



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO SOCIEDADE NATUREZA E DESENVOLVIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO
TAPAJÓS SOBRE DADOS METEOROLÓGICOS NA
FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS**

RAPHAEL PABLO TAPAJÓS SILVA

Santarém, Pará
Julho, 2017

RAPHAEL PABLO TAPAJÓS SILVA

CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO
TAPAJÓS SOBRE DADOS METEOROLÓGICOS NA
FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS

Orientador: Dr. Rodrigo da Silva

Coorientador: Dr. David Roy Fitzjarrald

Tese apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais, junto ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, na área de concentração: Impactos Ambientais e Sociais da Mudança do Uso da Terra na Amazônia.

Santarém, Pará
Julho, 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- S586c Silva, Raphael Pablo Tapajós
Caracterização e influência da brisa do rio Tapajós sobre dados meteorológicos na Floresta Nacional do Tapajós. / Raphael Pablo Tapajós Silva. – Santarém, 2017.
125fls.: il.
Inclui bibliografias.
- Orientador Rodrigo da Silva
Coorientador David Roy Fitzjarrald
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação Sociedade, Natureza e Desenvolvimento.
1. Vento - pressão . 2. Umidade. 3. Temperatura. 4. Radiação. 5. Rio Tapajós. I. Silva, Rodrigo da, *orient.* II. Fitzjarrald, David Roy, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 551.55098115

CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE DADOS METEOROLÓGICOS NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS

Tese apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais, junto ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, na área de concentração: Impactos Ambientais e Sociais da Mudança do Uso da Terra na Amazônia. Defendida, julgada e aprovada dia 31 de julho de 2017.

Comissão Examinadora, integrada pelos Membros:

Profa. Dra. Maria Assunção Faus da Silva Dias
(USP)
Externo à Instituição

Prof. Dr. Júlio Tóta da Silva (UFOPA)

Prof. Dr. Manoel Roberval Pimentel Santos
(UFOPA)

Prof. Dr. José Mauro Sousa de Moura (UFOPA)

Prof. Dr. Troy Patrick Beldini (UFOPA)
Externo ao Programa

Dr. Rodrigo da Silva (UFOPA)
Presidente da Banca - Orientador

Santarém, **Julho, 2017.**

Dedico à minha família

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Oeste do Pará, a Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento.

À State University of New York e ao Atmospheric Sciences Research Center em Albany, pela logística durante o período de desenvolvimento deste trabalho nos Estados Unidos.

Aos meus Orientadores e Amigos Rodrigo da Silva e David Roy Fitzjarrald pelo incentivo a ciência e contribuições essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Júlio Tóta e a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, no âmbito do Programa Pesquisador Visitante Especial, processo 88887.116382/2016-00, pela confiança e bolsa sanduíche.

Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto Meteorológico (LABSREM), nas pessoas do Professor Doutor Wilderclay Machado e ao Discente de Ciências Atmosféricas Cleber Xavier pelo processamento das imagens do MODIS e disponibilização da matriz numérica com os dados de temperatura superficial.

Aos meus colegas de trabalho, docentes do curso de Ciências Atmosféricas e ajuda durante curso de doutorado e afastamento.

Ao Professor David Roy Fitzjarrald e família pela recepção, ajuda e amizade em Albany.

À todos os meus familiares, especialmente aos mais próximos que conhecem toda minha trajetória.

À minha esposa Juliana pelo companheirismo, compreensão e apoio.

À minha mãe Dinorá, por tudo.

**“O caminho é mais importante
que o destino. Divirta-se!”**

TAPAJOS, Raphael. **CARACTERIZAÇÃO E INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE DADOS METEOROLÓGICOS NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS.** 112p. Tese de Doutorado em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento. Área de concentração: Impactos Ambientais e Sociais da Mudança do Uso da Terra na Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA. Santarém, Pará.

RESUMO

O presente estudo ressalta a importância de pesquisas sobre os processos ocorrentes na Camada Limite Atmosférica (CLA) na Amazônia, mais especificamente na região do Baixo Tapajós, levando em consideração o processo de Brisa do Rio Tapajós (BRT). Para entender a caracterização da circulação local e mecanismos de funcionamento da BRT, fez-se uso de dados das redes de estações, torres, satélites e também de campanhas de sondagem da baixa troposfera. Para verificar as influências da brisa sobre a Floresta Nacional do Tapajós (FNT), analisou-se a componente zonal u do vento para classificar dias com e sem ocorrência de BRT, e também a comparação desses dias sobre as medidas feitas no site Km67. Os resultados apontam para ocorrência de quase 50% de dias com BRT sobre a FNT, e que esta apresenta um ciclo diurno que pode alcançar em média 20 Km de extensão e até cerca de 1 Km de altura. A ocorrência de BRT foi relacionada com a diferença de pelo menos 1°C entre as superfícies do rio e floresta para ocorrer, de acordo com imagens de satélites. Foi verificado uma alta correlação da ocorrência de brisa com o aumento de umidade, sobre FNT. Já a diminuição de temperatura, nos dias com BRT, não são tão visíveis de maneira geral, porém foram apresentados casos que há a diminuição de até cerca de 5°C devido a BRT. Com relação a radiação, no Km67, não foram observadas grandes mudanças quanto no Km83, o que deve indicar a formação de nuvens mais densas ao Sul do Km67, e por isso pode estar relacionada à distribuição de chuva durante a tarde e início da noite sobre a FNT. O fluxo de calor latente, não foi influenciado pela BRT, já o fluxo de CO₂ indica menor absorção durante dias com BRT, para o período chuvoso.

Palavras-chaves: Brisa do rio tapajós, umidade, temperatura, radiação, fluxo de massa e energia.

TAPAJÓS, Raphael. **CHARACTERIZATION AND INFLUENCE OF THE TAPAJÓS RIVER BREEZE ABOUT METEOROLOGICAL DATA IN THE NATIONAL FOREST OF TAPAJÓS**. 2017. 112p. PhD Thesis in Society, Nature and Development. Area of concentration: Environmental and Social Impacts of Land Use Change in the Amazon. Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA.

ABSTRACT

The present study emphasizes the importance of research on the processes that occur in the Atmospheric Boundary Layer (CLA) in the Amazon region, specifically in the low Tapajós region, taking into account the Tapajós River Breeze (TRB) process. In order to understand the characterization of the local circulation and mechanisms of operation of the TRB, data were used of the networks of stations, towers, satellite and also observation campaigns in the low troposphere. In order to verify the influence of the breeze on the Tapajós National Forest (TNF), the zonal component of the wind was analyzed to classify days with and without occurrence of TRB, as well as the comparison of those days on the Km67 site measurements. The results point to the occurrence of almost 50% of days with BRT on TNF, and that it presents a diurnal cycle that can reach on average 20 Km of extension and up to about 1 Km in height. The occurrence of TRB was related to the difference of at least 1°C between river and forest surfaces to occur, according to satellite images. There was a high correlation between the occurrence of breeze and the increase of humidity on TNF. On the other hand, the decrease in temperature in the days with TRB is not so visible in general, however cases have been reported that there is a decrease of up to about 5 °C due to TRB. Regarding radiation, at Km67, no major changes were observed as at Km83, which should indicate the formation of more dense clouds south of Km67, and this may be related to the distribution of rain during the afternoon and early evening on the TNF. The latent heat flux was not influenced by the TRB, since the CO₂ flux indicates lower absorption during days with TRB, for the rainy season.

Key-words: Tapajós river breeze, humidity, temperature, radiation, mass and energy flux.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Corte vertical mostrando a Terra e a troposfera (adaptado de STULL, 1988).	3
Figura 2	– Circulação de brisa no sentido corpos d’argua-terra (adaptado de HOLTON, 2004). Linhas tracejadas indicam superfícies com densidades constantes.	6
Figura 3	– Evolução horária da CLA na região Amazônica (adaptado Martin et al., 1988)	8
Figura 4	– Região do Estudo, com destaque para Flona Tapajós, Rios Amazonas, Curuá-Una e Tapajós, e também a cidade de Santarém (ICMBio, 2017).	13
Figura 5	– Área do estudo (com níveis topográficos) com localização dos Rios, sítios de pesquisa, estações meteorológicas e locais de sondagens na baixa troposfera.	14
Figura 6	– Cobertura da superfície na região de estudo para o ano de 2014 (adaptado de MACHADO, 2017).	15
Figura 7	– Exemplo de decomposição da velocidade do vento. A componente zonal u é destacada.	24
Figura 8	– Médias diárias das componentes zonal (linha azul) e meridional (linha vermelha) do vento (m/s) climatológico do ERA-INTERIM, no nível de 925mb na latitude $3,0^{\circ}\text{S}$ e longitude de $55,75^{\circ}\text{W}$. Área sombreada é o desvio padrão, com cores correspondentes com as componentes.	25
Figura 9	– Rosa dos ventos das estações: Embrapa (EMB), Sudam (SUD), Guaraná (GUA), Mojuí (MOJ) e Km 117 (KM1).	27
Figura 10	– Rosa dos ventos das Estações: Vila Franca (VIL), Aeroporto (AER), T&E, Piquiatuba (PIQ) e Belterra (BEL).	28
Figura 11	– Rosa dos ventos da Estações: Jamaraquá (JAM), Km67 (KM6), Km83 (KM8) e Km77 (KM7).	29
Figura 12	– Fatores de Transmissão (FUJITA e WAKIMOTO, 1982) para região de estudo. As estações de Aeroporto (Aer), Piquiatuba (Piq), Km67, Km83 e Km77 (Km7) foram deslocadas no gráfico propositalmente para melhor visualização dos gráficos.	30
Figura 13	– Análise Geral da Direção (a), Velocidade (b) Componentes u (c) e v (d) do vento para as estações de Jamaraquá (J), Belterra (B), Mojuí (M), Km117 (K), Km67 (6), Km77 (7), Km83 (8).	33
Figura 14	– Análise para dias com BRT da Direção (a), Velocidade (b) Componentes u (c) e v (d) do vento para as estações de Jamaraquá (J), Belterra (B), Mojuí (M), Km117 (K), Km67 (6), Km77 (7), Km83 (8).	37
Figura 15	– Altura da Brisa usando dados do CIRSAN e campanhas de Balão cativo em Jamaraquá (J) e Terra Rica (T). O boxplot e a linha vermelha (média suavizada) são resultados de todos os dados, exceto Balão Terra Rica (T) e Lagrangiano (L). Altura em relação ao nível do Rio Tapajós.	39
Figura 16	– Sondagem CMET # 2 – 25 de agosto de 2016. Temperatura (vermelho), umidade específica (azul), trajetória do balão (linha pontilhada), limite do rio (cinza), FNT (verde) e horário são mostrados na parte de cima da figura, a altura é apresentada na parte de baixo.	41
Figura 17	– Zoom sobre a BRT mostrada na sondagem CMET # 2. Temperatura (vermelho), umidade específica (azul), trajetória do balão (linha pontilhada), limite da FNT (verde) e horário são mostrados na parte de cima da figura, a altura é apresentada na parte de baixo.	42

Figura 18 – Evolução diurna da velocidade e direção do vento para dias com BRT ($u > 0$) em todos os sites. Setas indicam magnitude e direção do vento.	43
Figura 19 – Diferença de Pressão entre Km67 e Jamaraquá para dias com e sem BRT para os períodos seco e chuvoso. K: medida no Km67; J: Medida em Jamaraquá; D: Diferença de Pressão.	46
Figura 20 – Diferença de Pressão entre Km67 e Jamaraquá para diferentes Classes.	47
Figura 21 – Temperatura do ar no Km67 e Jamaraquá para dias com e sem BRT no Km67 para o período seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	48
Figura 22 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jamaraquá. Dia Juliano 295 de 2002, Classe 2 de BRT.	50
Figura 23 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jamaraquá. Dia Juliano 082 de 2003, Classe 3 de BRT.	51
Figura 24 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jamaraquá. Dia Juliano 282 de 2001, Classe 3 de BRT.	52
Figura 25 – Temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) a partir do produto MOD11A1 do sensor MODIS/TERRA para o dia 29 de julho de 2004, às 10:31LT (MACHADO, 2017). Santarém e FNT são indicados na figura.	53
Figura 26 – Temperatura superficial para três longitudes diferentes para o dia 22 de setembro de 2008, classificado como dia com Brisa do Rio Tapajós. A cidade de Belterra, Torre Km67, Estação Km117 e rio Tapajós também são indicados. Áreas hachuradas serão usadas para comparação.	55
Figura 27 – Temperatura superficial para dias com Brisa do Rio Tapajós no Km67 e as diferenças de temperaturas entre essas superfícies (vermelho) para diferentes Latitudes, de acordo com a Figura 27 anterior. T_r-T_f : Diferença entre temperatura do rio e floresta; T_f-T_a : Diferença de Temperatura entre Floresta e área Antropizada.	56
Figura 28 – Temperatura superficial para dias SEM Brisa do Rio Tapajós no Km67 e as diferenças de temperaturas entre essas superfícies (vermelho) para diferentes Latitudes, de acordo com a Figura 27 anterior. T_r-T_f : Diferença entre temperatura do rio e floresta; T_f-T_a : Diferença de Temperatura entre Floresta e Agricultura.	57
Figura 29 – Umidade Específica no Km67 para o período seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	59
Figura 30 – Umidade específica no Km67 para diferentes classes para os períodos seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	61
Figura 31 – Componente u do da velocidade do vento sobre a Flona Tapajós em dias com Brisa, de acordo com a classe e períodos seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	62
Figura 32 – Correlação entre Umidade e componente u do vento para diferentes classes de brisa para o período Seco. As retas pontilhadas são as regressões lineares para cada classe de acordo com a legenda. R^2 também é indicado.	63

Figura 33 – Correlação entre Umidade e componente u do vento para diferentes classes de brisa para o período Chuvoso. As retas pontilhadas são as regressões lineares para cada classe de acordo com a legenda. R^2 também é indicado.	64
Figura 34 – Temperatura no Km67 em diferentes casos e de acordo com a sazonalidade. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	65
Figura 35 – Temperatura no Km67 em diferentes classes de BRT de acordo com a sazonalidade. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	66
Figura 36 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.	68
Figura 37 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.	69
Figura 38 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.	70
Figura 39 – Sondagem CMET#4 – 26 de agosto de 2016.	72
Figura 40 – Sondagem com balão cativo próximo ao Km67 dia 09 setembro de 2009 às 1745LT. Altura em relação a FNT. K e J são as medidas das estações do Km67 e Jamaraguá, respectivamente.	73
Figura 41 – Sondagem na Borda do Rio Tapajós em Jamaraguá dia 19 de junho de 2011 às 1702LT (TAPAJÓS et al., 2013). K e J são as medidas das estações do Km67 e Jamaraguá, respectivamente.	74
Figura 42 – Radiossondagem do Projeto CIRSAN ocorrida 29 de julho de 2001 às 1431LT. B e J são as medidas das estações do Belterra e Jamaraguá, respectivamente.	76
Figura 43 – Radiação no Km67 para dias com e sem BRT. Período de 2001-2005. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	77
Figura 44 – Radiação no Km83 para dias com e sem BRT. Período de 2000-2005. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	78
Figura 45 – Totais Anuais Observados nas estações de superfície (2003-2006). Observação regional (a) e zoom (b) sobre a região de estudo (FITZJARRALD et al, 2008).	80
Figura 46 – Totais anuais (mm) observados pelo Radar Meteorológico (2009-2011) (COHEN et al., 2014).	81
Figura 47 – Percentual do total de chuva para região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós. a. Horário de 0900-2100LT; b. Horário de 2100-0900LT. Santarém, Km67 e Km83 são indicados (Adaptado de COHEN et al., 2014).	82
Figura 48 – Fluxo de Calor Sensível para diferentes casos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	83
Figura 49 – Fluxo de Calor Latente para diferentes casos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	85
Figura 50 – Fluxo de Calor Latente para diferentes casos no Km83. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	86
Figura 51 – Fluxo de Calor Latente para diferentes Classes e Períodos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.	87
Figura 52 – Dióxido de Carbono no Km67; a. Dias com e sem BRT; b. Diferentes Classes de BRT.	89
Figura 53 – Fluxo de Dióxido de Carbono no Km67; a. Dias com e sem BRT; b. Diferentes classes de BRT.	90

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 REVISÃO DE LITERATURA	3
1.3.1 Camada Limite Atmosférica	3
1.3.2 Circulação Atmosférica	4
1.3.3 Circulação Atmosférica Local: Processo Físico e Equação de Circulação	5
1.3.4 Estado da Arte	7
CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA	13
2.1 REGIÃO DE ESTUDO	13
2.2 LOCAIS DE MEDIDAS E DADOS	16
2.2.1 Torres Micrometeorológicas	16
2.2.2 Estações Meteorológicas	18
2.2.3 Sondagem na Baixa Troposfera (SBT)	18
2.2.4 Sensoriamento Remoto	19
2.3 ANÁLISE DE DADOS	20
2.3.1 Estimativa dos Fluxos Turbulentos - Covariância dos Vórtices Turbulentos (CV)	20
2.3.2 Análise de Dados de Sondagens	22
2.3.3 Classificação de dias com Brisa do rio Tapajós	23
CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DA ÁREA DE ESTUDO	25
3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE CIRCULAÇÃO REGIONAL E LOCAL	25
3.2 CIRCULAÇÃO SOBRE ÁREA DE INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS	33
3.3 OCORRÊNCIA DE BRISA DO RIO TAPAJÓS (BRT)	34
3.4 ALTURA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS	38
CAPÍTULO 4 - MECANISMOS DE BRISA DO RIO TAPAJÓS	45
4.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA	45
4.2 TEMPERATURA DO AR	47

CAPÍTULO 5 - INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE AS MEDI-	
DAS NA FLONA	59
5.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA	59
5.2 UMIDADE ESPECÍFICA	59
5.3 TEMPERATURA DO AR	64
5.4 SONDA GENS NA BAIXA TROPOSFERA: INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE A UMIDADE E TEMPERATURA	71
5.5 RADIAÇÃO INCIDENTE	76
5.6 CHUVA	79
5.7 FLUXO DE ENERGIA	82
5.7.1 Fluxo de Calor Sensível (H)	82
5.7.2 Fluxo de Calor Latente (LE)	84
5.8 FLUXO E CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	88
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICES	100

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 INTRODUÇÃO

Estudar os processos que regem as interações entre superfície e atmosfera é essencial para compreender a dinâmica da Camada Limite Atmosférica (CLA), tornando assim seus fenômenos mais previsíveis ou melhor compreendidos. A CLA é a parte mais baixa da atmosfera onde acontece grande parte dos fenômenos físicos de troca de energia, massa e momento. É nesta camada que a sociedade humana se desenvolve e os fenômenos atmosféricos (clima e tempo meteorológico) interagem continuamente com ela.

Nesta área do conhecimento são necessários estudos para compreender de que maneira a heterogeneidade superficial estabelece os padrões de troca de energia e massa no tempo e no espaço. Um dos fatores que contribuem para que essa interação (biosfera-atmosfera) seja complicada de se entender é a dificuldade matemática intrínseca no estudo da dinâmica de fluidos, dominada, principalmente, pelo escoamento turbulento sobre superfícies heterogêneas.

Na Amazônia, que é composta por um mosaico de ecossistemas de diferentes características, o desafio se torna maior, visto que trabalhos que estudam a interação biosfera-atmosfera de maneira integrada não cobrem o vasto território, são escassos e por muitas vezes apresentam estudos de casos que são tomados como padrão para uma vasta área e assim geram grandes incertezas nos resultados de modelos atmosféricos de previsão de tempo e clima.

A região do baixo rio Tapajós, mais especificamente a Floresta Nacional do Tapajós (FNT), tem sido celeiro de diferentes estudos, como por exemplo do Programa de Larga Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), que ocorrem há quase duas décadas. Estes estudos produziram centenas de artigos científicos importantes em revistas internacionais da área e muitas das vezes introduzem a ideia de que a FNT pode representar um padrão para todo o Leste Amazônico (SALESKA et al., 2003; ROCHA et al., 2004; HUTYRA et al., 2007b).

Os trabalhos produzidos na região da FNT são de grande impacto, mas será que a FNT pode ser representativa para todo o Leste Amazônico? Algumas produções científicas têm se preocupado em verificar, por exemplo, se a circulação local, como o efeito da brisa do rio Tapajós, pode afetar os resultados medidos sobre a FNT, como mostrado por Silva Dias et al. (2004), Lu et al. (2005) e Fitzjarrald et al. (2008). Nesse contexto, essa proposta visa, de maneira integrada, analisar, caracterizar e descrever a circulação atmosférica na região do Baixo Tapajós e as influências sobre as medidas meteorológicas na FNT. Considerando os aspectos de circulação atmosférica local, pretende-se descrever de que maneira as características termodinâmicas de uma determinada região são influenciadas pela brisa do rio Tapajós.

A área de estudo deste trabalho é caracterizada pela confluência dos rios Amazonas e

Tapajós e do planalto Santareno. Devido a presença dos rios Amazonas e Tapajós, a dinâmica da CLA se torna diferenciada de qualquer outro lugar, podendo ser mecanismo principal regulador não apenas do clima, mas também da circulação local e regional, controlando a formação de nuvens, disponibilidade e característica da radiação solar para a superfície e na distribuição espacial e temporal de chuvas nesta região (COHEN et al., 2014; FITZJARRALD et al., 2008). Estas questões ainda não são bem conhecidas e necessitam ser explicadas. Sendo assim, deve-se explorar a interação/correlação entre variáveis e, principalmente, adotar métodos e técnicas de análise de dados de longo termo levando em conta o fenômeno da brisa, contrastes dinâmicos e termodinâmicas da CLA.

Para este trabalho, pretende-se utilizar o conjunto de dados já existentes provenientes do Projeto LBA, de outras bases de dados disponíveis de campanhas de medidas e de órgãos governamentais. Por outro lado, a verificação dos métodos mais adequados de análises mostrará as dificuldades, e possíveis falhas e erros nas medidas. Isso deverá indicar melhorias a serem feitas no que concerne a metodologia de medida, aquisição e análises de dados, além de apontar onde e/ou quais medidas complementares deverão ser feitas futuramente para o desenvolvimento e avanços nas áreas de estudo envolvidas.

Em termos de transferência de conhecimento para a sociedade, espera-se que os resultados obtidos nesse estudo indiquem a dimensão, ainda não existente, sobre os aspectos do comportamento físico-atmosférico local. A partir dessa base científica, será possível expor as principais influências sofridas pelo sistema biosfera-atmosfera local e deverão ser de grande utilidade para melhoria dos modelos de tempo/clima e para representar mais detalhadamente e realisticamente as condições e fenômenos atmosféricos local e regional. Não obstante, espera-se também que outros setores da sociedade possam se valer dos resultados deste estudo como argumento científico nas tomadas de decisões para o melhor desenvolvimento sócio-econômico-ambiental da Amazônia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar e determinar as influências da brisa do rio Tapajós, na região da Flona Tapajós, sobre a camada limite atmosférica local.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar a circulação atmosférica na região da Flona Tapajós, mais especificamente a brisa do rio Tapajós;
2. Compreender os mecanismos físicos responsáveis pelo funcionamento da brisa do rio Tapajós;

3. Analisar a influência da brisa do rio Tapajós sobre as medidas meteorológicas (Umidade, Temperatura, Radiação, Chuva) e micrometeorológicas (Fluxos de Energia e Dióxido de Carbono) sobre a Flona Tapajós.

1.3 REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1 Camada Limite Atmosférica

Camada Limite Atmosférica (CLA) é a parte mais rasa da troposfera, onde se concentram a maior parte dos gases que formam a atmosfera e é também onde ocorrem grande parte dos fenômenos de troca de massa, energia e momento. Na CLA os efeitos da superfície são sentidos diretamente e com mais intensidade, sendo o primeiro, o efeito de caráter dinâmico, causado pelo atrito do vento exercido pela superfície, e o segundo o efeito térmico, decorrentes do aquecimento da superfície devido à radiação solar.

Além desses dois fatores, e levando em consideração os aspectos locais e temporais, é possível determinar a espessura da CLA que varia de alguns quilômetros em condições de alta convectividade, até centenas de metros, condição de alta estabilidade (WALLACE e HOBBS, 2006), como mostrado na **Figura 1**:

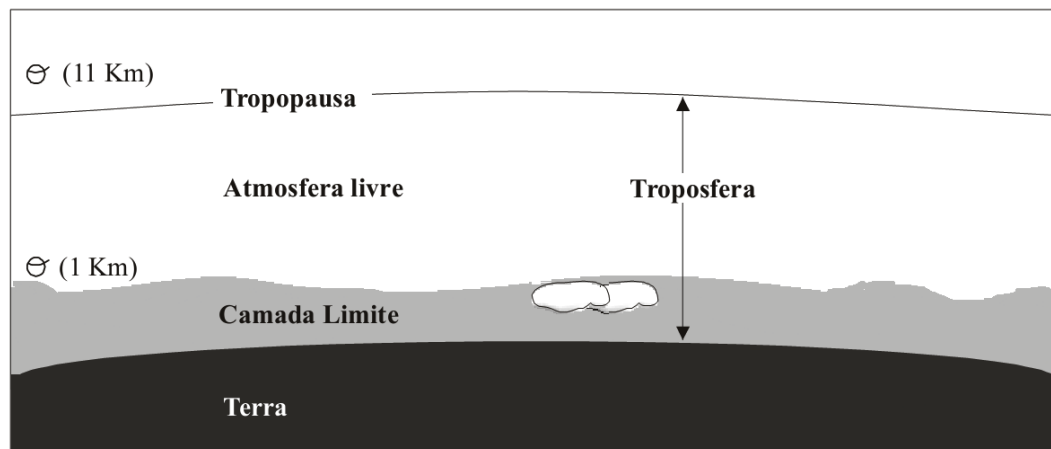


Figura 1 – Corte vertical mostrando a Terra e a troposfera (adaptado de STULL, 1988).

A espessura da CLA é influenciada por características como cobertura superficial, cobertura de nuvens, umidade do solo, radiação solar, sazonalidade e outras que são peculiares para cada região e que geram os chamados movimentos turbulentos fazendo com aconteçam trocas de energia, momentum e massa. Assim, de maneira geral, a CLA depende diretamente da energia solar incidente na superfície, pois esta responde diretamente ao aquecimento e resfriamento, apresentando variação diária característica e crescimento contínuo durante o dia, atingindo máximos, entre 1 e 2 km, durante o início da tarde e ficando em torno de 100 metros durante a noite (STULL, 1988).

1.3.2 Circulação Atmosférica

O clima global é diretamente influenciado pelo movimento do ar na atmosfera. Esse processo, conhecido como Circulação Atmosférica Geral (CA) é gerado por variações geográficas do calor superficial causado pelos gradientes meridionais de insolação, variações no albedo e outros fatores, sendo responsável por transportar energia, na forma de calor, dos trópicos para os polos e distribuir essa energia pelo globo terrestre em geral (HARTMANN, 1994).

A descrição da CA inclui médias de vento, temperatura, umidade, pressão, dentre outros, além da variabilidade dessas quantidades e a covariância dos componentes do vento e outras variáveis associadas com o sistema climático de larga escala. Essa descrição tem sido construída ao longo das últimas décadas, a partir de dados diários de superfície, sondagens e satélites medidos por todos os lugares do mundo. Para Hartmann (1994), esse trabalho descritivo tem sido realizado por meio da resolução das equações de movimento da atmosfera (levando em consideração a maior quantidade de parâmetros físicos possíveis) em supercomputadores, nos quais têm gerado um modelo global para circulação atmosférica.

Visualizando os movimentos em larga escala na atmosfera, em um alto grau de aproximação, podemos dizer que o mesmo é horizontal, pois na direção vertical, o gradiente de pressão é quase equivalente a força da gravidade como mostra a **equação (1)**. Porém, vale a penas ressaltar a importância de movimentos verticais como a convecção para formação de nuvens de chuva e cisalhamento do vento devido a topografia, dessa forma, desconsiderando esses movimentos ascendentes, temos:

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \approx \rho g \quad (1)$$

de modo que se as acelerações verticais forem negligenciáveis, a componente vertical da velocidade é menor em todos os locais. Já na direção horizontal, a principal força na atmosfera livre são os gradientes de pressão e a força de Coriolis conduzindo para um quase equilíbrio geostrófico. Dessa forma, os movimentos podem ser considerados, em sua maioria, paralelos para a contornos de pressão (isóbaras) e a velocidade do vento é inversamente proporcional a esses contornos (**equação (2)**).

$$V_g = \frac{1}{\rho g} \kappa \times \text{grad}p \quad (2)$$

As isóbaras são, dessa forma, aproximadamente linhas de corrente para o fluxo para fora da região equatorial. De fato, os ventos na superfície tendem a ficar paralelos na altura das linhas de contorno com alta pressão no lado direito no Hemisfério Norte, e do lado esquerdo no Hemisfério Sul. Existe, assim, uma tendência por divergência do subtropical células alta-pressão e da região polar. Os efeitos não-geostrófico na forma de fluxo de baixa pressão e fluxo para fora de áreas de pressão são devido a fricção e efeitos turbulentos de pequena escala na camada limite.

O ângulo da deflexão é uma manifestação do quase balanço entre a força de pressão, força de fricção e força de Coriolis.

1.3.3 Circulação Atmosférica Local: Processo Físico e Equação de Circulação

A Circulação Atmosférica Local (CAL) é o movimento de ar termicamente induzido, resultante da diferença de cobertura superficial. Dentre os tipos de CAL podemos citar as brisas marítima/terrestre, lacustre/terrestre, rio/terrestre, vale/montanha e também devido a áreas de vegetação próximo a áreas desmatadas e/ou cidades.

O processo físico de formação de brisa marítima/terrestre ou de rio/terrestre é o mesmo: diferença na capacidade térmica entre as massas de água e a terra. Esse fenômeno ocorre com mais frequência em regiões tropicais do que em altas latitudes, devido a intensa energia radioativa recebida provocando grande convecção e fraca força de Coriolis (STULL, 1988).

Para o desenvolvimento da brisa (corpos d'água/terra), levamos em consideração as condições iniciais iguais para ambos corpos: Temperatura, Pressão e disponibilidade de energia (Radiação incidente). Devido a diferença de capacidade térmica, ou seja, a relação entre a quantidade de energia que o corpo recebe calor e a variação de sua temperatura, e considerando que os dois corpos recebem a mesma quantidade de energia radiativa, a variação de temperatura da terra e da água são distintas. Outro fator que influencia nessa diferença é o processo de convecção ocorrente na água, que é um fluido, e distribui mais eficiente a energia recebida na superfície.

Com a diferença de temperatura entre a terra, \bar{T}_2 (mais aquecida) e a água \bar{T}_1 , o ar diretamente acima dessas superfícies são aquecidos diferentemente, provocando uma expansão no volume de ar na terra maior que sobre a água. Essa expansão de ar diferenciada sobre as superfícies, provoca uma diferença espacial no campo de pressão acima dessa região (p_0 e p_1) resultando em uma zona de maior pressão sobre a água, fazendo com que exista uma circulação induzida no sentido água-terra (**Figura 2**).

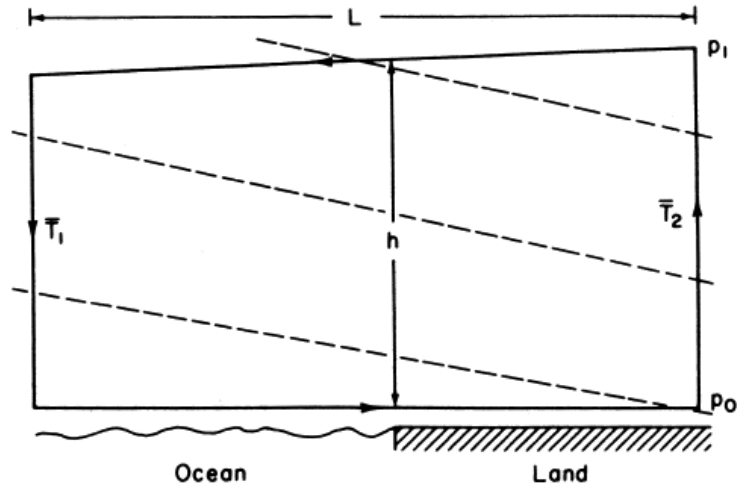


Figura 2 – Circulação de brisa no sentido corpos d'água-terra (adaptado de HOLTON, 2004). Linhas tracejadas indicam superfícies com densidades constantes.

Por fim, os movimentos verticais são induzidos em resposta ao ar em movimento horizontal. Na **Figura 2**, pode-se perceber que, em terra, por exemplo, o fluxo terrestre faz com que o ar se acumule em níveis mais baixos, enquanto que o fluxo em alto mar remove o ar de níveis mais altos. Como resultado, o ar sobe de níveis mais baixos para substituir o ar que está sendo removido de cima. Por outro lado, sobre a água, o ar desce de níveis mais elevados para substituir o ar que está sendo removido de níveis mais baixos. Estes movimentos ascendentes e descendentes completam a célula que compõe a circulação da brisa no sentido corpo d'água/terra.

Matematicamente e simplificadamente, podemos expressar o fenômeno de brisa como uma parcela de ar (fluido) em circulação, que é representada por uma medida escalar de rotação sobre uma área finita em duas dimensões (HOLTON, 2004). Pode-se, assim, definir a circulação C como sendo uma integral de linha sobre um contorno fechado dentro de um fluido com velocidade V , temos:

$$C \equiv \oint V \cdot ds \quad (3)$$

Onde ds representa a forma diferencial da distância ao longo da curva fechada, e considera-se por convenção, que o movimento positivo é em sentido anti-horário. Utilizando o teorema de Bjerknes para circulação, podemos reescrever a equação de circulação da seguinte forma (MILLER et al., 2003):

$$\frac{dC}{dt} = - \oint \frac{dp}{\rho} \quad (4)$$

Onde p [Pa] é a pressão atmosférica e ρ é a densidade [$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Aplicando o teorema de circulação (**equação (4)**) e a lei dos gases ideais, podemos substituir $\rho = pRT$, em que T [K] é a temperatura e R é a constante dos gases ideais para o ar seco ($287 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Integrando

ao redor do caminho fechado iniciando no continente (**Figura 2**) e usando o fato de que a linha integral sobre o círculo fechado de um perfeito diferencial é igual a zero, temos:

$$\frac{dC}{dt} = R(\bar{T}_1 - \bar{T}_2) \ln \frac{p_0}{p_1} \quad (5)$$

Onde p_0 é a pressão próxima a superfície e p_1 é a pressão próximo ao topo da célula de circulação [Pa], e T indica a média da temperatura de cada coluna vertical de ar (HOLTON 2004; MILLER et al., 2003).

Segundo Miller et al. (2003), para construção de um modelo físico completo, o sistema de brisa deve incluir os seguintes fatores: (1) Variação diurna da temperatura superficial, (2) Difusão do Calor, (3) Estabilidade Estática, (4) Força de Coriolis, (5) Difusão de momento, (6) Topografia, e (7) Vento predominante. Os dois primeiros são essenciais para a ocorrência da brisa, e o terceiro fator, que depende do movimento do ar sobre o continente (SIMPSON, 1994). A Força de Coriolis, qual não é importante pelas primeiras 6 horas, é responsável pela produção da rotação horizontal da brisa no tempo e dessa forma se estende para dentro do continente (NEUMANN, 1977). Difusão do Momento é importante para a produção do perfil de vento observada próximo a superfície, que é o mais importante freio no desenvolvimento da circulação, e evita que o sistema de brisa produza velocidades muito elevadas como previsto pelo Teorema de Circulação de Bjerknes (**equação (4)**). A topografia tem sido fator imprescindível e que revela grandes influências sobre a brisa e deve ser correlacionado a fundo com o fenômeno.

Como mostrado anteriormente, o fenômeno de brisa é muito complexo e leva em conta diferentes variáveis que interagem interdependente entre si. Dessa forma, deve-se ter grande cuidado na explicação do fenômeno e levar em consideração os diferentes fatores que influenciam na ocorrência, intensidade e extensão da brisa, por exemplo. Assim, são apresentados alguns resultados de estudos realizados em diferentes regiões mostrando o processo de interação da superfície-atmosfera e também sobre o fenômeno de brisa.

1.3.4 Estado da Arte

O comportamento complexo da Camada Limite Amazônica, suas interações com os tipos de superfície, convecção atmosférica e circulações de mesoescala, têm motivado estudos nas últimas décadas (MARTIN et al., 1988; FISCH et al., 2004; ACEVEDO et al., 2004 e 2008).

