento à superfície (m/s, vetores) nos dias 6 (a) e 11 (b) de julho de 2014 às 12 UTC, destacando Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A) obtidos com as reanálises ERA-interim. Setas vermelhas indicam o escoamento predominante do vento e o círculo tracejado destaca a região de convergência dos ventos na região de Manaus e ATTO.....42

- Figura 2.6 – Imagens realçadas do satélite GOES 13, no canal infravermelho no dia 11 de julho de 2014. Os círculos em branco indicam a posição aproximada do sítio ATTO e lago de Balbina.....43
- Figura 2.7 – Chuva (PRP) acumulada por dia (mm/dia) durante o mês de julho de 2014, medida no sítio ATTO. Em destaque o dia mais chuvoso do mês (11 de julho).....44
- Figura 2.8 – Comportamento diário e média mensal da temperatura do ar no período de 6 à 11 de julho de 2014, em Porto velho, Manaus e sítio ATTO.....46
- Figura 2.9 – Velocidade e direção do vento horizontal no nível de 73 metros medidos no sítio ATTO entre os dias 6 e 11 de julho de 2014.....47
- Figura 2.10 – Velocidade e direção do vento no nível de 73 metros medidos no sítio ATTO, em intervalos de 2 horas, entre os dias 9 e 11 de julho de 2014.....49
- Figura 2.11 – Comportamento diário e média mensal para: (a) radiação de onda curta incidente (W/m^2); (b) concentração de O_3 (ppb) e (c) concentração de CO_2 (ppm) no período de 6 à 11 de julho de 2014 no sítio ATTO.....51
- Figura 2.12 – Perfil vertical do vento horizontal (m/s) no sítio ATTO desde 00UTC do dia 9 até as 00UTC do dia 12 de julho de 2014.....52
- Figura 2.13 – Evolução da temperatura do ar ($^{\circ}C$, sombreado) no nível de 24,4m e vento horizontal (m/s, vetor) no nível de 134,5m desde 02 à 17UTC, do dia 11 de julho de 2014. O lago de Balbina (contorno preto) e o sítio ATTO (ponto preto) estão indicados.....54
- Figura 2.14 – Comportamento do vento no nível de 134,5m no dia 11 de julho de 2014 para: (a, a'') razão de mistura do vapor d'água (g/kg, sombreado); (b, b'') concentração do Ozônio (ppbv, sombreado); (c, c'') concentração de monóxido de carbono (ppbv, sombreado) e (d, d'') Dióxido de nitrogênio (ppbv, sombreado) no nível de 24,4 m, quando a Friagem estava chegando à área de estudo (a, b, c, d) e no momento de sua dissipação (a'', b'', c'', d''). O lago de Balbina (contorno preto) e o sítio ATTO (ponto preto) estão indicados.....57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATTO	<i>Amazon Tall Tower Observatory</i>
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i>
CCATT	<i>Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport</i>
CL	Camada Limite
CLE	Camada Limite Estável
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JULES	<i>Joint UK Land Environment Simulator</i>
LBA	<i>Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia</i>
LI	Linha de Instabilidade
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
RDS	Reserva de Desenvolvimento Sustentável
UNFAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau
CH₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
NO₂	Dióxido de Nitrogênio
N₂O	Óxido Nitroso
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
O₃	Ozônio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1 O fenômeno da friagem na Bacia Amazônica	16
1.2 Climatologia da área de estudo	17
1.3 Camada limite planetária na Amazônia	20
1.4 Circulações de mesoescala	22
1.5 Composição química da atmosfera amazônica	25
1.6 Objetivos	27
1.7 Objetivos específicos	27
1.8 Estrutura da dissertação	27
2 A PRESENÇA DE UM EVENTO DE FRIAGEM NO CENTRO DA AMAZÔNIA E SUA INFLUÊNCIA NAS VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E NA QUÍMICA DA ATMOSFERA	29
2.1 Introdução	31
2.2 Materiais e métodos	32
2.2.1 Área de estudo.....	33
2.2.2 Dados.....	34
2.2.3 Modelagem numéricas.....	35
2.3 Resultados e discussão	38
2.3.1 Características do ambiente na escala da bacia amazônica.....	38
2.3.2 Aspectos observados nas regiões Oeste e Central da Amazônia.....	44
2.3.3 Circulação local.....	46
2.3.4 Simulação numérica da circulação local e seu efeito no Sítio ATTO.....	51
2.4 Conclusões	60
3 CONCLUSÕES GERAIS	61
3.1 Resultados chave	61
3.2 Perspectivas para trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 O fenômeno da friagem na Bacia Amazônica

Os sistemas frontais (SF) são fenômenos meteorológicos de grande escala que ocorrem durante o ano todo sobre a América do sul, e apesar de atuarem com maior frequência nas latitudes altas, eventualmente alcançam regiões subtropicais e tropicais, causando grandes distúrbios meteorológicos. A trajetória dos SF está associada ao escoamento de grande escala e são geralmente orientadas no sentido Sudoeste/Nordeste (LONGO et al., 2004).

Flutuações de nebulosidade de 3 a 6 dias sobre a bacia amazônica foram associadas a penetrações de SF, bem como os eventos de propagação meridional de convecção do Sudoeste (SO) para o Norte (N) (MARENGO et al., 1997). Esses eventos são considerados como o padrão mais importante da variabilidade diária da convecção observada na Amazônia durante a primavera austral (SIQUEIRA; MACHADO, 2004). Isso mostra o importante papel das frentes frias na organização e propagação da convecção do subtropical ou das latitudes médias para latitudes tropicais mais baixas, em épocas em que a atividade convectiva é intensa, atingindo a bacia amazônica.

Embora esteja situada próxima ao equador, a região amazônica em sua parte meridional sofre eventualmente os efeitos da ação de SF denominados localmente e na literatura por “Friagem” (FISCH et al., 1996). Estudos pioneiros como o de Serra e Rastibona (1941) apresentam o fenômeno da Friagem como uma forte incursão de ar frio vindo das altas e médias latitudes que alcança as regiões tropicais e interfere nas condições atmosféricas da Amazônia.

Levando em consideração a grande extensão territorial e vasta diversidade de ecossistemas da Amazônia, a incursão de ar frio causa impactos distintos, que variam de acordo com a localidade de referência. No ano de 1994, Marengo et al. (1997) discutiram as implicações de um evento de Friagem nas regiões sudoeste, centro e leste da Amazônia, e concluíram que nas regiões mais próximas aos Andes, no sudoeste, as mudanças no ciclo diário da temperatura do ar, umidade relativa e direção do vento foram mais evidentes.

Diversos trabalhos foram realizados para compreender os impactos da Friagem nas características da atmosfera, no entanto, boa parte desses estudos tiveram como foco a região sul da Amazônia (FISCH et al., 1996; LONGO et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2004; PARMENTER, 1976; SIQUEIRA; MACHADO, 2004; VIANA; SILVA, 2012). Desta forma, os possíveis impactos da Friagem na região central da Amazônia, especialmente nos ecossistemas de floresta desta região tem sido pouco explorado na literatura.

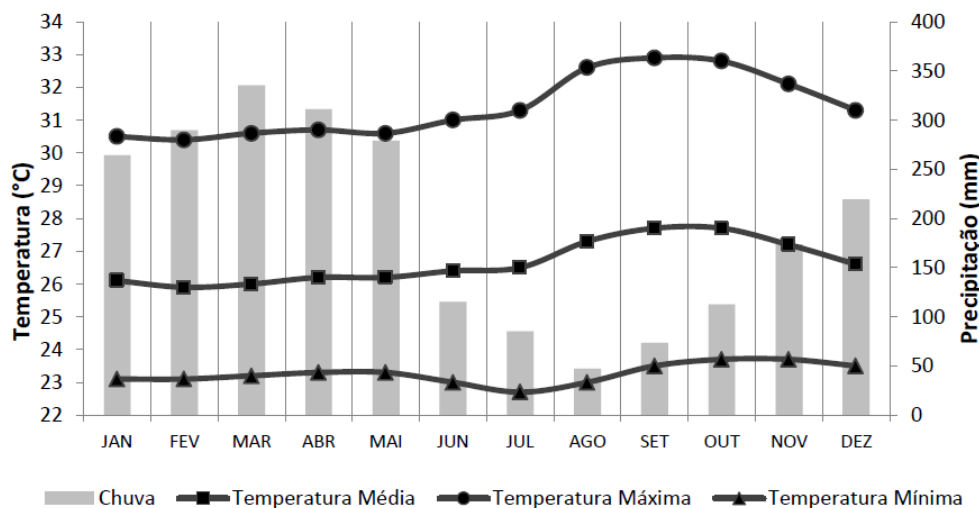
Em Manaus observa-se em média três ocorrências de eventos de Friagem por ano, que além de provocar decréscimos razoáveis na temperatura do ar modificam a direção predominante dos ventos, indo de N para Sul (S) e podem perdurar por dias (BRINKMAN; RIBEIRO, 1972). O entendimento sobre os processos associados ao fenômeno da Friagem é de extrema importância ambiental, pois além das mudanças diretas observadas nas variáveis atmosféricas, esses eventos interferem indiretamente tanto nas circulações de mesoescala, quanto no transporte e dispersão de gases traços. Estudos como o de Silva Dias et al. (2004) apontaram que os eventos de Friagem provocam enfraquecimento dos ventos de grande escala, favorecendo o desenvolvimento e domínio das circulações de brisa em regiões do centro da Amazônia.

1.2 Climatologia da área de estudo

A climatologia da Amazônia é caracterizada por um conjunto de diversos fatores, no entanto, a disponibilidade de energia solar é o mais importante (Nobre et al., 2009). A região situada entre 5° N e 10° S recebe no topo da atmosfera um valor de radiação máximo de 36,7 Mj/m²/dia em dezembro e janeiro e valores mínimos de 30,7 Mj/m²/dia nos meses de junho e julho (SALATI E MARQUES, 1984). Como é típica para a Bacia Amazônica central, a temperatura média do ar não apresenta variações consideráveis em escala sazonal devido à alta radiação solar incidente ao longo do ano (NOBRE et al., 2009). Climatologicamente na região de Manaus, as temperaturas mais altas são observadas durante a estação seca, entre os meses de junho e novembro, com temperatura média máxima de 27,5°C em setembro e precipitação abaixo de 50 mm em agosto. Enquanto que na estação chuvosa, entre dezembro e maio, as menores temperaturas médias e o maior índice pluviométrico são

observadas no mês de março, quando a temperatura média é de 25,9°C e precipitação fica acima de 300 mm, respectivamente (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Normais climatológicas de temperatura do ar e precipitação da cidade de Manaus (1961 a 1990).

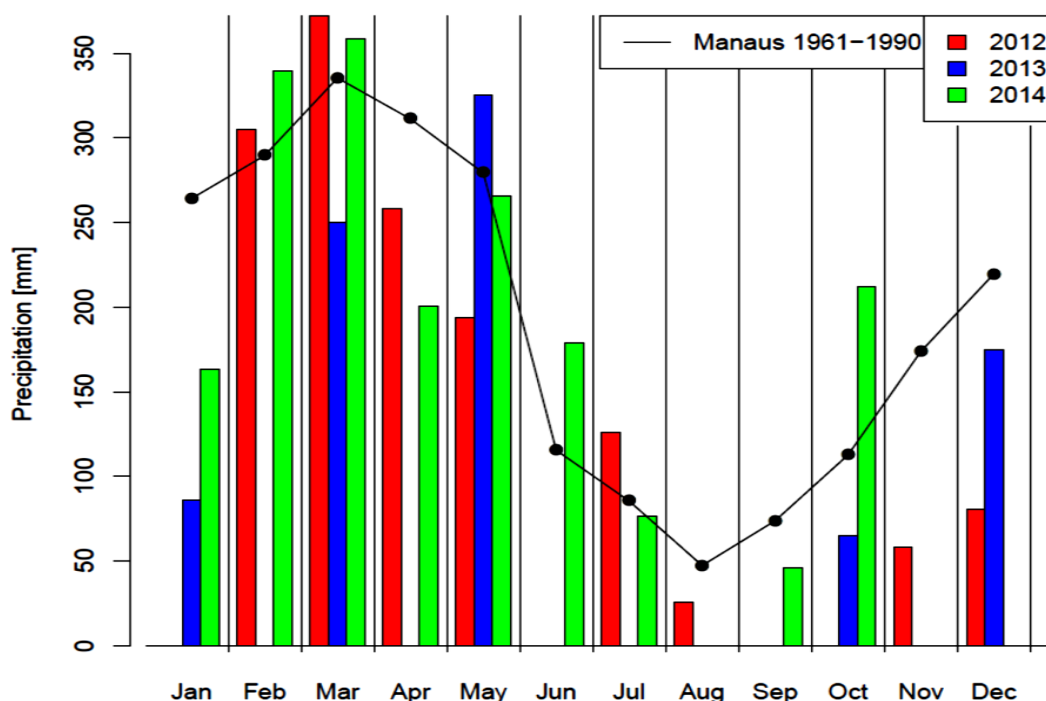


Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2017).

O regime pluviométrico amazônico tem como um dos principais sistemas geradores de precipitação a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que oscila anualmente entre os Hemisférios Sul e Norte (HS/HN), seguindo a marcha sazonal aparente do sol. Sua permanência mais ao sul do equador, cerca de 2° S, ocorre no primeiro semestre, e intensifica os sistemas convectivos locais, justificando este período como o mais chuvoso da região amazônica. Em contrapartida, seu retorno ao HN, até cerca de 14° N caracteriza o segundo semestre como o menos chuvoso (FISCH et al., 1996).

O ciclo sazonal da precipitação na Amazônia central é bem representado nas coletas de dados realizadas no sítio do *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO), com valores máximos em torno de março e valores mínimos em agosto e setembro (Figura 1.2). A variabilidade interanual é evidente em todos os anos, especialmente na transição para a estação chuvosa, fato que também foi observado nas médias climatológicas na estação de Manaus (FERNANDES, 2014).

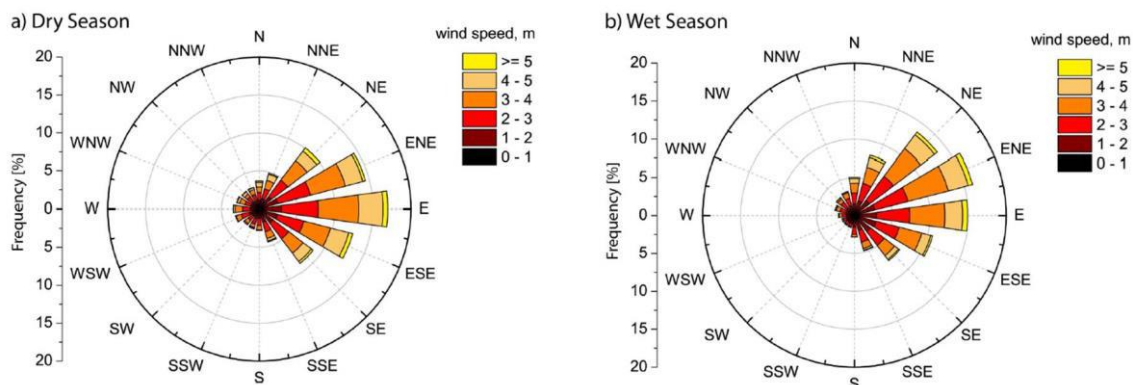
Figura 1.2 – Precipitação mensal registrada no sítio *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO) para os anos de 2012 a 2014 em comparação as normais climatológicas de Manaus INMET (1961-1990).



Fonte: Adaptado de Andreae et al. (2015).

Segundo Andreae et al. (2012), além de determinar dois regimes de precipitação bem distintos, a oscilação sazonal da ZCIT modifica também a origem dos ventos observados no sítio ATTO, na parte central da Amazônia, resultando em mudanças pronunciadas nas condições meteorológicas e na química da atmosfera. No deslocamento máximo da ZCIT no HS, os ventos predominantes são de Nordeste (NE) na bacia amazônica, favorecendo o transporte de aerossol marinho vindo do Atlântico, partículas de poeira do deserto do Saara e fumaça de incêndios da África ocidental (ANDREAE et al., 2015). Quando a ZCIT se encontra no HN, os ventos que predominam são de Leste (L) transportam a poluição de origem urbana das regiões sudeste do Brasil, além de poluição relacionada às queimadas. A variação sazonal da direção e velocidade do vento é apresentada na Figura 1.3.

Figura 1.3 – Rosas dos ventos para (a) estação seca (de junho a novembro) e (b) estação úmida (de dezembro a junho) com base nas médias registradas no período de 2012 a 2014.



Fonte: Adaptado de Andreae et al. (2015).

Além de fatores que caracterizam o clima amazônico, existem aqueles de escala planetária que interferem neste. A ocorrência de *El Niño*/Oscilação Sul (ENOS) é um importante sistema oceano/atmosférico relacionado a anomalias positivas (*El Niño*) ou negativas (*La Niña*) na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico equatorial, que em sua fase positiva inibe a precipitação e na fase negativa estimula as chuvas na região amazônica. Esse comportamento é devido à variação longitudinal do ramo descendente da circulação de Walker, que atua na região central da Amazônia em eventos de *El Niño* causando diminuição expressiva da precipitação, enquanto que na ocorrência de *La Niña*, o ramo descendente da circulação de Walker se desloca para a costa oeste equatorial da América latina, ocasionando chuvas mais intensas no centro da Amazônia (NOBRE; RENNÓ, 1985; NOBRE; OLIVEIRA, 1987).

1.3 Camada limite planetária na Amazônia

A Camada Limite Planetária (CLP) compreende a parte inferior da troposfera, em contato direto com a principal fonte de calor da atmosfera: a superfície terrestre (HOLTON, 2004). Desta forma, é na CLP que ocorrem as maiores trocas de energia entre a superfície e a atmosfera (STULL, 1998). O ciclo diário de desenvolvimento da CLP inicia-se pela manhã, quando a

radiação solar incidente de onda curta aquece a superfície, que por sua vez emite radiação de onda longa que aquece o ar adjacente, iniciando o transporte turbulento vertical de calor, de água e de gases traços, tais como o CO₂ e O₃ (OLIVEIRA; FITZJARRALD, 1993).

A formação da CLP em condições ideais (céu claro e superfície homogênea) apresenta-se no período diurno como uma Camada Limite Convectiva (CLC), no período noturno como Camada Limite Estável ou Noturna (CLE) e na transição entre os períodos apresenta características de Camada Limite Neutra (CLN) (MOREIRA, 2013).

Greco et al. (1992) em um estudo observacional, documentaram a presença de jatos noturnos de baixos níveis próximo à cidade de Manaus/AM, que segundo os autores é devido ao desacoplamento friccional acima da camada de inversão associada à rugosidade da floresta e também ao gradiente horizontal de temperatura e pressão existente na região. No entanto, destacam que a presença destes jatos pode ser uma particularidade da região de Manaus, devido a maior largura do rio na confluência dos rios Negro e Solimões, provocando assim, o sistema de brisa fluvial (DOS SANTOS et al., 2014).

Na região de floresta, o desacoplamento friccional inicia-se em torno das 16 hora local (HL), abaixo dos 200m, o qual dará início à formação da CLE (OLIVEIRA; FISCH, 2000). Uma camada com ventos praticamente constantes é observada em torno das 17HL, até o nível de 1000m de altura, mostrando que a mistura turbulenta se faz presente até este nível (OLIVEIRA; FISCH, 2000).

Oliveira e Fitzjarrald (1993) verificaram a influência de uma circulação de brisa de rio sobre as condições locais da CLP da região próxima de Manaus. A circulação observada apresenta um ciclo diário com fluxos de NE (sentido floresta/rio) durante o período da noite e da manhã e fluxos de SE (sentido rio/floresta) durante a tarde e ao anoitecer. Eles identificaram a presença de duas classes de jatos noturnos na camada limite de Manaus, sendo a primeira associada com a presença de cisalhamento vertical na direção do vento, mais frequente na estação seca e a segunda classe, sem essa variação, na estação úmida. A primeira classe é característica da camada mais baixa (200-400m), sendo que a segunda se estende sobre uma camada mais acima (400-600m).