Segundo Rocha et al. (2009), a CLA é caracterizada diretamente pela partição de energia, que por sua vez é controlada principalmente por dois fatores: pela disponibilidade de água para evapotranspiração, que regula o armazenamento de água no solo, e pela cobertura vegetal. Além desses fatores, a sazonalidade, circulações de Meso e Grande-escala são responsáveis para a determinação da evolução da Camada Limite Amazônica (BETTS et al., 2009). Martin et al., (1988) mostram que apesar da grande variabilidade, as alturas médias da Camada Limite

Convectiva (CLC), ocorrente durante o dia, na bacia Amazônica atingem valores médios próximos a 1250 metros, e a Camada Limite Noturna (CLN), muito mais rasa, cerca de 250 metros, como mostra a **Figura 3** a seguir:

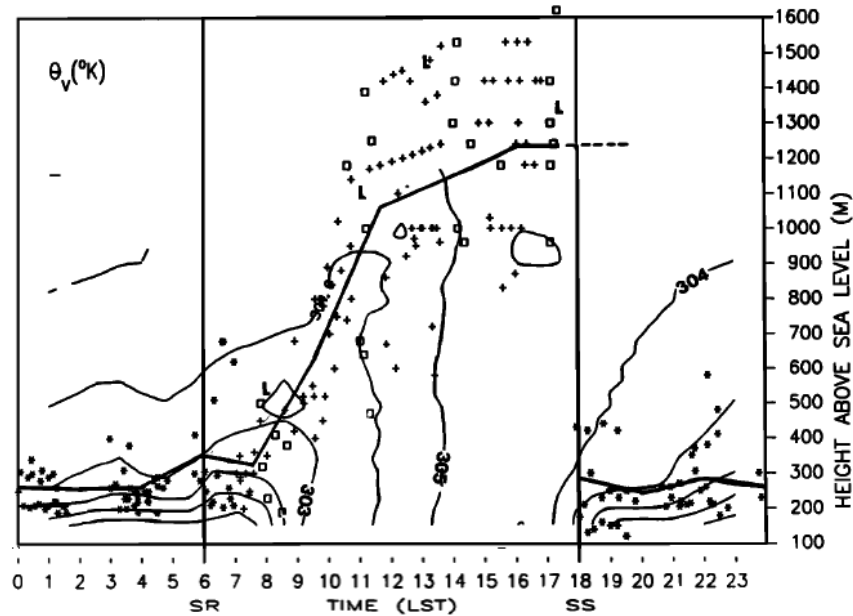


Figura 3 – Evolução horária da CLA na região Amazônica (adaptado Martin et al., 1988)

Em experimento realizado em Rondônia em 1999, Fisch et al. (2004) apresentaram resultados que comprovam as grandes diferenças entre valores encontrados na profundidade da CLC para a área de floresta (média de copa de 33 metros) e pastagem (*Brachiaria brizantha*). No período seco os fluxos de calor sensível na pastagem são altos e muito acima dos valores encontrados na floresta, criando uma CLC ao redor de 1650 metros, 550 metros mais profunda comparado com a CLC sobre floresta. Durante a estação chuvosa, a altura de CLC fica em torno de 1000 metros tanto para floresta como para pastagem, com temperatura e umidade do ar semelhantes para as duas áreas, mostrando que a disponibilidade de água na atmosfera e no solo são importantes para o desenvolvimento da CLA, impactando na altura da CLC.

Comparando o crescimento da CLC durante as estações seca e chuvosa nos dois sítios citados acima, na pastagem a altura da CLC sempre é mais alta do que na floresta, porém na estação seca as diferenças aumentam e ficam entre 300 e 600 metros (FISCH et al., 2004). Isto acontece devido à partição de energia de superfície, visto que o fluxo de calor sensível é duas vezes maior na pastagem (seca), fenômeno causado pelo baixo nível de evapotranspiração, e umidade no solo, significando que mais energia retornará para a atmosfera, sendo mais baixa na forma de calor sensível em vez de fluxo de calor latente.

A estrutura e desenvolvimento da CLA depende das características superficiais como comentado anteriormente. Outros fatores, externos, como por exemplo a ocorrência de brisas, também podem alterar as características termodinâmicas da CLA. Sobre isso, será feito aqui

uma breve citação de alguns resultados de trabalhos importantes sobre brisa e influências sobre a CLA.

Os primeiros estudos sobre a dinâmica de brisas mostram os aspectos teóricos aplicados sobre o fenômeno, motivados pela influência da brisa sobre a velocidade do vento, clima, atividade convectiva e qualidade do ar (ANGELL e PACK, 1965; NEUMANN e MAHER, 1971; BARBATO, 1975; NEUMANN, 1977; SHAIR et al., 1982; PIELKE, 1985; KALTHOFF et al., 2002). Os diferentes estudos mostraram que dependendo das características geográficas e de cobertura superficial, a brisa marítima pode adentrar a faixa continental de centenas de metros à centenas de quilômetros. Em relação a verticalidade dessa brisa, geralmente está dentro das centenas de metros das camadas mais próximas a superfície, mas em alguns casos pode chegar até um ou dois quilômetros, com movimentos ascendentes de $0,5$ a $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (STULL, 1998).

Devido a grande abrangência do estudo ao redor do mundo, muitos resultados importantes foram produzidos a partir do estudo da brisa marítima. Segundo Simpson (1994) e Baker et al. (2001), as linhas costeiras convexas indicam forte convergência e conseqüentemente maior movimento vertical na brisa marítima, e linhas costeiras côncavas, o inverso. Ressaltando que a presença de zonas de convergência são comuns nas proximidades de baías, penínsulas e foz de rios, que são áreas com linhas costeiras, em sua maioria convexas.

No Nordeste do Brasil, Cavalcanti e Kousky (1982) estudaram a precipitação associada à brisa marítima e verificaram que a brisa do oceano tende a intensificar os movimentos convectivos, empurrando as nuvens de chuva mais adentro do continente. Já em estudo na cidade de São Paulo, a estabilidade é o fator que regula a intensidade da brisa, deixando a brisa no sentido oceano-continente mais intensa que a brisa continente-oceano (OLIVEIRA e SILVA DIAS, 1982).

Uma ferramenta importante para o estudo de brisa é a modelagem numérica que, tem se tornado mais completa ao longo do tempo e conseqüentemente mais precisa. A partir de um modelo de brisa de oceano-continente, é possível verificar as relações do fenômeno e de alcance da brisa marítima sobre o continente. Usando simulações numéricas, Silva Dias, Vidale e Blanco (1995) chegaram a conclusão que a localização geográfica e a proximidade do mar implicam em uma resultante de vento que influencia o transporte e mistura de constituintes atmosféricos na troposfera.

As brisas de rio e lago também têm sido estudadas em menor quantidade, devido a escala do fenômeno comparada a brisa de oceano. Porém, essas brisas exercem um importante papel na dinâmica atmosférica da região ribeirinha, alterando os padrões de vento regidos pela escala sinótica, induzindo convecção e adveção de umidade para as localidades que circundam o rio.

Em um estudo pioneiro, sobre brisa de rio, realizado por Oliveira e Fitzjarrald (1993), mostraram que a existência da brisa fluvial do Rio Negro, próximo a Manaus, tem uma extensão horizontal em torno de 20 km para o interior do continente e extensão vertical de cerca de 500

m. A brisa fluvial possui o sentido floresta/rio durante a noite e início da manhã, revertendo o sentido (rio/floresta) durante a tarde e início da noite. Neste trabalho pioneiro, verificaram que as diferenças de temperatura entre floresta e rio era de 6°K durante o dia e -3°K durante a noite, fator esse que alimentava tanto a brisa do rio quanto a brisa da floresta.

Nogueira (2008) correlacionou a influência da brisa noturna com a origem dos jatos de baixos níveis sobre a região de Caxiuanã, na Amazônia Oriental. Neste local, devido à presença da baía (Baía de Caxiuanã – cerca de 10 km de largura), há uma facilitação da convergência nas suas margens em direção a superfície continental. O fenômeno ocorre naturalmente todos os dias no final da tarde e/ou início da noite, devido a diferença de temperatura entre a copa da floresta (mais frio) e a água da baía (mais quente), caracterizando a brisa terrestre.

Na região de Santarém, na confluência dos Rios Tapajós e Amazonas, alguns trabalhos envolvendo circulação atmosférica e suas influências foram desenvolvidos nos anos 2000. Resultados apresentados por Silva Dias et al. (2004) e Lu et al. (2005) utilizando dados do projeto “*Circulation in Santarém*” (CIRSAN/LBA), em campanha realizada nos meses julho e agosto de 2001, mostraram que durante os episódios de ventos alísios fracos, a brisa do Rio Tapajós realmente induz um fluxo oeste para a margem leste. A maioria das sondagens em Belterra mostram ventos de oeste em uma camada com altura de 400-500 metros de profundidade. Além disso, quando o vento zonal não invertia, o perfil de vento indicava uma considerável redução nos ventos alísios (SILVA DIAS et al., 2004, D’AURIA, 2004).

Medidas feitas no aeroporto de Santarém, na confluência dos Rios Amazonas e Tapajós, mostram que devido à circulação local e a proximidade dos rios, a CLA próximo a borda dos rios é influenciada, indicando que a mesma é convectiva durante o período noturno e diurno. Os resultados apresentam uma inversão térmica entre 400-500 metros durante a noite, que são consistentes com LCL (nível de condensação de nuvens), e aproximadamente 1100 metros durante o dia (SILVA DIAS, 2004).

Outro aspecto analisado, por Fitzjarrald et al. (2008), foi a variabilidade diurna do padrão da chuva, em função da distância do rio. Próximo ao rio a chuva é predominantemente noturna, enquanto mais no interior do continente ela ocorre tanto no período noturno, associada à passagem das Linhas de Instabilidade (LI), como no período vespertino devido à convecção local.

D’Auria (2004), também analisando os dados do projeto CIRSAN, mostrou que as brisas do Tapajós e Amazonas são fatos importantes na circulação da região do baixo Tapajós, indicando horários para ocorrência das mesmas em diferentes pontos. Outro fato importante é que as observações indicaram que a brisa do rio carrega umidade em direção à floresta, medidas confirmadas pelos dados das estações meteorológicas durante o CIRSAN.

Por outro lado, Tapajós et al. (2013), em trabalho mais recente, durante campanha de medidas na borda leste do Rio Tapajós, em Jamaraguá, realizada em junho de 2011, não encontraram padrões de horário para início da brisa do rio Tapajós, porém verificaram a ocorrência

em cerca de 50% dos dias estudados e que a mesma tem duração de duas ou mais horas. A circulação local, próximo ao rio Tapajós, devido à brisa de rio é peculiar pela formação de uma Camada Limite Interna (CLI) com características vindas do rio. A CLI é uma camada de ar sobre uma área com características de outras áreas e com sondagens realizadas no mesmo período, foi possível verificar que a altura da CLI varia muito, dependendo da ocorrência, indo de 200 até acima de 400 metros (TAPAJÓS et al., 2013).

Modelos, a partir de dados observacionais da região de estudo, também foram explorados por meio do Regional *Atmospheric Modeling System* RAMS (SILVA DIAS et al., 2004; LU et al., 2005; SAAD et al., 2010, D'AURIA, 2004). Lu et al. (2005) indicam que justaposição formada dos rios Amazonas e Tapajós, o contraste de rugosidade superficial entre a floresta e os rios de grande porte, e a topografia regional, tendem a facilitar a mudança de direção dos ventos de níveis mais baixos desde o Amazonas até o Tapajós. O fluxo norte, canalizado ao longo do Rio Tapajós, produz uma convergência com o direcional leste, e a linha resultante dessa convergência produz movimento ascendente alcançando entre 1,5 e 2 km de elevação, sendo estes forçantes mecânicos na subida de nuvens *cumulus* e aumento, às vezes, da precipitação.

Para Silva Dias et al. (2004), a formação de nebulosidade vista a leste do rio Tapajós, sobre a FLONA Tapajós, por meio de imagens de satélite, são resultado da supressão da nebulosidade na borda do rio, devido a brisa, faz com que haja formação de nuvens mais adentro, a leste do rio. D'Auria (2004), confirmou os resultados de Silva Dias (2004), a partir de simulações, mostrando que essa formação de nuvens ocorre principalmente em casos em que o solo se encontra mais seco. De acordo com D'Auria (2004), a formação de nebulosidade está em torno de 1200-1800 metros de altura sobre o lado leste do Rio Tapajós.

Outro fator que deve influenciar a circulação atmosférica na região de confluência dos rios Amazonas e Tapajós, são áreas desmatadas para uso agrícola ou pastagem. A diferença de temperatura nessas áreas pode influenciar na climatologia e circulação local, provocando uma *brisa de vegetação* (ou *de desmatamento*), formação de CLI e assim interferir nos padrões de chuva, fluxos de energia, temperatura e vento. Nesse sentido, alguns resultados de simulações feitas com intuito de verificar essas influências, na região de influência da BR163, foram realizados, levando em consideração áreas desmatadas, floresta e o rios (GANDU et al., 2004; SAAD et al. 2010).

Os resultados de Saad et al. (2010) mostraram que a brisa fluvial não é influenciada pelos efeitos causados pelo desmatamento. Contudo, foi observado que os efeitos do desmatamento e umidade do solo influenciam as características termodinâmicas da atmosfera, mostrando que no período seco essas influências são maiores. As simulações indicam que a área desmatada causa aumento de chuva no sentido de alinhamento dos ventos locais (vento-abaxo), ventos esses que são intensificados, e diminuição no sentido oposto (vento-acima). Além disso, modificações na CLA foram marcadas pelo aumento da razão de Bowen, causando uma bolha quente e seca até 1000 metros e logo acima uma camada de umidade. Esse fato, levando em consideração

uma escala regional sustenta a hipótese da formação de uma CLI, com características de áreas antropizadas, sobre a Flona Tapajós.

Apesar da representatividade dos modelos, alguns resultados de simulação da circulação atmosférica na região não foram bem assimilados, comparados com os dados de sondagens e estações, como é possível verificar em Lu et al. (2005) e D'Auria (2004). Isso deve ocorrer devido a resolução espacial e falta de sensibilidade do modelo com as características intrínsecas do local, que é uma região composta por um mosaico de superfícies com particularidades que devem ser estudadas mais detalhadamente.

CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA

2.1 REGIÃO DE ESTUDO

A região do Baixo Tapajós, oeste do Estado do Pará, tem como principal cidade Santarém, com cerca de 300.000 habitantes e localizada na Mesorregião do Baixo Amazonas, mais especificamente na confluência dos rios Tapajós e Amazonas (**Figura 4**).



Figura 4 – Região do Estudo, com destaque para Flona Tapajós, Rios Amazonas, Curuá-Una e Tapajós, e também a cidade de Santarém (ICMBio, 2017).

O rio Tapajós, é o quinto principal tributário do rio Amazonas, nasce no estado do Mato Grosso a partir da união dos rios Teles Pires e Juruena, tem uma extensão de cerca de 2.700 Km, com vazão média de $13.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (LATRUBESSE et al., 2005). O rio é classificado como águas claras, carregando pouco sedimento, com pH variando de 4.5 a 7.8, e atinge os maiores níveis nos meses de março e abril e mínimo entre setembro e outubro (HALES E PETRY, 2013). Outro fato importante é que a largura desse rio, que chega a aproximadamente 20 Km próximo a sua foz, essa largura considerável faz com que exista o fenômeno de brisa, principal objeto que será estudado nesse trabalho.

No lado oeste da BR-163 e a leste do Rio Tapajós, localiza-se a Floresta Nacional do Tapajós (FNT), criada em 1974 e com cerca de 527 mil hectares, e fica dentro dos limites do município de Belterra (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, 2017). O ICMBio aponta a FNT como Floresta Nacional com maior número de pesquisas científicas em andamento no Brasil (dados de 2014), estas em diferentes áreas, envolvendo Fauna, Flora, Aspectos Sociais e Processos de Interação Biosfera-Atmosfera. Esta última área sendo liderada pelo Programa de Larga Escala Biosfera Atmosfera (LBA) que se instalou na região da FNT desde o final dos anos 90 tem produzido muitos resultados relevantes em relação ao Ciclos Biogeoquímicos e Interação Biosfera-Atmosfera..

A localização das estações, locais de medidas e topografia da área de estudo é mostrada na **Figura 5**. A base de dados para a elaboração do mapa é a Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) datum WGS-84 e com resolução de 90 metros (EMBRAPA, 2017).

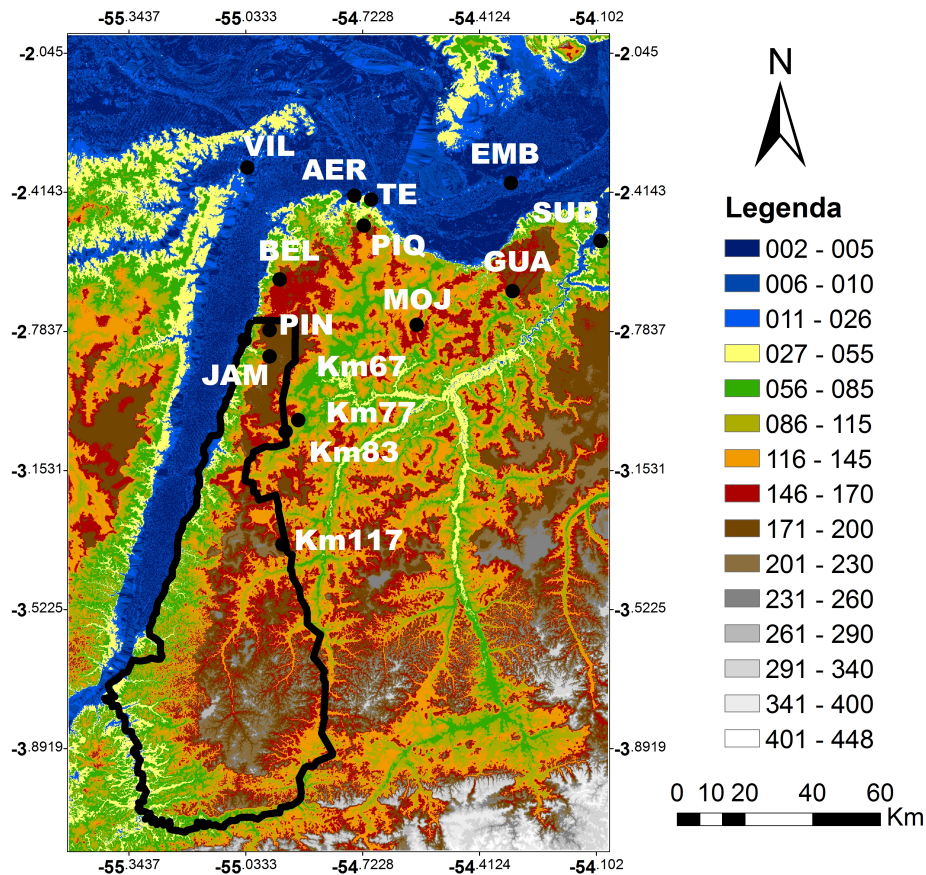


Figura 5 – Área do estudo (com níveis topográficos) com localização dos Rios, sítios de pesquisa, estações meteorológicas e locais de sondagens na baixa troposfera.

Dando ênfase aos locais de medidas ficam dentro ou próximo a área da FNT, é possível verificar que a FNT está em localizada em um divisor de bacias hidrográficas, do rio Tapajós e Rio Curuá-Una como mostra a **Figura 5**. Assa topografia é um dos fatores avaliados por Lu et al. (2005) que influência na circulação local, devido a canalização do vento pela justaposição dos rios Amazonas e Tapajós, no qual o lado oeste do Rio Tapajós possui maiores elevações que

facilitam o cisalhamento e canalização dos alísios. Verificando a topografia de toda a região, a irregularidade da superfície deve influenciar diretamente nas medidas feitas nos diferentes locais apresentados, e estas serão analisadas nos resultados. Em uma análise mais detalhada sobre a topografia da FNT, é verificado que existem grandes elevações, de até 200 metros dentro da Flona, com grandes áreas elevadas e declividades ao sul, como apresentado por Santos et al. (2017).

No que diz respeito a cobertura superficial, o estudo recente sobre a área de influência da BR-163 na cobertura do solo de Machado (2017) traz detalhes sobre os diferentes tipos de cobertura na região de estudo. A **Figura 6** mostra a FNT, áreas antropizadas a leste com áreas agrícolas, pastagem e floresta secundária. Ao Norte, em vermelho, a cidade de Santarém, e dentro da delimitação pela linha preta, bem menor, a cidade de Belterra.

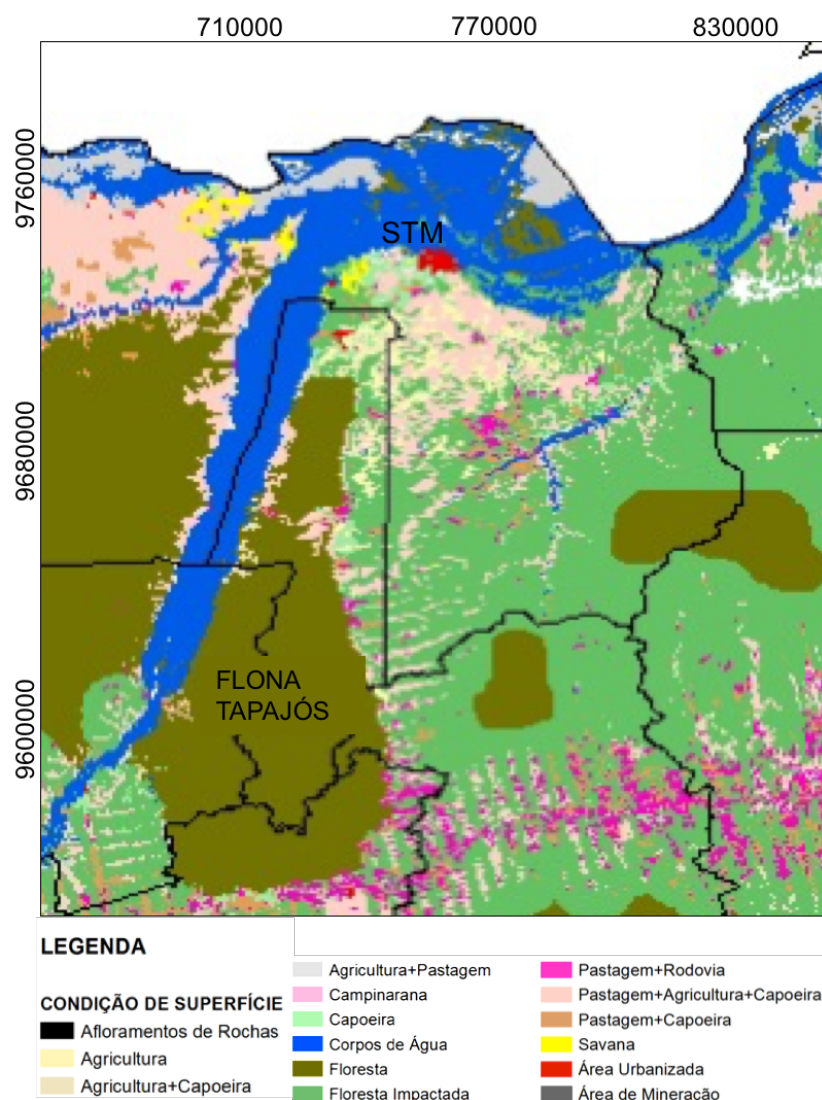


Figura 6 – Cobertura da superfície na região de estudo para o ano de 2014 (adaptado de MACHADO, 2017).

Para melhor entendimento sobre a distribuição dos dados, as medidas foram divididas em três partes, explicadas adiante, porém vale ressaltar que a maior parte dos dados utilizados aqui, foram processados e disponibilizados pelos grupos de pesquisa responsáveis.

2.2 LOCAIS DE MEDIDAS E DADOS

2.2.1 Torres Micrometeorológicas

As torres micrometeorológicas têm a característica específica de fazer medições em alta frequência (5-10Hz), composta basicamente de um sistema “*Eddy Covariance*” (analisador de gás por infravermelho e um anemômetro sônico 3D) para estimar os fluxos de energia e massa. Além disso, são feitas medidas de baixa frequência de variáveis meteorológicas (temperatura, umidade, radiação, pressão, precipitação, velocidade e direção do vento) e gases (vapor d’água e dióxido de carbono). A seguir a breve descrição dos sítios de pesquisa.

a. Sítio km 67 (Sítio de Floresta Primária)

O sítio de pesquisa está localizado na FNT (2°51’S, 54°58’W) e possui instrumentação instalada desde julho de 2000. A torre de 64 metros de altura está, aproximadamente, 10 km à Oeste da rodovia (**Figura 5**), dentro da área onde a copa é fechada, sendo composta por grandes árvores de 40 metros em média e de emergentes, até 55 m de altura. A descrição minuciosa dos instrumentos disponíveis e dados é feito por Hutyra (2007a). Os dados utilizados foram de 2001 à 2012 e foram processados pelo grupo de pesquisa da Universidade do Arizona/EUA (Hutyra et al. 2008) como descrito em Hutyra et al. (2007b) e Restrepo-Coupe et al. (2013). Para este estudo, foram usados os dados de vento e concentrações de dióxido de carbono e água provenientes sistema *Eddy Covariance* (descrito por Hutyra et al., 2007b e Restrepo-Coupe et al., 2013), e de sensores de temperatura e umidade localizados a cerca de 58 metros do solo, cerca de 17 metros acima da copa das árvores. Os dados de radiação utilizados aqui compreendem o período de 2001 a 2005, no qual o sensor foi instalado a cerca de 64 metros do solo, no topo da torre.

b. Sítio km 83 (Sítio de Floresta Manejada)

O sítio do km 83 (3°01’3”S, 54°58’14,9”W) localiza-se também na FNT, estando, aproximadamente, 5 km da rodovia à altura do km 83 (**Figura 5**). A vegetação é de floresta tropical fechada com copa emergente (comprimento de copa 35-40 m) em terreno de planalto, se distanciando, ao norte, 18 km do sítio km 67, e a oeste, 14 km do rio Tapajós. A instrumentação da torre de 64 metros foi instalada em junho de 2000 (MILLER et al., 2004), ficando em funcionamento até 2010, porém os dados utilizados são de 2000 à 2005 disponibilizados por Miller et al. (2009). Similarmente ao sítio do Km67, os dados de vento e concentrações de dióxido de carbono e água utilizados aqui são do sistema *Eddy Covariance*, localizado a 64 metros acima do solo, a localização do sensor de radiação, temperatura e umidade também estão localizados a mesma altura.

O corte seletivo foi manejado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e executado por uma companhia comercial (Fazenda Treviso/MAFLOPS). O manejo ocorre desde 1999, onde 3200 hectares de floresta primária

foram exploradas com baixo impacto, cujo objetivo foi minimizar danos à floresta através de um cuidadoso planejamento das atividades relacionadas com a exploração madeireira com inventário florestal de 100% das árvores com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) acima de 35 cm, corte de cipó, escolha prévia das árvores exploradas, planejamento dos ramais e pátios, planejamento da queda das árvores, utilização de trator florestal e planejamento da sua entrada para minimizar danos e compactação do solo.

Na área onde está a torre de fluxo, o manejo ocorreu em três fases no ano de 2001: a primeira fase em agosto, onde derrubaram poucas árvores próximas à torre; a segunda fase ocorreu em setembro, envolvendo corte nos blocos de 1 km para leste, 0,1 km oeste, 0,1 km norte e 0,7 km sul da torre de fluxo; e a terceira fase ocorreu entre novembro e dezembro de 2001, e envolveu blocos de corte que estenderam de 1 a 3 km leste e norte da torre de fluxo completando os 18 ha que faltavam (FIGUEIRA et al, 2008).

c. Sítio km 77 (Sítio de Campo Agrícola)

Instalada na Fazenda Paraíso (3°01'11,4"S, 54°53'39,3"W), na altura do km 77 (**Figura 5**), a leste da Rodovia Santarém-Cuiabá, no final do ano 2000, a torre de fluxo de 20 metros de altura, monitorou transformações ocorridas devido o uso do solo entre os anos de 2000 e 2005 como mostra a **Tabela 1**:

Tabela 1 – Condições de superfície entre os anos de 2000 a 2005.

Condição de Superfície	Período	
	Data Inicial	Data Final
Pastagem	set/00	nov/01
Arado	nov/01	fev/02
Arroz	fev/02	jun/02
Descanso	jun/02	dez/02
Arado	dez/02	jan/03
Arroz	jan/03	mai/03
Arado	mai/03	mai/03
Soja	mai/03	set/03
Descanso	set/03	jan/04
Arado	jan/04	jan/04
Arroz	jan/04	abr/04
Arado	abr/04	mai/04
Soja	mai/04	set/04
Descanso	set/04	mar/05
Arado	mar/05	mar/05
Soja	abr/05	ago/05
Descanso	ago/05	dez/05

A instrumentação é descrita por Sakai et al., (2004) e os dados foram preparados e disponibilizados por Fitzjarrald e Sakai (2010). Como os sensores de vento foram instalados em diferentes alturas da torre de fluxo, foi utilizada as medidas feitas pelo anemômetro sônico 2D

(ATI, modelo CATI) à 12 metros, e quando estava indisponível, foram substituídos por dados do sensor (anemômetro sônico 3D - ATI, modelo SATI/3K) logo abaixo à 8.3 metros.

2.2.2 Estações Meteorológicas

Além das três torres para medidas citadas acima, nove estações meteorológicas automáticas de superfície, do antigo Projeto LBA, registraram dados a cada 30 minutos na região de estudo (algumas desde o ano 1998), nas localidades de Belterra, Jamaraquá, Mojuí dos Campos, Guaraná, Km 117, Curuá-Una, Vila Franca, Cacoal Grande e na cidade de Santarém (**Figura 5**). Esta rede de estações de superfície é padronizada e possuem os sensores de Temperatura e Umidade (Vaisala - HMP45C) (à 2 metros), Radiação (Licor - LI200X) (à 9 metros), Precipitação (Texas - TE525) (à 0,5 metros), Velocidade e Direção do Vento (MetOne - 034A-L) (à 9 metros), Temperatura do Solo (Campbell Sci. - 107) (à -0,05 e -1,0 metros) e Umidade do Solo (CampbellSci - CS615) (à -0,2 metros). Foram utilizados dados disponibilizados por Fitzjarrald et al. (2009) de 1998-2006 e de 2007-2011 pelo Banco de dados do Laboratório de Ciências Atmosféricas/UFOPA.

Complementando os dados acima citados, as estações do Aeroporto Santarém de 1997-2015 (INFRAERO - <http://weather.gladstonefamily.net/>) e do 8º Batalhão de Engenharia e Construção de 2015-2016 (INMET-A250 – www.inmet.gov.br) também foram inseridos no banco de dados para melhor entendimento da circulação atmosférica.

2.2.3 Sondagem na Baixa Troposfera (SBT)

Adicionalmente às medidas realizadas simultaneamente pelas torres micrometeorológicas e estações meteorológicas, existem dados complementares disponíveis de campanhas de curto período de sondagens na baixa troposfera realizadas na região de estudo, que ocorreram nos anos de 2009, 2011 e 2016. Os métodos de sondagem foram através de Balão Cativo, como descrito por Acevedo et al. (2004), Balão Piloto e Radiosondagens, descritos por Silva Dias et al. (2004) e preparados por Silva Dias et al. (2012), e Balão Lagrangiano (CMET-2016). As variáveis básicas medidas foram: temperatura (T), umidade (U), pressão (P), velocidade (VV) e direção do vento (DV).

Os Balões Meteorológicos Controlados (*Controlled Meteorological Ballons* -CMET - ou aqui também chamados de balões Lagrangianos) são balões leves (< 1 kg), fáceis de lançar e controlar a altitude, além de longa duração de voo. O sistema de medida e de controle de altitude é descrito detalhadamente por Voss et al. (2012), e possui modem, via satélite, para recepção dos dados da localização do balão, além de sensores medindo temperatura e umidade.

Na campanha CMET-2016, foram feitos nove lançamentos (disponível em <http://websci.smith.edu/cmet/>), entre os dias 24 e 28 de agosto de 2016, da Hidrelétrica de Curuá-Una, a 70 km da cidade de Santarém, com objetivo de verificar, em baixas altitudes, o fenômeno de Brisa

do rio Tapajós sobre a Flona Tapajós. A **Tabela 2**, a seguir, contém os detalhes do local (**Figura 5**) e período das campanhas:

Tabela 2 – Sondagens de Baixa Troposfera ocorridas entre 2001 e 2016.

Local	Período	Método	Variáveis	Projeto
Belterra	25/Jul. a 15/Ago. 2001	Radiossonda	T, U, P, VV, DV	LBA/CIRSAN
Aer. Santarém	15/Jul. a 15/Ago. de 2001	Sodar	VV, DV	LBA/CIRSAN
Pindobal	20 a 31/Jul. 2001	Balão Piloto	VV,DV	LBA/CIRSAN
Belterra	03 a 15/Ago. 2001	Balão Piloto	VV,DV	LBA/CIRSAN
Km 67	07 a 10/Set. 2009	Balão Cativo	T, U, P, VV, DV	UFOPA
Jamaraquá	17 a 25/Jun. de 2011	Balão Cativo	T, U, P, VV, DV	UFOPA
Região de Estudo	24 a 28/Ago. de 2016	Balão Lagrangiano	T, U, P, VV, DV	CMET-2016

2.2.4 Sensoriamento Remoto

Para estimativa de temperatura superficial da área de estudo, foi utilizado o sensoriamento remoto como ferramenta para tratamento de imagens. As imagens do satélite MODIS, disponibilizados no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), foram tratadas pelo aplicativo de distribuição gratuita no endereço <https://lpdaac.usgs.gov/> (*Earth Resources Observation System Data Center - MODIS Reprojection Tool -MRT*).

Após a projeção, as imagens do produto MOD11A1, referentes as bandas de Temperatura da superfície e emissividade, com resolução de 1Km, tiveram reamostragem para 250 metros, ressaltando que este produto já possui correções para os efeitos da atmosfera (mais detalhes em MACHADO, 2017). Este último procedimento foi feito pelo software *Erdas 9.3*, e realizado pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto Meteorológico do Curso de Ciências Atmosféricas/UFOPA.

O produto final analisado foi a matriz numérica que representa a imagem processada, o que resultou na produção de 66 matrizes, representando 66 dias de 2003 a 2010 (tabela de dias apresentada no **Apêndice A1**), durante o período seco (devido a menor presença de nuvens), com medidas sempre às 10:31 Hora Local (LT). No tratamento das imagens foram excluídos os pixels que continham densidade de nuvens que poderiam afetar na estimativa da temperatura superficial e, dessa forma, esses valores foram desconsiderados.

De acordo com o exposto acima, há uma grande gama de dados a serem analisados, porém, a partir de uma verificação inicial, constatou-se que o período que compreende janeiro de 2001 até dezembro de 2005 é o que apresenta a melhor série, com o funcionamento regular, contínuo e simultâneo das torres de fluxos e maioria das estações meteorológicas da região de estudo.

2.3 ANÁLISE DE DADOS

2.3.1 Estimativa dos Fluxos Turbulentos - Covariância dos Vórtices Turbulentos (CV)

Utilizando sensores de resposta rápida instalados nas torres micrometeorológicas (sítios do Km67 e Km83), foi aplicado o método de covariância dos vórtices turbulentos, ou simplesmente *eddy covariance*, através da covariância das flutuações da velocidade vertical com os escalares temperatura, vapor d'água e dióxido de carbono, para o cálculo dos fluxos de calor Sensível, Latente e de CO₂, respectivamente.

Em geral, os dados provenientes dos sensores de resposta rápida são analisados em blocos de 30 minutos, como feito para os dados dos dois sites aqui utilizados. Filtros são aplicados de acordo com a frequência de amostragem e tipo do sensor. Para os sensores que medem as componentes do vento, dependendo das características do terreno sob o sensor ou dependendo do alinhamento do sensor, deve-se aplicar uma rotação tridimensional à estas componentes (McMillen, 1998). Os fluxos cinemáticos turbulentos são calculados diretamente a partir de:

$$\overline{w'U'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w'U' \quad (6)$$

$$\overline{w'\theta'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w'\theta' \quad (7)$$

$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\overline{w'x'} + \frac{m_d \rho_x}{m_w \rho_d} \overline{w'\rho'_w} + \rho_x \right] 1 + \frac{m_d \rho_x}{m_w \rho_d} \left[\frac{\overline{w'\theta'}}{\theta} \right] \quad (8)$$

onde w é a componente vertical da velocidade do vento, U representa a velocidade do vento na horizontal, θ é a temperatura do ar e x representa um escalar, em geral a umidade específica (q) ou a concentração de CO₂. Dessa forma, na técnica de covariância de vórtices, mede-se diretamente o fluxo turbulento de calor, água e CO₂ sobre uma superfície específica.

Na **equação** (8), ao lado direito aparece um termo adicional, conhecido como “*webb correction*” (Webb et al., 1980). Este termo deve ser usado dependendo do tipo de medida que esta sendo tomada do escalar x , na qual deve ser levada em conta a densidade do ar. Neste termo, m_d e m_w representam o peso molecular do ar seco e do vapor d'água respectivamente, e ρ_d , ρ_w e ρ_x são as densidades do ar seco, vapor d'água e do escalar x respectivamente.

O cálculo dos fluxos de calor sensível e latente (H e LE, respectivamente) podem ser obtidos usando os gradientes verticais de temperatura (θ) e umidade específica (q) respectivamente, e pelo coeficiente de difusão turbulenta. O fluxo de H descreve o transporte turbulento de calor na atmosfera, sendo a porção de calor total associado com a mudança de temperatura

(STULL, 2000). O fluxo de LE descreve o transporte vertical de vapor d'água e o calor exigido pela evapotranspiração do sistema solo-planta para atmosfera. Para os valores particionados da energia, podemos converter a **equação** (8) em fluxo de calor latente e sensível usando as seguintes equações:

$$H = \rho_d C_p \overline{w'\theta'} \quad (9)$$

$$LE = \rho_d \lambda \overline{w'q'} \quad (10)$$

Onde C_p é o calor específico do ar e λ o calor latente de evapotranspiração.

Para o fluxo de carbono, basta apenas substituir as variáveis da **equação** (8) relacionando-as com as concentrações de CO_2 (ppm ou $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), sendo que c é a razão entre as densidades de dióxido de carbono (ρ_c) e do ar seco (ρ_d) e c' é a flutuação em torno da média.

De acordo com Baldocchi (2003), são quatro as principais qualidades da técnica de covariância de vórtices: a primeira qualidade é o método possuir uma escala apropriada que assegura uma medida representativa da troca líquida de CO_2 de todo o ecossistema; a segunda é que técnica permite medir diretamente a troca líquida de CO_2 entre biosfera e atmosfera; a terceira qualidade diz respeito à área representativa de amostragem, que pode alcançar desde centenas de metros até quilômetros e a última qualidade diz respeito à escala temporal de medidas.

Em condições atmosféricas ideais, sob vegetação homogênea em uma superfície plana, aliado aos longos períodos de medidas que minimizam o erro de amostragem, o uso da técnica de covariância pode ser considerado preciso para estimar os fluxos turbulentos superficiais e conseqüentemente melhor representar o balanço (ou a troca líquida) de CO_2 e H_2O do ecossistema local. Quando a técnica é aplicada sobre condições de não homogeneidade espacial e/ou temporal deve-se considerar medidas de acumulação na atmosfera, efeitos da advecção e a divergência do fluxo. Em geral, estas situações são mais frequentes durante o período noturno gerando um número maior de dados imprecisos sobre a respiração do solo e das plantas, provocando um erro significativo nas estimativas das trocas líquidas de CO_2 entre a biosfera e atmosfera (Baldocchi, 2003).

Na tentativa de minimizar o problema em condições de pouca ou nenhuma mistura atmosférica, são sugeridos alguns critérios para avaliar e substituir os dados de má qualidade (Goulden et al., 1996; Pattey et al., 2002). Goulden et al., (1996) sugerem o critério chamado de “correção u^* ”, no qual são descartados os dados noturnos em que o valor da escala de velocidade turbulenta u^* é menor do que aquele previamente determinado, e substituídos por outros de noites mais turbulentas em condições específicas. Este tipo de correção foi desenvolvido para ser aplicado a dados coletados sobre superfícies com alta rugosidade, como florestas.

Especificamente, para os sites de floresta aqui estudado, utilizaram-se os dados já processados e dessa forma os detalhes do processamento para o site do Km67 está disponível em Hutyra (2007a) e Hutyra et al. (2007b), e para o site do Km83 em Miller et al. (2009) e Miller et al. (2004).

2.3.2 Análise de Dados de Sondagens

A partir dos dados de perfis atmosféricos medidos por meio de sondagens na baixa troposfera, serão analisados os perfis de vento e também as características atmosféricas. As características da CLA estão diretamente relacionadas entre si por meio das leis termodinâmicas. Partindo da equação fundamental de estado para um gás ideal (TSONIS, 2007) tem-se:

$$p = R\rho T \quad (11)$$

onde, p é a pressão atmosférica (mbar), T a temperatura do ar (K), ρ a densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) do ar e a $R = 287,04 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ é a constante específica dos gases. Com a atmosfera em equilíbrio pode-se considerar a seguinte equação:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (12)$$

onde $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ é a aceleração gravitacional. Se aplicarmos a primeira lei da termodinâmica e considerando que em um processo a pressão constante, $dU = c_p \cdot dT$ (onde $c_p = 1005 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ é o calor específico constante) e também a **equação** (12), obtem-se:

$$dQ = c_p dT - \frac{dp}{\rho} \quad (13)$$

Em um processo adiabático, ou seja, em que não há trocas de calor entre a parcela de ar e o meio onde esta se encontra $dQ = 0$, assim, utilizando a **equação** (13) temos:

$$T = T_0(p/p_0)^{R/c_p} \quad (14)$$

onde T_0 é a temperatura de referência, que corresponde a p_0 e onde $R/c_p = 0,286$ é constante. A partir disso, podemos definir a Temperatura Potencial (θ), que é a temperatura que uma parcela de ar teria se fosse trazida adiabaticamente até o nível de referência p , que pode ser considerada 1000 mb a nível do mar:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0,286} \quad (15)$$

As equações descritas até aqui caracterizam a atmosfera em termos de temperatura e pressão, porém existe certa quantidade de água presente na atmosfera que deve ser levada em

consideração como condição da atmosfera também. A partir disso, inserimos o conceito de umidade específica (q), que é a massa de água contida em determinada massa de ar úmido (gramas de água por quilograma de ar). Considera-se que um certo volume V de ar que contém ar seco e vapor de água a mesma temperatura T , dessa forma para o vapor d'água sendo:

$$eV = m_v R_v T \quad (16)$$

ou

$$e = \rho_v R_v T \quad (17)$$

Onde e é a pressão de vapor, ρ_v é a densidade do vapor de água e R_v é a constante do gás para o vapor de água. Para o peso molecular da água $M_v = 18.01$ g/mol, o valor de $R_v = 461.5$ J·kg⁻¹·K⁻¹. $R_v = R/M_v$, da mesma forma que $R_d = R/M_d$. Assim, $R_d M_d = R_v M_v$, logo:

$$\epsilon = \frac{R_d}{R_v} = \frac{M_v}{M_d} = 0.62218 \quad (18)$$

Definindo a umidade específica, temos:

$$q_1 = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{m_v}{m} \quad (19)$$

onde m é a massa total $m_v + m_d$ e $\rho_v = eM_v/RT$.

Por meio de uma relação matemática de equações psicométricas podemos fazer uma aproximação, levando em conta os valores da pressão, umidade relativa e temperatura do ar, em que a umidade específica por ser dada por:

$$q_2 = \frac{1000 \cdot \epsilon \cdot a \cdot \exp\left(\frac{b}{T}\right)}{p \cdot U_{rel}} \quad (20)$$

Onde p é a pressão (mb), T a temperatura do ar (K), U_{rel} a umidade relativa, $a = 253 \cdot 10^7$ e $b = 5420$. Dessa forma, a partir das medidas de baixa troposfera feitas com balões e de radiosonda, foi feita análise tanto de vento, quanto da temperatura potencial e umidade específica.

2.3.3 Classificação de dias com Brisa do rio Tapajós

Para a classificação dos dias com Brisa do Rio Tapajós (BRT), tanto para os dados de estações superficiais, quanto de sondagens de baixa troposfera, foi levado em conta apenas a componente zonal do vento (u), o qual após a decomposição do vento é utilizado apenas o sentido leste-oeste, ou *vice-versa*. Essa opção foi utilizada devido o rio está quase alinhado no sentido norte-sul, indicando no caso, que um vento no sentido oeste-leste como sendo brisa do

rio. No caso, considerando as coordenadas cartesianas que o sentido leste-oeste é negativo, o sentido oeste-leste é positivo, como ilustra a **Figura 7** a seguir:

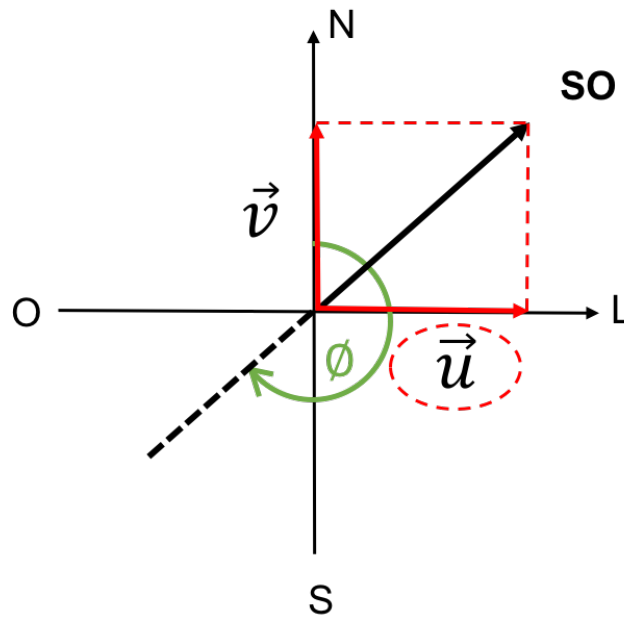


Figura 7 – Exemplo de decomposição da velocidade do vento. A componente zonal u é destacada.

A **Figura 7** mostra a decomposição do vento vindo de suldoeste, destacando a componente u no sentido oeste-leste (positivo). Para fazer essa decomposição utilizou-se a fórmula simples, mostrada na **equação (21)** a seguir:

$$u = |v| \times \sin \left[\frac{\pi}{180} \times \phi(\text{graus}) \right] \quad (21)$$

no qual ϕ é o ângulo meteorológico, em graus, que indica de onde o vento é proveniente. Para encontrar a componente meridional (v) basta substituir o seno (*sen*) pelo cosseno na **equação (21)**.

Após aplicar essa decomposição, para ser considerado brisa do rio Tapajós foi levando em conta (i) que o vento (u) fosse $\geq 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (ii) que essa brisa ocorresse por pelo menos 2 horas e (iii) que acontecesse durante o dia e início da noite, das 0800-2300 Hora Local (LT). Esses critérios foram escolhidos para se ter certeza da ocorrência diurna da BRT, para se ter segurança do funcionamento dos sensores e também maior confiabilidade de que o vento é proveniente de oeste e não apenas um movimento de ar, de curta duração, devido a algum fenômeno mais específico que não seja a BRT.

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE CIRCULAÇÃO REGIONAL E LOCAL

De maneira geral, a circulação atmosférica à nível de 925hPa, na região de estudo, observando médias mensais é caracterizada pela predominância de ventos de Nordeste durante o ano todo (D'AURIA, 2004). Fazendo uma análise diária dos dados da reanálise ERA-INTERIM (DEE et al., 2011) do ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) (disponível em www.ecmwf.int) para o período de 1979 a 2016, às 15 horas (hora local) é apresentado na **Figura 8**.

Na **Figura 8**, as médias diárias climatológicas das componentes do vento na latitude de 3,0°S e longitude de 54,75°W, às 15hs, mostram que os alísios, são mais fortes (valores mais negativos) durante a transição entre a estação seca e chuvosa, e atingem mínimos nos meses mais chuvosos e secos. Já a componente meridional, sempre de Norte, tem mínimos (valores próximos de zero) no período de transição da estação seca para chuvosa, com máximos coincido com o período de ocorrência dos mínimos da componente zonal.

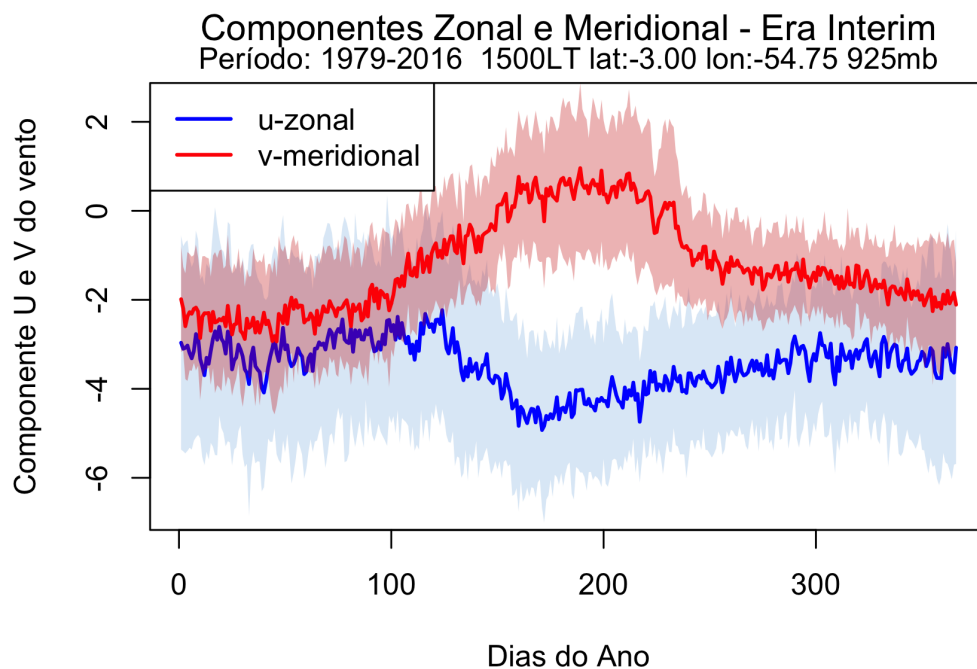


Figura 8 – Médias diárias das componentes zonal (linha azul) e meridional (linha vermelha) do vento (m/s) climatológico do ERA-INTERIM, no nível de 925mb na latitude 3,0°S e longitude de 55,75°W. Área sombreada é o desvio padrão, com cores correspondentes com as componentes.

Devido a localização, topografia, proximidade com grandes (Amazonas e Tapajós) e pequenos rios (Curuá-Una) e cobertura superficial, a caracterização do vento na região de estudo muda de local para local. Dessa maneira, fica claro que em aspectos gerais, não é possível verificar as particularidades da circulação da região, visto que a circulação local pode ser afetada por diversos fatores.

Para melhor descrever a circulação na região de estudo, fez-se o uso dos dados de velocidade e direção do vento observados pela rede de estações disponível em superfície (**Figura 5**). De maneira geral, as figuras seguintes (**Figuras 9, 10 e 11**) mostram a caracterização da circulação, com frequência de ocorrência da velocidade e direção para todos os dados disponíveis na região, do período de 1998 a 2015.

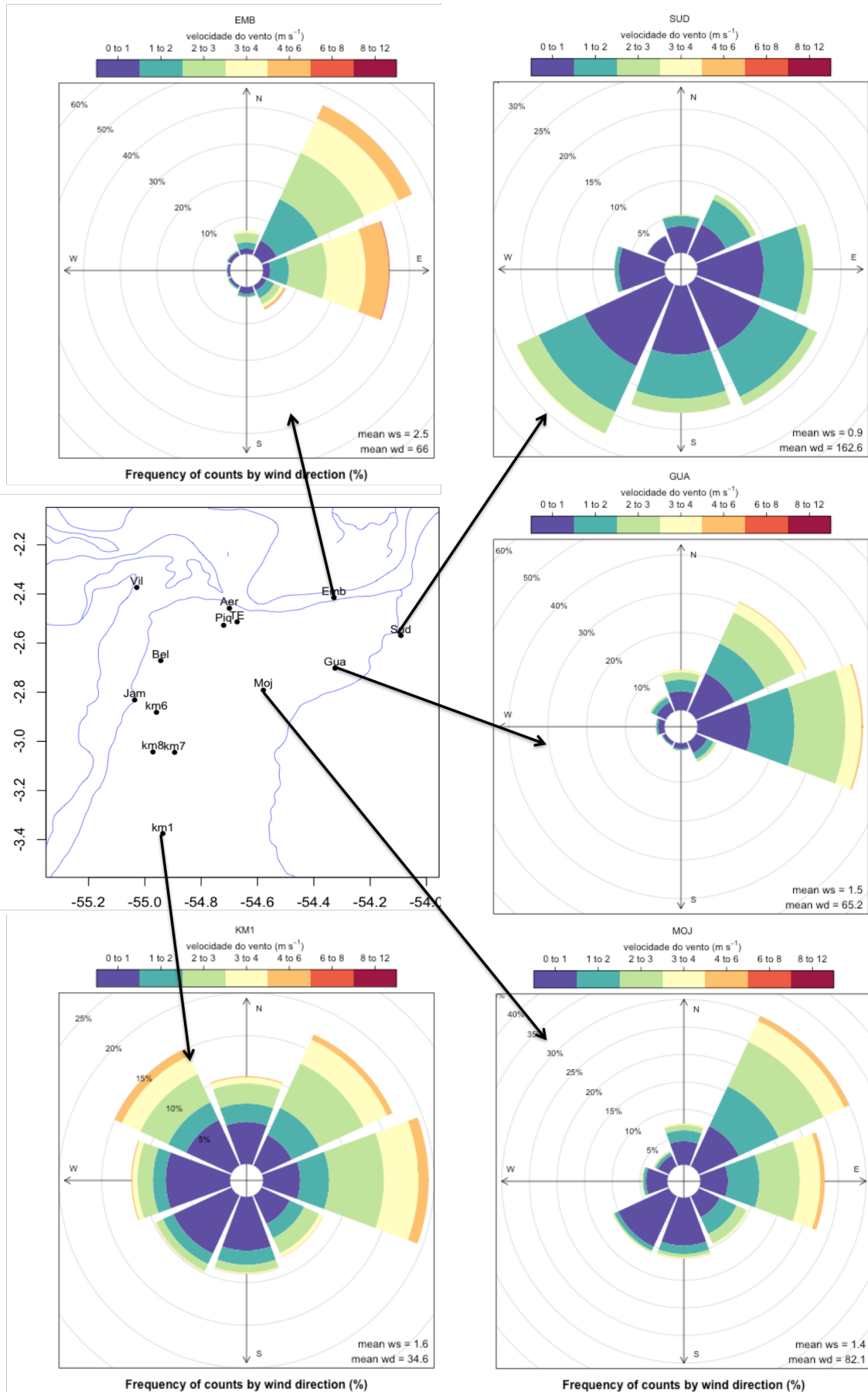


Figura 9 – Rosa dos ventos das estações: Embrapa (EMB), Sudam (SUD), Guaraná (GUA), Mojuí (MOJ) e Km 117 (KM1).

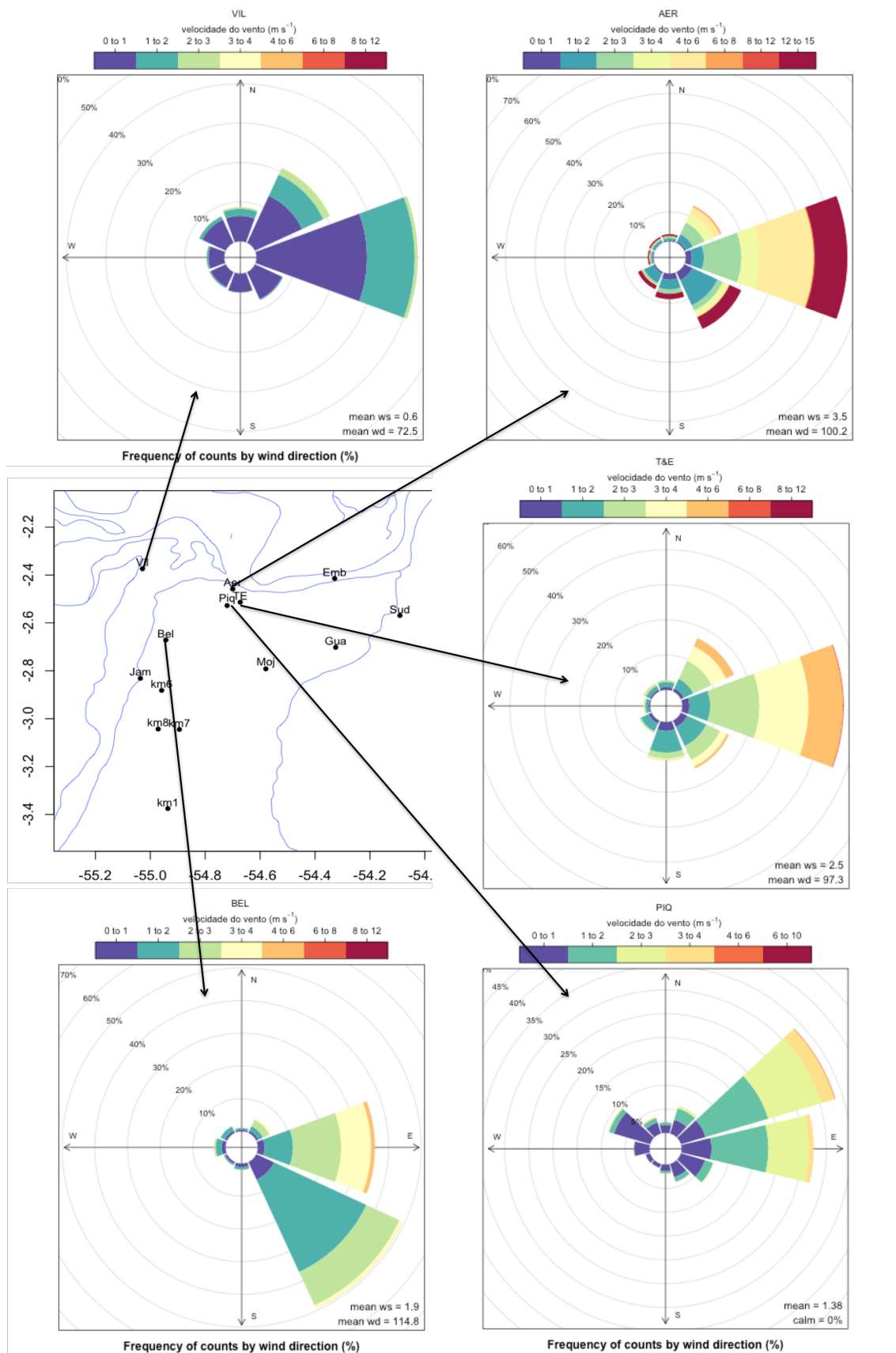


Figura 10 – Rosa dos ventos das Estações: Vila Franca (VIL), Aeroporto (AER), T&E, Piquiatuba (PIQ) e Belterra (BEL).

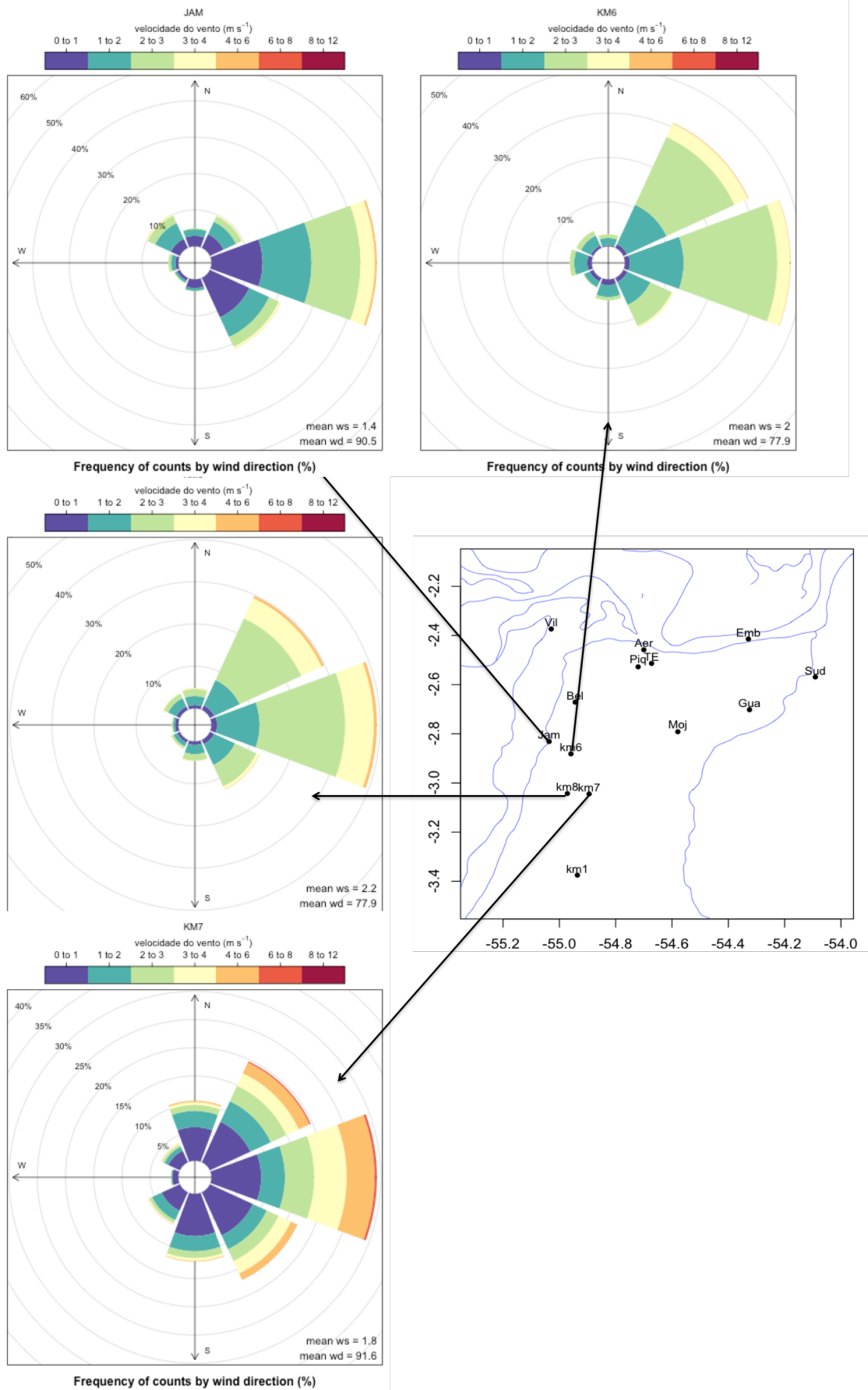


Figura 11 – Rosa dos ventos da Estações: Jamaraquá (JAM), Km67 (KM6), Km83 (KM8) e Km77 (KM7).

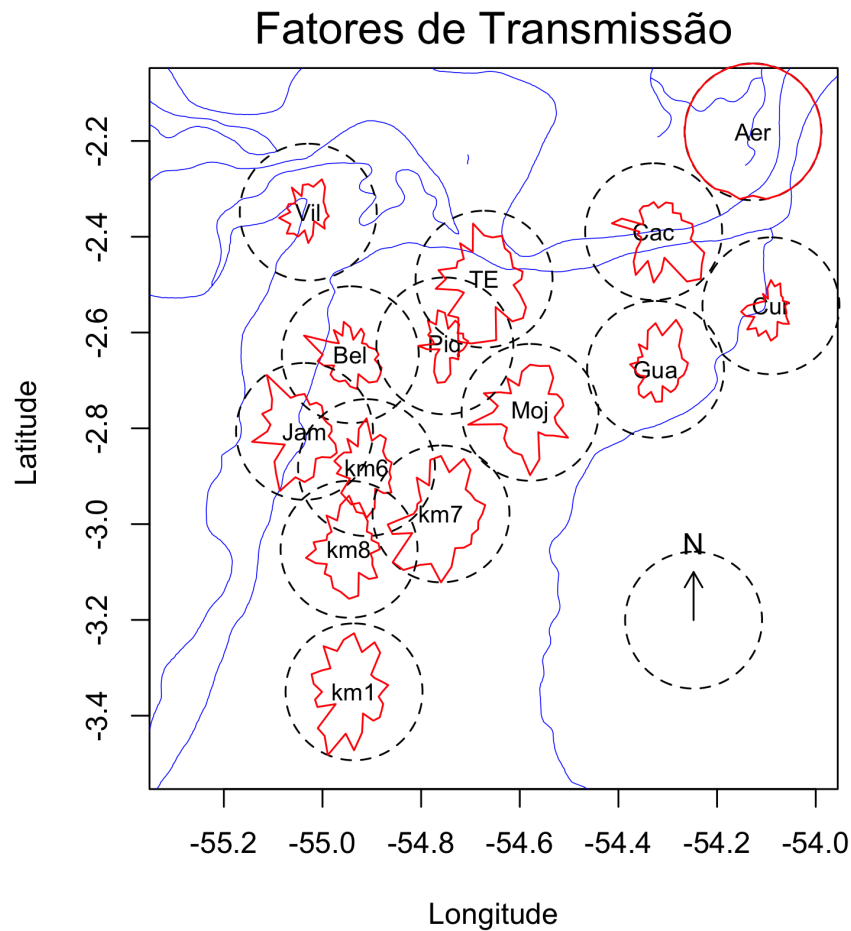


Figura 12 – Fatores de Transmissão (FUJITA e WAKIMOTO, 1982) para região de estudo. As estações de Aeroporto (Aer), Piquiatuba (Piq), Km67, Km83 e Km77 (Km7) foram deslocadas no gráfico propositalmente para melhor visualização dos gráficos.

As **Figuras 9, 10 e 11** mostram a caracterização da velocidade e direção do vento na região. Já a **Figura 12** mostra os fatores de transmissão (TF) de vento (FUJITA e WAKIMOTO, 1982). Os TF são uma relação existente entre a velocidade e direção do vento para uma rede de estações, de modo que é considerado a obstrução ou não dessa estação para certa direção. Para medida do TF, levou-se em consideração a média da velocidade de uma certa direção, a cada 11.25 graus, e depois essa média é dividida pelo máximo da velocidade para a rede das estações para aquela direção definida, de modo que se $TF = 1$ indica que o local de medida é totalmente desobstruído e, $TF=0$ indica que a estação é completamente obstruída (FUJITA e WAKIMOTO, 1982).

Assim, observando a **Figura 12**, com a localização aproximada de cada estação estudada representada pelo círculo pontilhado e linha vermelha, quanto mais próximo a linha vermelha estiver do círculo pontilhado, menos obstruída a estação estará e, quanto mais próximo do centro do círculo pontilhado estiver a linha vermelha mais obstruída estará a estação. O círculo também

traz a informação da rosa dos ventos, indicando qual sentido o vento está mais ou menos obstruído para determinada estação.

Com posse das informações sobre o comportamento geral do vento e da obstrução de cada estação, é possível mostrar, em uma análise geral, de acordo com as **Figuras 9, 10 e 11**, a ocorrência predominante dos ventos na região são de Leste, mas devido as características específicas de cada local, existem várias diferenças, tanto na velocidade, quanto na direção vento. Com o auxílio da **Tabela 3**, que exhibe a percentagem da direção de vento, calmaria e número de dias verificados, é possível ver resumidamente essas características.

Tabela 3 – Caracterização Geral do Vento na Região do Baixo Tapajós em percentagem.

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	CALMARIA	N-dias
AER	2.1	13.8	48.5	18.8	7.6	5.6	1.7	1.9	15.5	6805
BEL	1	4.9	35.8	49.4	2	1.1	3.5	2.2	2.2	2471
EMB	6.4	45.1	34.7	7.2	2.9	1.2	1	1.5	49.3	475
GUA	10.4	31.1	42.6	5.9	1.9	1.2	2.3	4.5	29.2	1523
JAM	5	9.9	45.4	21.6	3.3	1.8	2.8	10.2	18.5	3212
KM1	10.3	16.8	19.4	8	9	9.9	11.5	15.1	20.6	2393
KM6	2.8	30.9	37.3	12.4	4.8	2.5	5.1	4.3	0*	2919
KM7	10.6	19.6	29.3	17.1	12	6.2	1.4	3.7	0.1*	1451
KM8	4.9	29.7	39.3	13	4.7	2.4	1.6	4.4	3.8*	1298
MOJ	7.5	30	22.6	9.8	11.1	11.2	4.7	3.1	58.2	2357
SUD	5.3	9.2	16.1	18.7	17.7	23.1	7.1	2.9	30.7	727
TE	2.8	16.5	46.1	15.1	11	3.9	1.9	2.6	31.5	1210
VIL	8.7	21.1	40.9	7.9	4.9	4.6	4.5	7.5	33.4	2118

*A baixa calmaria registrada nesses locais possivelmente ocorre devido a maior sensibilidade dos anemômetros sônicos, comparada aos sensores de copo das outras estações.

A **Figura 9**, mostra as estações à Leste e ao sul (KM117) da área do estudo, com velocidades médias baixas predominantes, exceto a estação Embrapa (EMB) que por estar próxima à margem do Rio Amazonas, sem muita obstrução, atinge maiores valores, em alguns momentos acima de 6m/s. Outra estação desse grupo que chama a atenção é a Sudam (SUD Curuá-Una), apresentando uma predominância de ventos SO(Sudoeste – 23.1%) e velocidades baixas, até 3m/s. Uma das explicações para que isso aconteça seria a predominância de barreiras na direção predominante do vento na região, além da canalização Sul-Norte do vento feita pelo rio Curuá-Una. As estações de Mojuí (MOJ) e Km117 (KM1) apresentam predominância de NE (Nordeste – 30%) e L (Leste – 16.8%) respectivamente. Porém, existe também distribuição do vento vindo de O (Oeste) e SO (Sudoeste), isso devido a drenagem e efeito da brisa de vegetação à Sul da área de estudo que será mostrada posteriormente. A estação de Guaraná (GUA) mostra um comportamento normal, com ventos predominantes de Leste e Nordeste.

A **Figura 10** mostra a caracterização do vento das estações mais ao Norte da área estudada. As estações de Aeroporto (AER), T&E (TE) e Piquiatuba (PIQ), que ficam na deidade de Santarém, apresentam comportamentos similares, com a predominância de ventos de Leste e Nordeste em

sua maioria. A estação AER, localizada em um local alto e sem obstáculos, apresenta os maiores valores de velocidade do vento (média de 2.9 m/s) de toda a rede de estações, com valores que chegam acima de 10 m/s. D'Auria (2005) também reporta, durante o dia, a ocorrência da Brisa do Rio Amazonas (vento de Norte-Nordeste) que, em conjunto com ventos alísios, acelera o vento naquele local. Já durante a noite, devido o contraste térmico entre o Rio Amazonas e o continente (rio mais quente que continente), há também registros de vento no sentido Sul-Norte, como mostrado por Silva Dias et al. (2004).

A estação de Vila Franca (VIL), apesar de seguir o mesmo padrão das três estações acima comentadas, apresenta valores muito menores para velocidade do vento, e uma média de 0.6 m/s. Isso deve ocorrer devido à presença de obstáculos que circundam esta estação, fato que foi confirmado em algumas visitas de campo, como a presença de árvores e construções ao Norte e ao Sul da desta estação. Já a estação de Belterra (BEL) é caracterizada com predominância de ventos de SE (Sudeste – 49.4%) e L (Leste – 35.8%). De acordo com os Fatores de Transmissão (**Figura 12**) essa caracterização pode ser devido à topografia elevada mais ao Sul da estação (**Figura 5**) que desvia os ventos de Leste fazendo com que os mesmos cheguem até a estação pelo Sudeste.

O último grupo de gráficos, da **Figura 11**, mostram as estações que ficam dentro da FNT e também a estação Km77 que fica localizada à 4 quilômetros, aproximadamente, da FLONA Tapajós. As estações do KM67 e KM83 tem comportamentos muito similares, com predominância de ventos de Leste (37.3% e 39.3%, respectivamente) e Nordeste (30.9% e 29.7%, respectivamente). De acordo com a **Figura 12**, que mostra os fatores de transmissão de FUJITA, é possível verificar que as duas estações possuem padrões similares em relação à obstrução do vento sobre esses sítios, com melhores índices de transmissão ao Norte e ao Sul. Na estação de Jamaraquá, que fica próximo às margens do Rio Tapajós, há predominância de ventos de Leste e Sudeste (45.4% e 21.6%, respectivamente), mas também 10% de ventos vindo de Noroeste. Isso leva a crer na influência topográfica (**Figura 5** e **Figura 12**), pois a estação fica cerca de 160 metros abaixo do nível das estações de Km67 e Km83, e influência do Rio Tapajós, devido a brisa do rio, que será um dos objetos de estudo deste trabalho.

Por fim, a estação de Km77, que fica no campo agrícola, apresenta não só ventos vindos de Leste, distribuídos em Nordeste e Sudeste (**Tabela 3**), mas também, em valores menores, ventos vindos de Sul e Norte. Esse comportamento ocorre devido a área apresentar desobstrução naquelas direções (FUJITA e WAKIMOTO, 1982), facilitando o vento oriundo de todas das partes. Por outro lado, esse comportamento também indica que essa estação deve estar sendo influenciada por áreas de florestas à Oeste e à Sul, provocando uma brisa (brisa de vegetação) devido o contraste de temperatura superficial, além de drenagem de massa de ar devido a localização topográfica em que se encontra.