A turbulência na região próxima à superfície na floresta é persistente durante todo o período diurno, com o predomínio de convecção forçada (valores de Número de Richardson inferior a 1, $Ri < 1$) até próximo das 12HL, a partir desse horário, valores negativos de Ri começam a aparecer, representando o início de convecção livre associada com a turbulência térmica (OLIVEIRA; FISCH, 2000).

Em noites relativamente calmas na floresta amazônica, ondas de gravidade (OG) interna podem ocorrer na camada limite (CL), influenciando as trocas que ocorrem na CLE (STEENEVELD et al., 2009). As OG internas podem ser geradas por vários mecanismos, incluindo mudanças superficiais de rugosidade, topografia, convecção, ondulações do terreno, etc. (NAPPO, 2002). Essas características podem realocar energia e momentum e são significativas na determinação da estrutura vertical da atmosfera e no acoplamento da mesoescala com fenômenos de microescala (STEENEVELD et al., 2008, 2009).

O entendimento da turbulência se faz necessário para uma análise mais completa da dinâmica das trocas de energia na CLP. Entender essa dinâmica é de fundamental importância na compreensão de fenômenos de maior escala (mesoescala e escala sinótica), bem como fenômenos climáticos e ambientais. A estrutura e desenvolvimento da CLP são importantes em muitas áreas do conhecimento que vão desde a poluição ambiental, meteorologia agrícola, hidrologia, meteorologia aeronáutica, meteorologia de mesoescala até os modelos de previsão numérica do tempo e clima. Atualmente, as principais ferramentas no estudo da CLP são os experimentos observacionais, parametrizações teóricas e os modelos numéricos (GARRAT, 1994).

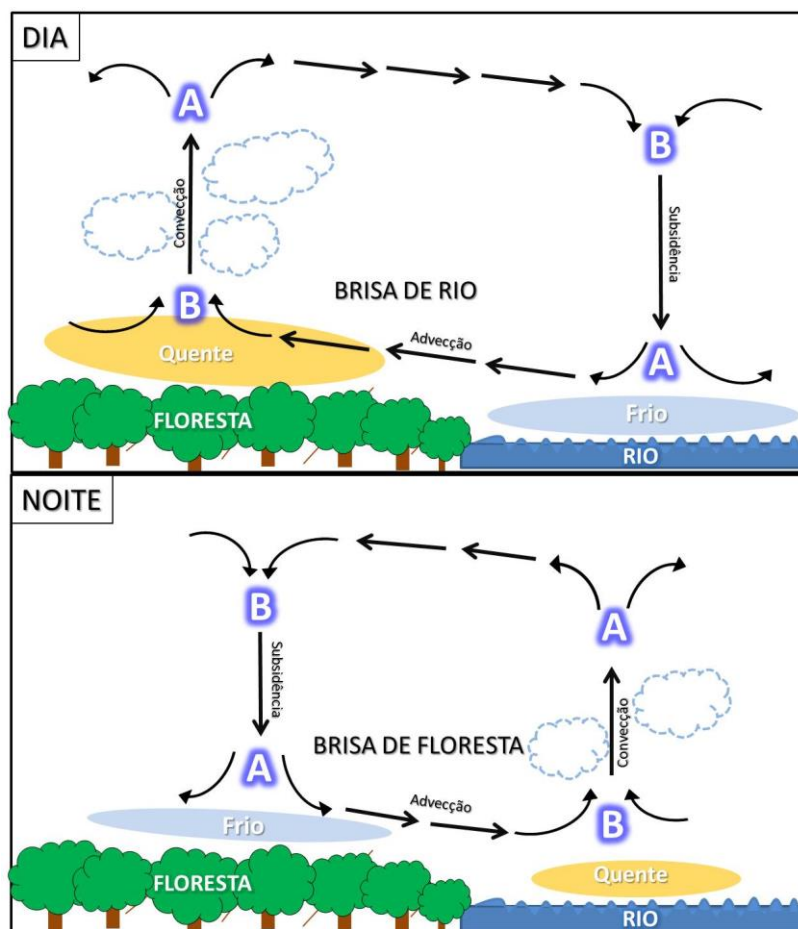
1.4 Circulações de mesoescala

A dinâmica da Mesoescala abrange estudos de sistemas atmosféricos cuja escala espacial está entre 2km e 2000km, o que inclui circulações que vão desde tempestades até frentes e furacões (ORLANSKI, 1975). Estes distúrbios de mesoescala estão intrinsecamente associados a instabilidade ocasionada por fontes térmicas ou topográficas (HOLTON, 2004).

As circulações de brisas de rio, oceano, vale-montanha e as não convencionais são exemplos adicionais de circulações regionais forçadas por contrastes de temperatura entre superfícies heterogêneas (COHEN et al., 2014; SILVA DIAS et al., 2004; FITZJARRALD et al., 2008, GERMANO et al., 2017; LU et al., 2005; MATOS; COHEN, 2016; SAAD et al., 2010; SANTOS et al., 2014).

A diferença da capacidade térmica entre um corpo d'água e a superfície terrestre promove movimento vertical de ar (convecção) sobre a superfície mais aquecida, que por sua vez gera um fluxo de ar horizontal (advecção) em baixos níveis, escoando no sentido da superfície de menor temperatura (alta pressão) para a de maior temperatura (baixa pressão), caracterizando as circulações de brisa (Figura 1.4)

Figura 1.4 – Modelo conceitual da dinâmica das circulações de brisa entre a superfície da floresta e de um rio durante o dia (brisa de rio) e no período noturno (brisa de floresta).



Fonte: O próprio autor (2018).

Em escala regional, as circulações de brisas são importantes sistemas transportadores de umidade e chuva continente adentro, responsáveis pela formação de convecção profunda que constituem as Linhas de Instabilidade (LI) (COHEN et al, 1995; ALCÂNTARA et al, 2011) e Micro Linhas Fluvial (MLF) na atmosfera, próximas a costa atlântica da Amazônia (MATOS e COHEN, 2016). Tais sistemas de circulação são fortemente influenciados pela topografia e principalmente pela localização dos corpos d'água em relação a sistemas de circulação predominantes de maior escala caracterizando regimes peculiares de precipitação local, que variam temporal e localmente na região (SILVA DIAS et al. 2004; FITZJARRALD et al. 2008s; COHEN et al, 2014, GERMANO et al, 2017).

A contribuição das circulações de brisa na distribuição espacial de gases traços tem sido o foco de diversos estudos. Através de dados observacionais Moura et al. (2004) concluiu que as circulações de brisa no lago da Balbina exercem um importante papel na distribuição do gás O_3 , uma vez que, segundo estes autores, a concentração de O_3 é sempre alta quando o vento é proveniente do lago, sugerindo ainda que o lago da Balbina seja fonte deste gás.

Em seu estudo sobre a dinâmica das circulações de brisa ao longo do lago Candle, Canadá, Sun et al. (1998) encontraram concentrações mais elevadas de CO_2 na região do lago do que aquela observada no mesmo nível sobre a terra, sugerindo que este resultado esteja associado ao movimento descendente induzido pela brisa do lago. Nesse estudo de modelagem, a brisa terrestre (floresta/rio) foi evidente no início da manhã, culminando nas concentrações de CO_2 mais elevadas sobre o lago devido a brisa terrestre.

Durante a campanha do projeto CHUVA na região de Belém, Matos e Cohen (2016), por meio de dados observacionais e simulações numéricas observaram de forma inédita a formação de bandas de convecção paralelas à ilha do Marajó associadas à ocorrência de brisa fluvial sobre a Baía do Marajó. Tal atividade convectiva foi denominada de Micro Linha Fluvial (MLF). Esta brisa fluvial encontra o escoamento de leste sobre o continente, convergindo e conseqüentemente adquirindo o formato de Micro Linha sobre o continente, paralelo a Ilha do Marajó. A MLF se intensifica sobre a Baía do Marajó ao propagar-se a Oeste, atingindo 13 km de profundidade.

Em um estudo recente, Germano et al. (2017) analisaram a dinâmica das circulações de mesoescala associadas às brisas e sua influência no ciclo diurno de precipitação em cinco municípios do nordeste do estado do Pará, por meio de dados observacionais de estações meteorológicas automáticas. Em geral, os valores máximos de velocidade do vento foram observados predominantemente de nordeste em todos os municípios, caracterizando a ocorrência de brisa de mar no mesmo sentido dos ventos alísios, entre os horários de 12:00 e 21:00 UTC. A precipitação induzida pela brisa marítima é mais frequente entre o final da tarde e início da noite. Com o aquecimento diurno, a convecção rapidamente se forma ao longo da costa, provocando valores máximos de chuva entre 15:00 e 16:00 UTC. Por outro lado, foram observadas linhas de convecção forçadas pela brisa terrestre, localizadas sobre o oceano ao longo da costa atlântica, com máximas entre 21:00 e 00:00 UTC.

Portanto, quando o foco do estudo se desloca para regiões menores é preciso considerar o papel das características regionais da paisagem na dinâmica das brisas e conseqüentemente como estas circulações podem influenciar o microclima.

1.5 Composição química da atmosfera amazônica

A floresta amazônica é uma importante fonte natural de gases traço, aerossóis e vapor d'água para a atmosfera global, principalmente por efeito de seu intenso metabolismo (ARTAXO et al., 2005). A grande disponibilidade de radiação solar na superfície amazônica, devido sua localização tropical favorecem a intensa reatividade química atmosférica (ANDREA e CRUTZEN, 1997). Tem sido proposto que a floresta amazônica representa uma fonte global de importantes gases de efeito estufa, como o Óxido Nitroso (N_2O) (POTTER et al., 1998), Metano (CH_4) (BARTLETT e HARRISS, 1993) e o Dióxido de Carbono (CO_2) (ANDREAE et al., 1988).

A troposfera tropical domina a produção global de radicais OH (hidroxila), também chamados de “detergentes da atmosfera” (ARTAXO et al., 2002), uma vez que são responsáveis por cerca de 70% da oxidação atmosférica global de gases de longa duração, incluindo monóxido de carbono

(CO), CH₄, clorofluorcarbonos hidrogenados e brometo de metila (CRUTZEN, 1995). Além disso, os oxidantes presentes na atmosfera são de fundamental importância na produção de aerossóis de gases precursores, que por sua vez desenvolvem um importante papel nos processos de oxidação atmosférica (ANDREAE e CRUTZEN, 1997). A Amazônia é considerada uma das principais fontes de partículas de aerossóis (principalmente orgânicas) para a atmosfera global (ANDREAE e CRUTZEN, 1997).

As emissões de gases precursores de Ozônio (O₃) são de particular importância sobre as características químicas e radiativas da atmosfera. As emissões de precursores de O₃ podem proporcionar um aumento expressivo nas concentrações deste gás, de modo que atinja níveis potencialmente danosos à floresta, pois o O₃ é fitotóxico, e danifica as funções estomáticas das folhas (ARTAXO et al., 2002). Sabe-se que o solo e o dossel da floresta atuam como importantes sumidouros de ozônio (O₃), e por outro lado são fontes de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), com tudo, os processos que ajustam esses fluxos são pouco compreendidos (LUDWIG et al., 2001).

A composição química da atmosfera amazônica, sazonalmente sofre significativas mudanças ao longo do ano. Na estação chuvosa, as concentrações relativamente baixas de gases como o CO, O₃ e NO_x são basicamente de origem biogênica da floresta, e da atividade fotoquímica nesta região tropical (JACOB & WOFSY, 1988). Por outro lado, durante a estação menos chuvosa, também chamada de estação das queimadas, a composição atmosférica sofre mudanças significativas do ponto de vista dos gases traços, alterando profundamente os mecanismos que regulam a composição química atmosférica (LONGO et al., 1999).

Destaca-se que a região amazônica vem sofrendo intensas mudanças no uso do solo, o que contribuem para profundas alterações nos fluxos de carbono e nitrogênio, gases traço e mudanças nos ciclos biogeoquímicos terrestres e atmosféricos, que possivelmente impactam no clima regional e global (ARTAXO et al., 2002; SILVA DIAS et al, 2002). Espera-se que as mudanças no uso da terra na Amazônia apresentem seus efeitos a longo prazo no balanço global de carbono, nas concentrações de gases de efeito estufa e partículas de aerossóis, e no poder oxidante da atmosfera global.

1.6 Objetivos

O objetivo proposto neste estudo foi analisar a influência de um evento de Friagem nas variáveis micrometeorológicas, nas circulações locais e na química da atmosfera em uma região de floresta na Amazônia central.

1.7 Objetivos específicos

- Identificar as alterações atmosféricas próximas a superfície, em escala regional, no ambiente da bacia amazônica devido a ocorrência do fenômeno de Friagem.
- Estimar as consequências do fenômeno de Friagem nas variáveis micrometeorológicas e concentrações de CO₂ e O₃ registradas acima do dossel, no sítio ATTO.
- Avaliar a influência das circulações locais entre o lago da Balbina e o sítio ATTO na distribuição horizontal de gases traços no período mais intenso da Friagem nesta região.

1.8 Estrutura da dissertação

O trabalho está apresentado em três capítulos, que abrangem os pontos dos objetivos propostos. O Capítulo 1 apresenta uma breve fundamentação teórica dos assuntos que serão discutidos neste estudo. O Capítulo 2 trata-se de um artigo sobre o estudo de caso da ocorrência do fenômeno de Friagem na região central da Amazônia. A sessão 1 deste artigo apresenta uma introdução ao assunto. A sessão 2 descreve os métodos e dados e utilizados. A sessão 3 apresenta os resultados observacionais e na sequência as simulações numéricas do caso de Friagem observado entre o dia 9 e 11 de julho de 2014. E finalmente, a sessão 4 apresenta as conclusões e discussões sobre os pontos fundamentais do artigo. O capítulo 3 apresenta as discussões gerais deste estudo e perspectivas para trabalhos futuros.

2 EVENTO DE FRIAGEM NA AMAZÔNIA CENTRAL E SUA INFLUÊNCIA NAS VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E NA QUÍMICA DA ATMOSFERA.

RESUMO

No período entre 9 e 11 de julho de 2014 um evento de Friagem alcançou a região central da Amazônia provocando mudanças significativas no microclima e química atmosférica. No dia 11 de julho, o escoamento de Sudoeste relacionado a Friagem convergiu com os ventos de Leste no centro da Amazônia, a interação entre essas duas massas de ar distintas formou uma forte banda de convecção, que se intensificou sobre a região de Manaus e sítio ATTO. As imagens do canal infravermelho do satélite GOES-13 mostram a evolução da atividade convectiva no dia 11 de julho, que provocou uma precipitação de 21mm no sítio ATTO. Além disso, a chegada da Friagem ocasionou queda brusca de temperatura e predominância de ventos no quadrante Sul, que pôde ser visto em Porto Velho entre nos dias 7 e 8 de julho e em Manaus e sítio ATTO entre os dias 9 e 11 de julho. A partir daí as análises foram concentradas nos registros da torre *instant*, no sítio ATTO, onde observou-se que a intensa nebulosidade sobre este sítio no dia 11 de julho, que resultou em redução na atividade fotoquímica e conseqüente decréscimo nas concentrações de O₃ a partir das 15:00 UTC deste dia, indicando uma interferência indireta da Friagem na química da atmosfera. Por fim, as simulações numéricas revelaram que o escoamento relacionado a Friagem mostrou-se restrito aos níveis verticais inferiores a 500 m, além disso, as simulações mostraram também que a Friagem trouxe ar mais limpo para a região, a julgar pelo fato de que as concentrações de NO₂, CO e O₃ foram baixas do início ao fim da incursão da Friagem nesta região.

Palavras-chave: Friagem na Amazônia; ATTO; Circulação local

ABSTRACT

In the period between July 9 and 11, 2014 a *Friagem* event reached the central Amazon region causing significant changes in microclimate and atmospheric chemistry. On July 11, the South-west flow related to *Friagem* converged with the Eastern winds in the center of the Amazon, the interaction between these two distinct air masses formed a strong convection band, which intensified over the region of Manaus and the site ATTO. The images of the infrared channel of the GOES-13 satellite show the evolution of convective activity on July 11, which caused a 21mm precipitation in the ATTO site. Moreover, the arrival of *Friagem* caused a sudden drop in temperature and predominance of winds in the South quadrant, which could be seen in Porto Velho between July 7 and 8 and in Manaus and ATTO site between 9 and 11 July. From that moment, the analyzes were concentrated in the records of the *instant* tower at the ATTO site, where it was observed that intense cloudiness on this site on July 11, which resulted in a reduction in the photochemical activity and a consequent decrease in O₃ concentrations from 15:00 UTC of this day, indicating an indirect interference of the *Friagem* in the chemistry of the atmosphere. Finally, the numerical simulations revealed that the flow related to *Friagem* was restricted to vertical levels of less than 500 m, in addition, the simulations also showed that the *Friagem* brought cleaner air to the region, judging by the fact that the concentrations of NO₂, CO and O₃ were low from the beginning to the end of the incursion of the *Friagem* in this region.

Keywords: *Friagem* in the Amazon; ATTO; Local circulation.

2.1 Introdução

A região amazônica sofre com a incursão de ondas de frio provenientes das altas latitudes do Hemisfério Sul (HS), com ocorrência relativamente comum principalmente no inverno e primavera austral, de junho a setembro. Climatologicamente, cerca de 70% dos casos de Friagem ocorrem durante estas estações. Estes eventos são denominados localmente e na literatura como Friagem (SERRA; RASTIBONA, 1941; FISCH, 1996; MARENGO, 1997; OLIVEIRA et al., 2004).

Diversos estudos foram realizados para compreender a influência da Friagem nas variáveis micrometeorológicas no sul da região Amazônica (PARMENTER, 1976; FISCH, 1995, 1996; SATYAMURTY, 2002; OLIVEIRA, 2004; LONGO, 2004; VIANA; SILVA, 2012). Por outro lado, poucos autores detalharam as implicações deste fenômeno na região central e leste da Amazônia (BRINKMAN; RIBEIRO, 1972; HAMILTON; TARIFA, 1978; FISH, 1996; MARENGO, 1997), ainda assim, esses trabalhos são limitados em regiões urbanas do centro da Amazônia. Brinkman e Ribeiro (1972) observaram que no caso da Amazônia central ocorrem de 2 a 3 eventos de Friagem por ano, preferencialmente no período menos chuvoso, de junho a setembro. Este foi um dos primeiros estudos a explorar as interferências de sistemas frontais (SF) na região mais central da Amazônia.

Mudanças significativas nos parâmetros meteorológicos devido aos efeitos da Friagem podem influenciar a dinâmica de circulações locais, como uma resposta indireta associada a este fenômeno. Silva Dias et al. (2004), observaram o enfraquecimento dos ventos alísios o qual foi associado ao efeito da Friagem no oeste da Amazônia, proporcionando assim o desenvolvimento de circulações locais vigorosas na região de Santarém, estado do Pará. Também nesta região, Fitzjarrald et al. (2008) notaram que em dias de baixa frequência de ventos de Leste, os ventos em superfície, próximos ao rio Tapajós inverteram seu sentido, do normal Leste para Oeste, indicando um domínio das circulações de mesoescala. Da mesma forma, Moura et al. (2004) concluíram que sem a influência do escoamento de grande escala na região do lago da Balbina no estado do Amazonas, foi possível observar com mais clareza a dinâmica de circulações de brisas, influenciando nas concentrações

de O_3 , que segundo estes autores, são maiores quando o escoamento ocorre no sentido do lago para a floresta, ou seja, brisa lacustre.

Na América do Norte, Sun et al. (1998) evidenciaram que quando o vento de grande escala é fraco, as circulações de brisa no lago Candle, Canadá, têm maior eficiência na redistribuição de calor, umidade, dióxido de carbono (CO_2) e ozônio (O_3) na atmosfera. Um importante fator que determina as concentrações de O_3 em determinada região é a variação local no campo de vento (CHENG, 2002). Portanto, o transporte e dispersão desses gases traço são extremamente afetados pelos sistemas de ventos locais, tais como a brisa (MOURA et al., 2004).