3.2 CIRCULAÇÃO SOBRE ÁREA DE INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS

Como o objetivo maior do trabalho é verificar as influências da circulação da área integrada pelo conjunto Rio-Floresta, fez-se uma análise mais detalhada das estações da Flona Tapajós (Km67, Km83, Jam) e também das mais próximas que são: Belterra, Km77, Km117 e Mojuí. Dessa forma, levando em consideração o ciclo diário da velocidade e direção do vento nesses sites, fez-se a caracterização de como é a circulação nessa área específica.

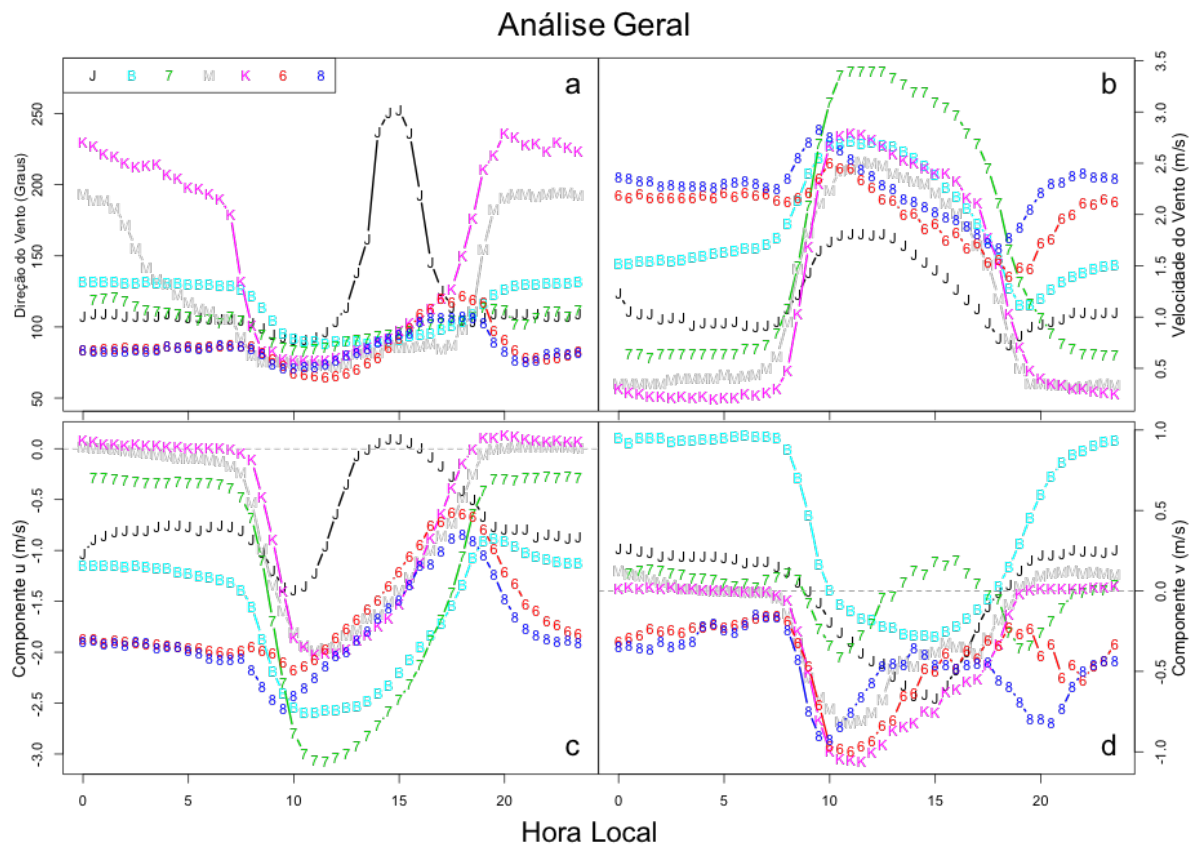


Figura 13 – Análise Geral da Direção (a), Velocidade (b) Componentes u (c) e v (d) do vento para as estações de Jamaraguá (J), Belterra (B), Mojuí (M), Km117 (K), Km67 (6), Km77 (7), Km83 (8).

A **Figura 13**, seguinte, mostra a mediana da velocidade, direção e componentes do vento (u e v) de todos os dias analisados. De acordo com a **Tabela 3**, e já comentado anteriormente, há ocorrências de ventos de Oeste na área mais específica do estudo. Porém, a **Figura 13**, mostra que durante a noite, há também a ocorrência de ventos de Sudeste, nas estações de Belterra, Jamaraguá e Km77. Nas estações de Mojuí e Km117, durante a noite, a direção fica Sul-Sudoeste. Outro fato que é possível observar é a alteração na direção do vento na estação de Jamaraguá, mostrando que a Brisa do Rio Tapajós afeta na mediana geral da direção do vento. Nas outras estações, de maneira geral, é possível notar apenas uma pequena mudança na direção do vento no fim da tarde.

Decompondo a velocidade do vento (**Figura 13c e 13d**), é possível verificar, na média, que apenas em Jamaraquá ocorre a inversão da componente zonal durante o dia devido a presença do Rio Tapajós. Nas outras estações, principalmente as da FNT (Km83 e Km67) não é possível verificar esse comportamento devido a média “dissolver” os dias que contém e não contém a BRT nesses sites. As outras duas inversões, em Mojuí e no Km117 são devido a localização e topografia que facilitam a drenagem do ar noturno como reportado por Goulden et al. (2006).

A componente meridional (v), indica que durante a noite, exceto Km67 e Km83, não há ocorrência de vento na direção Sul-Norte, com uma notável maior velocidade para Belterra. O aumento dessa velocidade durante o período noturno deve ter relação a facilitação do escoamento devido a topografia e localização da estação, bem próxima ao declive que leva ao Rio Tapajós à Oeste da mesma. Já durante o dia, a velocidade meridional (v) de todas as estações são caracterizadas com vento no sentido Norte-Sul, mas no sítio Km77, há uma mudança por volta de 1200LT (**Figura 13d**) da componente para valores positivos, indicando haver um mecanismo que influencia a direção do vento que foi registrada neste sítio, caracterizando esse fenômeno como brisa de floresta, ocorrendo no sentido Floresta-Campo Agrícola.

Lu et. al (2005) mostrou que na região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós, há uma facilitação de canalização dos ventos alísios devido a topografia nessa área em geral, no sentido Norte-Sul. Já na canalização Sul-Norte, um pouco menos ocorrente (**Tabela 3 e Figuras 9, 10 e 11**) tratam-se fenômenos locais, principalmente de chuvas convectivas, ou também deslocamento de massas de ar frias vindas do Sul, que causam por exemplo o fenômeno de friagem na Amazônia (MARENGO et al., 1997) e alteram os campos de pressão até próximo a região de Santarém, e conseqüentemente facilita a entrada de ar vindo de Sul, como reportado por Silva Dias et al. (2004).

3.3 OCORRÊNCIA DE BRISA DO RIO TAPAJÓS (BRT)

Levando em consideração a distância dos locais de medida até o Rio Tapajós, a ocorrência e intensidade da Brisa do Rio Tapajós (BRT) é peculiar de cada local. Dessa forma, após análise geral, considerou-se que o efeito da BRT deve ocorrer durante o dia e nas primeiras horas da noite (hora local) e assim fez-se a separação dos dados em dias que ocorreram ou não a brisa, com pelo menos duas horas de duração.

Além disso, a ocorrência da BRT foi considerada quando a componente zonal do vento ($u - m/s$), que na normalidade tem valores negativos (Leste-Oeste), foi maior ou igual 0,2 m/s (sentido Oeste-Leste) e ocorrência diurna, como descrito na **subseção 2.3.3**, no **capítulo 2**. A **Tabela 4** mostra a ocorrência dos dias em que houve inversão da componente zonal do vento (u) de acordo como descrito anteriormente:

Tabela 4 – Número de dias ocorrência de brisa do rio Tapajós de acordo com o método adotado.

Estação	BEL	JAM	K67	K77	K83	MOJ	K117
Total de dias analisados	2442	2478	2599	1357	1204	1362	1789
Dias com BRT	694 (28%)	1570 (63%)	1187 (46%)	496 (37%)	478 (40%)	672 (49%)	1343 (75%)
Dias com BRT - SECO*	291 (42%)	802 (51%)	633 (53%)	233 (47%)	242 (50%)	205 (30%)	632 (47%)
Dias com BRT - CHUVOSO*	403 (58%)	768 (49%)	544 (47%)	263 (53%)	236 (50%)	467 (70%)	711 (53%)

*Em relação aos dias com BRT.

A partir da **Tabela 3**, pode-se verificar que nos sites há uma percentagem significativa nos dias que temos inversão na componente zonal do vento. Nos sites de Belterra (28%) e Jamaraquá (63%), localizados mais próximos ao Rio Tapajós, essa inversão deveria apresentar valores similares, porém, como mostrado, os valores distintos mostram que o fenômeno ocorre de maneira diferente nestes sítios.

Para se ter certeza de que os dados da estação de Belterra estavam corretos, foram feitas análises anuais dos dados disponíveis dessa estação (1998-2005), mas os resultados foram similares. Com isso, é possível perceber que esse site se encontra na zona onde os efeitos da BRT não são tão ocorrentes como nos outros sites, Jamaraquá, Km67 e Km83. Isso deve-se ao fato dessa estação estar localizada em um limiar de influências tanto do Rio Tapajós quanto do Amazonas, de modo que o Rio Amazonas funciona como um acelerador dos ventos alísios durante o dia, como uma brisa de Rio também, e faz com que a BRT não tenha força suficiente para chegar a inverter a componente U do vento neste site. Outro fato que pode colaborar para os menores valores de ocorrência de BRT em Belterra é a canalização dos ventos alísios no sentido Norte-Sul, já comentado anteriormente e reportado por Lu et al. (2005).

Em Jamaraquá, na estação localizada mais próxima ao Rio Tapajós (de alguns metros na estação chuvosa a algumas centenas de metros na estação seca), era de se esperar que tivesse o maior número de casos de brisa de todas as estações, pois não há nenhuma barreira natural a Oeste, e está a aproximadamente a 10 metros acima do nível do rio, o que facilita o registro da BRT nesse site. Esses registros se confirmam com 63% de ocorrência de BRT naquele local.

As outras estações na FNT, Km67 e Km83, localizadas a 9,6 e 16,5 quilômetros do rio Tapajós respectivamente (**Figura 5**), apresentaram valores próximos para os casos de dias com BRT, Km67 com 46% e Km83 com 40%. Esses valores são diferentes sobre os reportados por Hutyra et al. (2007), que apresentou uma média de 28% por cento de dias com ventos de oeste sobre o Km67, com uma média de duração de 1.7 horas. Essa diferença deve ter acontecido devido a metodológica (não apresentada) de escolha de dias com brisa por Hutyra et al. (2007b). Outro fato importante é que esses resultados mostram que, apesar da distância do rio até esses pontos de medidas, a BRT deve influenciar diretamente no comportamento da Camada Limite

Atmosférica sobre a região de Floresta.

O site Km77 localizado na área agrícola, distante 23 quilômetros do Rio Tapajós e 5 quilômetros da FNT, próximo a BR-163, apresentou valores elevados no número de dias com inversão nos ventos alísios, 37%. Devido o campo agrícola estar ao Leste da Floresta, e a Floresta estar ao Leste do rio Tapajós, há uma grande possibilidade de que nesse ponto haja dois mecanismos de brisa: Brisa do Rio Tapajós (BRT) e Brisa de Floresta (ou vegetação). Vale ressaltar que ao Sul do campo agrícola também há presença de floresta secundária, reforçando a ideia da existência de brisa de Floresta, tanto no sentido Oeste-Leste (BRT), quanto no sentido Sul-Norte (Brisa de Floresta), o que reflete na alteração das médias da direção do vento, mostrados na **Figura 13d**.

Além desses fatores, existe a presença do Rio Curuá-Una à 30 quilômetros, o qual tem uma grande bacia de drenagem e que influencia no escoamento noturno no sentido Oeste-Leste e Sul-Norte. Esse fato, no Km77, ocorre na maioria das situações analisadas para esse local, exceto nos dias chuvosos e sem BRT, o que indica haver uma conexão entre as duas brisas.

Mojuí, com 50 quilômetros de distância do rio Tapajós, 20 quilômetros do Rio Amazonas e 20 quilômetros do Rio Curuá-Una, apresentou em quase metade dos dias (49%) inversão dos ventos alísios (**Tabela 4**). Esse fato, em sua maioria, ocorreu a partir das primeiras horas da noite e possivelmente não está relacionado a presença do Rio Tapajós (na maior parte dos casos), mas sim diretamente ligado à drenagem da bacia hidrográfica do rio Curuá-Una no sentido Sudeste e também na direção do Rio Amazonas a Nordeste. A presença desses dois rios, associado a diferença de temperatura espacial fazem que, durante a noite, haja no sentido terra-rio, conhecida na região como vento terral.

De maneira similar, e como surpresa, o site Km117, localizado a 31 quilômetros do Rio Tapajós, apresentou 75% dos dias com inversão da componente zonal do vento. Essa inversão deve ser, em parte, assim como em Mojuí, uma drenagem do ar superficial que ocorre nas primeiras horas da noite em direção Leste. Porém, no caso do Km117, a percentagem elevada de inversão deve-se a localização da estação, que se encontra na borda Leste do Planalto e, seguindo na direção Leste, por 13 quilômetros, existe um declive acentuado de aproximadamente 8 m/Km até um afluente que faz parte da bacia do Rio Curuá-una. Além disso, a Brisa de Floresta, no sentido Sul-Norte também deve estar contribuindo para que esse valor de inversão seja maior do que o esperado.

Para melhor descrever o ciclo diário da BRT, fez-se uso de dados referentes apenas aos dias com ocorrência da BRT como apresentado na **Tabela 4**. Usando a mediana para a direção do vento para dias com inversão da componente u do vento (BRT) construiu-se a **Figura 14**, que mostra claramente a dependência do horário de ocorrência da BRT para cada local de medida.

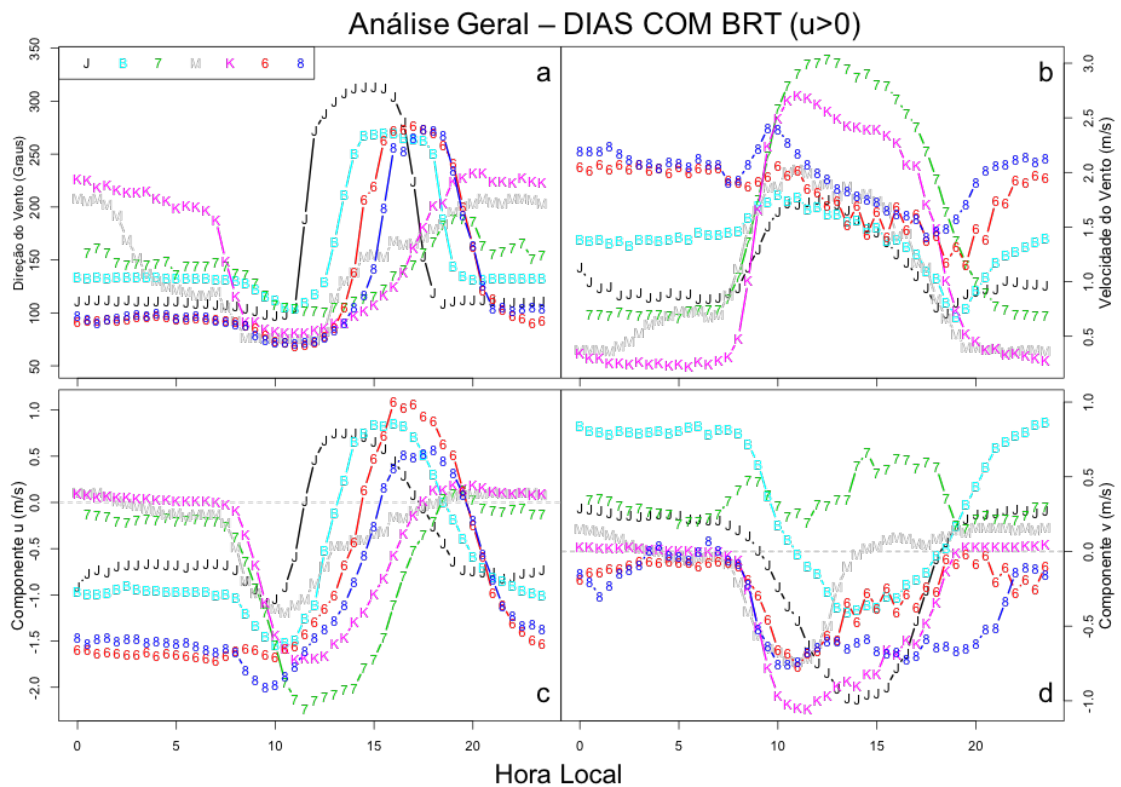


Figura 14 – Análise para dias com BRT da Direção (a), Velocidade (b) Componentes u (c) e v (d) do vento para as estações de Jamaraquá (J), Belterra (B), Mojuí (M), Km117 (K), Km67 (6), Km77 (7), Km83 (8).

Levando em consideração as **Figuras 14a** e **14c** é possível verificar que nas maiorias dos casos em que ocorre BRT, a brisa ocorre na seguinte sequência: Jamaraquá (1130LT), seguido de Belterra (1300LT), Km67 (1330LT), Km83 (1400LT) e no Km77 (1700LT). A inversão na componente u do vento, causada pela drenagem do ar, nas estações Km117 e Mojuí, iniciam-se às 1700LT e 1900LT, respectivamente. O término da BRT, assim como o início, segue a mesma ordem, iniciando por Jamaraquá, Belterra, Km67 e finalizando com Km83. Vale a pena ressaltar que a **Figura 14a** e **14c** mostra o padrão de ocorrência e duração, porém, dependendo das condições do dia o horário de início e fim da BRT podem variar. As estações de Km77, Km117 e Mojuí permanecem com a direção alterada durante toda a noite como explicado e mostrado anteriormente.

Classificando a intensidade da BRT, usando o valor máximo atingido pela velocidade da componente zonal (u), esta foi dividida em três classes: Fraca ($\geq 0,2$ até $1,0$ m/s), Média ($>1,0$ até $2,0$) e Forte ($>2,0$ m/s). Dependendo do valor máximo, a BRT pode adentrar cada vez mais no continente, de uma centena de metros até quilômetros sobre o lado Leste do Rio Tapajós. Os **Apêndices A4, A5 e A6**, contém a Velocidade, Direção e componentes v e u do vento para cada Classe. A **Tabela 5** abaixo mostra os locais e a percentagem de ocorrência de cada classe.

Tabela 5 – Ocorrência de acordo com a Classificação da Intensidade da Componente zonal u (m/s) e período do ano. Os valores estão em porcentagens (%)

LOCAL	Classes								
	Fraca			Média			Forte		
	TOTAL	seco	chuvoso	TOTAL	seco	chuvoso	TOTAL	seco	chuvoso
BELTERRA	10.5	3.3	7.2	64.3	25.6	38.6	25.2	13	12.2
JAMARAQUÁ	12.9	5.7	7.2	47.2	25.9	21.3	39.2	19.5	19.7
KM67	6.8	2.6	4.2	52.3	27.5	24.8	40.9	23.1	17.8
KM77	41.3	19.8	21.5	38.5	16.3	22.2	20.2	10.9	9.3
KM83	14.2	6.5	7.7	66.7	36	30.7	19.1	8.2	10.9
KM117	33.6	17.1	16.5	25.8	10	15.8	40.7	20	20.7
MOJUÍ	61.2	23.6	37.6	22.6	4.6	18	16.2	2.2	14

De acordo com a **Tabela 5**, acima, é possível verificar que a Classe Média de inversão dos ventos alísios se sobressai, na maioria das estações, sobre as outras. Isso ocorre, devido a brisa, no caso das estações mais próximas ao Rio Tapajós, conseguir se desenvolver e alcançar velocidades (u) superiores a 1m/s. Estações mais distantes, como Km117, Km77 e Mojuí, têm maior ocorrência da Classe Fraca e Média de vento zonal, pois não apenas o Rio Tapajós influencia, mas também a drenagem pela bacia do Rio Curuá-Una.

Ainda analisando a **Tabela 5** e levando em consideração a estação do ano, seca ou chuvosa, as maiores ocorrências da Classe Média e em parte para Classe Forte, ocorrem no período seco para as estações mais próximas ao rio Tapajós, diferentemente das estações distantes do rio que tem maior ocorrência durante o período chuvoso. Já levando em conta a Classe Fraca, verificou-se que ocorre principalmente no período chuvoso, tanto para estações próximas ao rio, quanto mais afastadas.

No caso do Km117 que obteve valores bem distribuídos, com maior ocorrência da Classe Forte, há um regime diferente de ventos que atuam sobre esta estação. Vale ressaltar que se acredita que as estações Km117 e Km77 são influenciadas tanto pela BRT quanto pela drenagem do ar noturno, pela bacia do Rio Curuá-Una. No Km117, devido ao pequeno gradiente longitudinal e grande gradiente latitudinal (Sul-Norte) de temperatura no período diurno (apresentado posteriormente no **Capítulo 4, seção 4.3**) é possível que além da drenagem, devido a localização e topografia, deve haver a ocorrência de uma leve brisa, brisa de vegetação, que se estende além do Km77, como pode ser visto na componente meridional do vento deste site apresentado nas **Figuras 13d e 14d**.

3.4 ALTURA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS

Para verificar a espessura da Brisa do Rio Tapajós foram feitas análises de diversas sondagens de baixa troposfera ocorridos em diferentes períodos e por diferentes campanhas de medidas, como mostrado no **Capítulo 2**. A altura da BRT depende tanto das condições

atmosféricas como do mecanismo da brisa, diferença de temperatura e pressão, além do local de medida (proximidade do Rio Tapajós) e hora do dia. Como as campanhas de balão cativos realizadas em 2009 (Terra Rica) e 2011 (TAPAJÓS, 2012) tiveram como principal foco a Camada Limite Noturna, apenas algumas sondagens foram selecionadas, sendo estas as que ocorriam antes das 2000LT. Já os perfis, tanto de radiossonda quanto de Balão Piloto, da Campanha CIRSAN (SILVA DIAS et al., 2004) e também do Balão Lagrangiano (CMET -2016) foram analisados.

Da mesma forma como feito para os dados de estações de superfície, foi considerada a componente zonal do vento (u) com valores positivos sendo uma medida com ocorrência da BRT. A **Figura 15**, a seguir mostra os valores encontrados para altura da BRT, levando em consideração o nível do Rio Tapajós, visto que a maioria das sondagens foram próximas a borda do rio.

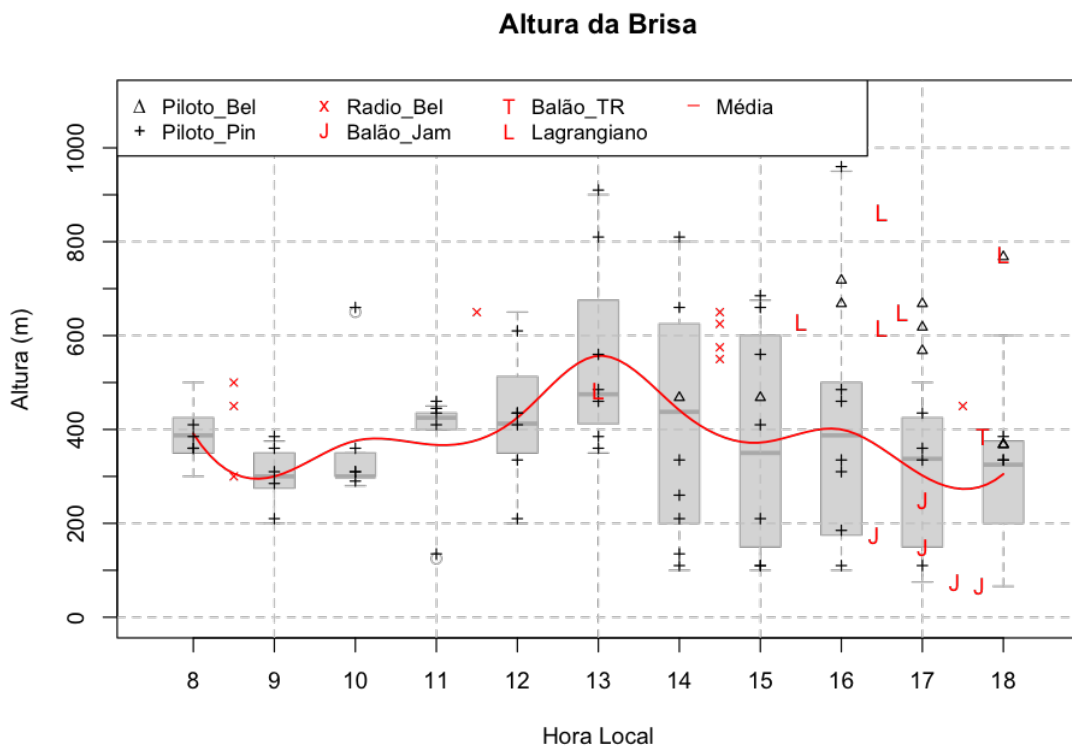


Figura 15 – Altura da Brisa usando dados do CIRSAN e campanhas de Balão cativo em Jamaraguá (J) e Terra Rica (T). O boxplot e a linha vermelha (média suavizada) são resultados de todos os dados, exceto Balão Terra Rica (T) e Lagrangiano (L). Altura em relação ao nível do Rio Tapajós.

De acordo com a **Figura 15**, a altura da BRT não varia muito na primeira parte do dia, apresentando valores, em média, em torno de 300 e 400 metros. Após o meio dia, apresenta uma grande variabilidade, de 150 metros até cerca de 960 metros, porém na média, apresenta valores similares a primeira parte do dia. Para média, usou-se apenas dos dados referentes à campanha CIRSAN (Pindobal e Belterra) e Jamaraguá.

Silva Dias et al. (2004) mostraram que durante os dias da campanha CIRSAN ocorreu influência do Rio Tapajós sobre as medidas de Balão Piloto em Pindobal (margem do rio),

indicando que mesmo quando não há inversão do vento, há uma diminuição considerável da componente u da velocidade do vento, fato este também constatado nas análises aqui feitas tanto para balão piloto quanto para balão cativo e radiossondagens. Vale ressaltar que mesmo nos dias que foram considerados sem BRT, existem dias em que há uma tendência de mudança de direção da componente zonal do vento, porém ocorre apenas uma diminuição da velocidade do vento, não acontecendo a brisa do rio e isso também foi registrado nos dados das estações superficiais em Jamaraquá, Belterra, Km67 e Km83.

Foi verificado também que tanto nas medidas com radiossondagens quanto com balão piloto medidos em Belterra, não houve tantos registros de brisa quanto esperado, visto que o local de medida foi próximo ao rio Tapajós cerca de 7 Km a Leste. Isso condiz com os resultados encontrados pelos dados analisados na estação superficial de Belterra que indicou 28% de dias com BRT (**Tabela 4**), mostrando que a estação de Belterra encontra-se em um local que é o limiar de ocorrer ou não a BRT, sendo influenciada também pelos ventos vindos de nordeste, acelerados durante o dia pela presença do Rio Amazonas (Brisa do Amazonas), e também de sudeste, devido ao relevo, como comentado anteriormente.

Na **Figura 15** também é possível perceber as alturas medidas nas campanhas com balão cativo em Jamaraquá (J), em Terra Rica (T), apenas uma sondagem com BRT, e CMET (L). As medidas da altura da BRT em Jamaraquá ficaram abaixo dos valores registrados pelas outras medidas, devendo ser o reflexo do período de medida ter sido muito úmido e com chuvas intensas, como mostrado por Tapajós, 2012, o que influencia diretamente nas diferenças de temperatura entre as superfícies e dificulta a formação de BRT, como discutido no modelo feito por Saad et al. (2010).

Já os dados da campanha Terra Rica (T) e CMET (L) (**Apêndices A2, A3 e Figuras 15 e 39**) foram inseridos para se ter uma base sobre a altura da BRT sobre a FLONA Tapajós. É possível verificar que a BRT adentra o continente, com valores que variam em torno de 483 a 862 metros, entre 1500LT e 1800LT, sobre a FNT, reforçando a ideia de que a BRT alcança mais de 20 quilômetros a Leste do Rio Tapajós e com altura considerável, levando em conta que os valores são próximos a algumas medidas realizadas com balão piloto próximo ao rio Tapajós, como mostrado a **Figura 15**, que contém as médias dos valores da altura da BRT.

Nas sondagens com balão Lagrangiano foi possível verificar que quando o balão passava abaixo de 1km de altura, após as 1200LT, sempre sofreu influência do Rio Tapajós, como na **Figura 16**.

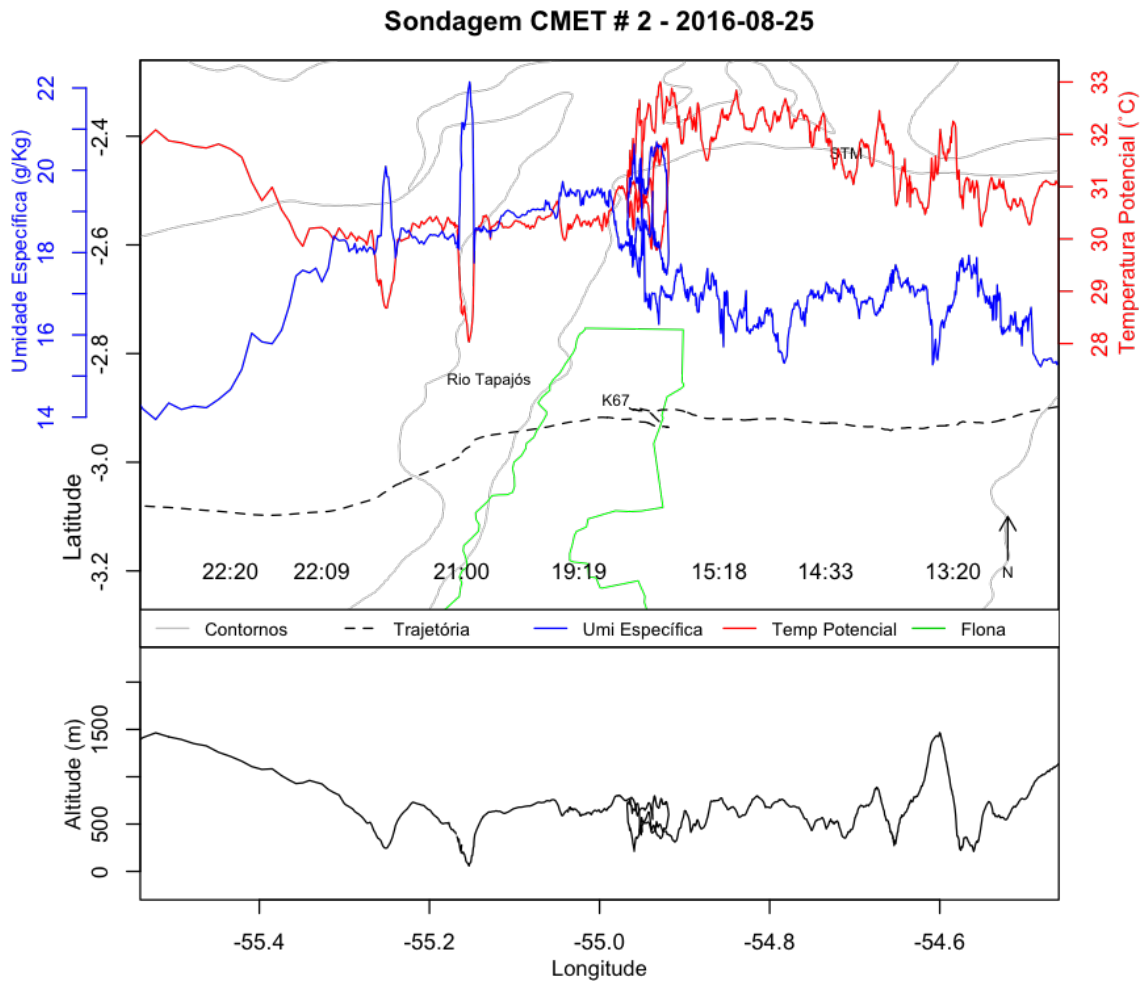


Figura 16 – Sondagem CMET # 2 – 25 de agosto de 2016. Temperatura (vermelho), umidade específica (azul), trajetória do balão (linha pontilhada), limite do rio (cinza), FNT (verde) e horário são mostrados na parte de cima da figura, a altura é apresentada na parte de baixo.

O rio atua como um canal convectivo, durante o dia e noite (SILVA DIAS et al., 2004), o que altera a pressão atmosférica sobre o mesmo facilitando tanto a BRT, quanto a Canalização Norte-Sul, e isso pode ser confirmado quando o balão, a baixa altura, chega sobre o rio e é empurrado tanto para Oeste, quanto para Sul. Mais especificamente, dando um zoom na BRT sobre a FNT, sondagem CMET # 2, mostrado na **Figura 16**, podemos verificar, além da altura da BRT em aproximadamente 600 metros, que o alcance da BRT chega a cerca de 16.5 Km, considerando a distância do Rio Tapajós até o máximo de retorno do balão sobre o continente.

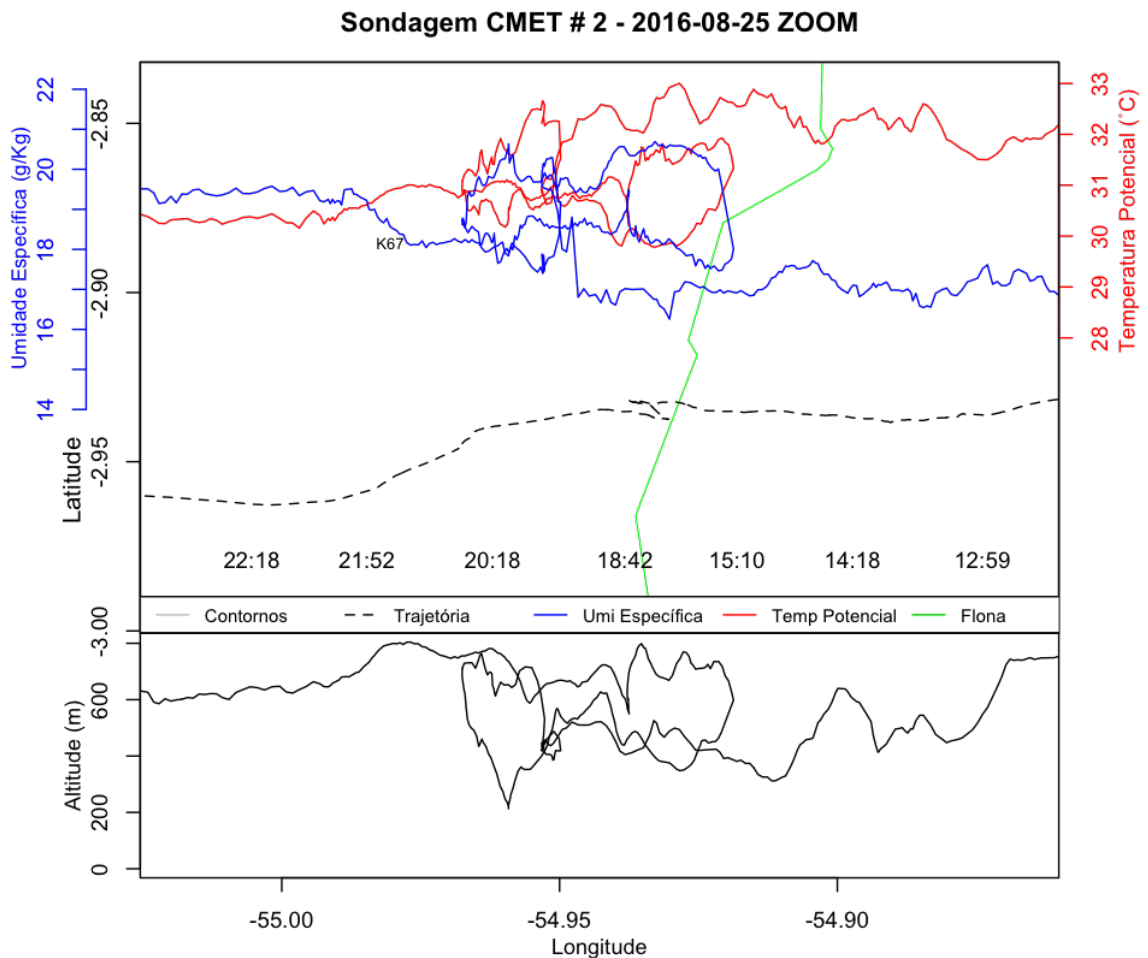


Figura 17 – Zoom sobre a BRT mostrada na sondagem CMET # 2. Temperatura (vermelho), umidade específica (azul), trajetória do balão (linha pontilhada), limite da FNT (verde) e horário são mostrados na parte de cima da figura, a altura é apresentada na parte de baixo.