Desta forma, a estimativa de possíveis impactos da Friagem nas medidas realizadas nos ecossistemas na Amazônia é essencial. Assim, o objetivo deste estudo é investigar os efeitos da Friagem nas variáveis micrometeorológicas medidas na região de floresta do sítio ATTO (ANDREA et al., 2015), assim como avaliar a influência deste fenômeno na dinâmica das circulações locais e seu papel na dispersão do gás ozônio (O_3). Para alcançar esses objetivos, foram utilizados os dados medidos no sítio ATTO, assim usou-se como ferramenta, o modelo JULES-CCATT-BRAMS (MOREIRA et al., 2013).

2.2 Materiais e métodos

O mês de julho compreende o período de inverno no HS, e representa ainda, o início da estação menos chuvosa da região amazônica (FISCH et al., 1998). Dessa forma, julho representa o mês propício a ocorrência de penetração de SF na Amazônia, que provocam o fenômeno de Friagem nesta região (GARREAUD 2000). Esse fenômeno, além de alterar as condições do microclima local, estabelecem uma oportunidade de melhor compreender a dinâmica das circulações locais, já que causam também o enfraquecimento dos ventos de grande escala predominantes de Leste na região do estudo (SILVA DIAS et al, 2004).

2.2.1 Área de estudo

A área de estudo está a cerca de 140 km em linha reta, a nordeste de Manaus, estado do Amazonas, e envolve a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Uatumã, município de São Sebastião do Uatumã, e o povoado de Balbina, no município de Presidente Figueiredo, onde estão estabelecidos respectivamente o sítio de pesquisa do *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO) ($2^{\circ}08'38''\text{S}/58^{\circ}59'59''\text{W}$) e o lago da represa de Balbina ($1^{\circ}50'38''\text{S}/59^{\circ}31'46''\text{W}$), situado à noroeste do sítio ATTO (Figura1). O sítio ATTO faz parte do Programa da Larga Escala Biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA), e está estruturado em uma densa floresta de terra firme, onde prevalecem os planaltos, com elevação máxima de 138 metros (ANDREAE et al., 2015). O lago artificial de Balbina foi formado pelo represamento do rio Uatumã em 1987, para a exploração do potencial hidrelétrico da região, sendo considerado o maior reservatório hidrelétrico da bacia amazônica, com uma área inundada de aproximadamente 2996 km², tendo em média 10 metros de profundidade (FEARNSIDE 1999).

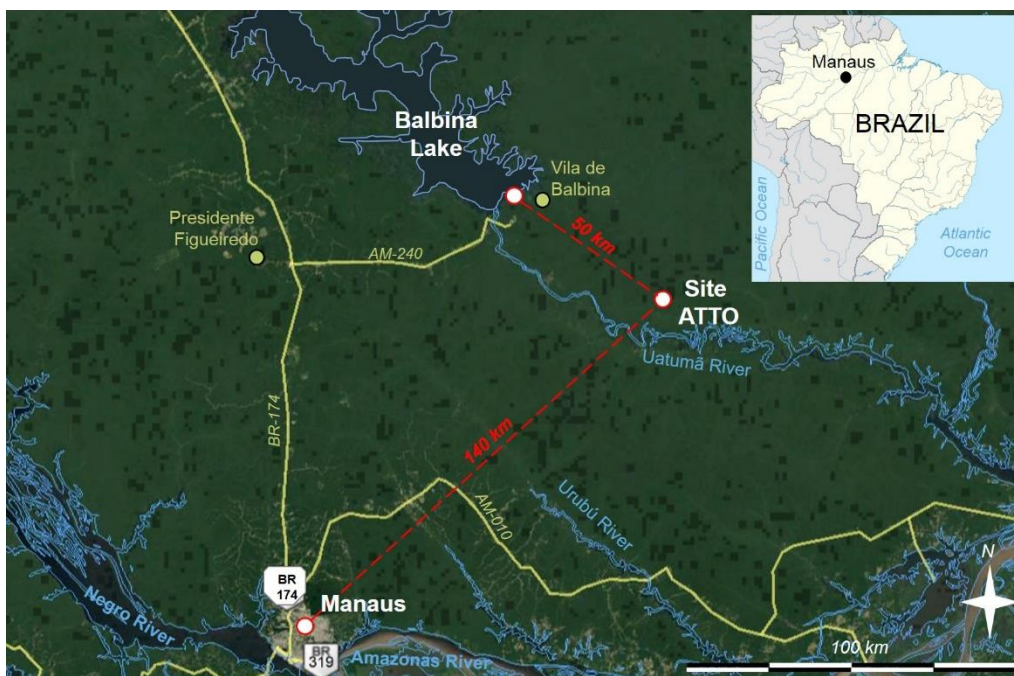


Figura 2.1 – Localização do sítio ATTO e do lago de Balbina. A linha vermelha tracejada indica a distância do sítio ATTO em relação ao lago de Balbina e a cidade de Manaus. As linhas amarelas representam as estradas e as linhas em azul representam a malha dos rios nesta região.

2.2.2 Dados

O conjunto de dados observacionais aqui utilizados foi coletado no sítio ATTO e nos aeroportos internacionais de Manaus (3°02'08"S, 60°02'47"O) e Porto Velho (8°42'50"S, 63°53'54"O), durante o mês de julho de 2014. Das estações meteorológicas dos aeroportos foram utilizados dados de superfície, referentes à temperatura do ar e direção e velocidade do vento, em intervalos de 30 minutos. As cidades de Porto Velho e Manaus foram escolhidas com o propósito de avaliar os impactos do avanço da Friagem em direção a região do sítio ATTO. As curvas diárias das variáveis observacionais da Torre *Instant* foram analisadas de modo a identificar sinais diretos e indiretos da influência deste fenômeno na região do sítio ATTO.

Os dados do sítio ATTO foram adquiridos da instrumentação da torre *Walk-up*, de 81 m, também chamada de torre *Instant*, que serve de base para o monitoramento de importantes gases traços como o biogênico dióxido de carbono (CO₂) e o reativo ozônio (O₃), além das variáveis micrometeorológicas. A torre forneceu informações referentes à temperatura, velocidade e direção do vento, radiação de onda curta incidente e precipitação.

As medidas das concentrações de CO₂ e O₃ foram concebidas de forma direta, respectivamente por um analisador de gás por infravermelho (IRGA), modelo LI-7500A (LI-COR inc., USA) e um analisador de gás por ultravioleta, modelo TEI 49i (Thermo Electron Corp, USA).

A aquisição de dados na torre foi realizada por registradores modelo CR1000 e CR3000 (Campbell Scientific inc., USA), com amostragem a cada minuto para as variáveis meteorológicas e em alta frequência (10Hz) para as concentrações de CO₂ e O₃, posteriormente processadas a cada 30 minutos. A relação das variáveis utilizadas neste estudo e seus respectivos sensores estão apresentados com maiores detalhes na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação das variáveis ambientais utilizadas neste estudo, seus respectivos instrumentos de medição e perfis verticais. Torre *Instant*, sítio ATTO.

VARIÁVEIS	INSTRUMENTOS	PERFIL VERTICAL
Temperatura de ar	Termo-higrômetro (CS215, Rotronic Measurement UK Solutions)	81 m
Direção e velocidade do vento	Anemômetro sônico 2D (Windsonic, Gill Instruments Ltd., UK)	73 m
Radiação de onda curta incidente	Piranômetro (CMP21, Kipp & Zone, Netherlands)	75 m
Precipitação pluviométrica	Pluviômetro (TB4, Hydrological Services Pty. Ltd., Australia)	81 m
Concentração de CO ₂	Analisador de gás por infravermelho (IRGA, LI-7500/LI-7200, LI-COR inc., USA)	81 m
Concentração de O ₃	Analisador de gás por ultravioleta (TEI 49i, Thermo Electron Corp, USA)	79 m

Com o objetivo de avaliar a evolução do sistema frontal na América do Sul, que deu origem ao episódio de Friagem visto na Amazônia foram utilizados dados das reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) ERA-Interim, em intervalos de 6 horas. O modelo ERA-interim e o sistema de reanálises ECMWF apresentam resolução horizontal de um quarto de grau, 60 níveis verticais, representação esférica-harmônica para os campos dinâmicos básicos, e grade gaussiana reduzida com espaçamento aproximadamente uniforme de 79 km para superfície (BERRISFORD et al., 2011).

Além disso, imagens realçadas do canal infravermelho do satélite GOES-13 (CPTEC/INPE, 2014) foram utilizadas, com o propósito de analisar a formação e passagem de sistemas convectivos na área de estudo.

2.2.3 Modelagem numérica

Estudos dos efeitos da distribuição da vegetação, topografia e rios são relevantes sobre as circulações locais, neste sentido é recomendável usar como ferramenta os resultados de simulações numérica de alta resolução, buscando avaliar possíveis efeitos da circulação local sobre a distribuição de gases traço naquela região.

Assim, as simulações numéricas do presente estudo foram realizadas utilizando o modelo de mesoescala BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric*

Modeling System) versão 5.3 (FREITAS et al., 2016). O BRAMS representa uma versão brasileira do RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) (COTTON et al., 2003) adaptado às condições tropicais. Esta versão do BRAMS contém o acoplamento dos modelos JULES (*Joint UK Land Environment Simulator*) (BEST et al., 2011; CLARK et al., 2011) e do CCATT (*Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport*) (FREITAS et al., 2007), tornando o BRAMS um novo sistema numérico de modelagem da atmosfera-biosfera-química totalmente acoplado e denominado de JULES-CCATT-BRAMS (MOREIRA et al., 2013).

O tempo de integração do modelo foi de 72 horas, com início às 00:00 UTC do dia 9 de julho de 2014. Foi utilizada apenas uma grade cuja resolução horizontal foi de 1,5 km, com 185 pontos em x e 140 pontos em y, e 39 pontos em z. A resolução vertical da grade foi variável com o espaçamento vertical inicial de 50 metros, aumentando por um fator de 1.1 até o nível de 1.2 km, e deste ponto em diante este espaçamento foi constante até o topo do modelo. O domínio coberto por esta grade, a distribuição dos principais rios e topografia pode ser observado na Figura 2.

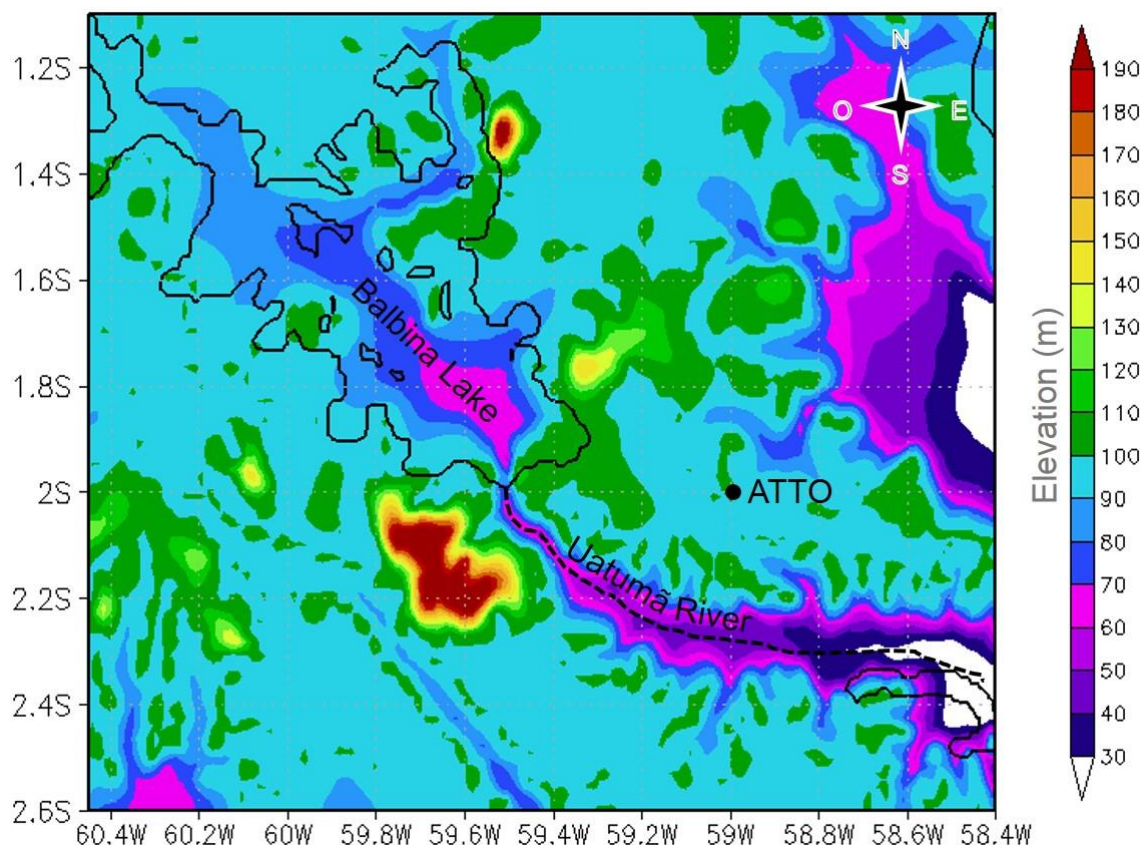


Figura 2.2 – Domínio da grade da simulação do modelo JULES-CCATT-BRAMS mostrando a distribuição da topografia (metro) e localização do lago de Balbina (linha preta), sítio ATTO (ponto preto) e rio Uatumã (linha tracejada).

A inicialização do modelo foi heterogênea, utilizando as reanálises do ECMWF-Era Interim, que foram disponibilizados pelo CPTEC-INPE, a cada 6 horas e estão em uma resolução espacial de um quarto de grau. Foram definidas sete camadas de solo até a profundidade de 12,25 metros e a umidade do solo assumida foi heterogênea, como descrito em Gevaerd e Freitas (2006). Os dados de textura do solo são originalmente obtidos da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (UN FAO) e para o território brasileiro foram adaptados pelo INPE (ROSSATO et al., 2004; 2013).

Nestas simulações, a microfísica de nuvem utiliza a formulação de Greg Thompson de “*single moment in cloud liquid water*” (THOMPSON et al., 2008; THOMPSON e EIDHAMMER, 2014) que consiste no tratamento separado de cinco classes de águas que, posteriormente, são misturadas num tratamento de momento único para cada tipo de nuvem, otimizando assim o tempo computacional. Além disso, inclui a ativação de aerossóis na condensação de núcleos de nuvens (cloud condensation - CCN) e de gelos (ice nuclei - IN),

dessa forma, prevê a concentração do número de gotículas de água nas nuvens, bem como as concentrações de duas novas variáveis de aerossóis uma para CCN e outra para IN. Estas variáveis são agrupadas em dois grupos diferentes de acordo com sua higroscopicidade: os aerossóis higroscópicos chamados de "amigos da água" (water friendly) e os aerossóis não-higroscópicos são os "amigos do gelo" (ice friendly) (FREITAS et al., 2016).

A parametrização da radiação de ondas longas e curtas utilizada foi a de Carma (Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres) (TOON et al., 1989), que soluciona a transferência radiativa usando o método de dois fluxos e inclui os principais absorventes moleculares (vapor d'água, CO, O₃ e O₂), adicionalmente, trata os coeficientes de absorção gasosa usando uma fórmula de soma exponencial (TOON et al., 1989). Os esquemas de radiação do JULES-CCATT-BRAMS estão acoplados *on-line* com os modelos de microfísica de nuvem e aerossol, para fornecer simulações de interações aerossol-nuvem-radiação (FREITAS et al., 2016). As propriedades físicas e ópticas da nuvem no esquema radiativo de Carma foram parametrizados de acordo com Sun e Shine (1994) e Savijarvi et al. (1997; 1998) usando perfis de conteúdo de água líquida e gelo fornecidos pelo modelo de microfísica de nuvem do JULES-CCATT-BRAMS (FREITAS et al., 2016).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Características do ambiente na escala da bacia amazônica

Através das reanálises ECMWF ERA-interim tem-se o comportamento do vento horizontal e da temperatura do ar próximo à superfície, na região norte do Brasil, entre os dias 6 e 11 de julho de 2014, às 12UTC (menos 4 para ter o Horário Local) (Figura 2.3). No dia 6 observa-se que a temperatura foi da ordem de 24°C em três localidades de interesse desse trabalho, sendo elas: Porto Velho (P); Manaus (M) e sítio ATTO (A) (Figura 2.3a). Além disso, nota-se que o vento dominante foi de Leste em praticamente toda a região amazônica.

Vale salientar que essas temperaturas e a direção do vento observados no dia 6 de julho representam o padrão normalmente encontrado nesta região (FISH et al., 1996). Porém, no dia 7 de julho é possível observar que o vento

dominante passa a ser de Sul e Sudeste na região de Porto Velho, assim como evidencia-se a presença de uma massa de ar com temperatura mais baixa (em torno de 18°C) se aproximando desta cidade (Figura 2.3b).

No decorrer dos dias, entre 8 e 9 de julho, a massa de ar frio avançou ainda mais na direção de Porto Velho, assim como o vento dominante passou a ser de Sul em toda região oeste do estado do Amazonas, bem como nas regiões de Manaus e no sitio ATTO (Figuras 2.3 c-d). Para este período, o boletim técnico do CPTEC relatou a penetração de uma massa de ar polar na região subtropical e tropical do Brasil que avançou no sentido Sudeste/Noroeste do Brasil, dando origem as ondas de frio de Sul, que por sua vez provocaram o fenômeno de Friagem na Amazônia (CPTEC/INPE, 2014).

Com a aproximação da Friagem no dia 9 de julho na região de Manaus e no sitio ATTO observa-se que a razão de mistura decaiu de 17 para 14 g/kg (Figura 2.4). Além disso, entre os dias 9 e 11 de julho, toda a faixa abaixo do 6°S apresentou valores de umidade abaixo do observado na região imediatamente acima dessa latitude, situação comum em episódios de Friagem (VIANA; SILVA, 2012).

Dessa forma, durante o período considerado neste estudo, evidencia-se a chegada do fenômeno de Friagem na região Sudoeste e Central da Amazônia que produziram quedas bruscas na temperatura e umidade do ar e mudança na direção do vento como observado anteriormente em Fisch (1996), Marengo (1997), Oliveira et al., (2004) e Viana e Mendonça da Silva (2012).