É muito difícil estimar o alcance da BRT por conta da variabilidade da velocidade da brisa, além da não uniformidade espacial que a mesma apresenta. Como comentado, a estação de Belterra encontra-se em um limiar para ocorrência ou não da BRT, e neste local especificamente tanto o Rio Amazonas, quanto o Rio Tapajós podem influenciar nas medidas de circulação local, isso é mostrado tanto pelos resultados até aqui apresentados quanto por Silva Dias (2004) e D'Áuria (2004). Como apresentado nas **Tabelas 4 e 5**, e mostrado na **Figura 14**, há ocorrência de BRT nos locais de medidas mais próximos do rio: Jamaraquá, Belterra, Km67, Km83 e também sites mais distantes, como em Km77, Mojuí, e Km117, sendo estes últimos também influenciados pelo efeito de brisa da vegetação e pelo escoamento noturno, em direção à bacia de drenagem do Rio Curuá-Una, sendo assim difícil identificar qual efeito ocorrente tem maior influência nesses pontos.

Sendo assim, separando apenas os dias que tiveram BRT (inversão da componente u da velocidade do vento) nesses sites e fazendo uma média geral, fez-se uma projeção do ciclo diurno do alcance da BRT, como apresentado na **Figura 18**.

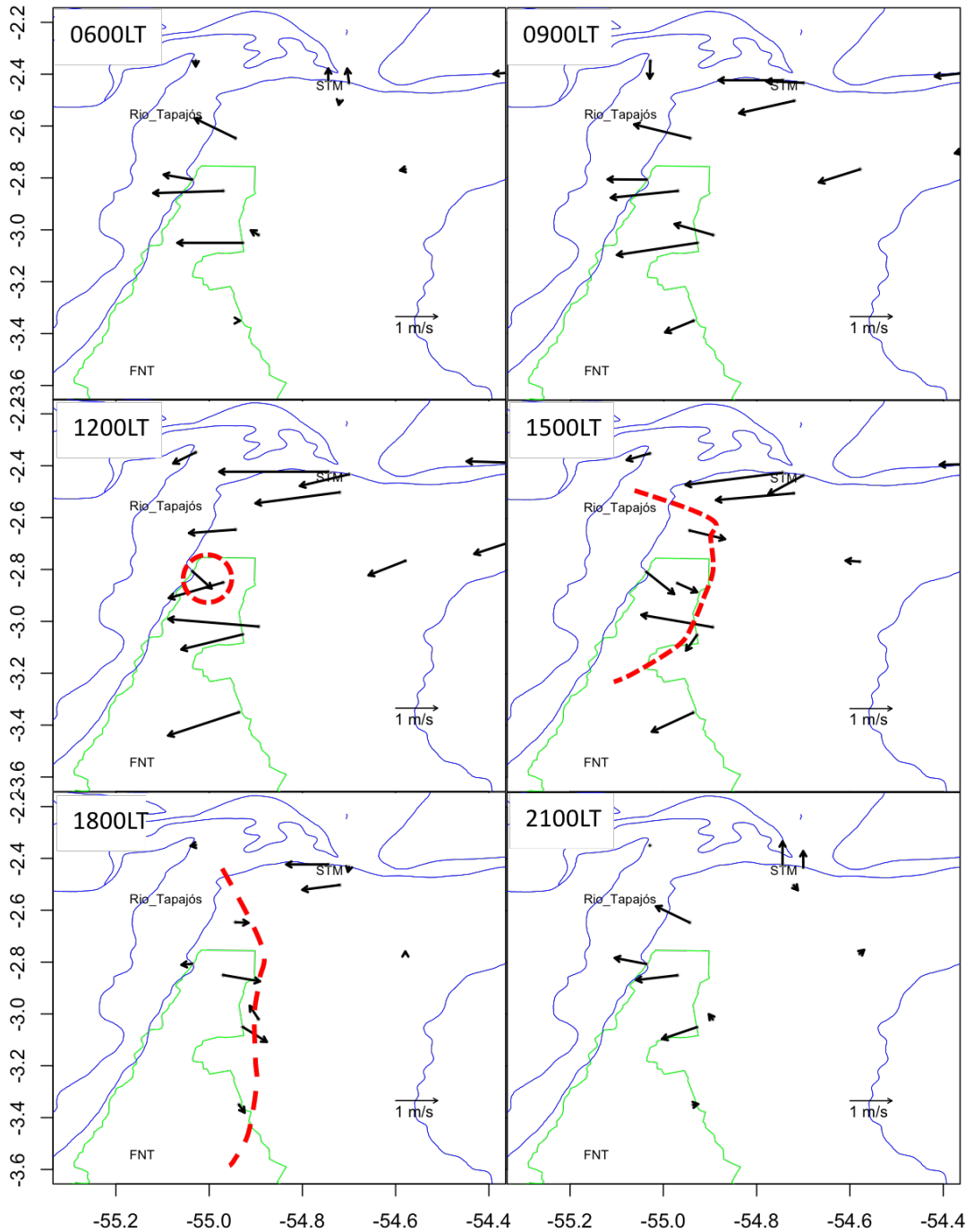


Figura 18 – Evolução diurna da velocidade e direção do vento para dias com BRT ($u > 0$) em todos os sites. Setas indicam magnitude e direção do vento.

Na **Figura 18** é possível verificar o início da BRT, mais próximo ao Rio Tapajós em torno de 1200LT, às 1500LT com a BRT praticamente consolidada (linha vermelha), chegando a cerca de 18Km adentro do continente, evoluindo até as 1800LT até mais de 20Km de distancia do Rio Tapajós, valor coerente com os resultados de Silva Dias et al. (2004), e a mais de 30Km, levando em consideração a localização da estação do Km117. Porém, vale ressaltar que os valores

apresentados são médios, e que se levarmos em conta apenas os dias com BRT de Classe Forte, a BRT pode chegar além da distância citada acima, e tem seus efeitos propagados, em menor proporção, até a estação de Mojuí, cerca de 50 Km da margem do Rio Tapajós.

As 1800LT é possível verificar também que a BRT inicia a se desfazer na borda do rio, porém ainda causa efeitos sobre o continente como a diminuição da velocidade do vento sobre o Km77. As 2100LT a BRT já se desfez, porém ainda é possível perceber que no Km117 ainda temos inversão da direção do vento, indicando efeitos de drenagem do ar, e também da diferença de temperatura noturna Sul-Norte, causando uma leve brisa que é conhecida como *terral*.

CAPÍTULO 4 - MECANISMOS DA BRISA DO RIO TAPAJÓS

4.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

O processo de brisa, no que diz respeito a água-continente, é amplamente conhecido, como descrito no **Capítulo 2, subseção 2.3.1** As pesquisas vão desde situações mais estudadas como a brisa Oceano-Continente e Lago-Continente, até as menos estudadas, como a que está sendo apresentada nesse trabalho, que é o processo Brisa Rio-Continente, ou simplesmente brisa do Rio.

Como o processo de formação da brisa do rio tem os mesmos princípios físicos de qualquer outra brisa, ou seja, diferença de capacidade térmica entre dois corpos que ocasiona uma diferença de temperatura e conseqüentemente diferentes campos de pressão sobre esses dois corpos, a análise do mecanismo de brisa foi baseada nesses princípios.

Como temos diferentes locais de medidas das variáveis meteorológicas (**Figura 5**), foi usada a torre de Fluxo do Km67 como referência para análise dos dias com Brisa do Rio Tapajós (BRT). Essa escolha foi feita devido o Km67 estar aproximadamente 10Km a Leste do Rio Tapajós e com intuito de verificar se há influência da BRT sobre as medidas feitas nesse local. Sabendo quais os dias em que ocorreram inversão na componente u da velocidade do vento nesse ponto, foram separados esses dias específicos para análise das mudanças da pressão e temperatura comparados com a estação de Jamaraquá que fica a alguns metros do Rio.

Para comparar a pressão nesses dois pontos, Km67 (continente) e Jamaraquá (borda do rio), primeiramente foi retirada a diferença de altitude por meio da decomposição do valor horário de pressão de cada local. Essa decomposição usa apenas a flutuação da pressão naquele local, ou seja, é a diferença entre a média e o valor medido. Feito isso para todos os dias disponíveis para ambas estações, e posteriormente foi comparado as medianas das flutuações de pressão para os dois locais de medida, e por fim pôde-se verificar como se comporta o campo de pressão.

Comparando as mudanças nas medidas de pressão entre continente e borda do rio, confirma-se que o efeito da presença do rio é praticamente constante durante todo o período de dados disponíveis. Isso ocorre tanto em dias considerados com brisa, quanto em dias classificados sem brisa no Km67, como mostrado na **Figura 19**.

Para o período seco, de acordo com a **Figura 19a**, não há tanta diferença de pressão entre os dias com e sem BRT, exceto que para dias com BRT a diferença é negativa durante cerca de duas horas a mais (até às 1500LT) que nos dias sem BRT. Após às 1200-1300LT até às 2100LT, para dias sem BRT (seco), a diferença de pressão entre Km67 e Jamaraquá volta a ser positiva indicando retorno do movimento do vento no sentido Leste-Oeste. No período chuvoso,

o comportamento é similar ao período seco.

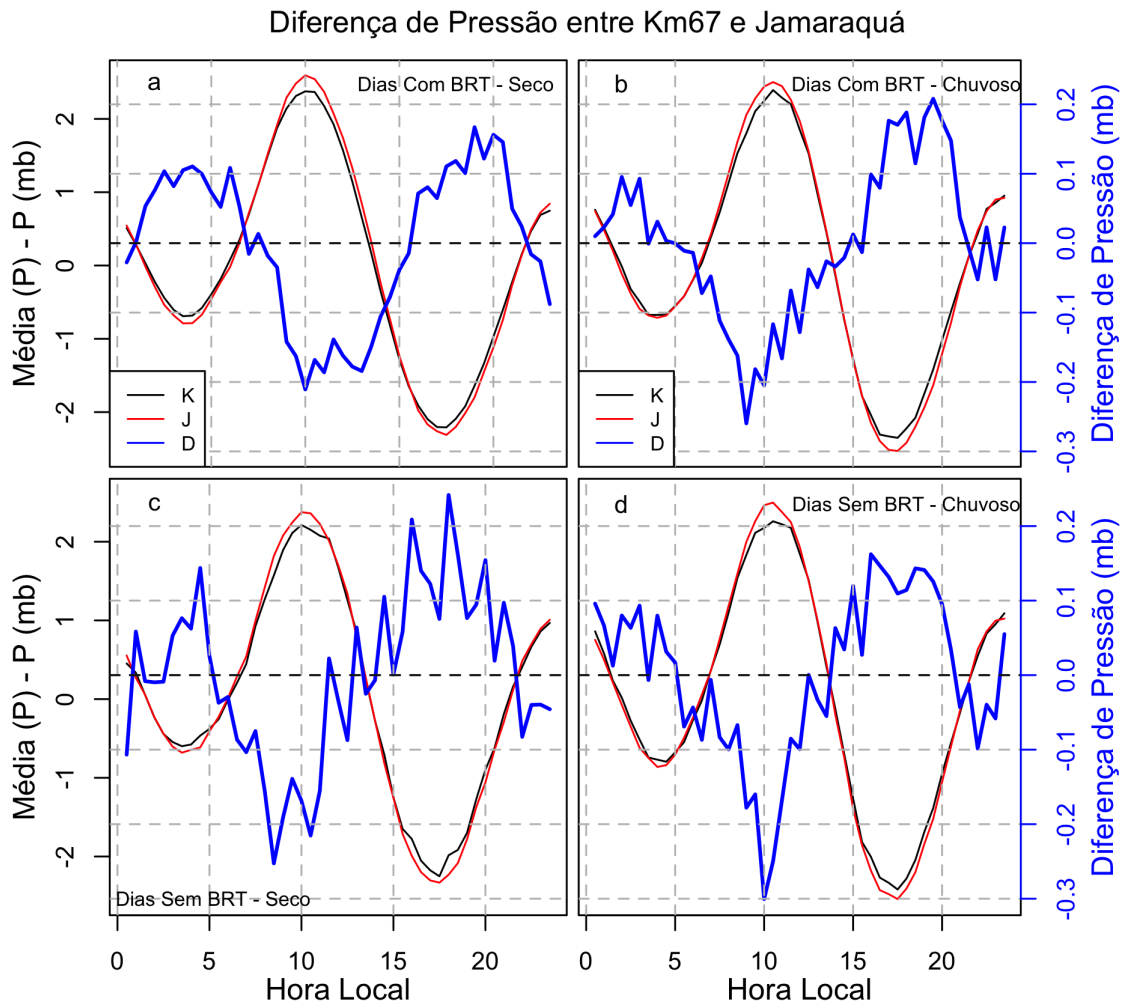


Figura 19 – Diferença de Pressão entre Km67 e Jamaraquá para dias com e sem BRT para os períodos seco e chuvoso. K: medida no Km67; J: Medida em Jamaraquá; D: Diferença de Pressão.

Considerando agora, a análise de apenas os dias que tiveram BRT no KM67, constatou-se que as mudanças na pressão são minuciosas durante o fenômeno da brisa (durante o dia), chegando em média, no máximo, a 0.2mb, entre Jamaraquá e Km67. Esses resultados, comparados a Oliveira e Fitzjarrald (1993), são razoáveis, visto que na região de Manaus, a brisa do Rio Negro causa uma diferença horizontal de 0.5mb/100Km.

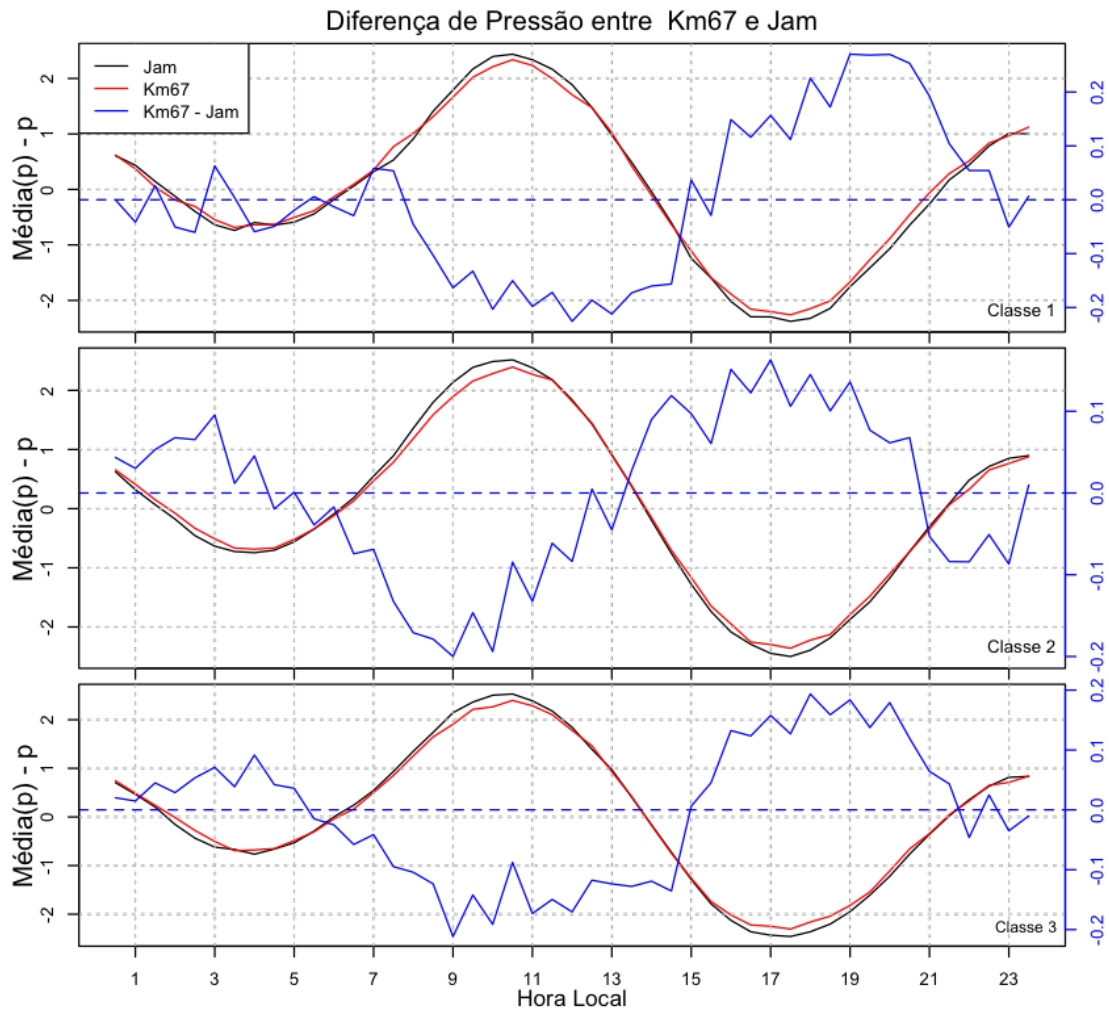


Figura 20 – Diferença de Pressão entre Km67 e Jamaraquá para diferentes Classes.

Agora fazendo o mesmo processo anteriormente descrito, porém dividindo por classes de BRT, as Classes Fraca, Média e Forte da BRT, notou-se que na média não há muitas diferenças entre os campos de pressão (rio-continente), porém em relação a duração, considerando o início e o término dessa diferença, é maior na Classe Forte (Classe 3) do que na Classe Fraca (classe 1), indicando a relação direta entre o valor máximo da velocidade que a brisa pode atingir com a duração da diferença de pressão entre os dois sites, como mostrado na **Figura 20**.

4.2 TEMPERATURA DO AR

Comparando as temperaturas, a estação sobre floresta apresenta valores maiores que na estação próximo ao rio, tanto no período chuvoso quanto no período seco, para dias com e sem brisa do rio, como mostra a **Figura 21**, na qual foi levado em conta a comparação da temperatura para dias em que ocorre ou não a brisa simultaneamente nos dois sítios. Ressalto que a estação de Jamaraquá é cercada a Leste por um campo de futebol de terra (parcialmente gramada), a Oeste pelo rio Tapajós e a Norte e Sul uma pequena porção de floresta. Outro fato interessante é que o

rio Tapajós varia sua posição em relação à estação de Jamaraquá, ficando a alguns metros, no período chuvoso, a até centenas de metros de distância, formando uma extensa praia, no período seco.

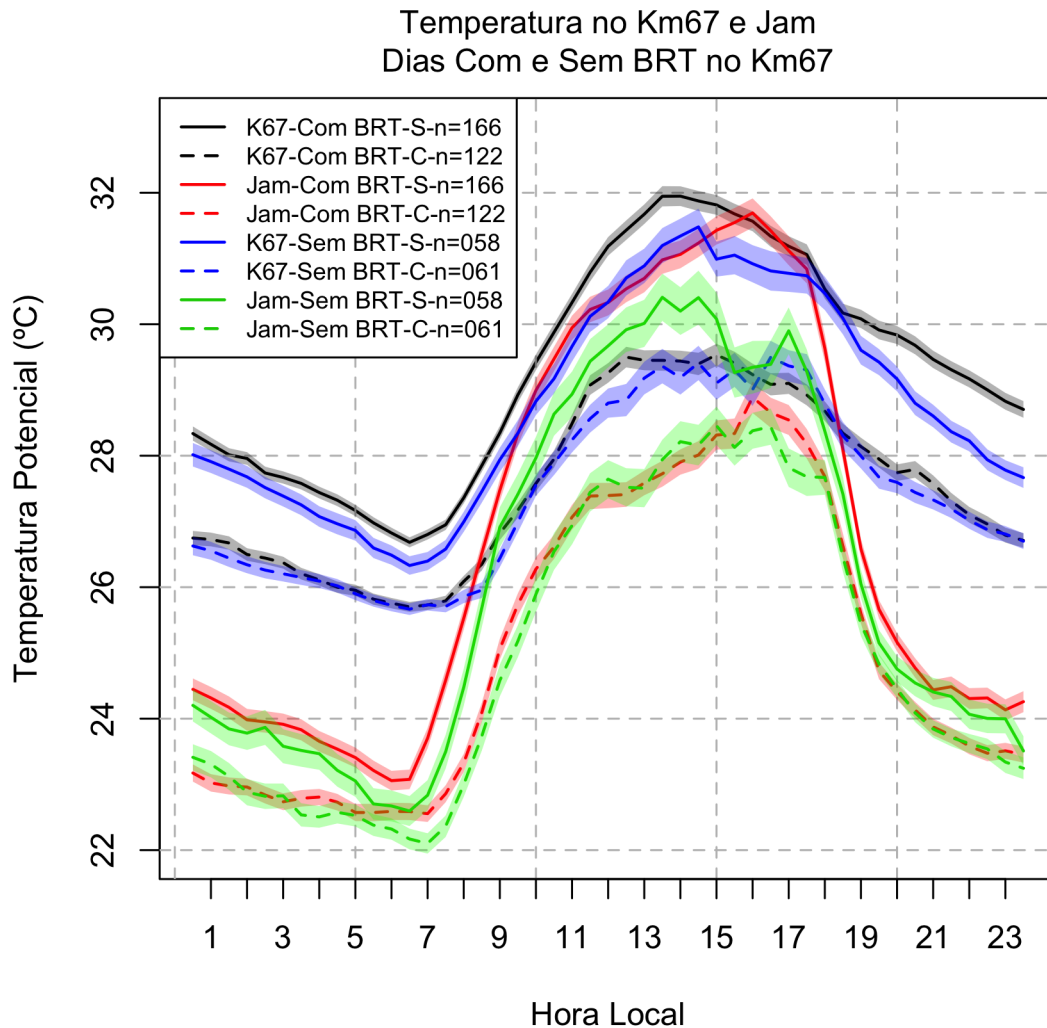


Figura 21 – Temperatura do ar no Km67 e Jamaraquá para dias com e sem BRT no Km67 para o período seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

A **Figura 21**, apresentada mostra que para o período seco as diferenças maiores na temperatura ocorrem durante o período noturno que podem chegar até 5.1°C as 2100LT, sempre com a temperatura próximo ao rio menor que sobre a floresta. Isso se deve ao fato da presença da areia da praia e campo de futebol próximos a estação do rio resfriarem muito mais rapidamente que a floresta.

Entrando mais especificamente no fenômeno da brisa do rio, que ocorre exclusivamente no período diurno, verifica-se que os máximos de temperaturas, para o período seco, ficam em torno de 31.9°C próximo às 1330LT, indicando que as temperaturas maiores, cerca de 0.4°C

(antes do meio dia) à 0.85°C (após o meio dia) comparada com dias sem BRT, também pode ser um indicativo da ocorrência de brisa do rio.

Percebe-se, que no período seco, que a diferença inicial às 0600LT é cerca de 3.7°C e diminui no decorrer da manhã até às 1100LT para 0.38°C . Após às 1100LT a diferença aumenta gradativamente até chegar ao máximo de 0.97°C às 1300LT, a partir daí as diferenças voltam a diminuir chegando às 1630LT a terem a diferença de apenas 0.085°C . Chegando o período noturno as diferenças voltam a ser maiores. No período chuvoso para dias com BRT o comportamento é muito similar, porém as diferenças de temperaturas são maiores e chegam a cerca de 2°C , às 1230LT, e as diferenças mínimas chegam a 0.3°C próximo as 1600LT.

Para dias sem BRT, as diferenças de temperatura se mantêm, com a floresta sempre mais quente do que a região próxima ao rio Tapajós. As diferenças, durante o período diurno, são de no máximo 3.5°C e mínimo de 0.53°C , às 0700LT e 1030LT respectivamente, no período seco, e de 3.6°C às 0700LT e 0.62°C às 1600LT para o período chuvoso. Isso mostra que nos dias com BRT, tanto no período chuvoso quanto no seco, há uma melhor mistura da camada de ar sobre a floresta com a camada de ar próxima do rio, fazendo com que as diferenças de temperatura sejam menores do que em dias com BRT, como mostrado na **Figura 21**.

Ainda de acordo com a **Figura 21** é possível ver que para dias sem BRT, sobre o Km67, teve um pequeno decréscimo na temperatura diferente de Jamaraquá que apresentou uma deflexão maior entre às 1400 e 1700LT. Esse fato acontece porque para a comparação das temperaturas mostradas foram selecionados dias com e sem BRT no Km67, sendo usados os mesmos dias para Jamaraquá, que contém a maioria dos dias com BRT, mostrando esse efeito.

De fato, é possível afirmar que as medidas em Jamaraquá são diretamente afetadas pela área ao redor da mesma e não apenas pelo rio, e verificar o mecanismo de BRT por meio da temperatura do ar é muito difícil. Analisando alguns casos, é possível notar que logo que há a inversão do vento em Jamaraquá a temperatura medida pela estação decresce consideravelmente em relação a Floresta (Km67), e essa diferença foi de 1.1°C no dia Juliano 295 de 2002 e 2.1°C , no dia 082 de 2003, como mostrado nas **Figuras 22 e 23**, respectivamente.

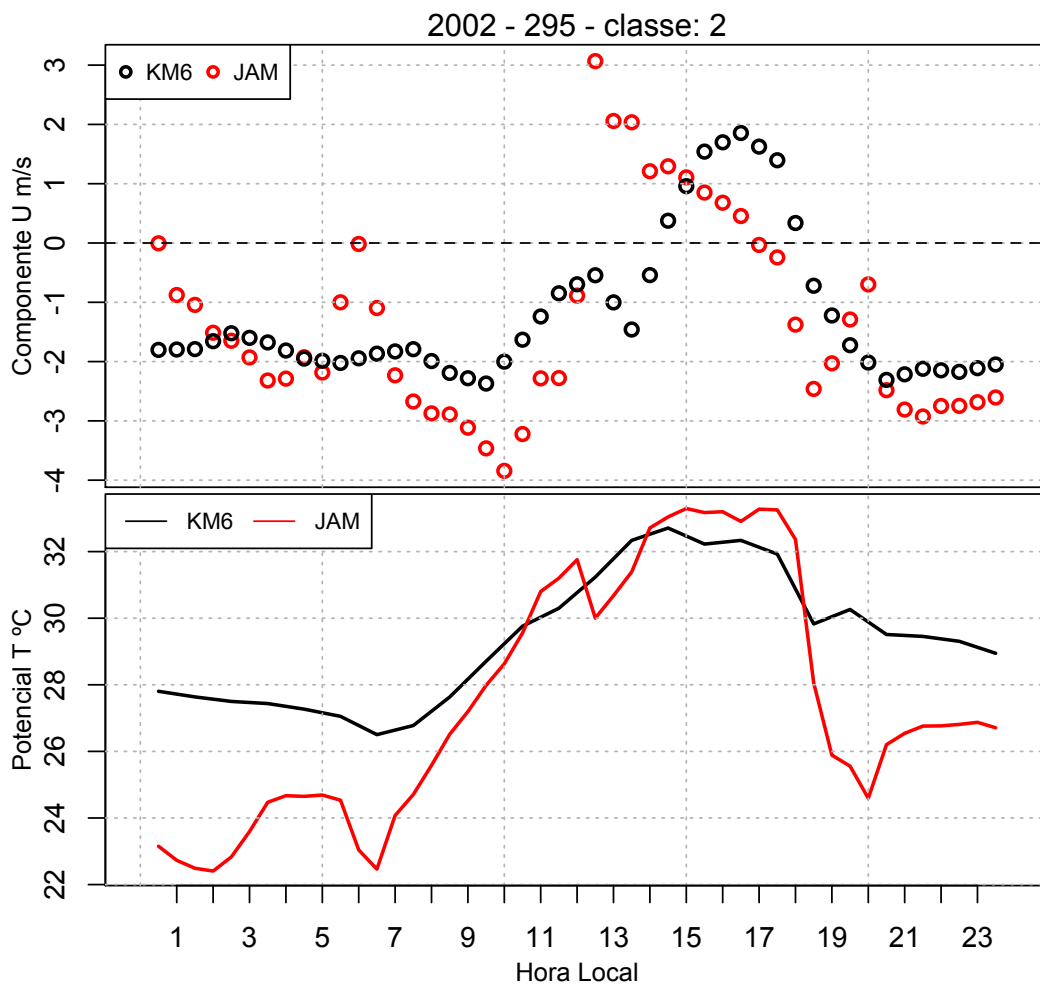


Figura 22 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jamaraguá. Dia Juliano 295 de 2002, Classe 2 de BRT.

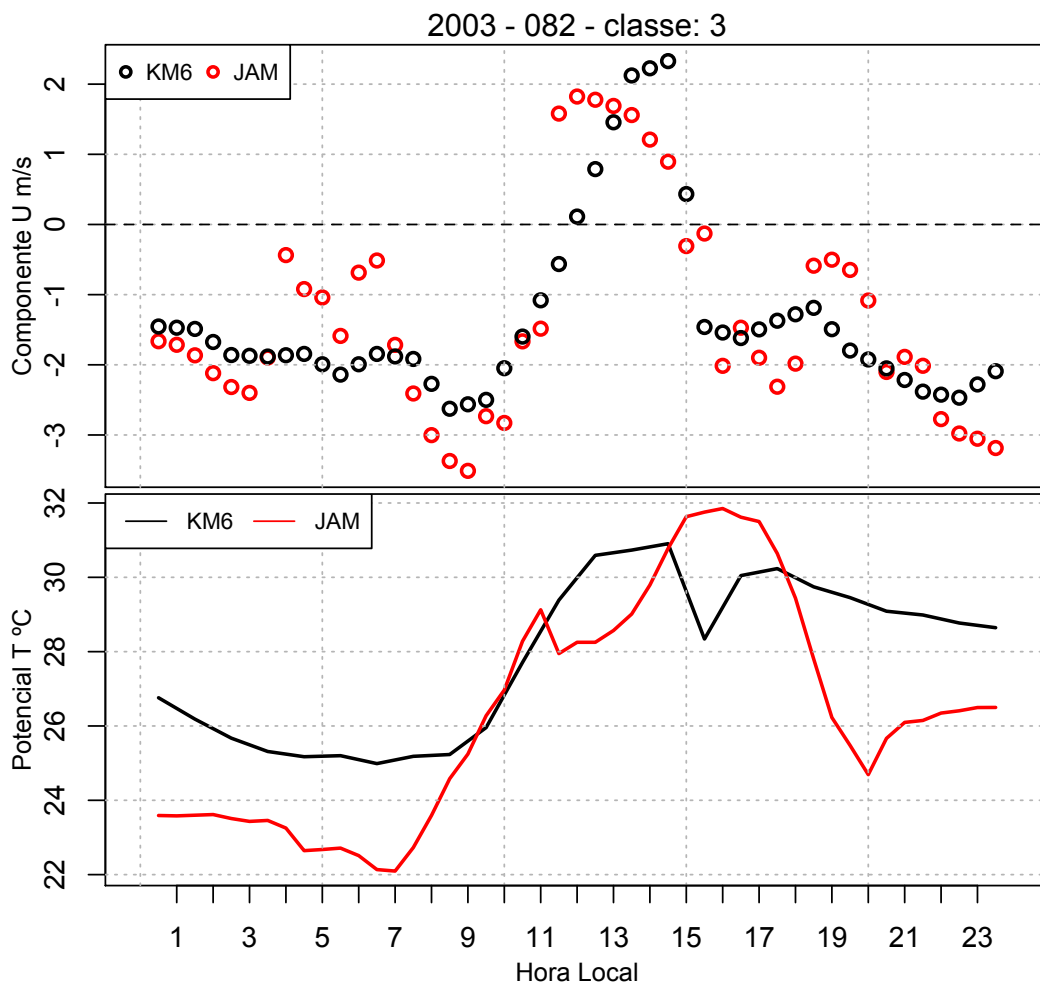


Figura 23 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jaramaquá. Dia Juliano 082 de 2003, Classe 3 de BRT.

Em várias outras situações, como na **Figura 24**, é difícil verificar essa diferença de temperatura causadora da BRT, isso ocorre principalmente por conta da área e tipo de cobertura da região ao redor da estação de Jamaraquá, como citado anteriormente, dificultando descrever um padrão para o mecanismo da brisa através da diferença de temperatura entre as duas áreas distintas, Rio e Floresta.

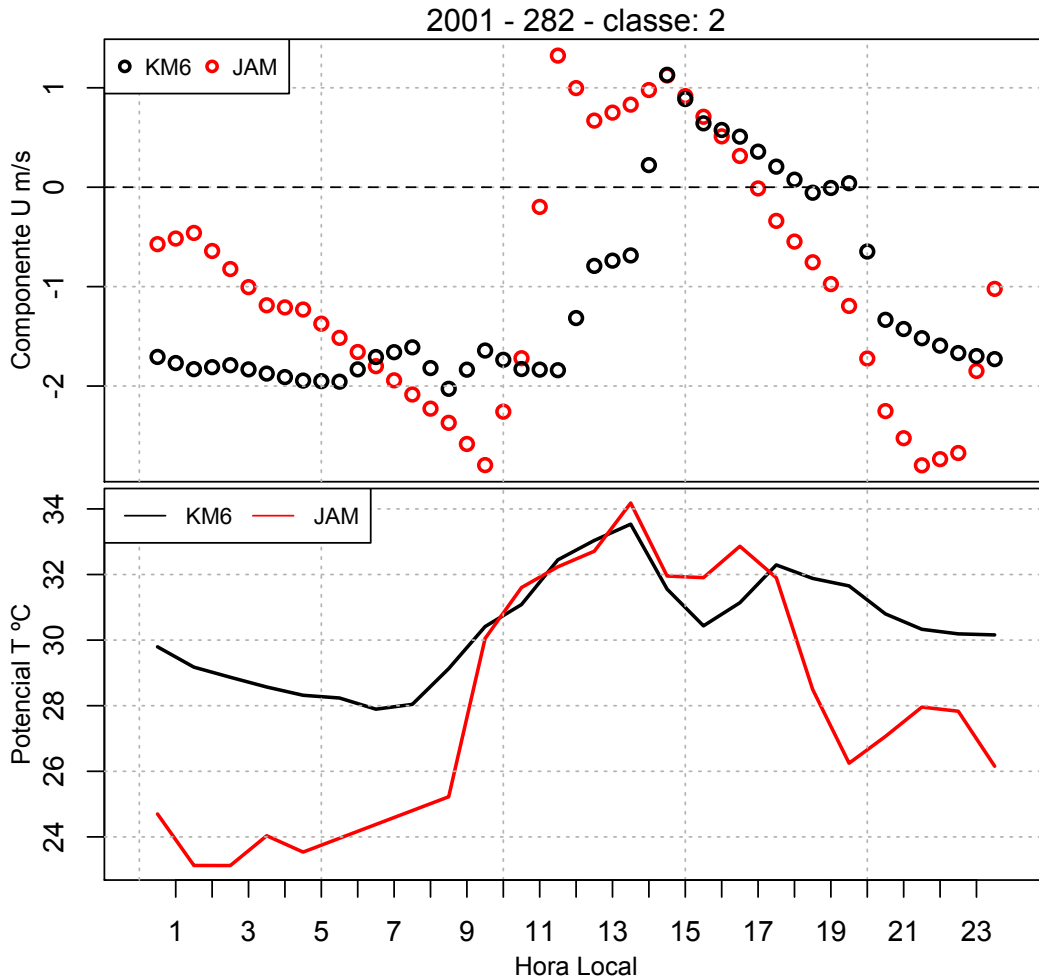


Figura 24 – Componente u do vento e temperatura no Km67 e em Jamaraquá. Dia Juliano 282 de 2001, Classe 3 de BRT.

Apesar dessa dificuldade em filtrar as influências sobre as medidas em Jamaraquá, observando apenas para a floresta, nos casos apresentados nas **Figuras 22, 23 e 24**, que há uma diminuição da temperatura logo após a inversão do vento naquele local, indicando que o ar sobre a floresta é misturado com o proveniente do rio, com temperaturas menores, fazendo com que a temperatura sobre a Flona Tapajós diminua, ou até mesmo deixe de aumentar, de acordo com o ciclo horário.

Como o fenômeno de brisa ocorre devido a diferença de temperatura (e pressão) entre duas superfícies, e não foi possível verificar isso diretamente entre as diferenças entre as medidas sobre a floresta (Km67) e próximo ao Rio Tapajós (Jamaraquá), foi usado medidas indiretas, a partir de imagens de satélite tratadas de acordo com o **capítulo 2, seção 2.2.4**.

A análise das imagens teve como objetivo verificar se havia algum limiar de diferença de temperatura entre as superfícies do Rio Tapajós e Floresta para o funcionamento do fenômeno de BRT. Diferentemente dos dados de estações, mostrado na seção anterior, as estimativas indiretas de satélite deverão, a partir do ponto que se escolhe, mostrar efetivamente a diferença de temperatura entre os distintos tipos de cobertura superficial.

Na **Figura 25**, há um exemplo de produto produzido por meio do tratamento de imagem.

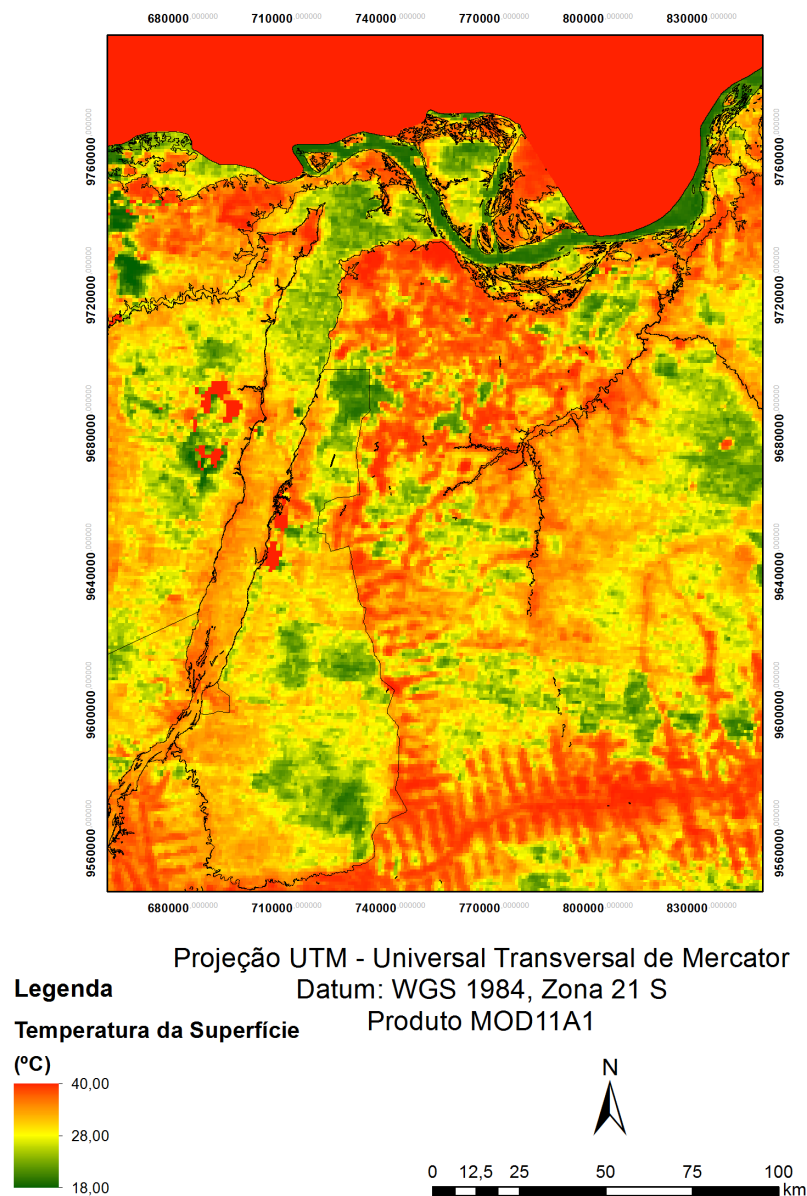


Figura 25 – Temperatura da superfície (°C) a partir do produto MOD11A1 do sensor MODIS/TERRA para o dia 29 de julho de 2004, às 10:31LT (MACHADO, 2017). Santarém e FNT são indicados na figura.

Como é possível verificar na **Figura 25**, existe grande variação da temperatura na área de estudo, tanto longitudinal quanto latitudinal, mostrando que tanto os rios quanto a FNT apresentam valores menores de temperatura, comparado a áreas antropizadas. Em trabalho

similar, mais em uma escala global, Li et al. (2015) mostrou que áreas de floresta, em relação a áreas antropizadas, para região equatorial, tem papel de resfriar a área ao redor e isso se confirma onde a densidade de floresta é maior ao sul e extremo norte da FNT.

Para uma análise mais detalhada, dando um zoom sobre a área próximo ao norte da FNT, e com intuito de encontrar o limiar de diferença de temperatura superficial para o funcionamento da BRT, as 66 imagens tratadas foram classificadas, a partir dos dados de vento medidos no Km67, e em: 52 como sendo sem BRT e 14 são dias com BRT. Foram feitos três cortes longitudinais, incluindo o Rio Tapajós, Floresta e áreas antropizadas. Esses três cortes deverão indicar tanto as diferenças de temperatura em um corte sobre a Flona Tapajós (corte do centro – linha vermelha - **Figura 26**), quanto mais ao norte, próximo a cidade de Belterra (linha preta) e ao Sul (linha azul), próximo a estação Km117. Além dos cortes latitudinais (três linhas em diferentes latitudes), três diferentes pontos (área hachurada na **Figura 26**) em cada latitude foram escolhidos para se comparar a temperatura. Cada ponto desse foi escolhido de acordo com as características superficiais, rio, floresta, e área antropizada, respectivamente (exceto a linha ao Norte que tem apenas o rio, a Oeste, e áreas antropizadas ao Leste).

Figura 26 Temperatura superficial para três longitudes diferentes para o dia 22 de setembro de 2008, classificado como dia com Brisa do Rio Tapajós. A cidade de Belterra, Torre Km67, Estação Km117 e rio Tapajós também são indicados.

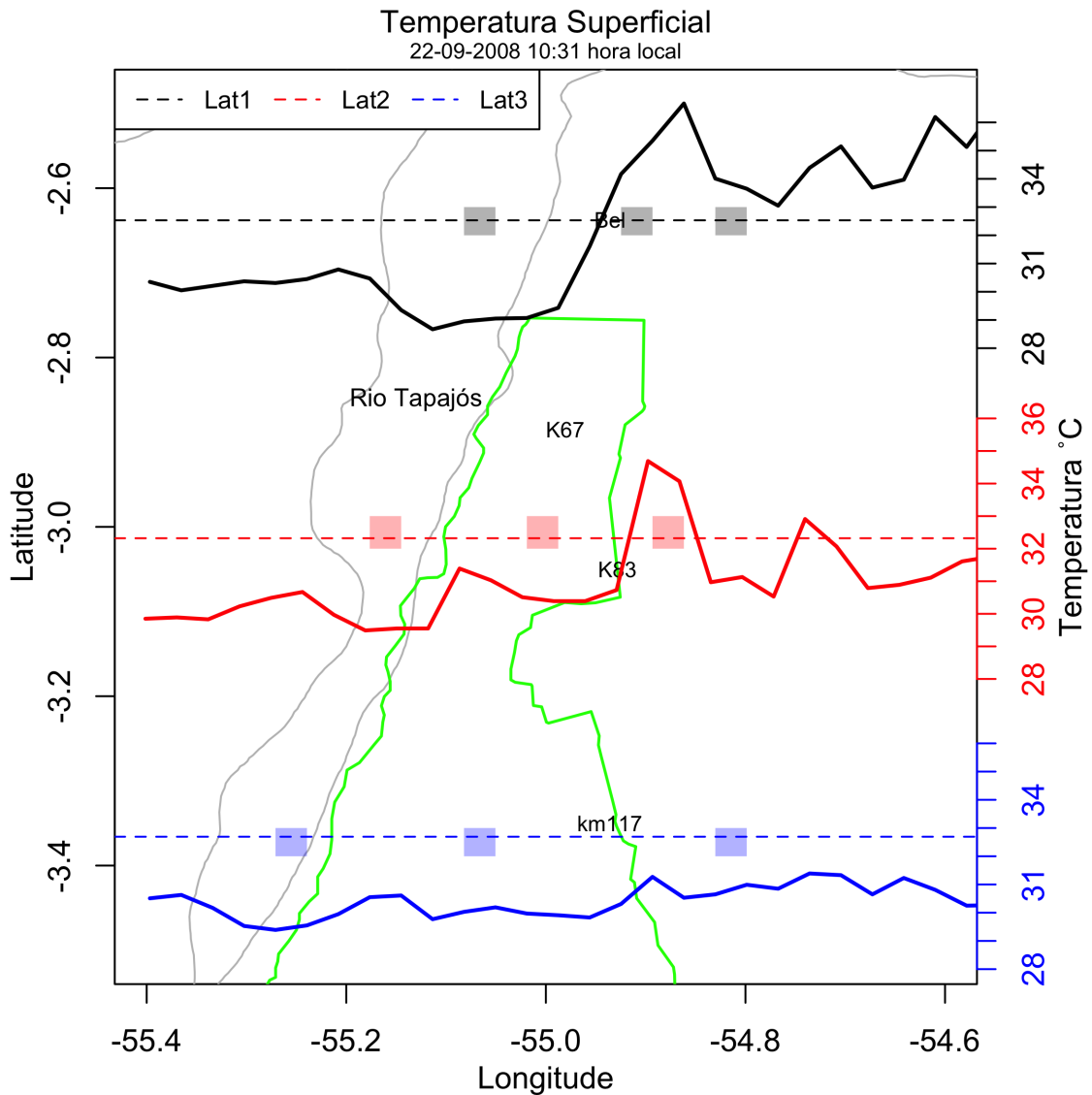


Figura 26 – Temperatura superficial para três longitudes diferentes para o dia 22 de setembro de 2008, classificado como dia com Brisa do Rio Tapajós. A cidade de Belterra, Torre Km67, Estação Km117 e rio Tapajós também são indicados. Áreas hachuradas serão usadas para comparação.

A partir da **Figura 26**, do dia com BRT, 22 de setembro de 2008, é possível verificar que existe diferença de temperatura superficial entre o Rio, Floresta e Área Agrícola (ou antropizadas). As diferenças são mais percebidas ao norte da área analisada (linhas preta e vermelha) do que ao sul (linha azul). Ao Norte (linha preta) a diferença de temperatura chega a 8°C menor no rio do que na área a Leste, usada como área agrícola e desmatada ao redor da cidade de Belterra. No meio da **Figura 26** (linha vermelha), a temperatura superficial da Floresta é cerca de 1 a 1.8°C maior que no rio, e 5.1°C maior na Área Agrícola comparada com a temperatura do rio Tapajós, esse efeito deve reforçar o mecanismo da BRT sobre a floresta e também causar a “brisa de vegetação” sobre as áreas desmatadas, com vento no sentido floresta-área desmatada. Já mais ao Sul (linha azul), mostrou que a temperatura não varia tanto quanto as outras latitudes, mais a diferença fica entre 0.91 e 1.5°C entre o rio e a Floresta e área a Leste. Isso se deve, tanto a largura menor do Rio Tapajós nesse ponto, cerca de 12 km, mas principalmente a maior presença

de área de floresta a Leste do Rio.

Fazendo o uso dos dados disponíveis, para as mesmas latitudes (áreas destacadas para as latitudes mostradas na **Figura 26**, em preto-Norte, vermelho-meio e azul-Sul) e tomando como referência o rio Tapajós a Oeste, foi possível notar claramente que para dias com BRT existe um gradiente positivo (aumento de temperatura) no sentido Oeste-Leste, e um gradiente negativo (diminuição de temperatura) no sentido Norte-Sul, sendo que esses gradientes são mais evidentes para dias com BRT.

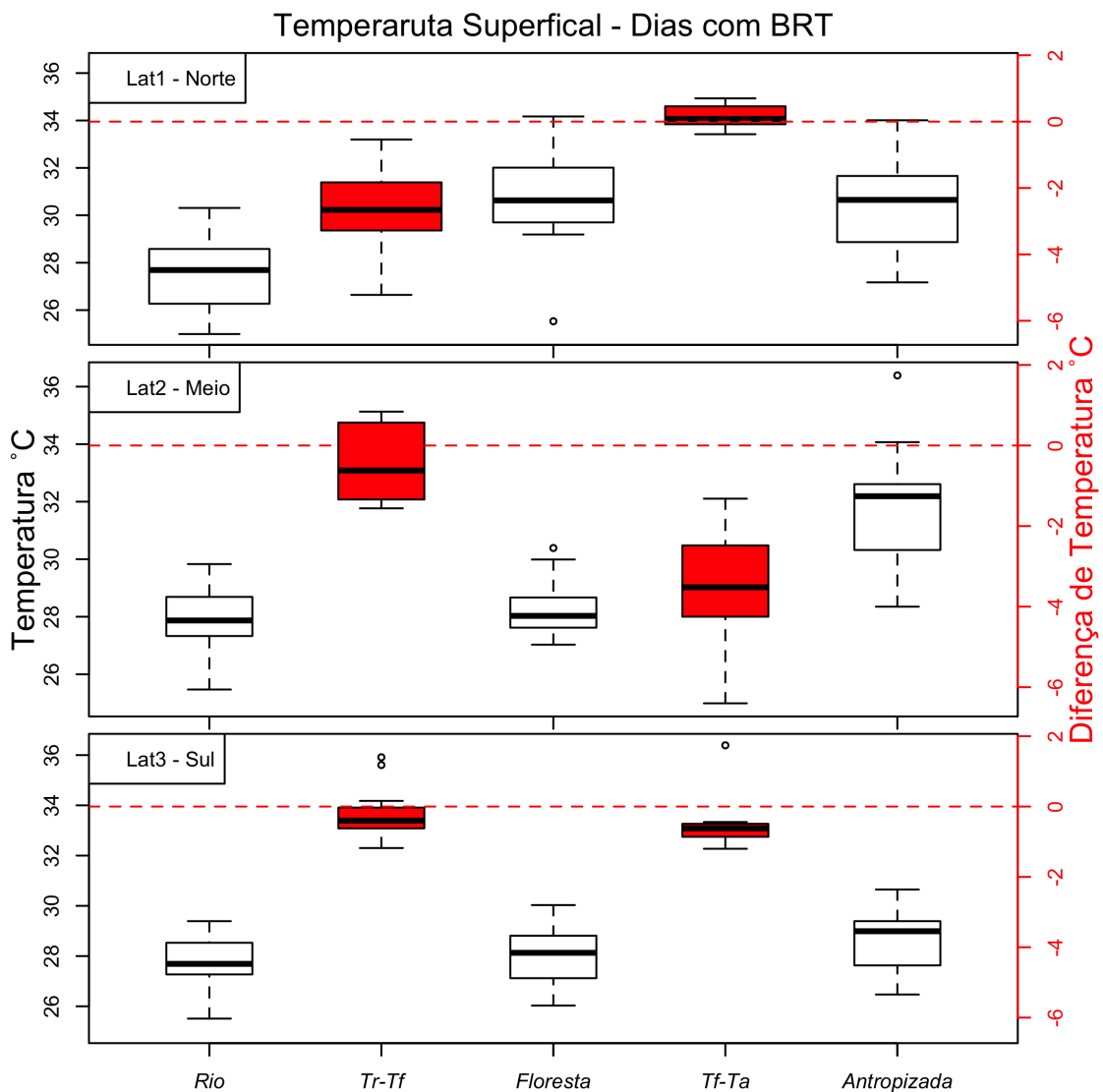


Figura 27 – Temperatura superficial para dias com Brisa do Rio Tapajós no Km67 e as diferenças de temperaturas entre essas superfícies (vermelho) para diferentes Latitudes, de acordo com a **Figura 26** anterior. Tr-Tf: Diferença entre temperatura do rio e floresta; Tf-Ta: Diferença de Temperatura entre Floresta e área Antropizada.

As Figuras **27** e **28** mostram a distribuição da temperatura superficial em diferentes latitudes, de acordo com a localização indicada na **Figura 26**, contendo medidas para o rio, floresta, e áreas antropizadas, além disso, foi feita a diferença de temperatura entre essas superfícies.

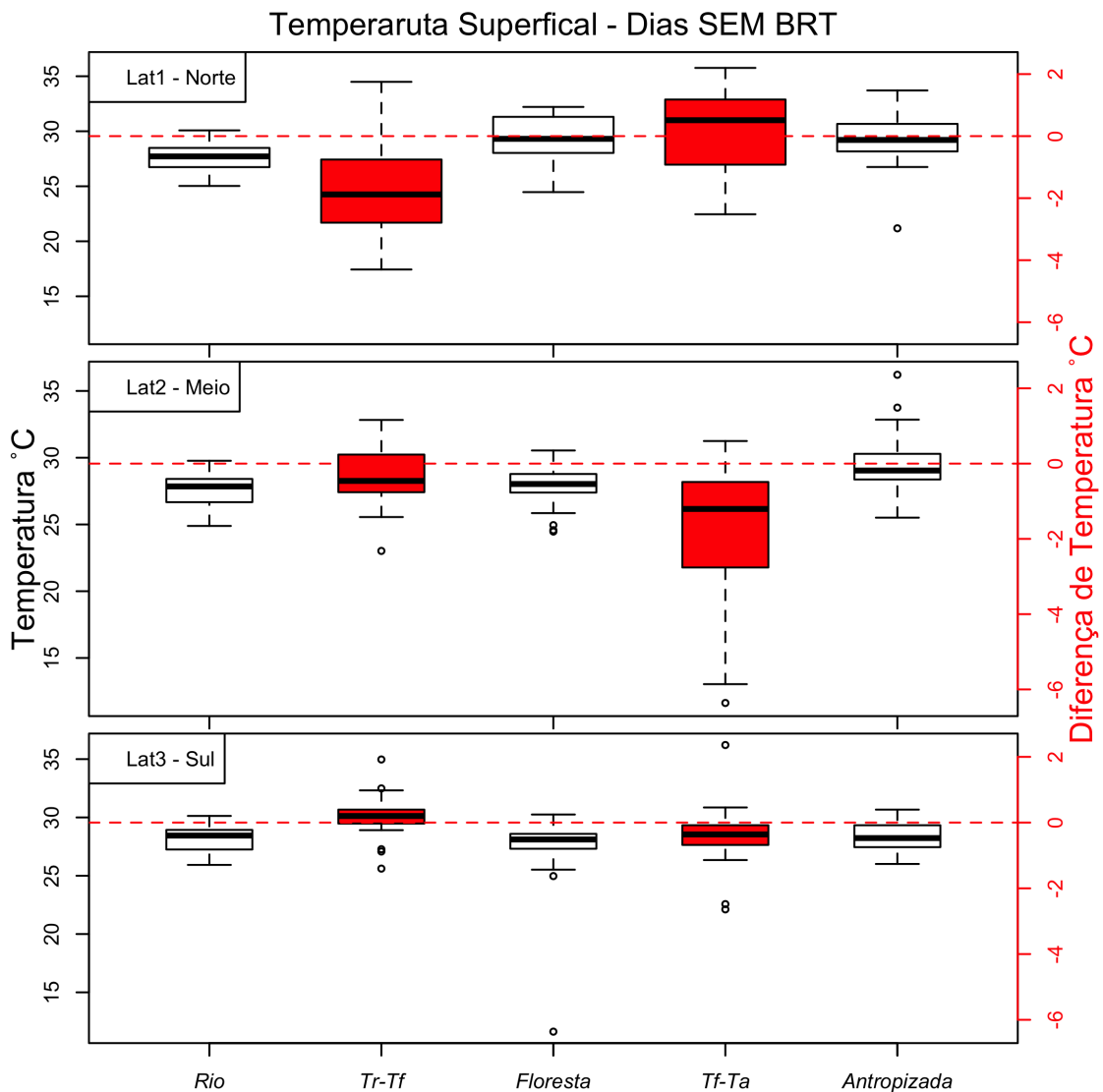


Figura 28 – Temperatura superficial para dias SEM Brisa do Rio Tapajós no Km67 e as diferenças de temperaturas entre essas superfícies (vermelho) para diferentes Latitudes, de acordo com a **Figura 27** anterior. Tr-Tf: Diferença entre temperatura do rio e floresta; Tf-Ta: Diferença de Temperatura entre Floresta e Agricultura.

As análises mostram que ao norte as diferenças entre Rio Tapajós e as superfícies à Leste (Floresta, Agricultura ou Desmatadas) são maiores que ao sul, e isso é predominante, tanto em dias com ou sem BRT. Mais especificamente na latitude-meio, local onde temos Rio, Floresta e Campo Agrícola, e onde ocorre efetivamente o fenômeno de BRT, é possível afirmar, de acordo com as **Figuras 28 e 29**, que as temperaturas superficiais são maiores em dias com BRT do que sem BRT. Considerando a temperatura média das superfícies, em dias com BRT, a diferença de temperatura entre Rio e Floresta é de 1.06°C , e entre Floresta e Campo agrícola de 2.37°C . Já para dias sem BRT, para mesma latitude, as diferenças de temperatura são de 0.28 e 1.61°C , respectivamente entre Rio e Floresta e entre Floresta e Campo Agrícola. Essas diferenças demonstram claramente que para ocorrer o fenômeno de Brisa do Rio Tapajós deve haver uma diferença significativa de temperatura, de pelo menos 1°C , e que também a diferença

de temperatura acentuada entre Floresta e Campo Agrícola deve ajudar a alimentar o mecanismo da brisa, visto que os valores foram cerca de 0.76°C maiores que nos dias sem BRT.

Vale ressaltar que, foram poucas imagens analisadas, e que os valores médios indicam resultados importantes que devem ser levados em consideração, visto que existem poucas medidas da temperatura superficial sobre o Rio Tapajós e concomitantemente sobre a floresta. Outro fato importante é que podem haver dias que não apresentem esse padrão apresentado, pois devido ao mosaico de superfícies, sazonalidade, condições climáticas, cobertura de nuvens, podem e devem ocorrer diferenças entre os valores apresentados, visto que os dados das imagens analisadas são apenas do período seco e instantâneas para o horário de 1031LT, ressaltando a importância de estudos futuros envolvendo imagens provenientes de outros satélites e em outros horários, além de medidas *in situ* para reforçar os resultados.

CAPÍTULO 5 - INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE AS MEDIDAS NA FLONA

5.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Para verificar o efeito da Brisa do Rio Tapajós (BRT) sobre as variáveis medidas na Flona Tapajós fez-se uma análise dos dados medidos na Torre KM67. Para melhor verificar as influências da BRT, os dias foram divididos em dias com e sem BRT, de acordo com a inversão da componente u do vento, como já trabalhado no **Capítulo 3, seção 3.3**.

5.2 UMIDADE ESPECÍFICA

5.1. Usando dados da Torre Km67 e também de perfis atmosféricos de baixa troposfera é possível fazer uma análise mais completa sobre a influência da BRT sobre a umidade e temperatura. A Figura 30 a seguir mostra o ciclo diário médio da umidade específica no Km67 nos diferentes casos, levando em consideração a sazonalidade.

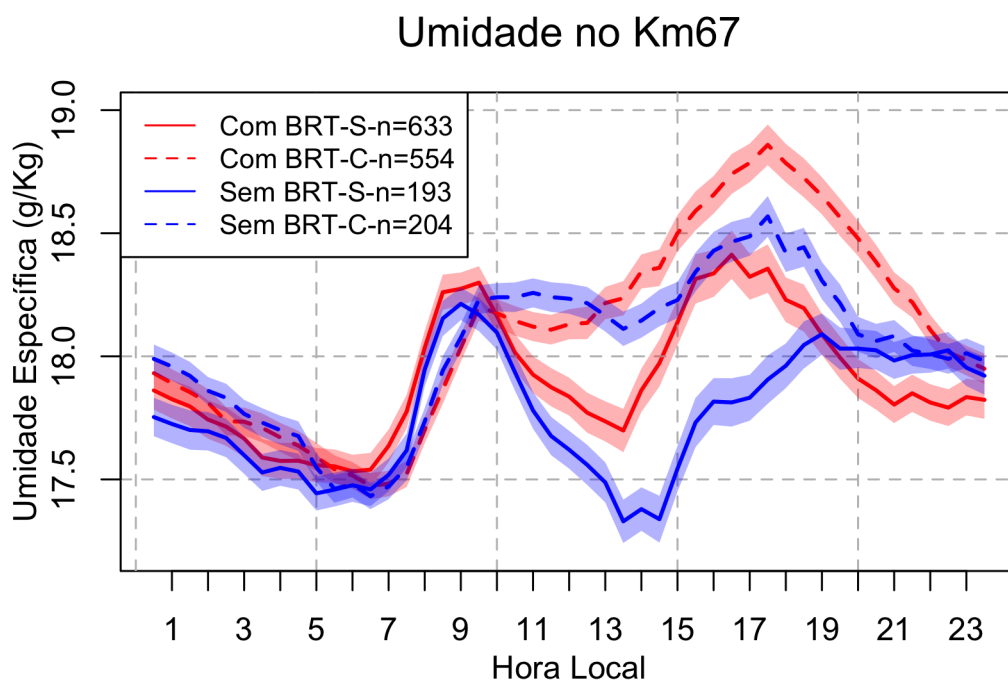


Figura 29 – Umidade Específica no Km67 para o período seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

De acordo com a **Figura 29**, é possível verificar claramente que há uma diferença máxima de umidade de até 0.55 g/Kg entre os períodos chuvoso e seco, se levarmos em conta todos os

dias de dados. Durante o período noturno, acima da floresta, não há muita mudança na umidade, que diminui gradativamente de aproximadamente 18.2 g/kg até próximo de 17.5 g/kg, tendo um aumento repentino durante o início da manhã, devido a umidade acumulada sob as árvores durante a noite ser misturado e logo pela manhã, com o início do processo de turbulência (ACEVEDO et al., 2008).

Tendo em vista a perspectiva de dias com e sem BRT, ainda observando a **Figura 29**, fica evidente a influência da Brisa do rio Tapajós na umidade sobre a Flona Tapajós. Para os dias com Brisa, verifica-se que há um aumento até 0.63 g/Kg no período seco e 0.38g/Kg no período chuvoso, comparado com a média dos valores de umidade para dias sem brisa.

De maneira geral o ciclo de umidade indica que há diminuição, após o aumento inicial na pela manhã, e depois um aumento no fim da tarde novamente. Essa diminuição de umidade durante o dia, sobre a Flona, é resultado da mistura do ar mais seco vindo do campo agrícola à Leste, que no período seco é mais evidente que no período chuvoso, devido a maior disponibilidade de umidade no período chuvoso. Ainda observando a **Figura 29**, fica mais claro que nos dias sem BRT a diminuição da umidade é muito mais acentuada, principalmente no período seco.

Se fizermos a relação entre as Classes da brisa com a umidade específica sobre a Flona, como mostrado na **Figura 30**, é possível perceber que em todos os casos de Classes de BRT e período sazonal do ano, devido a BRT, há acúmulo de umidade sobre a floresta. Isso ocorre justamente pelo motivo já citado acima, no qual a brisa mantém o ar úmido, bombeado pela floresta, sobre a Flona. Verifica-se ainda que durante o período seco a BRT de Classe Forte (Classe 3) é mais eficiente para aumentar a umidade sobre a Floresta, e para dias com outras duas Classes de brisa, Fraca e Média (Classe 1 e 2), a umidade tem comportamento similar, diferenciando os valores e os horários de aumento. Já durante o período chuvoso, para dias com a BRT de Classes Forte e Fraca a umidade tem comportamento similar, em valores, e a Classe Média se mostra mais eficiente para acumular umidade sobre a floresta.

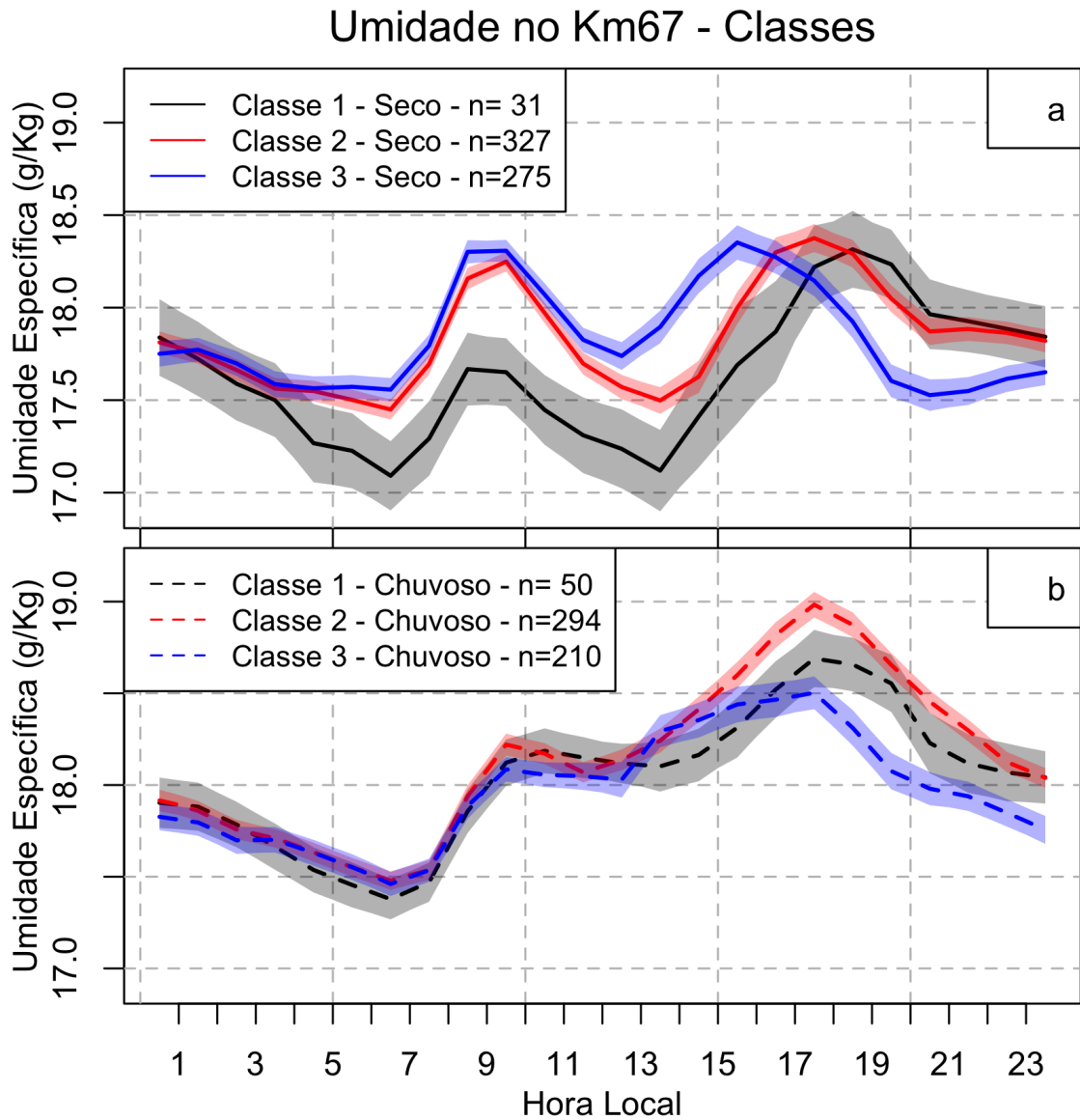


Figura 30 – Umidade específica no Km67 para diferentes classes para os períodos seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

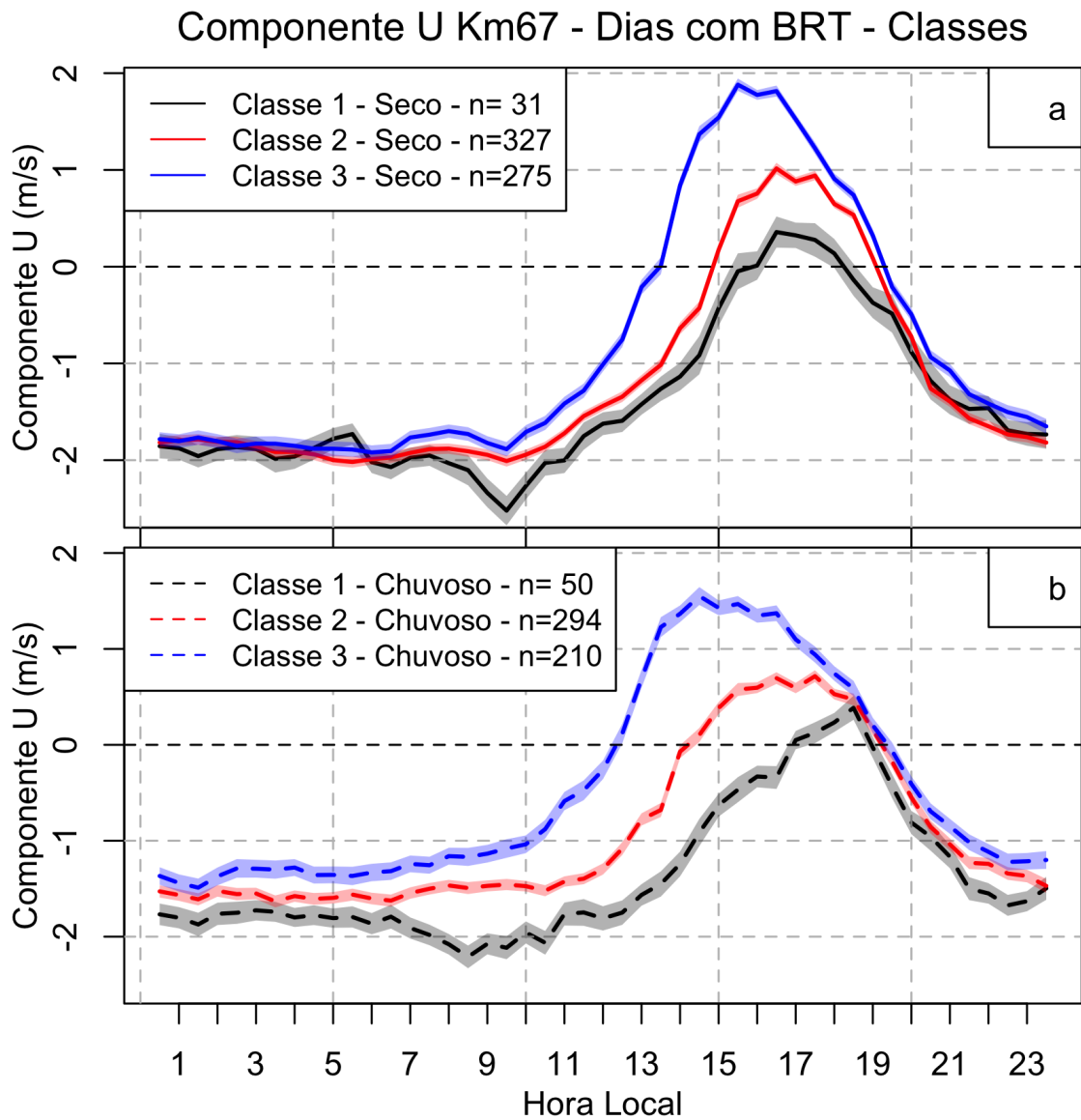


Figura 31 – Componente u da velocidade do vento sobre a Flona Tapajós em dias com Brisa, de acordo com a classe e períodos seco (S) e chuvoso (C). Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

As **Figura 30 e 31** mostram que o efeito da BRT sobre a umidade é diretamente proporcional ao horário de início e fim da brisa, e aumento da umidade é diretamente proporcional ao tempo de duração da brisa, de modo que quanto mais tempo demora a BRT mais tempo a umidade se mantém elevada. Com base na **Figura 31** é possível verificar que o efeito se inicia a partir das 1000LT, momento em que a velocidade u passa a aumentar, indo do negativo (sentido Leste-Oeste) para o positivo (Oeste-Leste), mantendo-se positiva até cerca de 1900LT.

Com isso, fez-se uma correlação entre as duas variáveis, levando em consideração o período de 1100LT até as 2100LT, visto que também há um atraso entre a mudança da direção do vento e a mudança da umidade específica. A seguir, nas **Figuras 32 e 33**, mostram-se as correlações existentes entre umidade específica e BRT, para os dois períodos, seco e chuvoso.