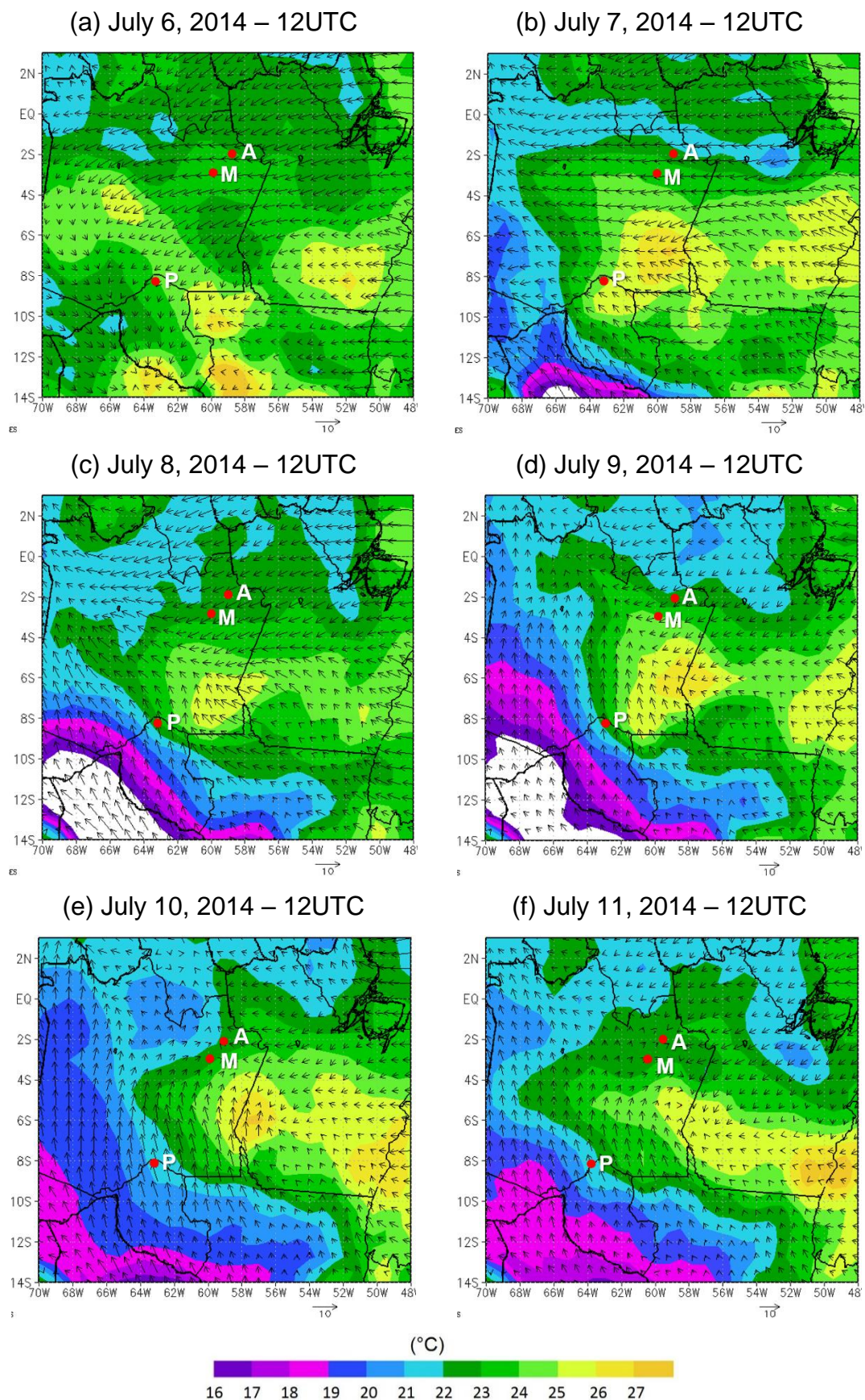


Figura 2.3 – Distribuição da temperatura do ar (°C, sombreado) e vento (m/s, vetor) na superfície, nas localidades de Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A), às 12:00 UTC entre os dias 6 e 11 de julho de 2014 obtidos com as reanálises ERA-interim.

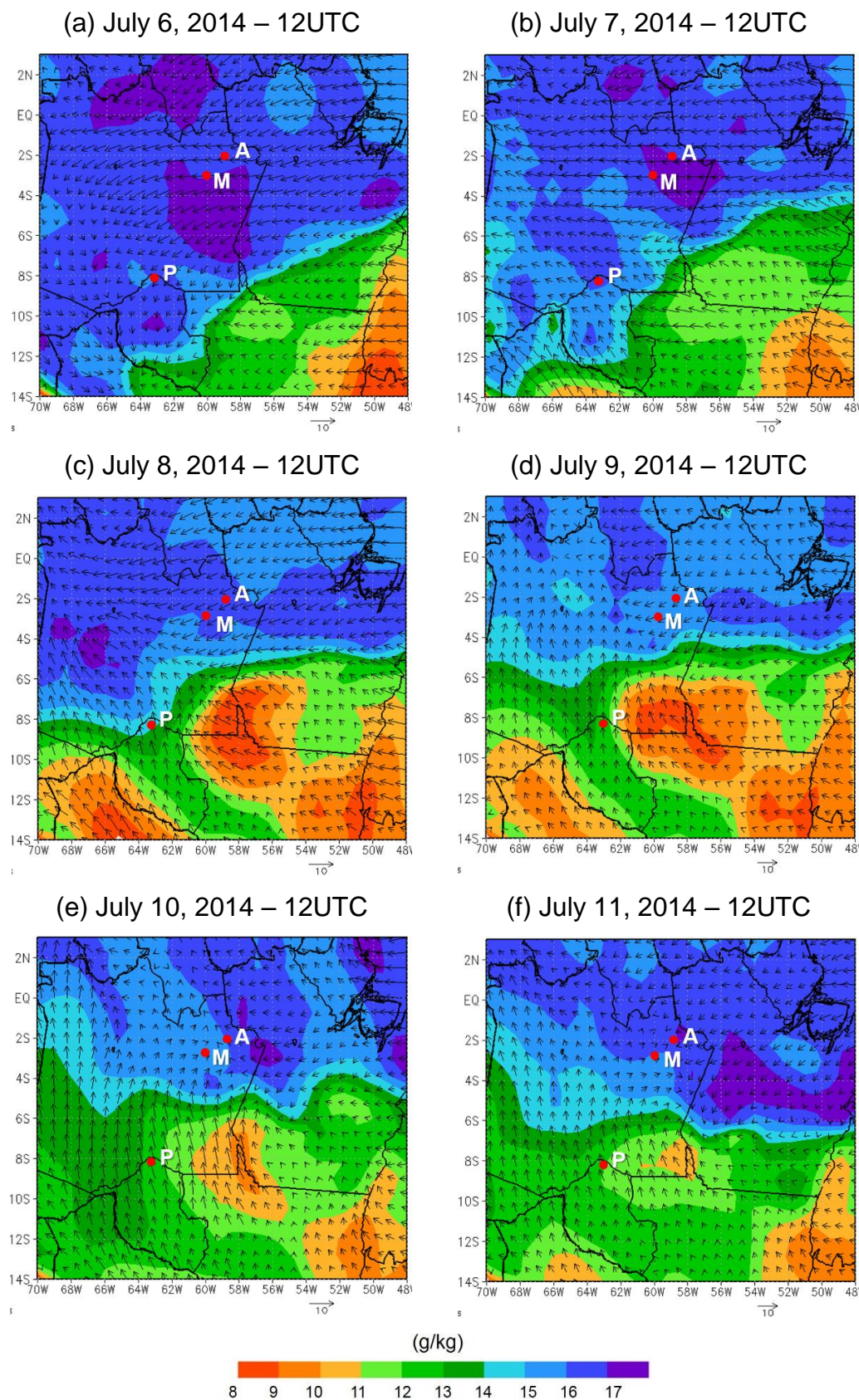


Figura 2.4 – Distribuição da razão de mistura (g/kg, sombreado) e vento (m/s, vetor) na superfície, em Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A), às 12 UTC entre os dias 6 e 11 de julho de 2014 obtidos com as reanálises ERA-interim.

O comportamento do vento sobre a bacia amazônica, antes da chegada da Friagem e quando a mesma estava na região central da Amazônia está representado na Figura 2.5. Interessante notar que no momento em que a Friagem se encontrava na região de Manaus e do sítio ATTO, ocorreu convergência do vento de Leste com o escoamento de Oeste associado à Friagem (Figura 2.5b). O escoamento de Leste transporta umidade da costa atlântica até esta região central da Amazônia (VERA et al., 2006) enquanto que o escoamento de Sul, associado ao evento de Friagem, transporta massas de ar seco e frio das altas latitudes até esta região.

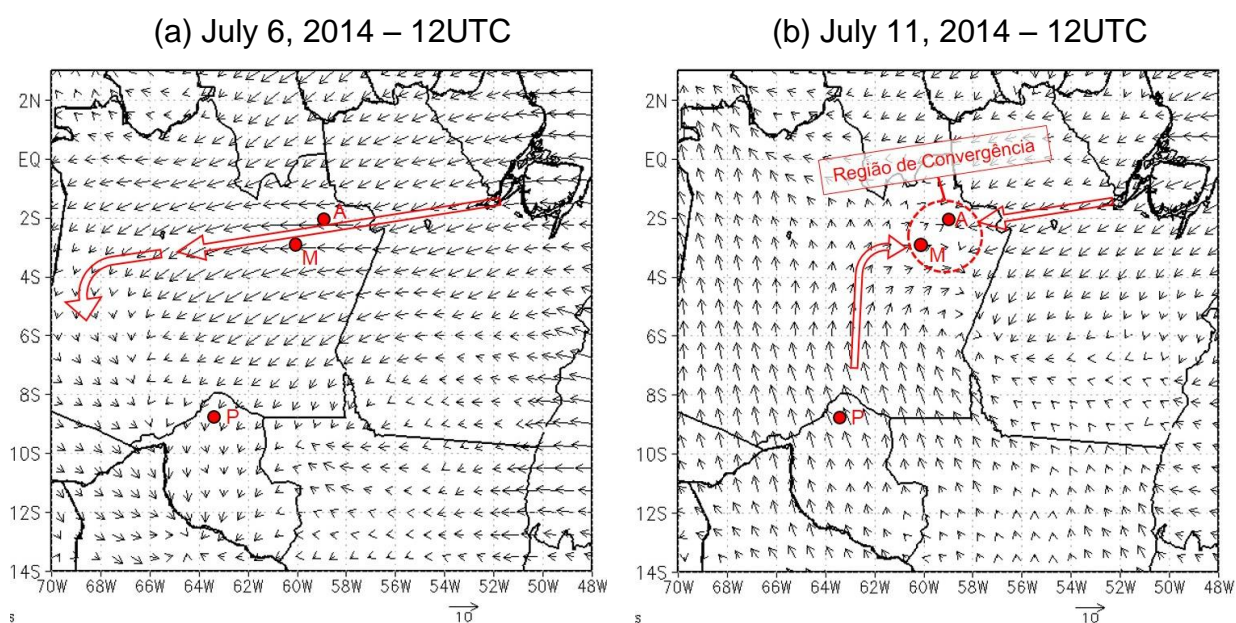


Figura 2.5 – Comportamento do vento à superfície (m/s, vetores) nos dias 6 (a) e 11 (b) de julho de 2014 às 12 UTC obtidos com as reanálises ERA-interim, destacando Porto Velho (P), Manaus (M) e sítio ATTO (A). Setas vermelhas indicam o escoamento predominante do vento e o círculo tracejado destaca a região de convergência dos ventos na região de Manaus e ATTO.

A Figura 2.6 apresenta uma sequência de imagens do satélite GOES 13, no canal infravermelho, quando a Friagem esteve atuante na região central da Amazônia. Durante a madrugada observa-se convecção na região de confluência entre os rios Amazonas e Tapajós (Figura 2.6a), que se propaga na direção Oeste, chegando na região do sítio ATTO às 13 UTC (Figura 2.6c). Visto que este sistema convectivo não está associado às linhas de instabilidade que se formam junto a costa (COHEN et al., 1995; ALCÂNTARA et al, 2011) é

possível afirmar que esta convecção tenha sua formação associada ao encontro dessas duas massas de ar com propriedades distintas (Figura 2.5).

July 11, 2014

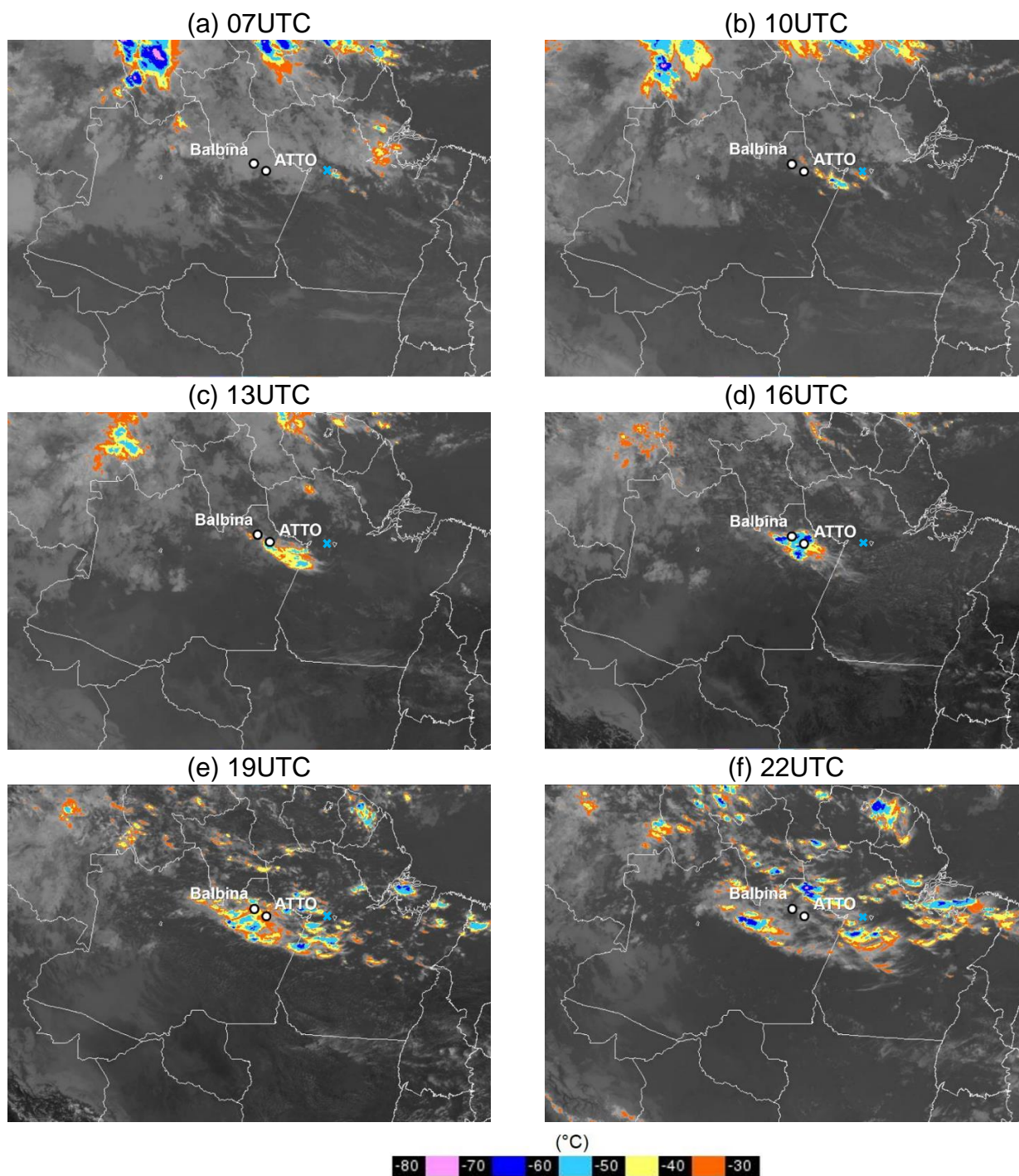


Figura 2.6 – Imagens realçadas do satélite GOES 13, no canal infravermelho no dia 11 de julho de 2014. Incluindo os locais aproximados do sitio ATTO e lago de Balbina (círculos brancos) e a região de confluência do Rio Amazonas e Rio Tapajós (X em azul).

Destaca-se também, que durante a propagação desta convecção no dia 11 de julho, a mesma se intensificou e causou o maior índice pluviométrico registrado no sítio ATTO durante o mês de julho de 2014, com chuva recorde de 21mm no dia 11 (Figura 2.7).

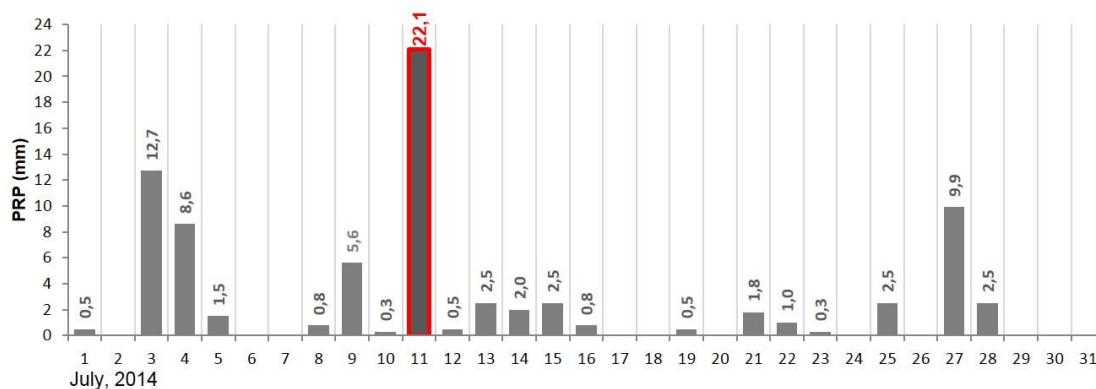


Figura 2.7 – Chuva (PRP) acumulada por dia (mm/dia) durante o mês de julho de 2014, medida no sítio ATTO. Em destaque o dia mais chuvoso do mês (11 de julho).

2.3.2 Aspectos observados nas regiões oeste e central da Amazônia

O comportamento da temperatura do ar, próximo à superfície, em Porto Velho e Manaus, e acima do dossel da floresta no sítio ATTO, entre os dias 6 e 11 de julho de 2014, juntamente com a média horária da temperatura do ar para o mês de julho podem ser visualizados na Figura 2.8. É possível notar que entre os dias 6 a 8 de julho de 2014 o ciclo diário da temperatura do ar apresentou um comportamento muito próximo da curva média diária para este mês. Contudo, a partir do dia 8 houve quedas significativas nos valores da temperatura nos três sítios investigados, em decorrência da chegada do fenômeno da Friagem nestas localidades.

Em Porto Velho, a temperatura do ar caiu de 34°C para 19°C entre os dias 7 a 10 de julho, enquanto que em Manaus e no sítio ATTO a queda foi da ordem de 10° C e 7° C, respectivamente, entre os dias 9 a 11 de julho. Desse resultado, constata-se que a diminuição da temperatura em Manaus e no sítio ATTO (entre 10 e 11 de junho) ocorreram em torno de 1 dia depois da diminuição da temperatura observada em Porto Velho (entre 8 e 9 de junho).

Chama atenção também, o fato de que em Porto Velho, tanto os valores máximos quanto os mínimos de temperatura do ar sofreram reduções

substanciais durante a presença da Friagem. Já em Manaus e no sítio ATTO foram observadas diminuições apenas nos valores máximos de temperatura, durante a Friagem. Comportamento similar foi observado por Marengo et al. (1997) para as regiões Sudoeste e Central da Amazônia durante um episódio de Friagem. Portanto, nota-se que devido a ocorrência da Friagem, as localidades mais ao sul da Amazônia apresentam reduções mais intensas nos valores da temperatura, em comparação as regiões localizadas mais ao centro da Amazônia. De acordo com Viana e Mendonça da Silva (2012), as regiões mais ao sul da Amazônia podem apresentar quedas de temperatura da ordem de 10°C, ou seja, valores muito baixos quando comparados com às médias diárias.

Finalmente, é preciso lembrar que o sítio ATTO localiza-se em uma região de floresta, distante 50 km do lago da represa de Balbina e à 140 km de Manaus, onde esta estação meteorológica encontra-se sob a influência de urbanização (SOUZA e AVALÁ, 2012) e da proximidade de grandes rios. Dessa forma, especula-se que tanto o sítio ATTO como Manaus estão sob a influência de brisa de lago (MOURA, 2004) e rios (DOS SANTOS et al., 2014), respectivamente.