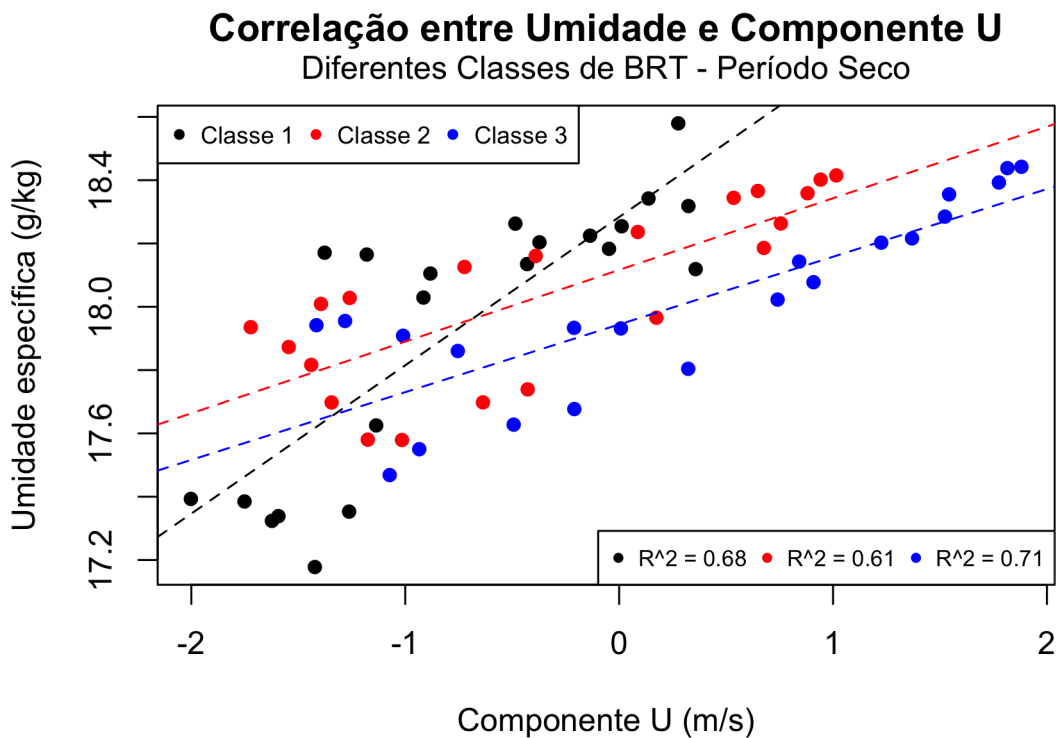


Figura 32 – Correlação entre Umidade e componente u do vento para diferentes classes de brisa para o período Seco. As retas pontilhadas são as regressões lineares para cada classe de acordo com a legenda. R^2 também é indicado.

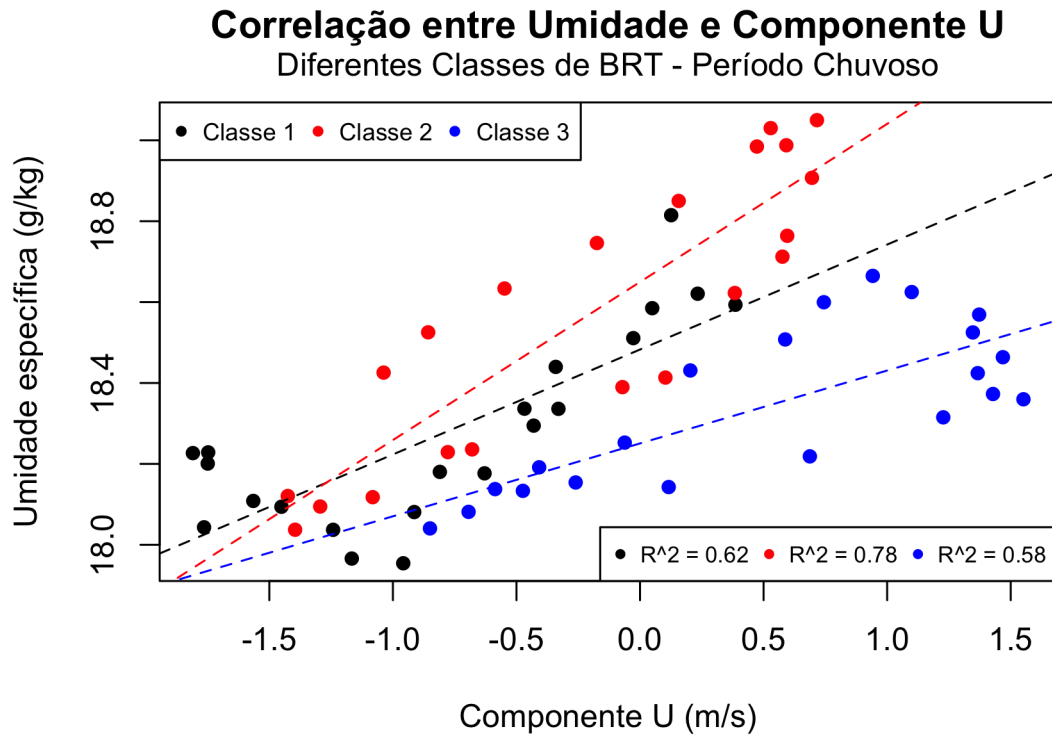


Figura 33 – Correlação entre Umidade e componente u do vento para diferentes classes de brisa para o período Chuvoso. As retas pontilhadas são as regressões lineares para cada classe de acordo com a legenda. R^2 também é indicado.

As correlações entre a umidade e a componente u do vento para os dois períodos e três classes de brisa foram fortes, sempre acima de 0.76, mostrando que a BRT tem forte influência sobre a umidade. Para o período seco teve-se os seguintes valores para o Coeficiente de Correlação (R), 0.82, 0.78, 0.84, das seguintes Classes Fraca, Média e Forte, respectivamente. Já para o período chuvoso, para as Classes Fraca, Média e Forte, foram, respectivamente, de 0.79, 0.88 e 0.76. Já o Coeficiente de determinação (R^2), mostrados nos gráficos das **Figura 32** e **33**, mostram que em todos os casos, os valores para R^2 são médios e altos, confirmando que o aumento da umidade específica é explicado fortemente pela mudança da velocidade e direção do vento.

5.3 TEMPERATURA DO AR

Continuando as análises dos dados da Torre Km67, agora ressaltando as influências sobre a temperatura, a **Figura 34**, a seguir, mostra as diferenças de temperatura para os casos de dias com e sem brisa do rio Tapajós.

Temperatura no Km67

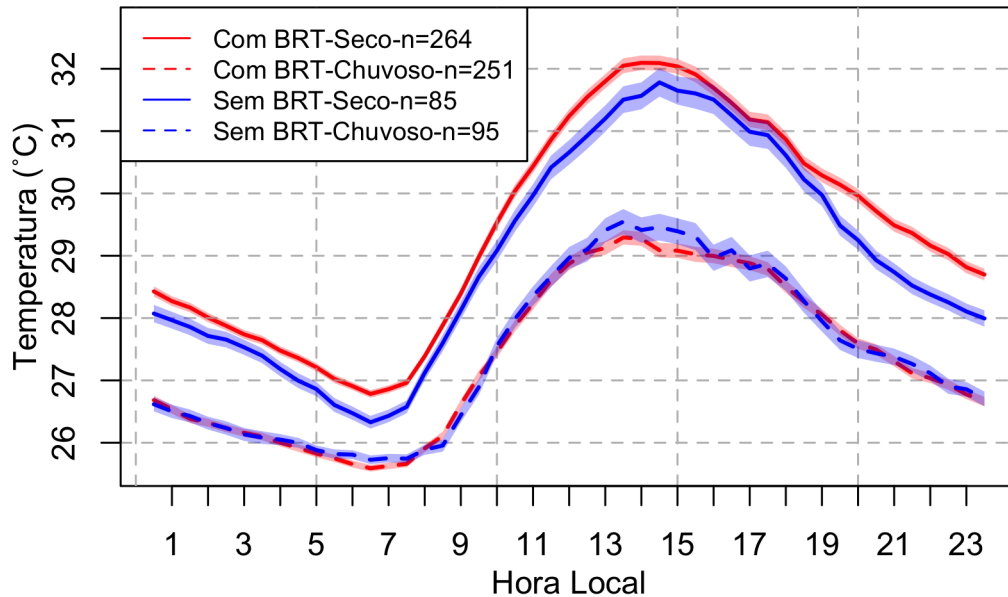


Figura 34 – Temperatura no Km67 em diferentes casos e de acordo com a sazonalidade. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

Observando a **Figura 34**, foi possível verificar que comparando os dias com e sem BRT tiveram diferenças na temperatura. No período seco a diferença máxima, durante o dia, ocorre às 1230LT, cerca de 0.62°C maior para dias com BRT do que sem BRT. Esse fato pode estar associado ao fato de que em dias com BRT deve haver maior aquecimento para que haja o fenômeno, como discutido no **Capítulo 4**, que tratou o Mecanismo da BRT. Já no período chuvoso, ocorre o inverso, a temperatura para dias sem BRT fica maior do que para dias com BRT, com uma diferença máxima, durante o dia, de 0.37°C às 1430LT. Como não houve análise de imagens para o período chuvoso, isso devido a grande presença de nuvens durante a estação, é possível que para os dias com BRT essa formação de nuvens seja mais intensa sobre a parte Leste do Rio Tapajós, como mostrado por Silva Dias et al. (2004) e Lu et al. (2005), e assim haja um menor aquecimento da área de floresta quando acontece o fenômeno durante a estação chuvosa.

Como a BRT carrega o ar com menor temperatura vindo de Oeste, do rio, e também aumenta a umidade sobre a floresta, esperava-se que a temperatura diminuísse automaticamente com a ocorrência da BRT, porém isso não é visto na média, como apresentando na **Figura 34**. Isso pode ser devido dois fatores: o primeiro fator é que nem sempre há a diminuição da temperatura sobre a floresta nos dias com BRT, pois como o ponto de medidas está cerca de 10Km do Rio Tapajós, o ar vindo do rio demora a chegar sobre a floresta e muitas vezes não chega, ou chega bem misturado, não diminuindo efetivamente a temperatura do ar no ponto de

média; e o segundo fator é que os dias que tiveram a diminuição efetiva da temperatura, como mostrado nas **Figuras 22, 23, 24** no **Capítulo 4, Seção 4.2**, podem estar sendo “diluídos” nas médias.

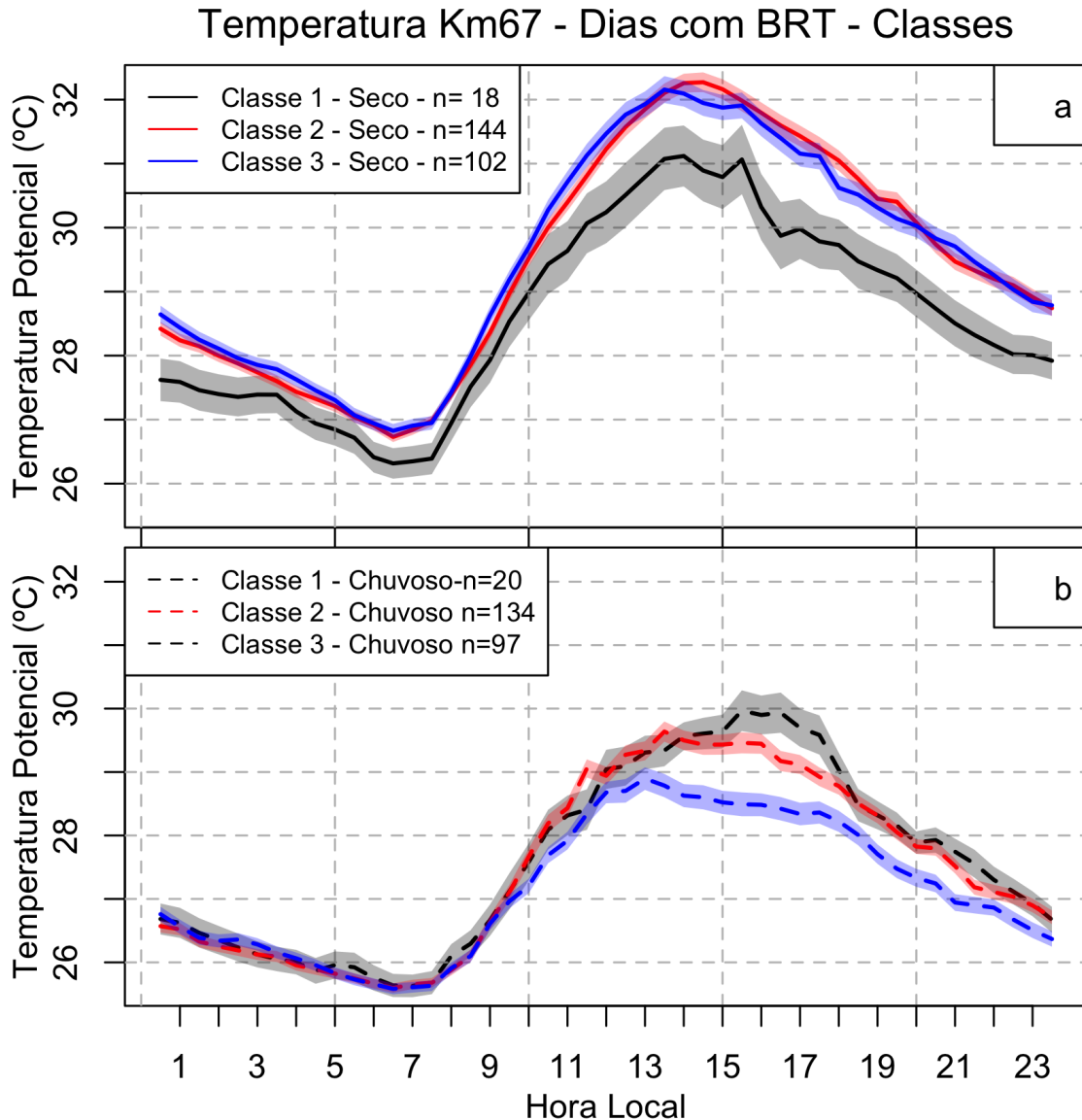


Figura 35 – Temperatura no Km67 em diferentes classes de BRT de acordo com a sazonalidade. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

Levando em conta as classes da BRT, de acordo com **Figura 35**, verificou-se que para o período seco, os dias com BRT de Classe Fraca (Classe 1) são mais eficientes para diminuir a temperatura sobre a Floresta em 1.72°C e 1.52°C , comparada com as Classes Média (Classe 2) e Forte (Classe 3), respectivamente. Durante o período chuvoso, a BRT de Classe Forte (Classe 3) é responsável por baixar a temperatura mais rapidamente, no máximo entre 0.76°C e 1.51°C , a mais que as outras classes de BRT. Faz-se necessário aqui pensar que para BRT mais fortes, há necessidade de maior diferença de temperatura entre o rio e a floresta, e conseqüentemente maior

aquecimento da floresta, o que deixa as temperaturas para dias de Classes Média e Forte mais elevadas.

Esse resultado, como comentado anteriormente, não traz efetivamente os efeitos da BRT sobre a temperatura, visto que analisando individualmente os dias é possível verificar mais claramente, em vários casos, a diminuição da temperatura em decorrência da inversão do vento. De fato, é possível ver, nas Figuras **22**, **23**, **24** no **Capítulo 4, Seção 4.2**, que a BRT baixa a temperatura, porém temos que levar em conta que o ar vindo do Rio pode ser misturado e a diminuição da temperatura não ocorra efetivamente, e sim sutilmente que não seja detectado nas análises gerais. Além disso, muitas vezes a duração da temperatura reduzida não é tão grande quanto a duração da BRT. Alguns exemplos são apresentados nas **Figuras 36, 37 e 38**, adiante.

Nos exemplos de influência da BRT sobre a temperatura, é claramente visível a diminuição da temperatura durante ou logo após a ocorrência da BRT. Essa diminuição pode ser drástica, como mostrado na **Figura 36**, com a diminuição de cerca de 2°C (a) a 5°C (b), ou minuciosa, como mostrado na **Figura 37**, de cerca de 0.3°C, além de quase imperceptível como na **Figura 38**. Toda essa mistura de influências (ou não) da BRT sobre a temperatura faz com que seja muito difícil correlacionar e verificar (nas médias ou medianas) a influência da BRT sobre a temperatura, nos dados superficiais.

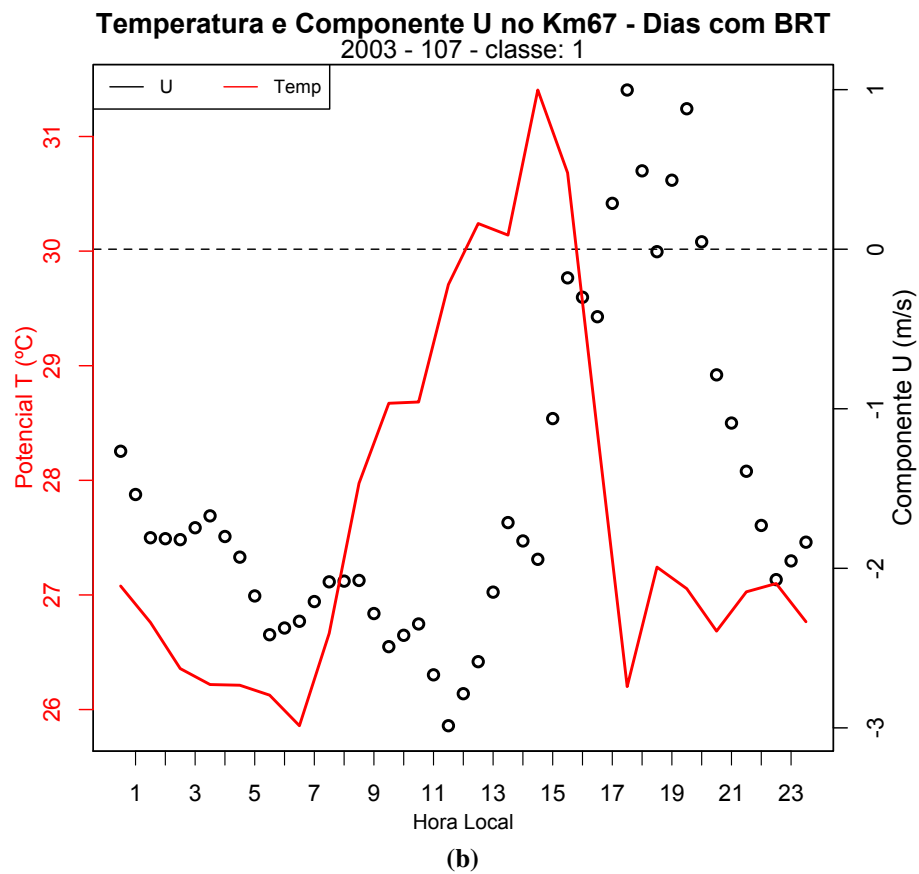
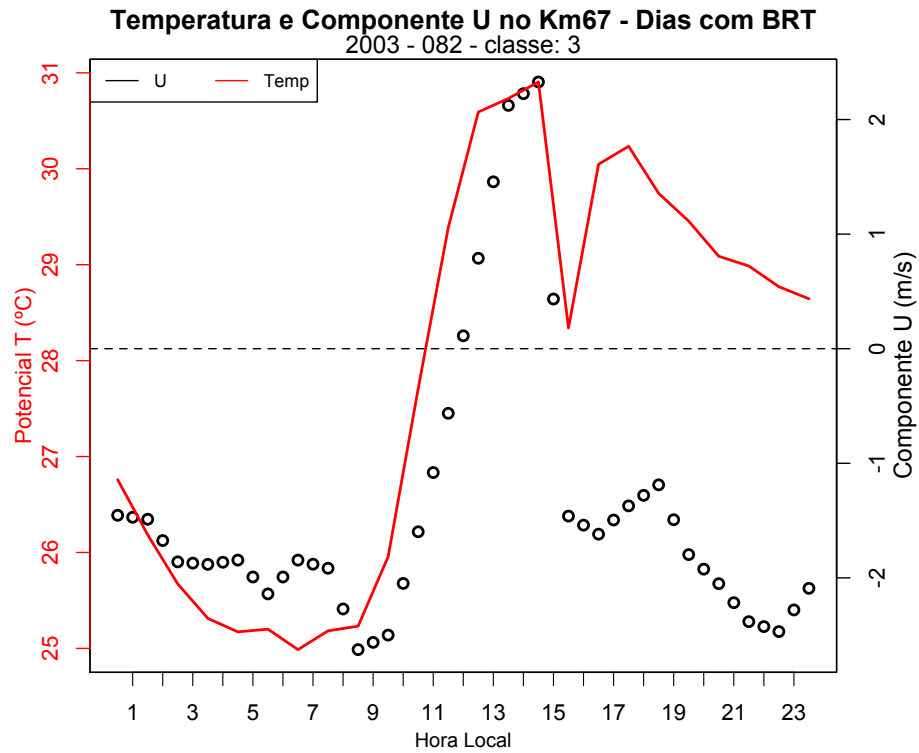


Figura 36 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.

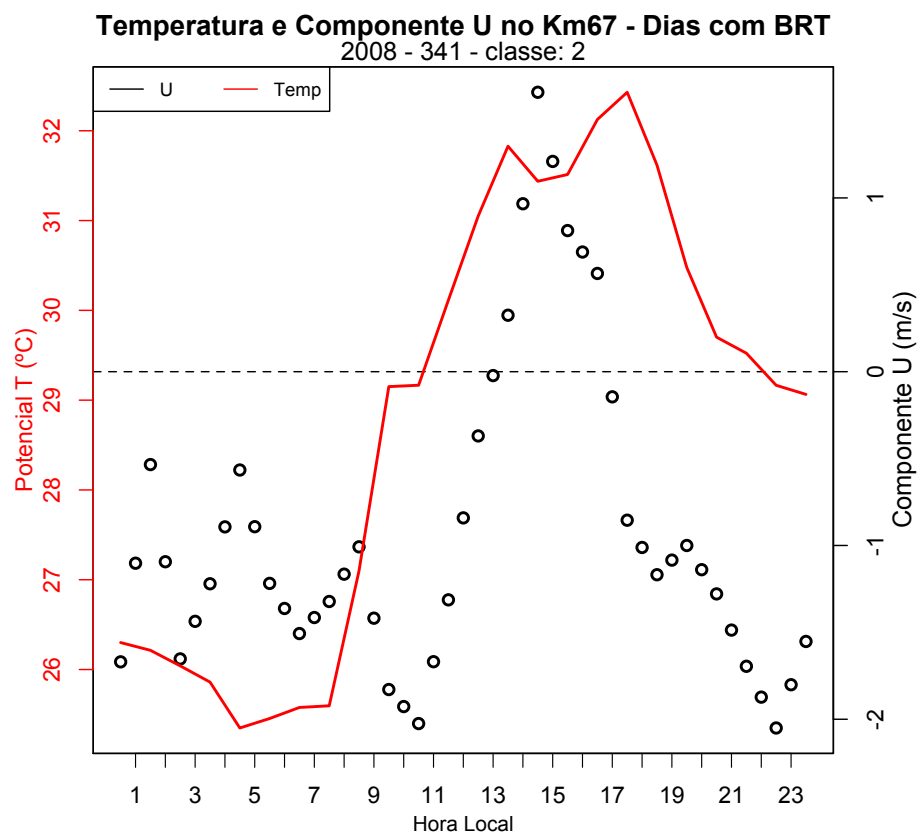
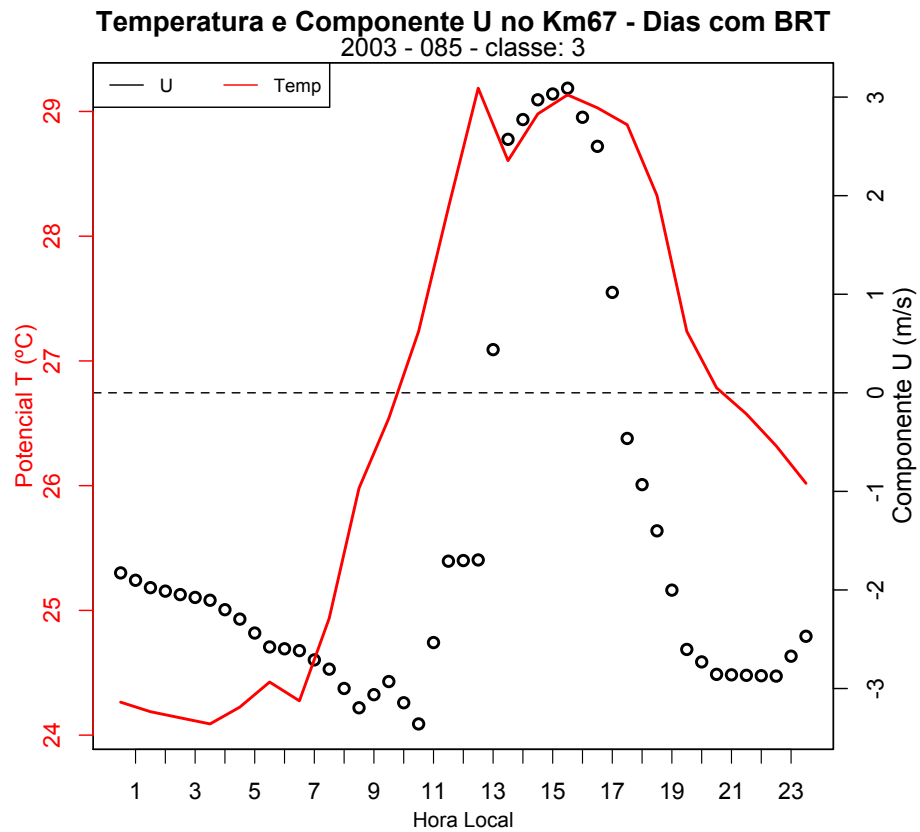


Figura 37 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.

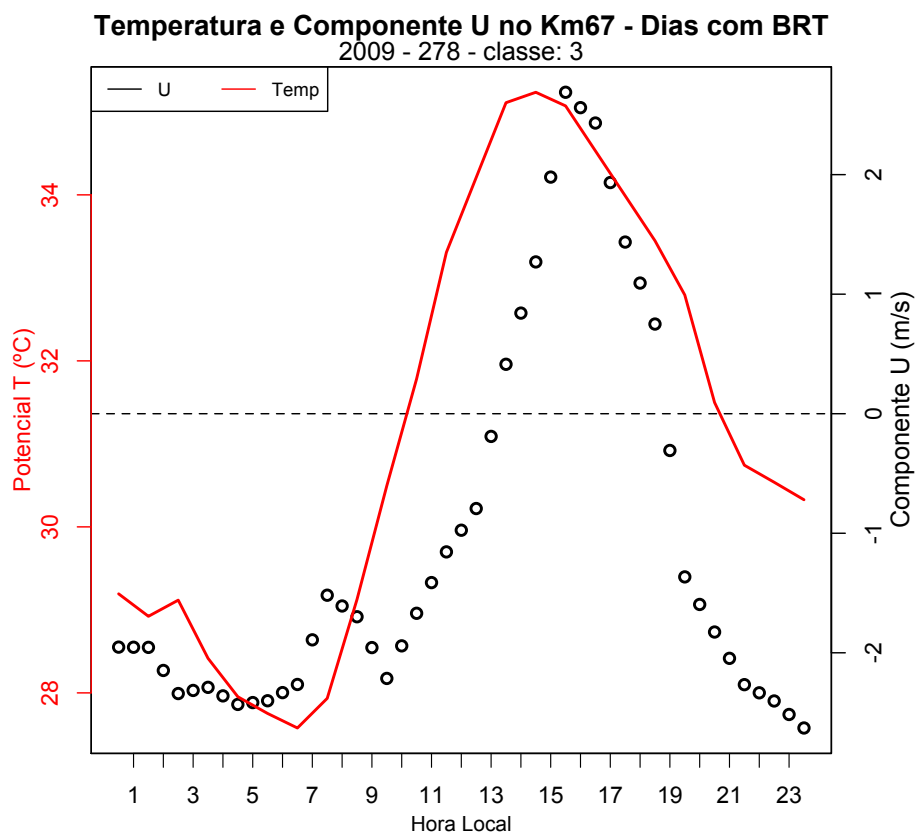
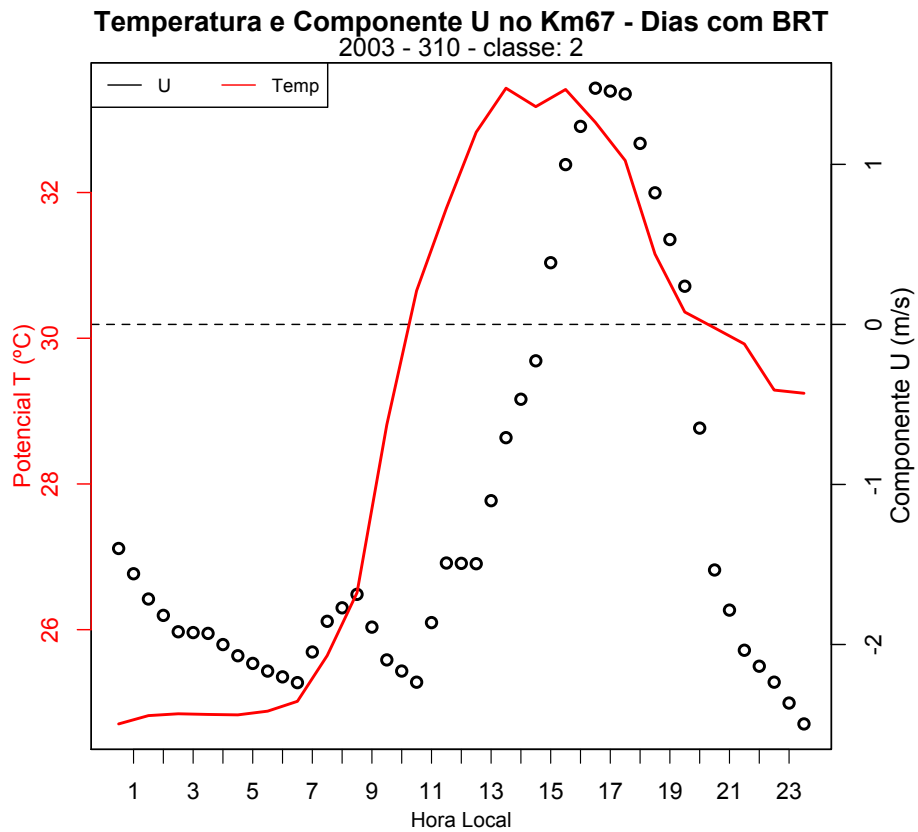


Figura 38 – Temperatura e Componente U no Km67. Dia juliano, ano e classe são indicados.

5.4 SONDAGENS NA BAIXA TROPOSFERA: INFLUÊNCIA DA BRISA DO RIO TAPAJÓS SOBRE A UMIDADE E TEMPERATURA

Como mostrado anteriormente, existem influências da BRT sobre as medidas de temperatura e umidade feitas por estações próximas à superfície da Floresta, no Km67. Explorando mais detalhadamente as sondagens de baixa troposfera, ocorridas na região do Tapajós, como apresentado por Tapajós et al. (2013), Tapajós (2012), Silva Dias et al. (2004) e também em sondagens da Campanha CMET-2016, foi possível, além de estimar a altura da BRT (apresentada no **Capítulo 3, seção 3.6**), mostrar algumas influências causadas sobre as condições de umidade e temperatura, dependendo de como se desenvolve a BRT, sobre o local de medida.

Considerando as sondagens sobre a Floresta, foi possível perceber que há sempre um aumento da umidade específica e diminuição da temperatura associada ao fenômeno de BRT, isso pode ser visto tanto nas **Figuras 17 (Capítulo 3, seção 3.6)** e 39, de sondagens feitas com balão Lagrangiano, quanto nas **Figuras 40 e 41**, feitas com balão cativo e radiossonda respectivamente.

Na **Figura 39**, que mostra a sondagem com balão Lagrangiano, a umidade específica passou a aumentar assim que alcançou a área de floresta, e esse aumento foi maior quando o balão decresceu até ser carregado pelos ventos oriundos da BRT. Esse efeito que fez com que a umidade aumentasse em até 6g/Kg, e diminuísse a temperatura em 3°C sobre a floresta, e foi verificado claramente nas sondagens de número #2 (**Figura 17**), #4 (**Figura 39**), #7, #8 e #9 (**Apêndices A2 e A3**), que passaram sobre a FNT em altitudes abaixo de 1000 metros e registraram BRT. Isso sustenta a hipótese de que a brisa do rio Tapajós mantém sobre a floresta uma camada de acumulação de umidade em dias com BRT.

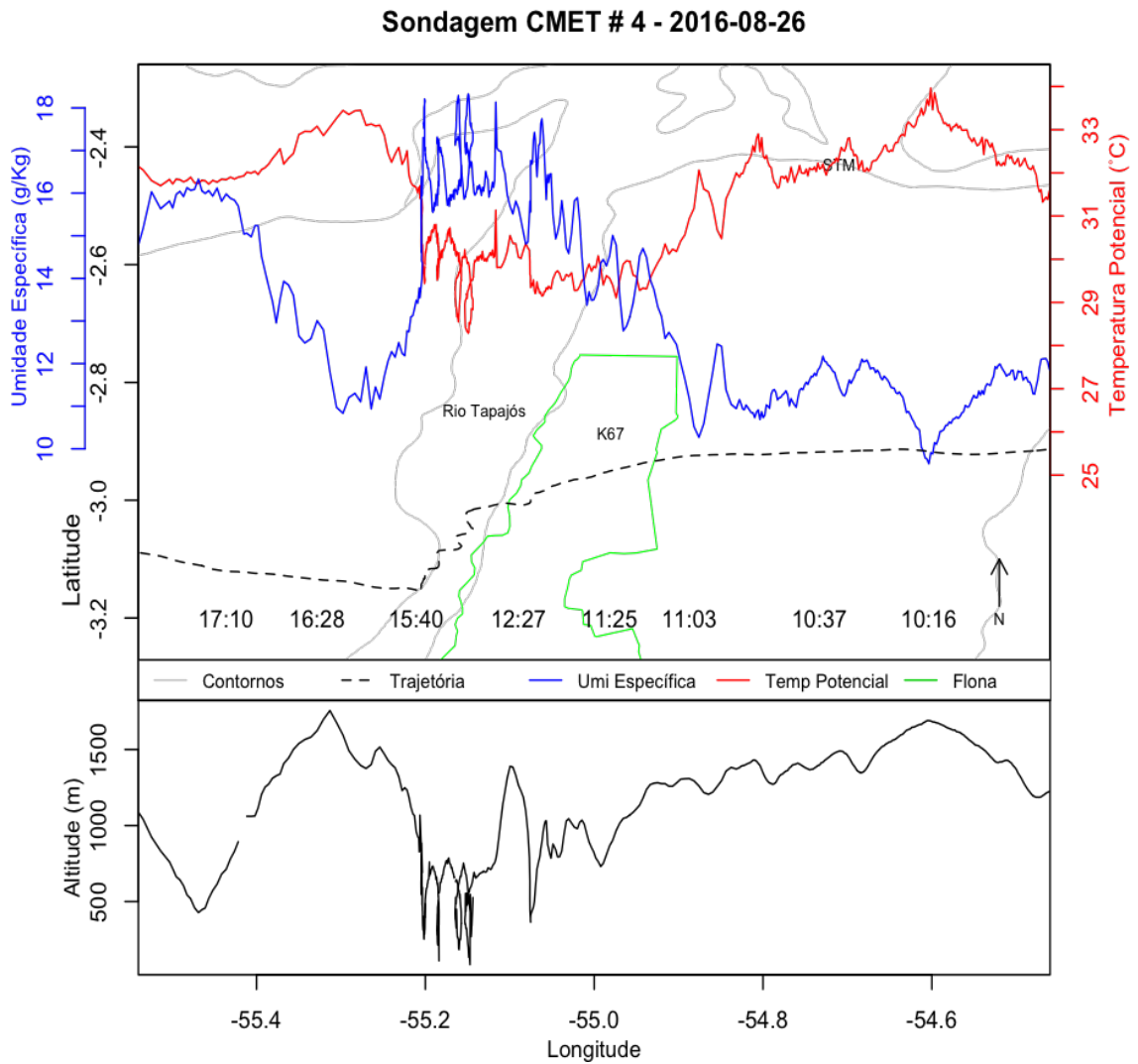


Figura 39 – Sondagem CMET#4 – 26 de agosto de 2016.

Em campanha de sondagens para estudo da Camada Limite Noturna na FNT, próximo ao Km67 (Base ICMBIO-Terra Rica), analisando uma sondagem realizada no fim da tarde identificada como BRT, é possível verificar claramente, na **Figura 40**, que durante o fenômeno de BRT, que se estende verticalmente para cima em até 225 metros, em relação à superfície e 385 metros em relação ao Rio Tapajós, faz com que o ar misturado seja mais úmido e menos quente que o ar logo acima, proveniente de influência tanto da Floresta quanto de Campos Agrícolas a Leste do local de medida. A temperatura chega a aumentar cerca de 0.7°C e a umidade específica diminuir cerca de 2g/Kg comparada com o ar misturado da BRT.