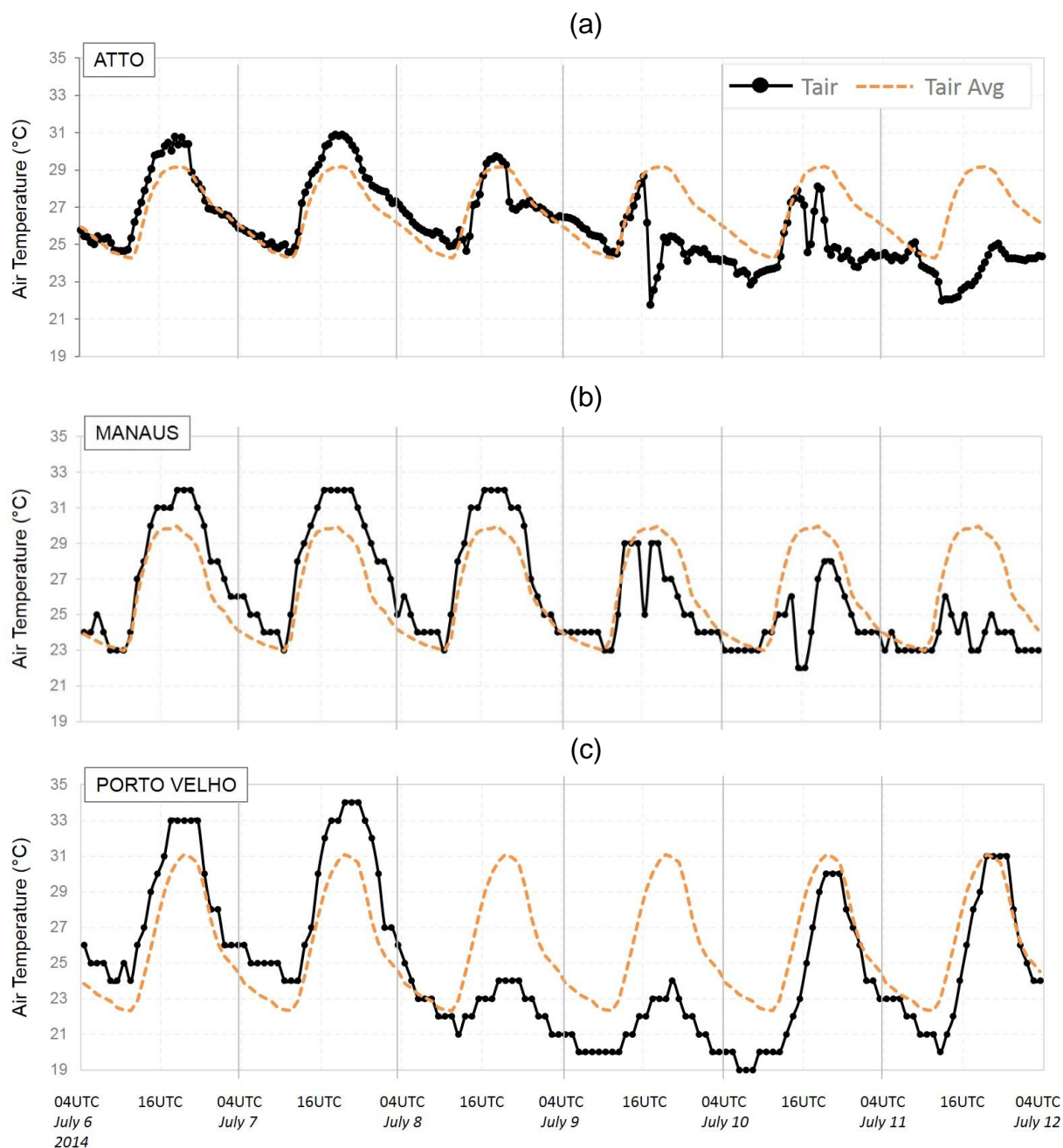


Figura 2.8 – Comportamento diário e média mensal da temperatura do ar no período de 6 à 11 de julho de 2014, em Porto velho, Manaus e sítio ATTO.

2.3.3 Circulação local

Além das mudanças observadas no ciclo diário da temperatura do ar no sítio ATTO, notou-se também alterações na direção do vento durante o período da Friagem (Figura 2.9). Antes da chegada desse fenômeno, entre os dias 6 e 8 de julho, observa-se que a direção do vento horizontal foi predominantemente

de Sudeste e Nordeste. Por outro lado, no dia 9 de julho a direção do vento foi bem distribuída entre os quatro pontos cardeais, e nos dias 10 e 11 de julho o escoamento do vento teve maiores frequências de Oeste, de Norte e de Sudoeste, quando a Friagem chegou ao sitio ATTO. Estes resultados mostram-se contrários aqueles apresentados por Andreae et al. (2015), que através de rosa dos ventos tanto para o período chuvoso como menos chuvoso no sitio ATTO, não encontraram variações significativas da direção do vento ao longo do dia. Desta forma, estes autores não observaram efeitos de circulações locais devido à proximidade deste sitio ao rio Uatumã (12 km) e lago Balbina (50 km) que pudessem ser levados em consideração.

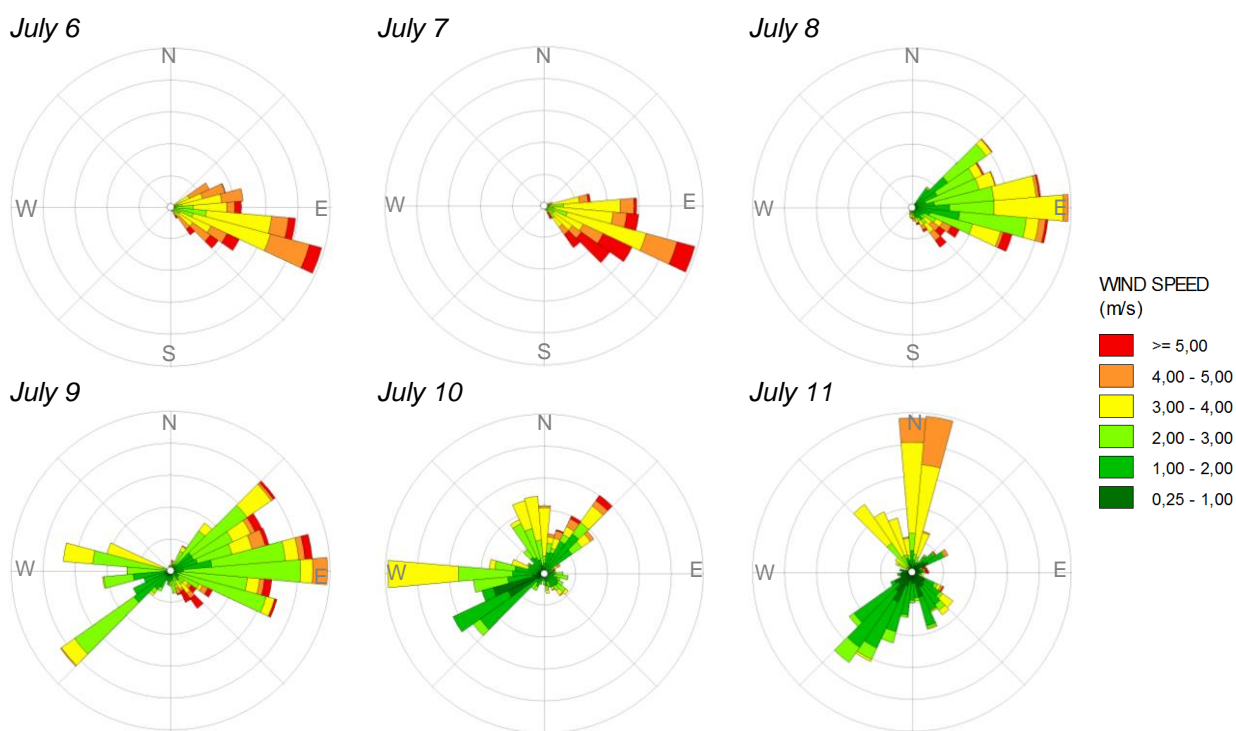


Figura 2.9 – Velocidade e direção do vento horizontal no nível de 73 metros medidos no sitio ATTO entre os dias 6 e 11 de julho de 2014.

Entretanto, Silva Dias et al. (2004) mostraram que durante a chegada de uma massa de ar fria na região oeste da Amazônia, a pressão atmosférica ao nível do mar aumenta nesta região, resultando numa força do gradiente de pressão apontando no sentido contrário aos ventos Alísios, o que seria

coerente com uma desaceleração dos ventos de Leste. Dessa forma, estes autores puderam observar a ocorrência de circulações de brisa de rio na região de Santarém durante um evento de Friagem no oeste da Amazônia. Seguindo esta hipótese, analisou-se o comportamento do vento no sitio ATTO a cada duas horas, durante o período que a Friagem esteve ativa nesta região (Figura 2.10).

No dia 9 observa-se que a direção do vento foi essencialmente de Leste até o final da manhã (14 e 16 UTC), quando o vento assumiu a direção de Sudeste e Sudoeste até o final da tarde e início da noite (22 e 00 UTC), o que corresponde ao escoamento associado à chegada da Friagem nesta região. A partir das 00 UTC do dia 10 de julho até as 14 UTC observa-se que o vento predominante foi de Oeste, indicando um desvio do escoamento básico, que normalmente seria de Leste. No início da tarde (16 UTC), o vento assumiu a direção de Norte até o início da manhã (12 UTC) do dia 11 de julho. Este desvio do vento também poderia ser uma indicação de circulação local na região do sitio ATTO durante a madrugada, entretanto a direção de Oeste e de Norte observadas nestes dias não correspondem ao esperado escoamento da brisa de floresta o qual deveria ser na direção do lago de Balbina como documentado por Moura et al. (2004), através de dados coletados no mês de julho de 2001 nas margens do lago de Balbina. Sendo assim, o vento observado na região do sitio ATTO, corresponde ao escoamento vindo da região sudoeste da Amazônia como mostrado na Figura 2.5b. Acredita-se que este escoamento associado ao fenômeno da Friagem tenha se sobreposto aquele de circulação de brisa observado por Moura et al. (2004) ou que esta circulação de brisa não alcançou a região do sitio ATTO. Este aspecto será discutido na próxima sessão onde serão analisados os resultados da simulação com modelo JULES-CCATT-BRAMS.

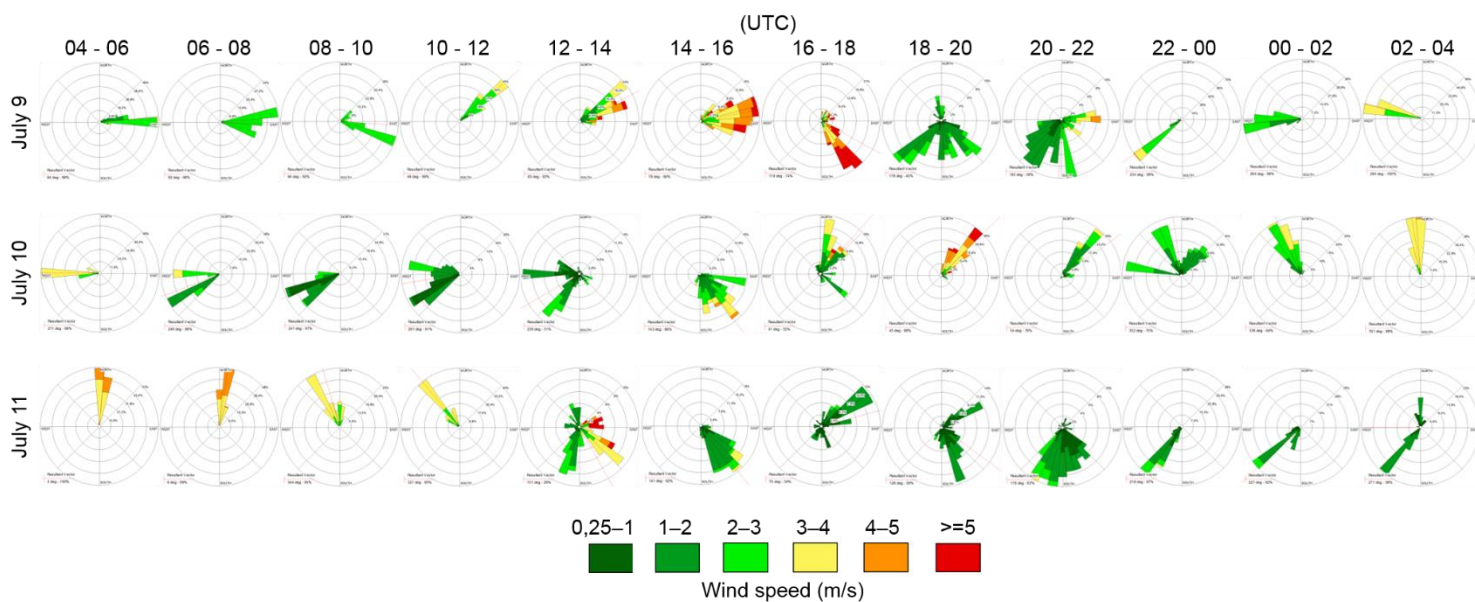


Figura 2.10 – Velocidade e direção do vento no nível de 73 metros medidos no sitio ATTO, em intervalos de 2 horas, entre os dias 9 e 11 de julho de 2014.

Dado que este episódio de Friagem exerceu importantes variações no ambiente na região central da Amazônia, a Figura 2.11 apresenta o comportamento radiação de onda curta incidente (SWin), concentrações de Ozônio (O_3) e Dióxido de Carbono (CO_2) medidas no sitio ATTO, entre os dias de 6 e 11 de julho de 2014.

A radiação de onda curta incidente durante este período mostra claramente sua redução durante a manhã do dia 11 de julho quando chegou a Friagem nesta região do sitio ATTO. O máximo da radiação de onda curta incidente neste dia 11 de julho ocorreu aproximadamente às 19 UTC, com valor de aproximadamente 450 W/m^2 , sendo que a máxima média mensal da radiação normalmente ocorre às 16 UTC com valor da ordem de 800 W/m^2 (Figura 2.11a).

Antes da chegada da Friagem na região do sitio ATTO, entre os dias 6 e 8 de julho, observa-se que as concentrações de O_3 estiveram próximos da média mensal, com valores mínimos ocorrendo em torno das 10 UTC e máximos em torno das 18 UTC (Figura 2.11b), estando este resultado coerente com os observados em outros estudos na Amazônia (BETTS et al., 2002; GERKEN et al., 2016; DIAS JUNIOR et al., 2017; MELO et al., 2018). No entanto, quando ocorre a entrada da Friagem nesta região, entre os dias 9 e 11

de julho observou-se uma queda acentuada da concentração de O_3 nos horários onde esperava-se as maiores concentrações deste gás (16 UTC), quando também foi observado uma redução na radiação de onda curta incidente, devido a presença de sistemas convectivos nesta região, especialmente no dia 11 (Figura 2.6). A nebulosidade é um fator meteorológico determinante no ciclo diário de O_3 . Baixas concentrações de O_3 resultam da fotoquímica reduzida associada a grandes quantidades de cobertura de nuvens e precipitação que limitam a irradiância actínica atingindo a superfície próxima (GU et al., 2002).

O comportamento das concentrações de CO_2 durante este período (Figura 2.11c) mostrou-se semelhante as médias mensais entre os dias 6 e 10 de julho, com fração molar máxima em torno de 420 ppm aproximadamente às 10 UTC e mínimas inferiores a 390 ppm (ARAÚJO et al., 2010). Entretanto, no dia 11 de julho observou-se um aumento significativo do CO_2 em relação à média mensal que alcançou 470 ppm às 14 UTC, apontando uma relação direta com a atenuação da radiação incidente devido ao aumento da nebulosidade que reduziu a eficiência da floresta em absorver o gás CO_2 via fotossíntese, uma vez que, a temperatura e luminosidade são fatores limitantes desse processo (KLUGE, 2014). A combinação da queda de temperatura e diminuição da radiação solar na superfície fez com que as concentrações deste gás sofressem um aumento incomum e expressivo no dia 11 de julho em torno das 16UTC.

Diante desses resultados encontrados principalmente no dia 11 de julho, pôde-se constatar que a entrada da Friagem influencia a química da atmosfera nesta região.

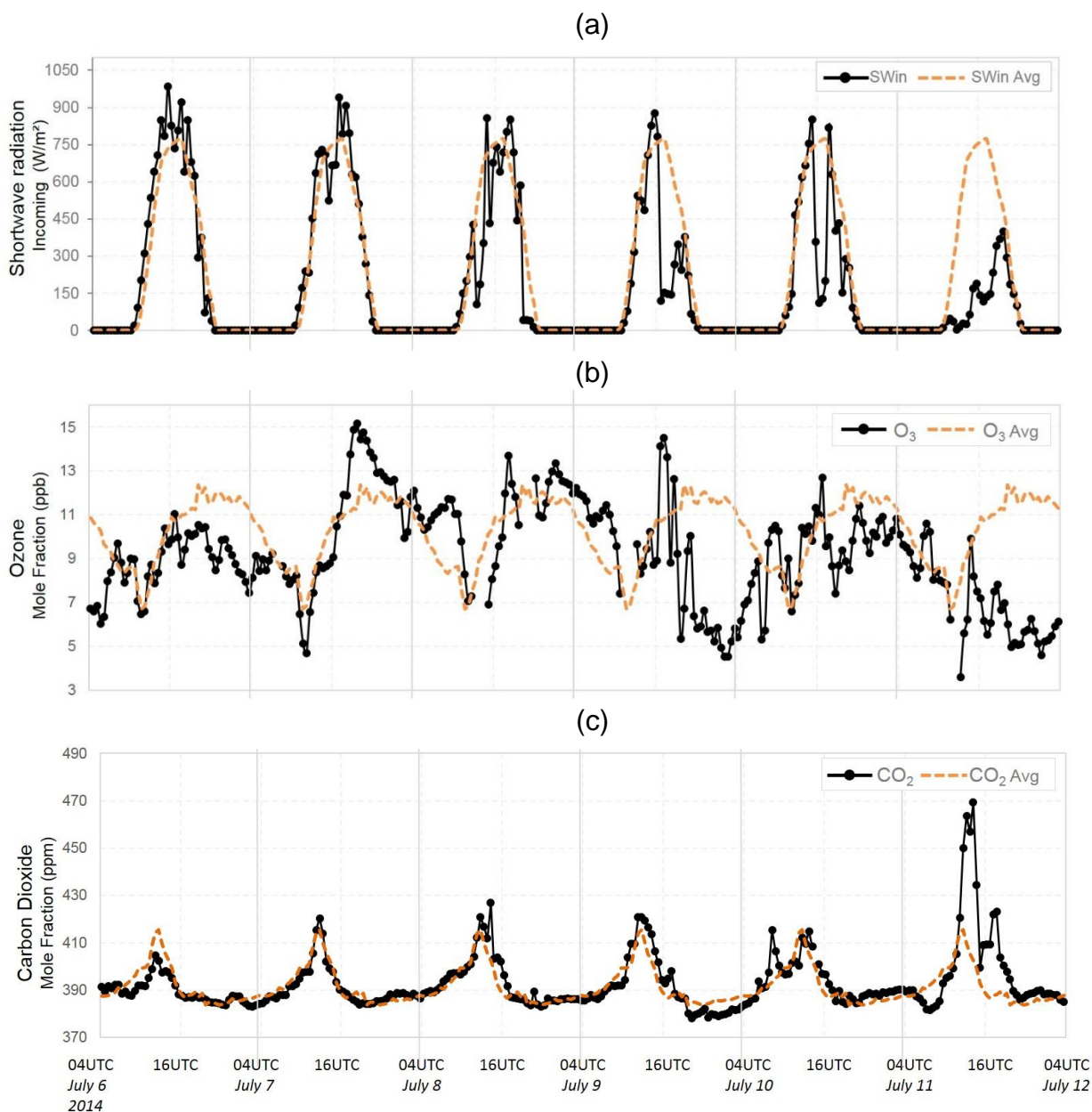


Figura 2.11 – Comportamento diário e média mensal para: (a) radiação de onda curta incidente (W/m^2); (b) concentração de O_3 (ppb) e (c) concentração de CO_2 (ppm) no período de 6 à 11 de julho de 2014 no sítio ATTO.

2.3.4 Simulação numérica da circulação local e seu efeito no sítio ATTO

Os resultados apresentados acima indicaram a possibilidade de existência de circulações locais durante um evento de Friagem assim como foi observado sua influência na química da atmosfera na região do sítio ATTO. Portanto, no sentido de entender melhor esta circulação local e seu papel nas medidas feitas neste sítio, esta sessão apresenta os resultados de uma simulação numérica feita com modelo acoplado JULES-CCATT-BRAMS.

A Figura 2.12 apresenta o perfil vertical do vento horizontal em um ponto de grade próximo ao sitio ATTO, desde as 00 UTC do dia 9 de julho até a noite do dia 11 de julho de 2014. Em baixos níveis (próximo de 80 metros), observa-se o vento de Leste até às primeiras horas do dia 10 de julho, logo após este período, o vento passou a ter uma direção predominante de Oeste-Noroeste até a tarde do dia 11 de julho, predominado em seguida na direção Sul.

Portanto, observa-se que esta simulação capturou de forma semelhante o comportamento do vento horizontal medido na altura de 73 m no sitio ATTO (Figura 2.10). Outro aspecto bem interessante que pode ser extraído do resultado desta simulação é que acima de 500 metros o escoamento é essencialmente de Leste durante todo o período de integração do modelo, demonstrando que a entrada da Friagem ou a circulação local são fenômenos com pequena profundidade.

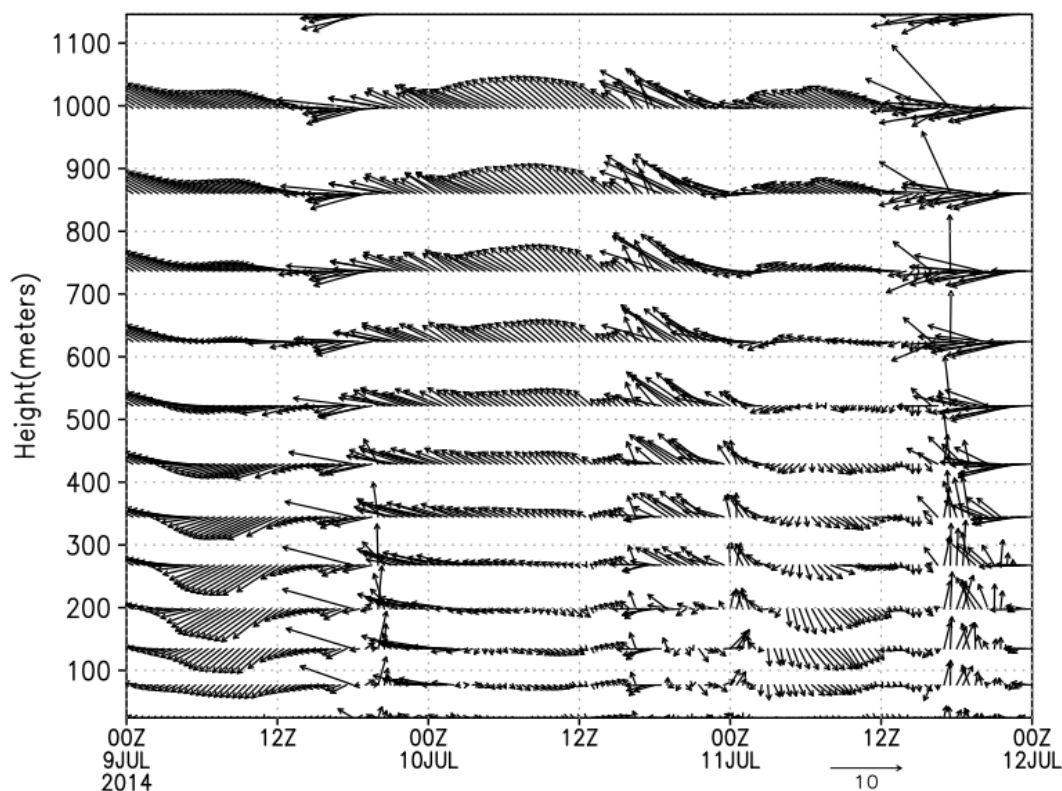


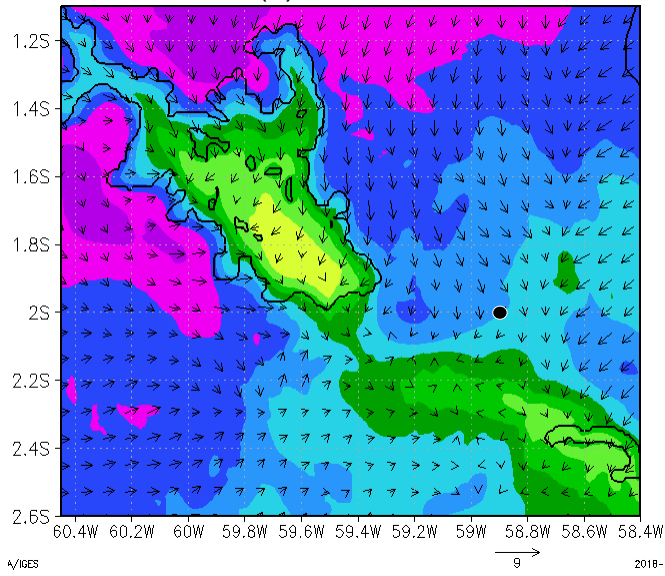
Figura 2.12 – Perfil vertical do vento horizontal (m/s) no sitio ATTO desde 00UTC do dia 9 até as 00UTC do dia 12 de julho de 2014.

No sentido de avaliar o desenvolvimento da circulação de brisa e a entrada da Friagem na área de interesse, a Figura 2.13 apresenta a evolução da temperatura no nível 24,4 metros ($^{\circ}\text{C}$, sombreado) e do vento horizontal (m/s, vetor) no nível de 134,5 metros desde a 03 até 17 UTC do dia 11 de julho.

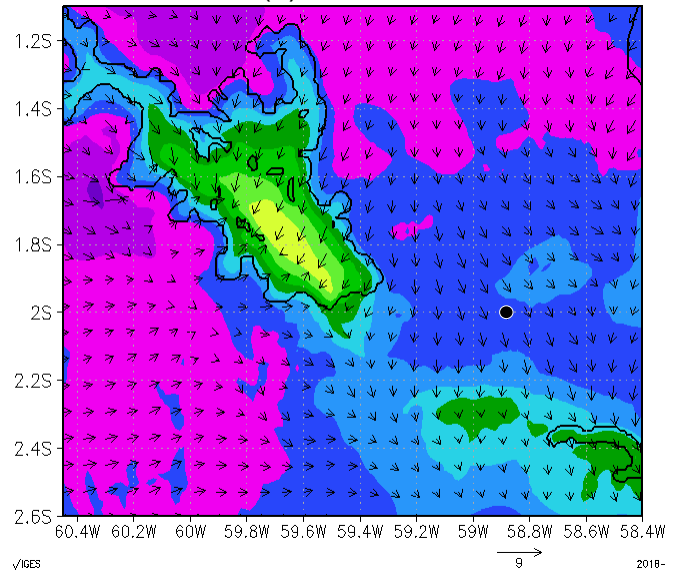
Desde às 2 até 11 UTC nota-se que a temperatura do ar é maior sobre o lago de Balbina em comparação aquela encontrada na área de floresta. Este gradiente de temperatura induz a formação de brisa de floresta, com o vento convergindo em direção ao centro do lago (Figura 2.13 a-e). As 13 UTC o gradiente de temperatura inverte sua direção e inicia a formação da brisa do lago em direção a floresta, que às 15 UTC apresenta-se de forma mais bem definida ao longo das margens sudeste do lago de Balbina (Figura 2.13g).

July 11, 2014

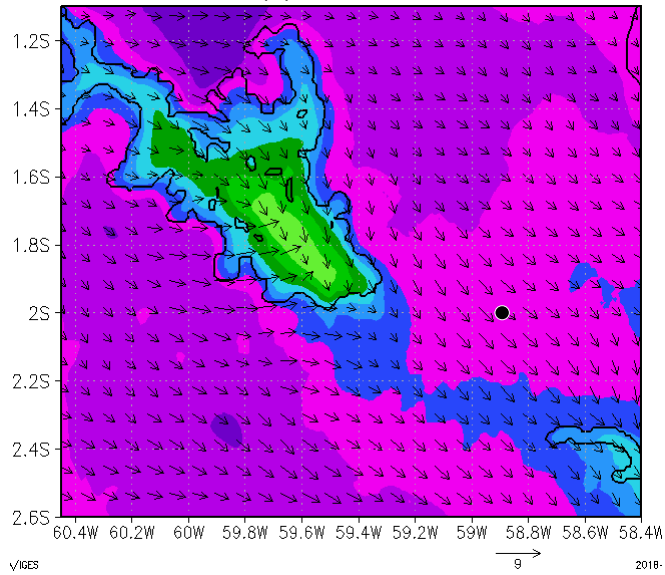
(a) 03 UTC



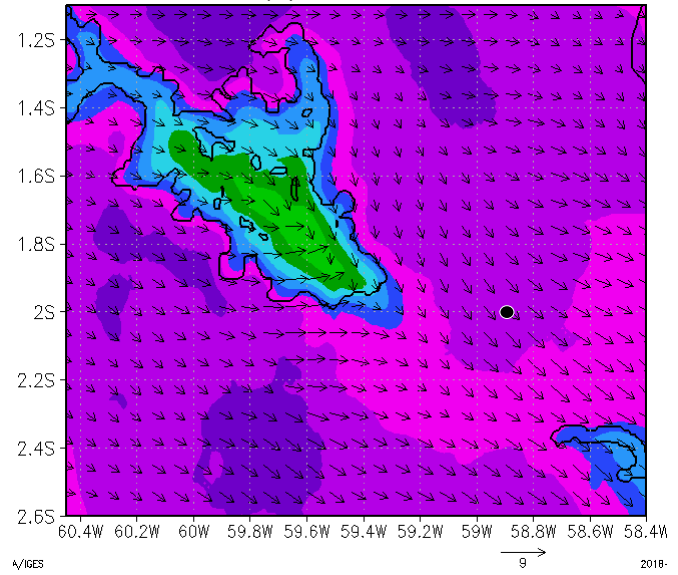
(b) 05 UTC



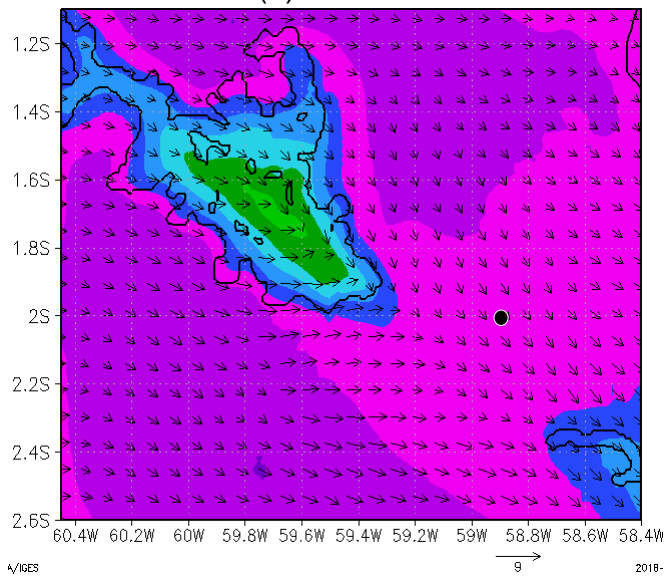
(c) 07 UTC



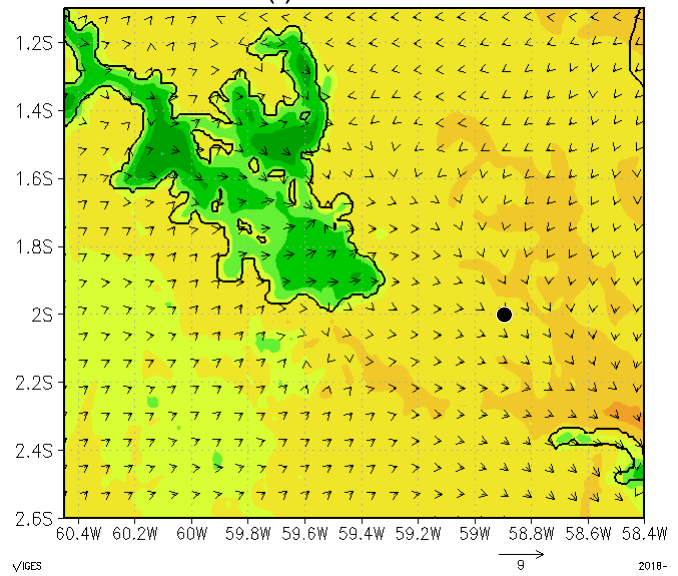
(d) 09 UTC



(e) 11 UTC



(f) 13 UTC



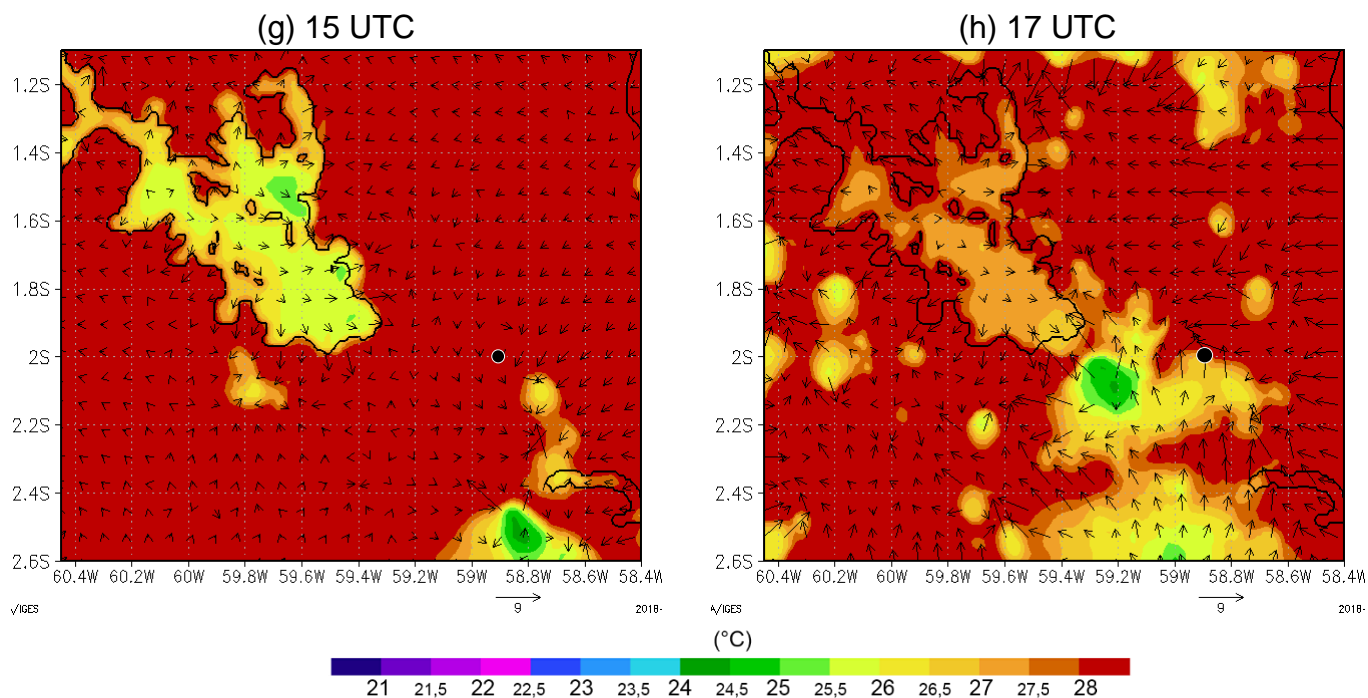


Figura 2.13 - Evolução da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, sombreado) no nível de 24,4m e vento horizontal (m/s, vetor) no nível de 134,5 m desde 02 à 17UTC, do dia 11 de julho de 2014. O lago de Balbina (contorno preto) e o sítio ATTO (ponto preto) estão indicados.

Outro aspecto interessante é a entrada de ar mais frio através do quadrante Noroeste desde às 03 UTC, a qual vem sendo transportado na direção Sudeste. Interessante notar que este ar frio ao ser advectado neste domínio ele contorna o lago de Balbina até as 11 UTC, quando a área continental fica sob o domínio de um ar mais frio associado ao fenômeno de Friagem. Outro ponto relevante pode ser visto às 9 UTC quando se estabelece um corredor de ar relativamente mais quente desde o lago de Balbina até o quadrante Sudeste do domínio, estando este corredor de ar mais quente numa área onde tem-se o rio Uatumã cuja largura é inferior a 1 km e não pode ser capturado na resolução horizontal assumida nesta simulação.

A queda gradual da temperatura e a predominância de ventos de Noroeste mostrados nesta simulação, nos pontos de grade próximos ao sítio ATTO concordam com os dados observacionais deste sítio (Figuras 2.8 e 2.10).

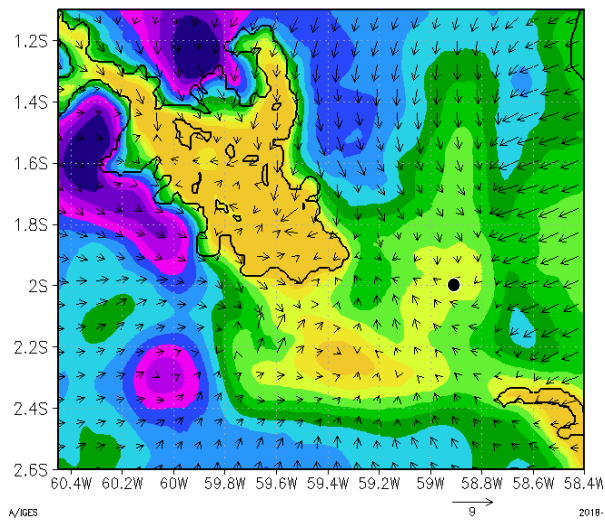
Embora a brisa do lago de Balbina tenha se estabelecido, a mesma não atingiu o sítio ATTO até o horário das 15 UTC (Figura 2.13g). Além disso, nos

horários seguintes ocorreu precipitação na simulação como observado nas imagens de satélite (Figura 2.6), que por sua vez perturba o ambiente propício às brisas vigorosas que pudessem alcançar o sítio ATTO. Embora a presença de Friagem possa promover o enfraquecimento dos ventos Alísios, que por sua vez permitiria o estabelecimento de brisas como observado na região de Santarém por Silva Dias et al. (2004), na região do ATTO a massa de ar mais frio e seco da Friagem chegou neste sítio e foi dominante sobre a circulação de brisa do lago e da floresta. Possivelmente, na região de Santarém essa massa de ar da Friagem, não chega efetivamente até aquela região, mas promove o enfraquecimento dos Alísios, permitindo que brisas de rio se estabeleçam naquela região (SILVA DIAS et al., 2004; LU et al., 2005, FITZJARRALD et al., 2008; COHEN et al., 2014).

A Figura 2.14 apresenta o comportamento do vapor d' água, O_3 , CO e NO_2 no dia 11 de julho de 2014, no momento em que a Friagem se aproximou da área de estudo (a, b, c, d) e quando esteve enfraquecendo (a'', b'', c'', d''). Observa-se que a razão de mistura de vapor d'água próximo a superfície, às 02 UTC (a) foi menor no local onde também foi observado ar mais frio entrando neste domínio, indicando que a Friagem trouxe ar frio e seco para o sítio ATTO e lago da Balbina. Além disso, nota-se que tanto no início (a) quanto no momento de dissipação da Friagem (a''), o lago da Balbina mostrou-se uma grande fonte de umidade, que foi transportada pelos ventos de Noroeste em direção ao sítio ATTO.

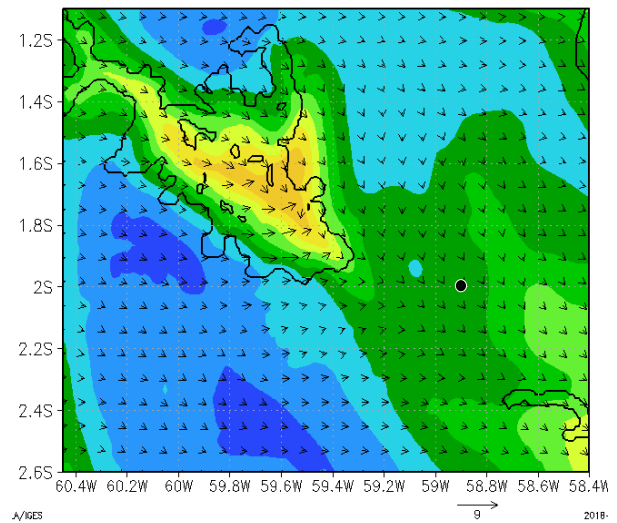
July 11, 2014 - 02UTC

(a) Razão de mistura do vapor d'água

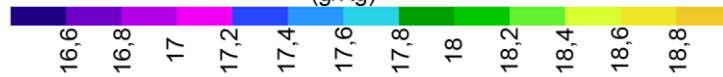
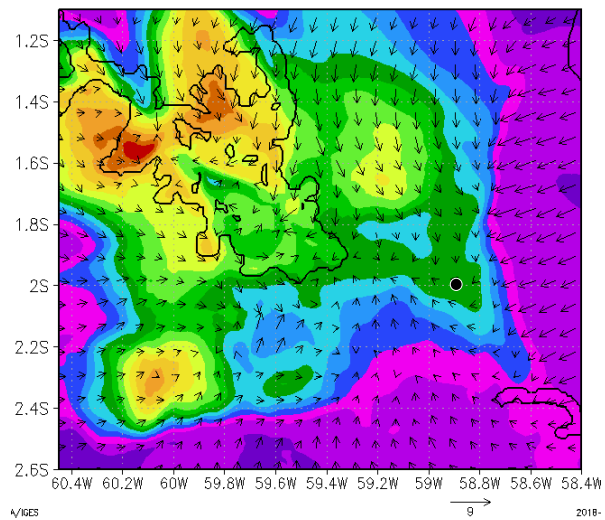
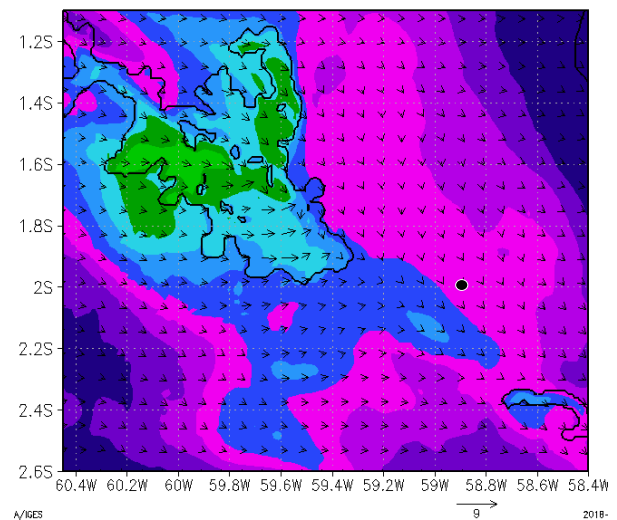


July 11, 2014 - 12UTC

(a'') Razão de mistura do vapor d'água



(g/Kg)

(b) Concentração de O₃ – 02UTC(b'') Concentração de O₃ – 12UTC

(ppbv)



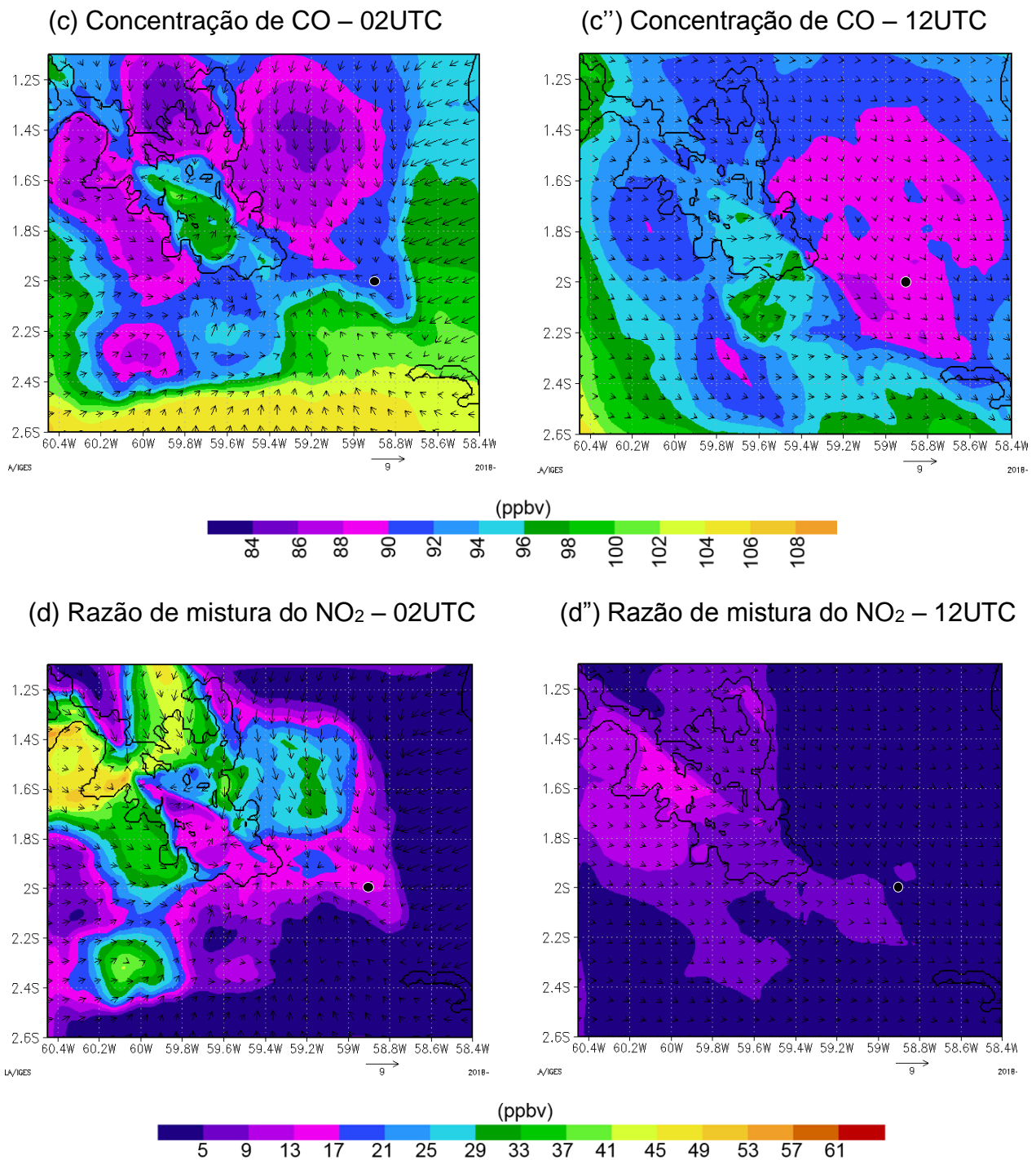


Figura 2.14 – Comportamento do vento no nível de 134,5m no dia 11 de julho de 2014 para: (a, a'') razão de mistura do vapor d'água (g/kg, sombreado); (b, b'') concentração do Ozônio (ppbv, sombreado); (c, c'') concentração de monóxido de carbono (ppbv, sombreado) e (d, d'') Dióxido de nitrogênio (ppbv, sombreado) no nível de 24,4 m, quando a Friagem estava chegando à área de estudo (a, b, c, d) e no momento de sua dissipação (a'', b'', c'', d''). O lago de Balbina (contorno preto) e o sítio ATTO (ponto preto) estão indicados.

Na Figura 2.14 observa-se também que o gás O_3 apresenta maiores concentrações sobre o lago e seu entorno, em ambos os horários mostrados (b e b''). Vale destacar também, que as concentrações de O_3 nos limites do domínio da simulação são sempre menores, da ordem de aproximadamente 8 ppbv, enquanto que sobre o lago, essas concentrações ultrapassam os 20 ppbv em certos pontos, especialmente às 02 UTC. Pode-se ver também, que a circulação de brisa transportou altas concentrações de O_3 em direção ao sítio ATTO, que foi observado principalmente no início da incursão da Friagem nesta região.

A formação de O_3 sobre o lago da Balbina e sua dispersão via circulação de brisa já foi evidenciada antes (MOURA et al., 2004), assim como o aumento de gases traços na região de Balbina já foi relacionada a incursão de massa de ar polar nesta região (ARTAXO et al., 2005).

Com relação ao gás CO nota-se que sua concentração sobre o centro do lago às 02 UTC (c) é maior que nas regiões próximas das margens do lago, no entanto, chama atenção neste horário o transporte de CO chegando com os ventos de Sul e Nordeste, aproximando-se do sítio ATTO. O aumento das concentrações de CO podem estar relacionadas a emissões por queimadas, que são transportados a longas distâncias por ação do vento (ANDREAE et al., 2002), possivelmente associada ao fenômeno da Friagem. Contudo, nota-se que toda a região do domínio da simulação apresenta baixas concentrações de CO no horário em que a Friagem é dissipada (c'').

O gás NO_2 é um importante precursor de O_3 , e está relacionado principalmente a emissões por queimadas. A emissão de gases precursores na formação de O_3 podem aumentar a concentração deste gás a níveis danosos a floresta, já que o ozônio pode danificar as funções estomáticas das folhas (ARTAXO et al., 2002). Apesar disso observa-se que as concentrações mais elevadas de NO_2 no horário das 02UTC (d) parecem ter sua origem na própria região onde se encontram e apresentam taxas mais reduzidas no horário da dissipação da Friagem (d'').

De maneira geral, observou-se que as concentrações dos gases NO_2 , CO e O_3 foram sempre maiores sobre a superfície do lago Balbina, indicando que este corpo d'água possivelmente atua como fonte desses gases. As emissões de gases de efeito estufa dos rios, brejos e lagos podem ser muito

maiores do que se pensava até agora, contribuindo na caracterização local e regional da química da atmosfera (RICHEY et al., 2002).

Do ponto de vista de gases traço, pode-se notar que o evento de Friagem trouxe uma massa de ar relativamente mais limpa para a região de interesse, tendo em vista que as concentrações médias de NO₂, CO e O₃ estiveram abaixo do que já foi observado em regiões de floresta na bacia amazônica (ARTAXO et al., 2002; CORDOVA et al., 2004). Vale destacar que o mês em questão (julho) está inserido num período considerado a estação das queimadas na Amazônia, quando se tem um aumento expressivo nas concentrações de gases traço, incluindo CO, NO₂ e O₃ (LONGO et al., 1999).

2.4 Conclusões

No período de 9 à 11 de julho de 2014 um fenômeno de Friagem alcançou a região central da Amazônia. Por intermédio dos dados das reanálises ECMWF ERA-interim foi possível constatar que esse fenômeno incursionou na região amazônica de Sudoeste à Nordeste, trazendo um forte escoamento no quadrante Oeste, que dominou o campo dos ventos na região central da Amazônia.

Através dos dados observacionais foi possível comprovar que a passagem do fenômeno da Friagem na região central da Amazônia teve seus efeitos mais significativo no dia 11, tanto em Manaus quanto no sítio ATTO.

Com os registros da torre *instant*, no sítio ATTO, constatou-se que o dia 11 foi marcado pela queda brusca da temperatura do ar, enfraquecimento do escoamento típico de Leste e predominância de ventos de Sul, Oeste e Norte. Além disso, no dia 11 a interação da massa de ar da Friagem com o escoamento dos ventos alísios deu origem à bandas de convecção, que por sua vez provocaram redução significativa da radiação incidente de onda curta e chuva recorde do mês.

A redução da radiação incidente provocou aumento súbito nas concentrações de CO₂ e queda abrupta nas concentrações de O₃, como consequência da redução das taxas fotossintéticas e fotoquímicas respectivamente.

Por meio das simulações do modelo JULES-CCATT-BRAMS foi possível avaliar os principais impactos que o fenômeno de Friagem provocou tanto nas características termodinâmicas quanto na química atmosférica da região central da Amazônia. De um modo geral, o modelo reproduziu satisfatoriamente as principais alterações que o fenômeno da Friagem trouxe ao ambiente de interesse. Além disso, as circulações de brisa entre o lago da Balbina e a floresta foram bem representadas nas simulações, no entanto, não foi possível constatar a influência desta brisa nas concentrações de gases traço no local do sítio ATTO.

Embora este artigo analise apenas um estudo de caso, os resultados observacionais e das simulações permitem concluir que o fenômeno de Friagem pode interferir profundamente nas condições microclimáticas e na composição química da atmosfera, numa região de densa floresta, no centro da Amazônia.

3. CONCLUSÕES GERAIS

3.1. Resultados chave

Os resultados das reanálises do ECMWF ERA-interim mostraram que uma massa de ar com características polares (frio e seco) alcançou a região norte do Brasil e modificou as condições atmosféricas na Amazônia, entre os dias 6 e 11 de julho de 2014, da mesma forma como relatado no boletim técnico do CPTEC/INPE (2014).

Os dados observacionais das regiões sudoeste (Porto Velho) e central da Amazônia (Manaus e sítio ATTO) apontaram queda acentuada da temperatura do ar e mudança na direção do vento predominante de Leste para Sul, caracterizando a chegada do fenômeno da Friagem na Amazônia (FISCH, 1996; MARENGO, 1997; OLIVEIRA et al., 2004 e VIANA; SILVA, 2012). Em Manaus e no sítio ATTO, a chegada da Friagem ocorreu no dia 9 de julho de 2014, sendo que seus efeitos mais pronunciados foram vistos no dia 11.

As reanálises ERA-interim mostraram que o escoamento de ar frio e seco originado da Friagem convergiu com o escoamento típico de Leste na região central da Amazônia no dia 11 de julho de 2014. O encontro dessas

duas massas de ar com características distintas provocou intensa atividade convectiva sobre a região de Manaus e sítio ATTO, que foi evidenciada pela sequência de imagens de satélite do dia 11 de julho.

Os dados coletados no sítio ATTO mostraram que durante a atuação da Friagem foi registrado o maior índice pluviométrico do mês de julho, com acumulado superior a 20 mm no dia 11. A nebulosidade persistente observada neste dia reduziu a radiação incidente na superfície, em cerca de 50%, que por sua vez interferiu na flutuação diária de O_3 e CO_2 , uma vez que a luminosidade é fator limitante no ciclo diário das concentrações desses gases traço (KLUGE, 2014; GU et al., 2012).

O modelo integrado JULES-CCATT-BRAMS reproduziu satisfatoriamente o comportamento do vento horizontal, que foi coerente com as medidas feitas no sítio ATTO. A evolução diária das circulações locais resultantes do gradiente térmico entre a superfície do lago da Balbina e a floresta foram capturadas nas simulações, bem como o escoamento de ar originado da Friagem. Durante o período de integração do modelo foi possível notar que a circulação local e o escoamento referente a entrada da Friagem são fenômenos com pouca profundidade, sendo atuantes na subcamada troposférica que se estende da superfície até aproximadamente 500 m.

As simulações comprovaram que o fenômeno de Friagem trouxe ar relativamente mais limpo para a região de domínio do modelo, tendo em vista que as concentrações médias de NO_2 , CO e O_3 estiveram abaixo do que já foi observado em outros estudos, em regiões de floresta na bacia amazônica (ARTAXO et al., 2002; CORDOVA et al., 2004).

Esta simulação revelou ainda que sobre a superfície do lago da Balbina as concentrações de NO_2 , CO e O_3 foram mais acentuadas ao longo do dia, em comparação a superfície da floresta, apontando que este lago é uma importante fonte de gases traço, podendo contribuir efetivamente na caracterização da composição química da atmosfera (RICHEY et al., 2002).

Estes resultados mostraram que o fenômeno de Friagem causou profundas alterações nas condições atmosféricas do centro da bacia amazônica, modificando os processos biogeoquímicos na interface floresta atmosfera, que são controlados por fatores meteorológicos como a temperatura, direção do vento e nebulosidade.

Diante desses resultados exalta-se a grande importância de melhor compreender os processos inerentes à interação de múltiplas escalas entre a atmosfera e os diversos ecossistemas amazônicos, de modo a alcançar um melhor entendimento sobre os impactos destas interações nas características ambientais, em escala regional e local.

3.2. Perspectivas para trabalhos futuros

Este trabalho mostrou os principais impactos do fenômeno de Friagem na região central da Amazônia, no entanto, trata-se de um estudo de caso, onde abordou-se apenas um evento de Friagem. Neste contexto, uma atividade relevante se refere ao estudo da climatologia dos fenômenos de Friagem no centro da Amazônia à partir de séries históricas da região urbana de Manaus e da região de floresta do sítio ATTO.

Outro trabalho bastante relevante seria o estudo detalhado da dinâmica das circulações de brisa do lago da Balbina ao longo do período chuvoso e menos chuvoso da Amazônia, de modo que o transporte de gases traço via circulação local fosse caracterizado sazonalmente, determinando com mais clareza os limites da interação das circulações de brisa com o ambiente e seu papel no transporte e dispersão de gases traço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa da Larga Escala Biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA) pelos dados cedidos do sítio de pesquisa do *Amazon Tall Tower Observatory (ATTO)*, ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* pelos dados de reanálises cedidos, e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) por disponibilizarem o modelo JULES-CCATT-BRAMS. Além disso, agradecem ao Laboratório de Modelagem da Amazônia (LMAZ) pelo auxílio técnico prestado e ao CNPq pela bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA C. R.; SILVA DIAS M. A. F.; SOUZA E. P.; COHEN J. C. P... Verification of the role of low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**. v.100, p.36-44, 2011.

ANDREAE, M. O., ARTAXO, P., BRANDÃO, C., CARSWELL, F. E., CICCIOLO, P., DA COSTA, A. L., CULF, A. D., ESTEVES, J. L., GASH, J. H. C., GRACE, J., KABAT, P., LELIEVELD, J., MALHI, Y., MANZI, A. O., MEIXNER, F. X., NOBRE, A. D., NOBRE, C., RUIVO, M. D. L. P.TS8, SILVA-DIAS, M. A., STEFANI, P., VALENTINI, R., VON JOUANNE, J., AND WATERLOO, M. J.: Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: the LBA-EUSTACH experiments. **J. Geophys. Res.**, v.107, p. 8066, 2002, doi:10.1029/2001JD000524.

ANDREAE, M. O.; ACEVEDO, O. C.; ARAÚJO, A.; ARTAXO, P.; BARBOSA, C. G. G.; BARBOSA, H. M. J.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHI, X.; CINTRA, B. B. L.; DA SILVA, N. F.; DIAS, N. L.; DIAS-JÚNIOR, C. Q.; DITAS, F.; DITZ, R.; GODOI, A. F. L.; GODOI, R. H. M.; HEIMANN, M.; HOFFMANN, T.; KESSELMEIER, J.; KÖNEMANN, T.; KRÜGER, M. L.; LAVRIC, J. V.; MANZI, A. O.; MORAN-ZULOAGA, D.; NÖLSCHER, A. C.; NOGUEIRA, D.S.; PIEDADE, M. T. F.; PÖHLKER, C.; PÖSCHL, U.; RIZZO, L. V.; RO, C.U.; RUCKTESCHLER, N.; SÁ, L. D. A.; SÁ, M. D. O.; SALES, C. B. A.; SANTOS, R. M. N. D.; SATURNO, J.; SCHÖNGART, J.; SÖRGEL, M.; DE SOUZA, C. M.; DE SOUZA, R. A. F.; SU, H.; TARGHETTA, N.; TÓTA, J.; TREBS, I.; TRUMBORE, S.; EIJCK, A.V.; WALTER, D.; WANG, Z.; WEBER, B.; WILLIAMS, J.; WINDERLICH, J.; WITTMANN, F.; WOL, S.; YÁÑEZ-SERRANO, A. M. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) in the remote Amazon Basin: overview of first results from ecosystem ecology, meteorology, trace gas, and aerosol measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics (ACP) Journal**, v.15, p.1–127, 2015. doi:10.5194/acpd-15-1.

ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BECK, V.; BELA, M.; FREITAS, S.; GERBIG, C.; LONGO, K.; MUNGER, J. W.; WIEDEMANN, K. T.; WOFYSY, S. C. Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons. **Atmospheric Chemistry and Physics (ACP) Journal**, v.12, p.6041-6065, 2012. doi:10.5194/acp-12-6041.

ANDREAE, M. O.; BROWEL, E. V.; GARSTANG, M.; GREGORY, G. L.; HARRISS, R. C.; HILL, G. F.; JACOB, D. J.; PEREIRA, M. C.; SACHSE, G. W.; SETZER, A. W.; SILVA DIAS, P. L.; TALBOT, R. W.; TORRES, A. L.; WOFYSY, S. C. Biomass-burning emissions and associated haze layers over Amazonia. **J. Geophys. Res.**, v. 93, n. D2, p. 1509-1527, Fev. 1988.

ANDREAE, M. O.; CRUTZEN, P. J.. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. **Science**, v. 276, p. 1.052-1.058, 1997.

ARAÚJO, A.C.; DOLMAN, A.J.; WATERLOO, M.J.; GASH, J.H.C.; KRUIJT, B.; ZANCHI, F.B.; DE LANGE, J.M.E.; STOEVELAAR, R.; MANZI, A.O.; NOBRE, A.D.; LOOTENS, R.N.; BACKER, J. Spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **National Agricultural Library**, 2010.

ARTAXO, P.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; PROCÓPIO, A. S.; PAULIQUEVIS, T. M.; ANDREAE, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L. V.; CORDOVA, A. M. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 8.081–8.095, 2002. doi:10.1029/2001JD000666.

ARTAXO, PAULO.; GATTI, LUCIANA, V.; CORDOVA, ANA M. LEAL.; LONGO, KARLA M.; FREITAS, SAULO R. DE.; LARA, LUCIENE L.; PAULIQUEVIS, THEOTONIO M.; PROCÓPIO, ALINE S.; RIZZO, LUCIANA V.. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **Acta Amazônica**, v. 35, n.2, p.185 – 196, 2005.

BARTLETT, K. B.; HARRISS, R. C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. **Chemosphere**, v.26, p.261–320, 1993.

BERRISFORD, P, DEE, DP, POLI, P, BRUGGE, R, FIELDING, K, FUENTES, M, KÅLLBERG, PW, KOBAYASHI, S, UPPALA, S, SIMMONS, A. The ERA-Interim archive Version 2.0. Miscellaneous, **ERA Report Series**, v.1, 2011.

BEST, M. J., PRYOR, M., CLARK, D. B., ROONEY, G. G., ESSERY, R. L. H., MÉNARD, C. B., EDWARDS, J. M., HENDRY, M. A., PORSON, A., GEDNEY, N., MERCADO, L. M., SITCH, S., BLYTH, E., BOUCHER, O., COX, P. M., GRIMMOND, C. S. B., AND HARDING, R. J.. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. **Geosci. Model Dev.**, v.4, p.677–699, 2011.

BETTS, A.K., GATTI, L.V., GORDOVA, A.M., SILVA DIAS, M.A.F., FUENTES, J.D.. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night. **Journal of Geophysical Research**, v.107, no. d20, p.8046, 2002.

BRINKMAN, W. L. F.; RIBEIRO, M. N. G. Air temperatures in Central Amazonia.III Vertical temperature distribution on a clearcut area and in a secondary forest near Manaus (cold front conditions July 10th 1969). **Acta Amazônica**, v.2. n. 3, p. 25-29, 1972.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC/INPE). **Boletim técnico. 11 de julho 2014**. Acesso em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso em: abril de 2017

CHENG, W. L., Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions. **Atm. Environment**, v.36(21), p.3445-3459, 2002.

CLARK, D. B., MERCADO, L. M., SITCH, S., JONES, C. D., GEDNEY, N., BEST, M. J., PRYOR, M., ROONEY, G. G., ESSERY, R. L. H., BLYTH, E., BOUCHER, O., HARDING, R. J., HUNTINGFORD, C., AND COX, P. M.. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. **Geosci. Model Dev.**, v.4, p.701–722, 2011.

COHEN, J. C. P.; FITZJARRALD D. R.; D'OLIVEIRA, F. A. F.; SARAIVA, I.; BARBOSA, I. R. S.; GANDU, A. W.; KUHN P. A. Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the tapajós-amazon confluence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.esp., p.23-30, <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130058>, 2014.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS. M. A. F.; NOBRE, C. A. Environmental Conditions Associated with Amazonian Squall Lines: A Case Study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163–3174, 1995.

CORDOVA, A. M.; GATTI, L. V.; LONGO, K.; FREITAS, S.; ARTAXO, P.; PROCÓPIO, A. S.; SILVA DIAS, M.A.F.; FREITAS, E.D. Nitrogen oxide measurements in an Amazon site and enhancements associated with a cold front. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v.4, p.2.301–2.331, 2004.

COSTA, C.V.P.S., STOY, P.C., TÓTA, J., TROWBRIDGE, A.M.; Downward transport of ozone rich air and implications for atmospheric chemistry in the Amazon rainforest. **Atmospheric Environment**, v.124, p.64-76. Published by Elsevier Ltd., 2016.

COTTON, W. R., PIELKE, R. A., WALKO, R. L., LISTON, G. E., TREMBACK, C. J., JIANG, H., MCANELLY, R. L., HARRINGTON, J. Y., NICHOLLS, M. E., CARRIO, G. G., MCFADDEN, J. P.; RAMS 2001: Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, p. 5-29, 2003.

CPTEC/INPE. **Boletim Técnico. 11 de julho 2014.** Disponível em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>
CRUTZEN, P. J.. Overview of tropospheric chemistry: Developments during the past quarter century and a look ahead. **Faraday Discuss.**, v.100, p.1 – 21, 1995.

DIAS-JUNIOR C., N. DIAS, J. FUENTES, M. CHAMECKI., Convective storms and non-classical low-level jets during high ozone level episodes in the Amazon region: An ARM/GOAMAZON case study. **Atmospheric Environment**, v.155, p.1016, 2017.

EUGSTER, W. & SIEGRIST, F. The influence of nocturnal CO₂ advection on CO₂ flux measurements. **Basic and Applied Ecology**, v.1, n.2, p. 177-188, 2000.

FERNANDES, M. J. S.: Índice de erosividade da chuva média anual para Manaus/AM de 1981 a 2010. **Geonorte**, v.10, p. 46–49, 2014.

FEARNSIDE, P. M. Social impacts of Brazil's Tucuruí Dam. **Environmental Management**, v.24(4), p.483-495, 1999. DOI: 10.1007/s002679900248.

FISCH, G. F.: Camada limite Amazônia: aspectos observacionais e de modelagem. 201 p. (INPE-6123-TDI/584). **Tese** (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 1995.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia. **Rev. Climanálise** (Edição Comemorativa de 10 anos), p. 24-41, 1996.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v.28 (2), p.101-126, 1998.

FITZJARRALD, D. R.; SAKAI, R. K.; MORAES, O. L. L.; DE OLIVEIRA, R. C.; ACEVEDO, O. C.; MATTHEW, J. Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós confluence. **Rev; Biogeosciences**, v.113, p.1-17, 2008.

FREITAS, S. R. et al. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATTBRAMS). Part 1: Model description and evaluation. **In Atmospheric Chemistry and Physics Discussion** (Online), v.7, p.8571-8595, 2007.

FREITAS, S.R., et al. 2016. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. **Geosci. Model Dev. Discuss.**, 2016.

GANDU A.W., COHEN J.C.P., SOUZA J.R.S., Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. **Theoretical And Applied Climatology**, v.78, p.123- 135, 2004.

GARRAT, J. R. the Atmospheric Boundary Layer. **Rev. Earth Science**, v.37, p.89–134, 1994.

GARREAUD, R. D. Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 7, p. 2544-2559, 2000.

GERKEN, T., WEI, D., CHASE, R.J., FUENTES, J.D., SCHUMACHER, C., MACHADO, L.A.T., ANDREOLI, R.V., CHAMECKI, M., DE SOUZA, R.A.F., FREIRE, L.S., JARDINE, A.B., MANZI, A.O., DOS SANTOS, R.M.N., RANDOW, GEVAERD, R., AND FREITAS, S. R.. Estimativa operacional da umidade do solo para inicialização de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. **Rev. Bras. Meteorol.**, v.21, p.1–15, 2006.

GERMANO M. F.; VITORINO, M. I.; COHEN, J. C. P.; COSTA, G. B.; SOUTO, J. I. O.; REBELO, M. T. C.3; de Sousa, A. M. L. Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. **Atmos. Sci. Let.**, disponível on-line em: (wileyonlinelibrary.com), 2017. doi: 10.1002/asl.726.

GRECO, S.; ULANSKY, S.; GARSTANG, M.; HOUSTON, S. Low Level Nocturnal Wind Maximum over the Central Amazonian Basin. **Boundary Layer Meteorolog**, v.58, n.1-2, p.91-115, 1992.

GU, L.; BALDOCCHI, D.; VERMA, S. B.; BLACK, T. A.; VESALA, T.; FALGE, E.M.; DOWTY, P. R.. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. **J. Geophys. Res.** v.107 (D6), p.4050, 2002.

HAMILTON, M.G., TARIFA, J.R.. Synoptic aspects of polar outbreak leading to frost in tropical Brazil. **Monthly Weather Review**, v.106(11), p.1545-1556, 1978.

HOLTON, J.R. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology. **Department of Atmospheric Sciences. University of Washington**. 4. Ed., v. 88., p. 535, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.phpmep/bdmep>. Acesso em: 5 de março de 2017.

JACOB, D.J.; WOFSY, S. 1988. Photochemistry of biogenic emissions over the Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 93(D2), p.1.477-1.486, 1998.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; DA SILVA, P. P. M. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. **Rev. Virtual Quim.**, v.7, n. 1, p.56-73, 2015. Disponível em: <http://www.uff.br/rvq>. Data de publicação na Web: 30 de novembro de 2014.

LONGO, K. M.; THOMPSON, A. M.; KIRCHHOFF, V. W. J. H.; REMER, L.; FREITAS, S. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; ARTAXO, P.; HART, W.; SPINHIRNE, J. D.; YAMASOE, M. A.. Correlation between smoke and tropospheric ozone concentrations in Cuiabá during Smoke Clouds and radiation – Brazil (SCAR-B). **Journal of Geophysical Research**, v.104(D10), p. 12.113-12.129, 1999.

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.

LU, L.; DENNING, A. S.; DA SILVA-DIAS, M. A.; DA SILVA-DIAS, P.; LONGO, M.; FREITAS, S. R.; SAATCHI, S. Mesoscale circulations and atmospheric CO₂ variations in the Tapajós Region, Pará, Brazil. **J.24 Geophys. Res.**, v.110, D21102, 2005, doi:10.1029/2004JD005757.

LUDWIG, J.; MEIXNER, F. X.; VOGEL, B.; FORSTNER, J. Processes, influencing factors, and modelling of nitric oxide surface exchange an overview. **Biogeochemistry**, v.52, p.225– 257, 2001.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CULF, A. D. Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon basin. **J. Appl. Meteor.**, v. 36, p.1553–1566, 1997.

MATOS, A. P.; COHEN J. C. P.. Circulação de brisa e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v.38, p. 21– 27, 2016. (Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia).

MATOS, A. P.; COHEN J. C. P.. Circulação de brisa e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v.38, p.21–27, 2015.

MELO, A. M. Q. Simulações de linhas de instabilidade continentais e a formação de correntes de densidade superficiais ricas em ozônio. **Dissertação de mestrado**, PPGCA/UFPA, Belém-PA, 2018.

MESQUITA, R.L.C.; SILVA R.R.. Insights of meso and micro-scale processes for the Caxiuanã forest region from high resolution simulation. **RBMET**. v.27(2), p.253-261, 2012.

MOREIRA, D. S., FREITAS, S. R., BONATTI, J. P., MERCADO, L. M., ROSÁRIO, N. M. É., LONGO, K. M., MILLER, J. B., GLOOR, M., AND GATTI, L. V.. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS 10 atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO2 budget in South America. **Geos. Model Devel.**, v.6, p.1243-1259, 2013.

MOURA, M. A. L.; MEIXNER, F. X.; TREBS I.; LYRA, R. F. F.; ANDREAE, M. O.; NASCIMENTO FILHO, M. F. Evidência observacional das brisas do lago de Balbina (Amazonas) e seus efeitos sobre a concentração do ozônio. **Acta Amazônica**, v.34, n. 4, p.605-611, 2004.

NAPPO, C. J. An introduction to atmospheric gravity waves. Amsterdam: **Academic Press**, p. 276, 2002.

NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian climate: main features, in: Amazonia and Global Change. **American Geophysical Union**, Washington, D.C., v.30, p.149–162, 2009.

NOBRE, C. A.; OLIVEIRA, A.: Precipitation and circulation anomalies in South America and the 1982-83 El Niño/Southern Oscillation episode. In: CONFERENCE OF GEOPHYSICAL FLUID DYNAMICS WITH SPECIAL EMPHASIS ON "EL NIÑO. [**Proceedings...**]. São José dos Campos: Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro Latino-americano de Física, 1987. p. 325-328.

NOBRE, C. A.; RENNÓ, N. O.: **Droughts and floods in south America due to the 1982-1983 El Niño/Southern Oscillation episode**. 1985. 4p. (Relatório Técnico, INPE 3408 PRE/ 677).

OLIVEIRA, A.P.; FITZJARRALD, D.R.: The Amazon river breeze and the local boundary layer: I - Observations. **Boundary Layer Meteorol.**, v.63, p.141- 162, 1993.

OLIVEIRA, P. J.; ROCHA, E. J. P.; FISH, G.; KRUIJT, B.; RIBEIRO, J. B. M.: Efeitos de um evento de riagem nas condições meteorológicas da Amazônia: um estudo de caso. **Acta Amazônica**, v.34, n. 4, p. 613–619, 2004.

OLIVEIRA, P. J.; FISCH, G.: Efeito da Turbulência na Camada Limite Atmosférica em Áreas de Floresta e Pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.15, n.2, p.39-44, 2000.

ORLANSKI, I. Arational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, n.5, p. 527-534, 1975.

PARMENTER, F. C. A. Southern Hemisphere cold front passage at the Equator. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 57, n. 12, p. 1435-1440, 1976.

POTTER, C. S., E. A. DAVIDSON, S. A. KLOOSTER, D. C. NEPSTAD, G. H. DE NEGREIROS, AND V. BROOKS. Regional application of an ecosystem production model for studies of biogeochemistry in Brazilian Amazonia. **Glob. Change Biol.**, v. 4, p. 315– 333, 1998.

RAMOS DA SILVA, R., D. WERTH; R. AVISSAR., Regional Impacts of Future Land-Cover Changes on the Amazon Basin Wet-Season Climate. **J. Climate**, v.21 (6), p.1153-1170, 2008.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, K.; BALLESTER, V. M. & HESS, L. L.: Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source at atmospheric CO₂. **Nature**, v.416, p.617-620, 2002.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J.: Variação espaço temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, p.113-122, 2004.

ROSSATO, L.; ANGELIS, C.F.; ALVALÁ, R.C.S.: Impacto das características da superfície terrestre no algoritmo de inferência da umidade do solo no Brasil, utilizando observações do sensor AMSR-E/AQUA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 137-156, 2013.

SAAD, S. I. Efeitos da extensão e posição do desmatamento em meso-escala sobre a circulação atmosférica e a chuva na Amazônia. 2008. 88f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São Paulo (USP), 2008.

SAAD, S. I., H. R. DA ROCHA, M. A. F. S. DIAS, AND R. ROSOLEM.. Can the deforestation breeze change the rainfall in Amazonia? A case study for the br-163 highway region. **Earth Interact**, v.14(18), p.1–25, 2010, doi:10.1175/2010EI351.

SALATI, E.; MARQUES, J. Climatology of the Amazon region. In SIOLI, H. (Ed.). **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dordrecht/Boston/Lancaster: Dr. W. Junk Publishers, p.763 1984.

SANTOS, M. J.dos; SILVA DIAS, M. A. F.; FREITAS, E. D. Influence of local circulations on wind, moisture, and precipitation close to Manaus City, Amazon Region, Brazil. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v.119, p. 13,233-13,249, 2014. doi:10.1002/2014JD021969.

SATYAMURTY, P.; FONSECA, J. F. B.; BOTTINO, M. J.; SELUCHI, M. E.; LOUREN, M. C. M.; GONCALVES, L. G. G. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. **Meteorological Applications**, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2002.

SAVIJÄRVI, H.; AROLA, A.; RÄISÄNEN, P.. Short-wave optical properties of precipitating water clouds. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.123, p.883–899, 1997.

SAVIJARVI, H.; RAISANEN, P.. Long-wave optical properties of water clouds and rain. **Tellus**, v.50A, p.1–11, 1998.

SERRA A. B.; RATISBONA L. As ondas de frio na Bacia Amazônica. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. Serviço de Meteorologia, 1941.

SERRA A. B.; RATISBONA L. As ondas de frio na Bacia Amazônica. Serviço de Meteorologia, **Ministério da Agricultura**, Rio de Janeiro, 1941.

SILVA DIAS M. A. F.; SILVA DIAS P. L.; LONGO M.; FITZJARRALD D. R.; DENNING A. S.. River breeze circulation in eastern Amazonia: observations and modeling results. **Theor. Appl. Climatol.** v.78(1), p.111-121, 2004.

SILVA DIAS, M. A. F.; REGNIER, P. Simulation of meso-scale circulations in a deforested area of Rondonia in the dry season. *Amazonian Deforestation and Climate*. **New York: J. M. Wiley and Sons**, p. 531-547, 1996.

SILVA DIAS, M.A.F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P. L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A.; FUENTES, J. D.; ROCHA, H.; MARENGO, J.; PLANA-FATTORI, A.; SÁ, L.; ALVALÁ, R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L. V.. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, v.107 (D20), p. 8.072-8.092, 2002. doi:10.1029/2001JD000335.

SILVA DIAS, M.A.F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P. L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A.; FUENTES, J. D.; ROCHA, H.; MARENGO, J.; PLANA-FATTORI, A.; SÁ, L.; ALVALÁ, R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L. V.. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, v.107(D20), p.8.072-8.092, 2002, doi:10.1029/2001JD000335.

SIQUEIRA, J. R.; MACHADO, L. A. T. Influence of the Frontal Systems on the Day-to-Day Convection Variability over South America. **Journal of Climate**, v.17, p.1755-1766, 2004.

SOUZA, D. O.; ALVALÁ, R. C. S.. Observational evidence of the urban heat of Manaus City, Brazil. **Meteorological Applicatin**, 2012, doi: 10.1002/met.1340.

STEENEVELD, G. J.; HOLTSLAG, A. A. M.; NAPPO, C. J.; DEWIEL, B.; MAHRT, L.; Exploring the possible role of small-scale terrain drag on stable boundary layers over land. **J. Appl. Meteorol. Clim.**, v.47, p.2518–2530, doi:10.1175/2008jamc1816.1, 2008.

STEENEVELD, G. J.; NAPPO, C. J.; HOLTSLAG, A. A. M.; Estimation of orographically induced wave drag in the stable boundary layer during the CASES-99 experimental campaign. **Acta 20 Geophys**, v.57, p.857–881, doi:10.2478/s11600-009-0028-3, 2009.

SUN, J.; DESJARDINS, R.; MAHRT, L.; MACPHERSONS, I. Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n. d20, p.25,873-25,885, 1998.

SUN, Z.; SHINE, K. P.. Studies of the radiative properties of ice and mixed-phase clouds. Q. J. Roy. **Meteor.Soc.**, v.120, p.111–137, 1994.

THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T.; A study of aerosol impacts on clouds and precipitation 5 development in a large winter cyclone. **J. Atmos. Sci.** 2014.

THOMPSON, G.; FIELD, P. R.; RASMUSSEN, R. M.; HALL, W. D.. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. **Mon. Wea. Rev.**, v.136, p.5095–5115, 2008.

TOON, O. B.; MCKAY, C. P.; ACKERMAN, T. P.; SANTHANAM, K.. Rapid Calculation of Radiative Heating Rates and Photodissociation Rates in Inhomogeneous Multiple Scattering Atmospheres. **J. Geophys. Res.**, v.94, p.16287-16301, 1989, doi: 10.1029/JD094iD13p16287.

VERA, C.; BAEZ, J.; DOUGLAS, M.; EMMANUEL, C. B.; MARENGO, J.; MEITIN, J.; NICOLINI, M.; NOGUES-PAEGLE, J.; PAEGLE, J.; PENALBA, O.; SALIO, P.; SAULO, C.; SILVA DIAS, M. A.; SILVA DIAS, P. AND ZIPSER, E. The South American Low-Level Jet Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, p. 63–77, 2006.

VIANA, L. P.; SILVA, M. M... Efeitos de incursão de ar frio na Amazônia em julho de 2010: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, 2012, Gramado, RS. **Anais...** Gramado: SBMET, 2012. 1 CD-ROM.