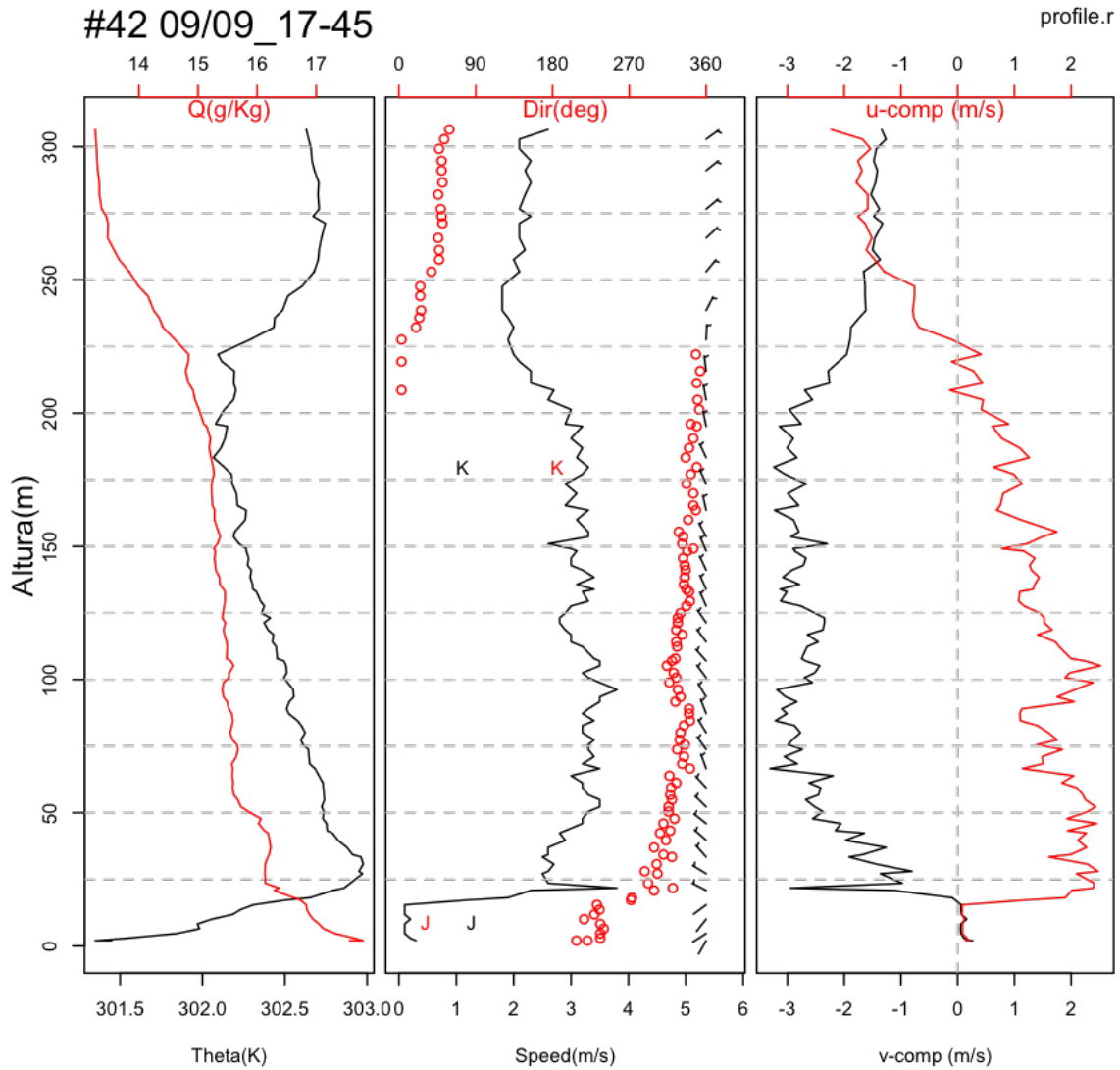


Figura 40 – Sondagem com balão cativo próximo ao Km67 dia 09 setembro de 2009 às 1745LT. Altura em relação a FNT. K e J são as medidas das estações do Km67 e Jamaraquá, respectivamente.

Tapajós et al. (2013) também mostrou que é possível verificar mudanças nas condições atmosféricas, devido a BRT, próximo da borda do Rio, em Jamaraquá. As mudanças foram significativas, comparando os valores das diferentes camadas da atmosfera: uma camada influenciada pela BRT, com umidade específica cerca de 1 à 1.5g/Kg maior e a temperatura até 0.9°K menor que a outra camada, com as características vindas da Floresta como mostra a **Figura 41**.

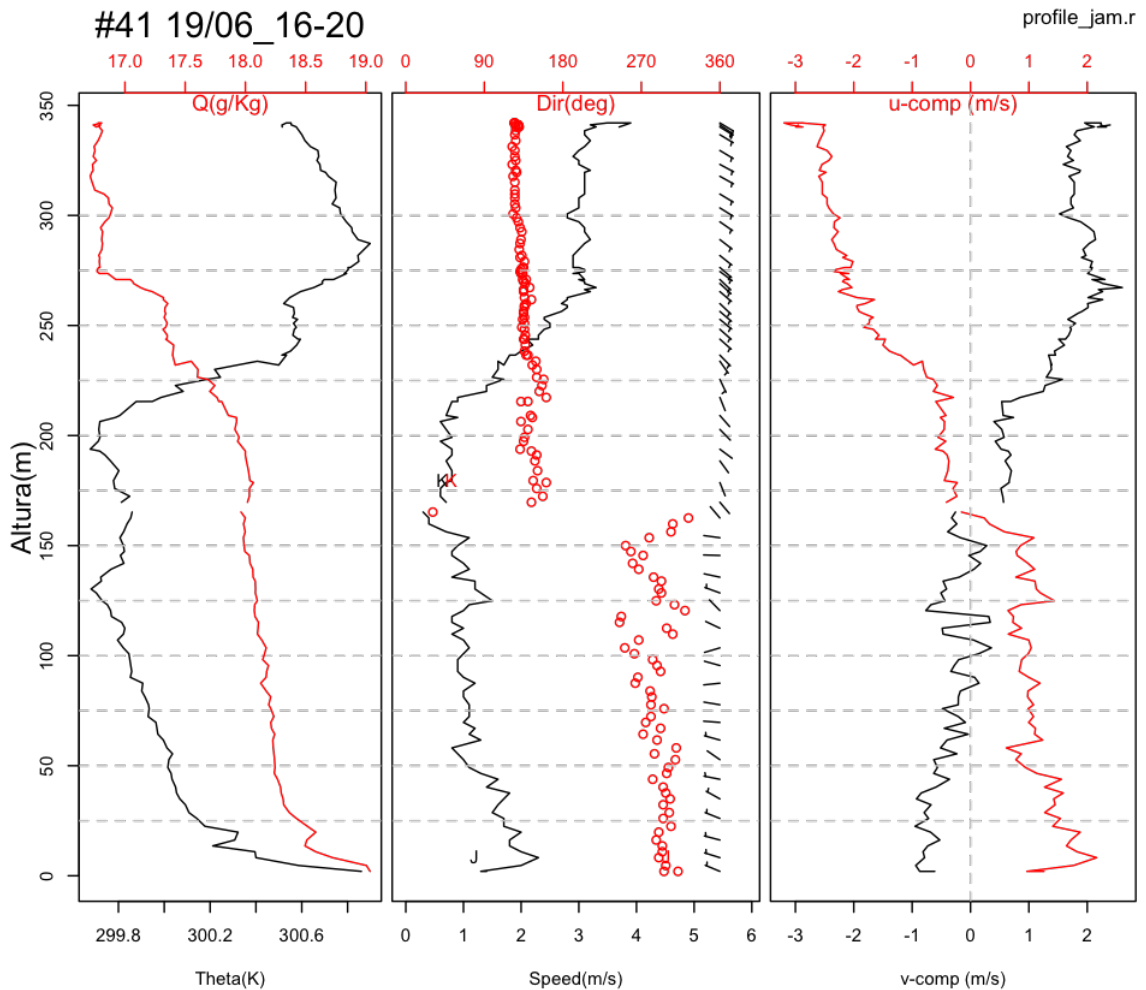


Figura 41 – Sondagem na Borda do Rio Tapajós em Jamaraquá dia 19 de junho de 2011 às 17:02LT (TAPAJÓS et al., 2013). K e J são as medidas das estações do Km67 e Jamaraquá, respectivamente.

Na borda do Rio Tapajós, como mostrado na **Figura 41**, as mudanças na umidade e temperatura não são tão bruscas quanto vistas pelas sondagens da campanha CMET-2016. Isso deve ocorrer, tanto pela proximidade das duas camadas, uma influenciada pelo rio e outra pela floresta, mas também pela mistura destas, visto que as medidas feitas por Tapajós et al. (2013) foram feitas na interface Rio-Floresta. Mais sondagens, no fim da tarde e início da noite, feitas em 2011, apresentaram comportamento similar a mostrada na **Figura 41**.

Nas radiossondagens ocorridas em Belterra que aconteceram em 2001 durante o experimento CIRSAN (SILVA DIAS et al., 2012), foram identificadas 9 com BRT das 126 sondagens realizadas. Verificou-se o mesmo comportamento, para umidade e temperatura, apresentado por Tapajós et al. (2013) e também através das medidas do CMET-2016, porém, como as radiossondagens atingem alturas muito maiores que o balão cativo, foi possível perceber que existem três camadas bem características para as sondagens classificadas com BRT. A primeira camada com características do Rio, na qual é possível confirmar o aumento da umidade e diminuição da temperatura; a segunda camada é uma camada de transição; e a terceira, com características da circulação de mesoescala.

Outro fato interessante de se notar é que, como reportado por Silva Dias et al. (2004), durante a campanha de 2001 do experimento CIRSAN houve a ocorrência de “friagem” na Amazônia (SILVA DIAS et al., 2004), o que pode ter intensificado o fenômeno de BRT. Essa intensificação foi devido ao aumento de pressão na parte Oeste da Bacia Amazônica, coerente com a diminuição dos ventos alísios e facilitação da ocorrência de BRT (MARENGO et al., 1997).

A **Figura 42**, apresenta uma radiossondagem ocorrida em Belterra que mostra a coerência com as características citadas anteriormente. Nessa sondagem, assim como em outras identificadas como BRT, é possível verificar claramente o aumento da umidade, cerca de 5g/Kg, e também a diminuição da temperatura, cerca de 3°K, devido a presença do rio, estando essa camada confinada a cerca de 700 metros em relação ao nível do rio. De 700 metros a 1200 metros de altura seria a camada de transição, onde há um decréscimo linear da umidade e temperatura, e é caracterizado pela mistura entre as duas camadas, a primeira com características do rio referente a BRT e a terceira, com características de circulação de mesoescala e que traz informações de áreas de floresta a Leste do rio. Nas outras radiossondagens com essas mesmas características, o aumento da umidade variou de 3-7g/Kg e a temperatura entre 2-5°K.

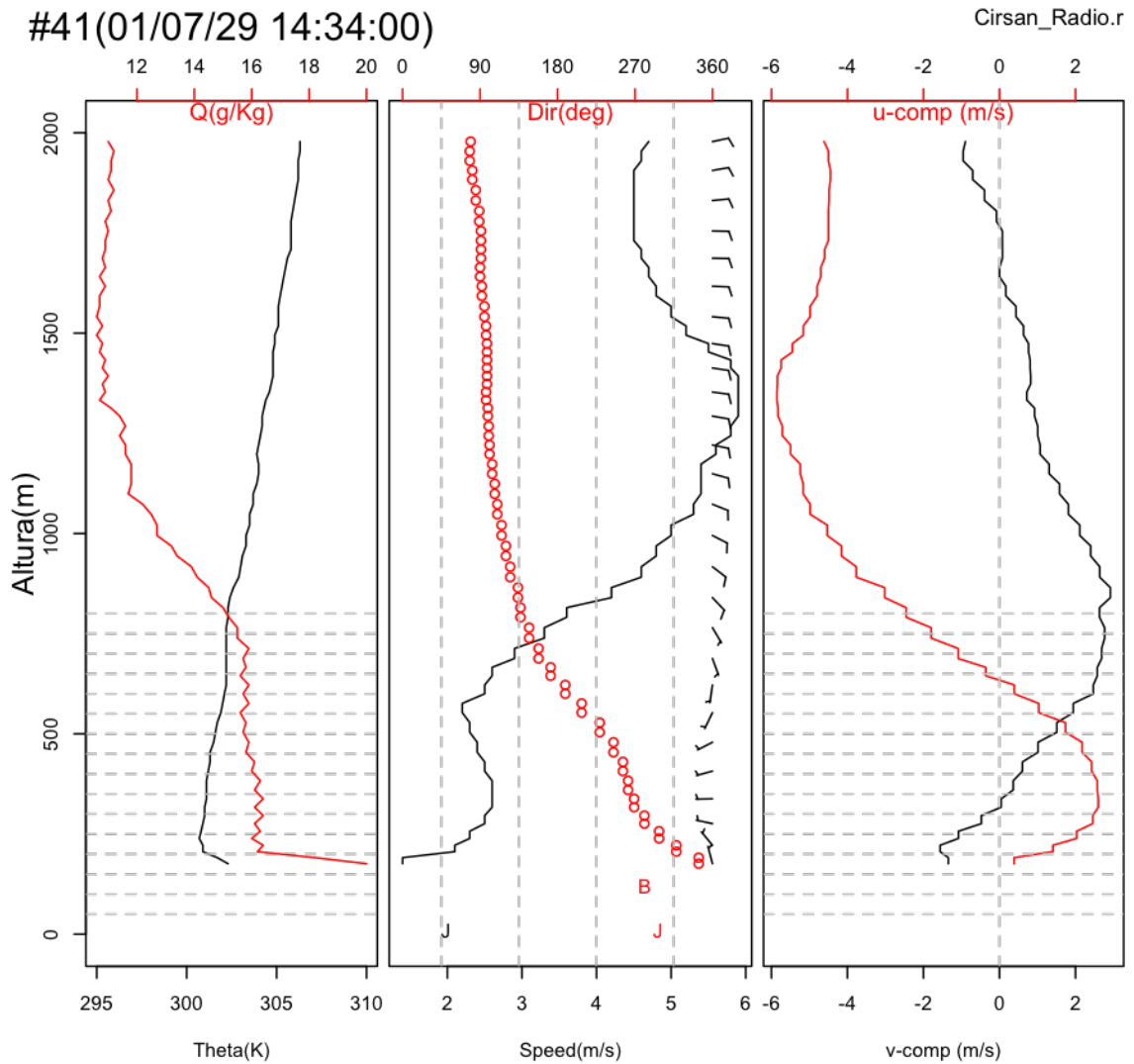


Figura 42 – Radiossondagem do Projeto CIRSAN ocorrida 29 de julho de 2001 às 1431LT. B e J são as medidas das estações do Belterra e Jamaraguá, respectivamente.

Os resultados até aqui apresentados, referentes a influência da BRT sobre umidade e temperatura, mostram que a FNT está sobre um regime climático único, que torna a FNT especial perante outras florestas amazônicas.

5.5 RADIAÇÃO INCIDENTE

Para análise dos dados de radiação sobre a FNT, utilizou-se dados de 2001-2005, para os sites Km67 e Km83. Comparando todos os dias com e sem BRT, para o Km67, as diferenças pequenas, porém visíveis, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco, como mostra a **Figura 43**.

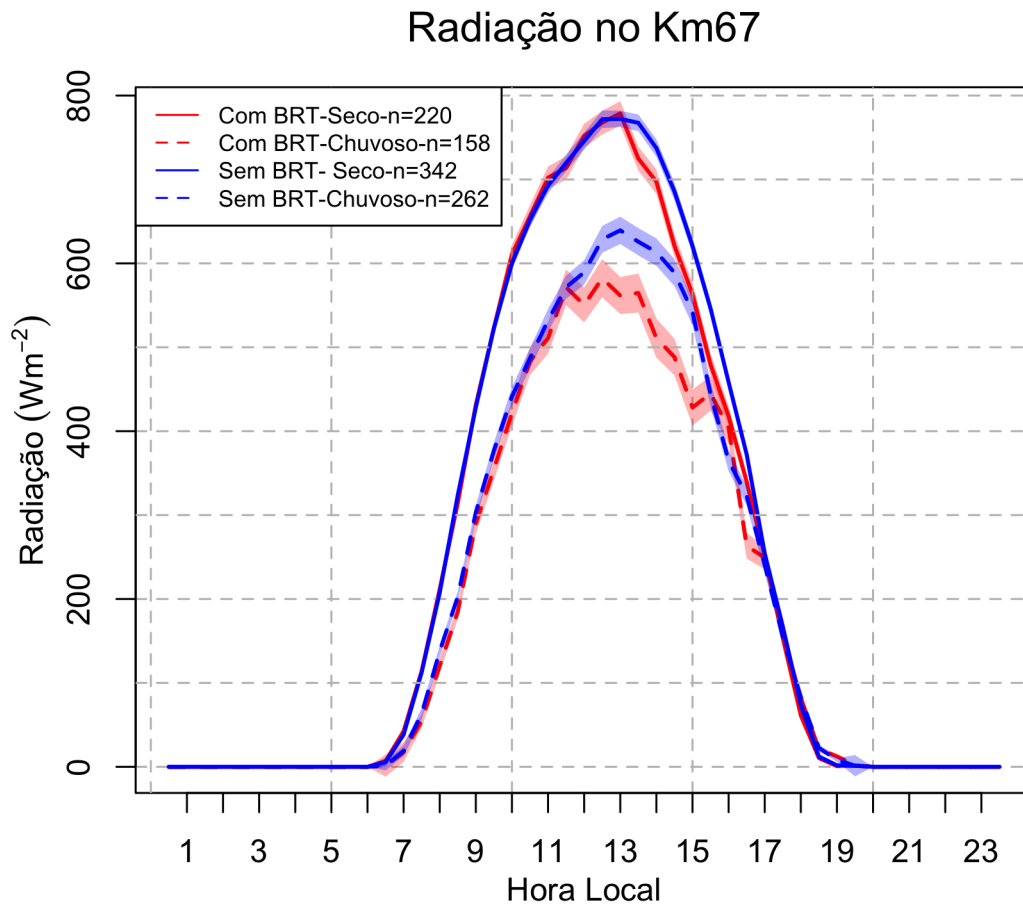


Figura 43 – Radiação no Km67 para dias com e sem BRT. Período de 2001-2005. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

No Km67, é possível perceber que as diferenças, comparando dias com e sem BRT, iniciam-se em torno de 1200LT (**Figura 43**), sendo que para os dias com BRT há um decréscimo na radiação, para os dois períodos. Já se imaginava que a formação de nuvens sobre o lado Leste do rio Tapajós (LU et al., 2005; SILVA DIAS et al., 2004) seria um fator que levasse os valores da radiação abaixo do geral, principalmente para dias com BRT, pois a BRT poderia ajudar no deslocamento de massas úmidas sobre o ponto de medida no Km67. Entretanto, se fizermos a análise da radiação mais ao Sul da FNT, no site Km83 (16.5Km a Oeste do Rio Tapajós), as mudanças na radiação são muito mais visíveis, com um decréscimo brusco em média de 140W/m^2 em torno de 1300LT, e coerentes com a linha de nuvens que se forma sobre a FNT, como mostra **Figura 44**.

Radiação no Km83

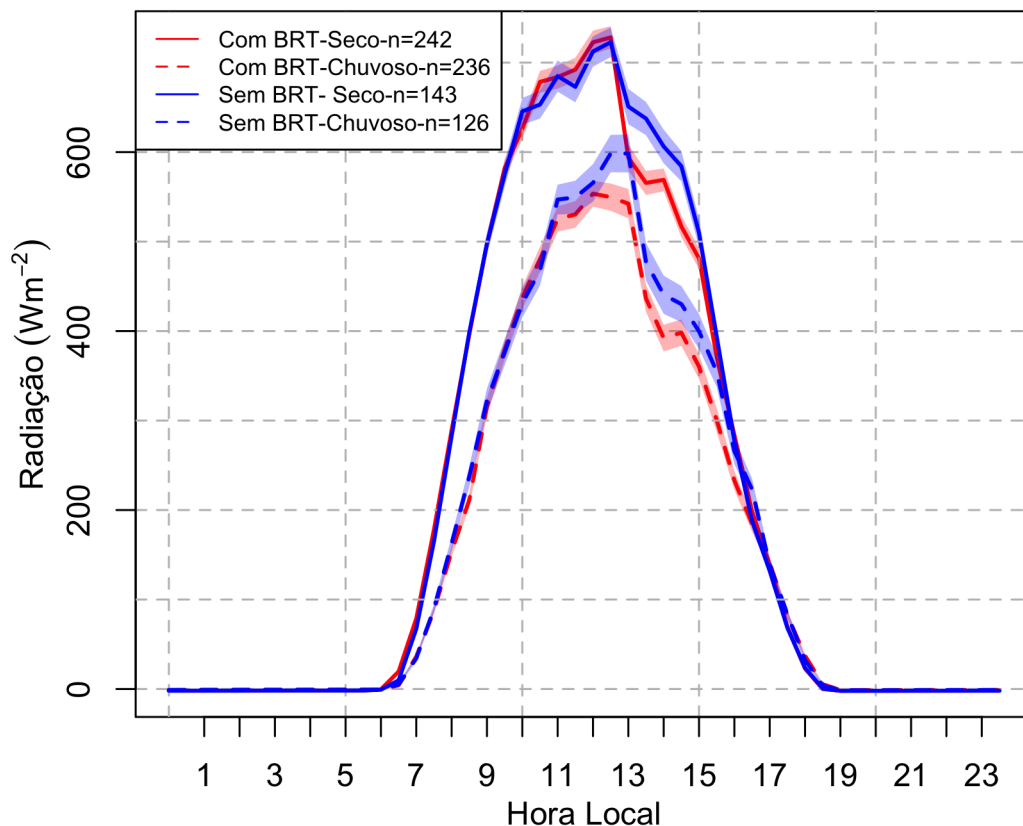


Figura 44 – Radiação no Km83 para dias com e sem BRT. Período de 2000-2005. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

A partir da **Figura 44**, verifica-se que é predominante o decréscimo da radiação sobre o Km83 para todos os dias estudados, tanto com quanto sem BRT, e deve existir uma relação desse decréscimo com a formação de nuvens nessa região. Se compararmos as **Figuras 43 e 44**, é possível afirmar que deve existir um gradiente de densidade de cobertura de nuvens na linha formada entre Norte-Sul sobre a FNT, com maior densidade de cobertura de nuvens sobre o Km83. Essa densidade chega ao máximo em torno de 1300LT, coerente com o horário de início de inversão/diminuição dos ventos alísios nos sites, o que leva a crer que a diminuição da velocidade dos ventos alísios pode intensificar a formação e acúmulo de nuvens sobre a FNT.

Se compararmos dias com e sem BRT no Km83, mostrado na **Figura 44**, há um decréscimo extra, acima do que ocorre normalmente, de cerca de 70 W/m^2 , as 1300LT, o que podemos considerar que seria uma diminuição devido a BRT, diferente do Km67 que praticamente não há diferenças correlacionando o horário em que ocorre a BRT. Czikowsky & Fitzjarrald (2009), mostraram que a fração de cobertura de nuvens no Km67, teria no máximo (0.4) em torno de

1230LT, para o período seco, e para o período chuvoso (0.6) no início da manhã. Já a base de nuvens ficaria em média 1230 e 600 metros, na estação seca e chuvosa, respectivamente. O horário é coincidente para o período seco, como registrado no Km83, porém espera-se que lá a fração de cobertura de nuvens seja superior ao Km67 devido a brusca diminuição da radiação naquele local.

Ainda em relação a radiação no Km83, correlacionando as classes de BRT e a radiação (**Apêndice A7**), os resultados mostram que para dias com Classe Forte de BRT a diminuição foi maior para dias com Classe Fraca e Média, sendo estas últimas classes com valores muito similares. Ao contrário, no Km67, para dias com Classe Média e Forte, para o período seco, tiveram valores mais elevados de radiação que para dias com Classe Fraca, o que pode ser um indicativo de que a linha de nuvens deve estar sendo formada ou acumulada mais a Leste do local de medida, com deslocamento ajudado pela BRT, e que em dias com BRT Fraca a linha de nuvens fique mais acima do local de medida.

Vale a pena ressaltar que a radiação é responsável por grande maioria dos processos, tanto físicos, com a disponibilização de energia para a turbulência, fluxos de energia e massa, e também para os processos biológicos, como a fotossíntese e deve se investigada com maiores detalhes em trabalhos futuros, correlacionando a disponibilidade de radiação incidente, assim com as componentes de radiação que emitidas e/ou que chegam nestes locais, com processos biológicos ocorrentes na floresta.

5.6 CHUVA

Para análise da influência da BRT sobre a chuva na região de estudo, utilizaram-se dois trabalhos recentes sobre o tema, realizados na região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós realizados por Fitzjarrald et al. (2008) e Cohen et al., (2014). A investigação de ambos era a distribuição espacial de chuvas, levando em consideração a presença dos rios.

Fitzjarrald et al. (2008) mostrou que chuvas noturnas próximas aos rios poderiam ser resultado de linhas de instabilidade que adentram a bacia Amazônica, como explicado por (COHEN et al. 1995). Cohen et al. (2014), a partir de observações de Radar Meteorológico, mostraram que, nas médias anuais, a predominância de chuvas noturnas é sobre o Rio Amazonas, e que isso se deve principalmente a canalização de nuvens convectivas trazidas por linhas de instabilidade na região. Fitzjarrald et al. (2008) confirmam esses resultados a partir de observações pontuais feitas por pluviômetros, mostrando que há uma concentração maior de chuva ao Noroeste da área de estudo, como mostrado na **Figura 45** abaixo.

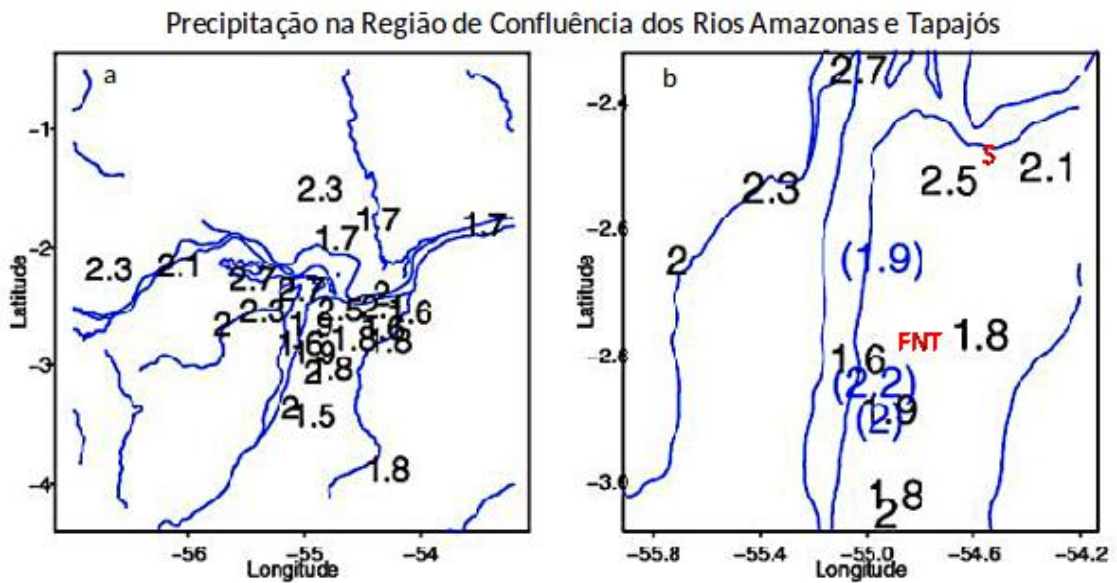


Figura 45 – Totais Anuais Observados nas estações de superfície (2003-2006). Observação regional (a) e zoom (b) sobre a região de estudo (FITZJARRALD et al, 2008).

Mais especificamente na região da FNT, as chuvas são distribuídas espacialmente com gradiente de aumento no sentido Rio-Floresta (Oeste-Leste). Dessa forma, pode se verificar que, a Brisa do Rio Tapajós empurra mais adentro do continente as nuvens convectivas, retirando da borda do rio, e assim fazendo com que chova menos na borda do rio e mais sobre a floresta.

Os resultados, tanto de Cohen et al. (2014) quanto de Fitzjarrald et al. (2008), indicam essa distribuição. Nas estimativas de Radar Meteorológico, apresentado por Cohen et al. (2014), há a distribuição dos totais anuais (**Figura 46**) indicando existir um padrão de ocorrência de chuva na região de estudo, com maiores valores sobre a foz e o lado Leste do Rio Tapajós. Máximos de 1200mm sobre as torres do Km67 e Km83, na Flona Tapajós, são indicados.

Total anual de Chuva para região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós

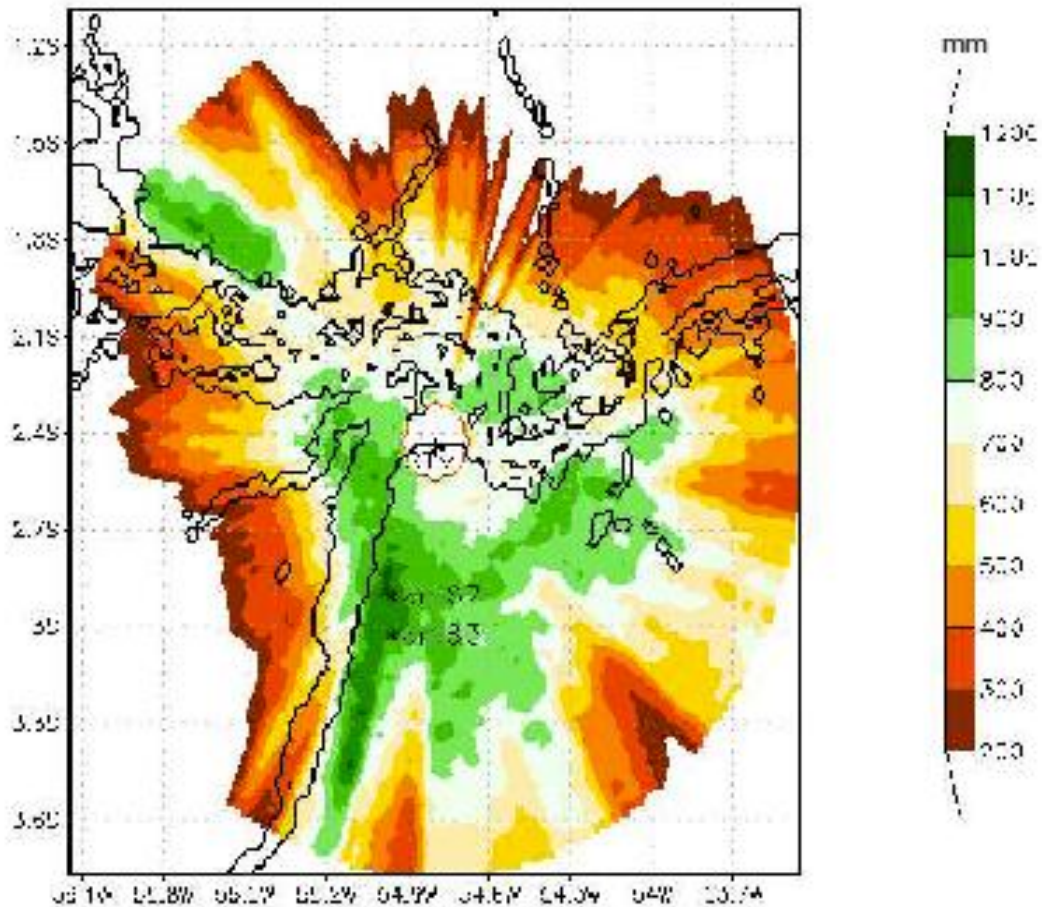


Figura 46 – Totais anuais (mm) observados pelo Radar Meteorológico (2009-2011) (COHEN et al., 2014).

Os estudos de Fitzjarrald et al. (2008) e Cohen et al. (2014) também mostraram a distribuição horária de chuva na região, indicando assim a influência direta da BRT sobre o horário e a distribuição de chuva. Ambos estudos indicam que devido a BRT a distribuição de chuva entre 0900-2100LT (**Figura 47a**) é mais intensa sobre a FNT, tanto para os períodos secos como para os chuvosos. Esse fato está diretamente ligado a facilitação da formação de nuvens sobre o lado Leste do Rio Tapajós, como reportado por Silva Dias et al. (2004) e Lu et al. (2005), também pelo fato da BRT suprimir a formação de brisa na borda do rio e assim reforçar a formação de nuvens sobre FTN.

Resultados sobre a radiação na FNT, como mostrado na seção anterior por meio da **Figura 44**, indicam a maior densidade de nuvens a partir das 1300LT sobre o Km83, em ambos períodos, coincidentes com maior precipitação no período da tarde e início da noite na faixa que se estende pelo continente de 30-50km de distância do Rio Tapajós.

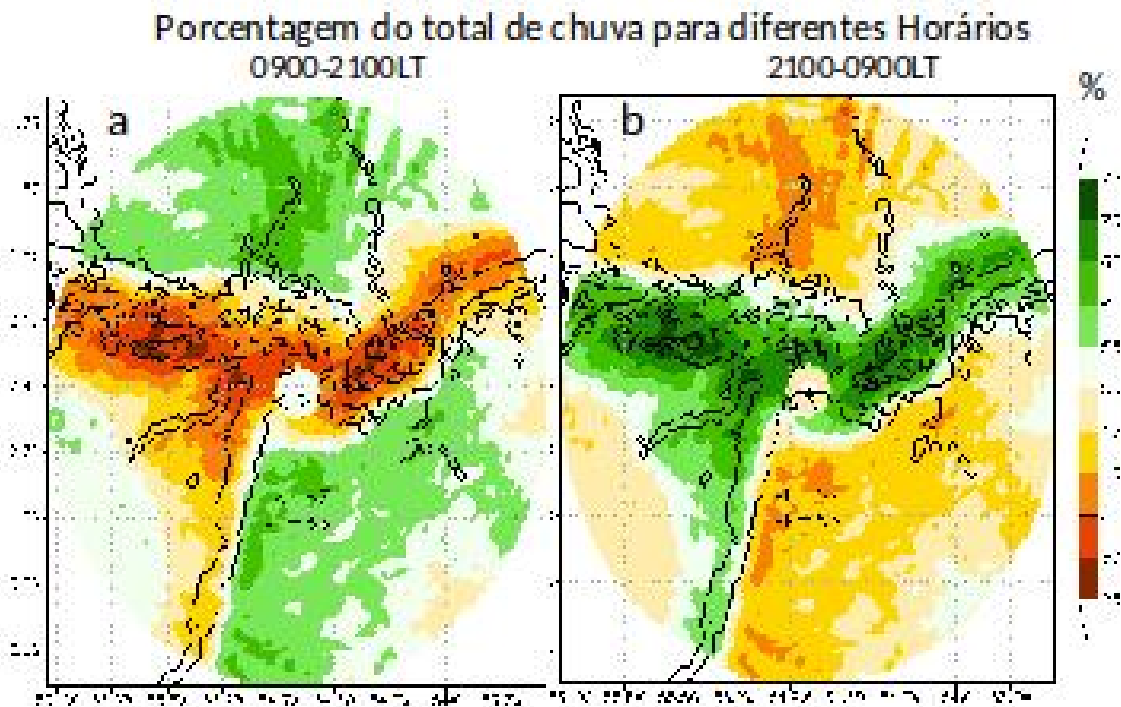


Figura 47 – Percentual do total de chuva para região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós. a. Horário de 0900-2100LT; b. Horário de 2100-0900LT. Santarém, Km67 e Km83 são indicados (Adaptado de COHEN et al., 2014).

Em relação a chuva noturna ocorrente entre 2100LT e 0900LT, a **Figura 47b** mostra que a chuva é predominante sobre o canal do Rio Amazonas, e pode ser reforçada pela ocorrência de linhas de instabilidade, como reportado por Cohen et al. (1995). Outro fator que pode ajudar na distribuição da chuva sobre a foz e o lado Oeste do Rio Tapajós é a canalização dos ventos alísios no sentido Norte-Sul e o desvio devido a topografia local e justaposição dos Rios Amazonas e Tapajós (LU et al., 2005).

Os resultados apresentados por Cohen et al. (2014) e Fitzjarrald et al. (2008) são indicativos consistentes que a Brisa do Rio Tapajós influencia na distribuição horária e espacial, além da quantidade de chuva sobre a FNT, mostrando que tanto a região de confluência dos Rios Amazonas e Tapajós, assim como a FNT, estão sobre um regime especial de precipitação.

5.7 FLUXO DE ENERGIA

5.7.1 Fluxo de Calor Sensível (H)

De acordo com a **Figura 48**, que mostra o Fluxo de Calor Sensível (H) para os diferentes casos no Km67, é possível perceber que os dias sem BRT apresentam comportamento bem similar ao geral, e comparando com os dias sem BRT, o H fica abaixo do comportamento para dias com BRT a partir das 1100LT, horário de chegada da BRT no Km67, isso para estação

seca. Essa diferença vai de 8 W/m² às 1100LT até 20 W/m² às 1500LT e deve estar associada ao aquecimento mais elevado da Floresta para os dias que ocorre BRT.

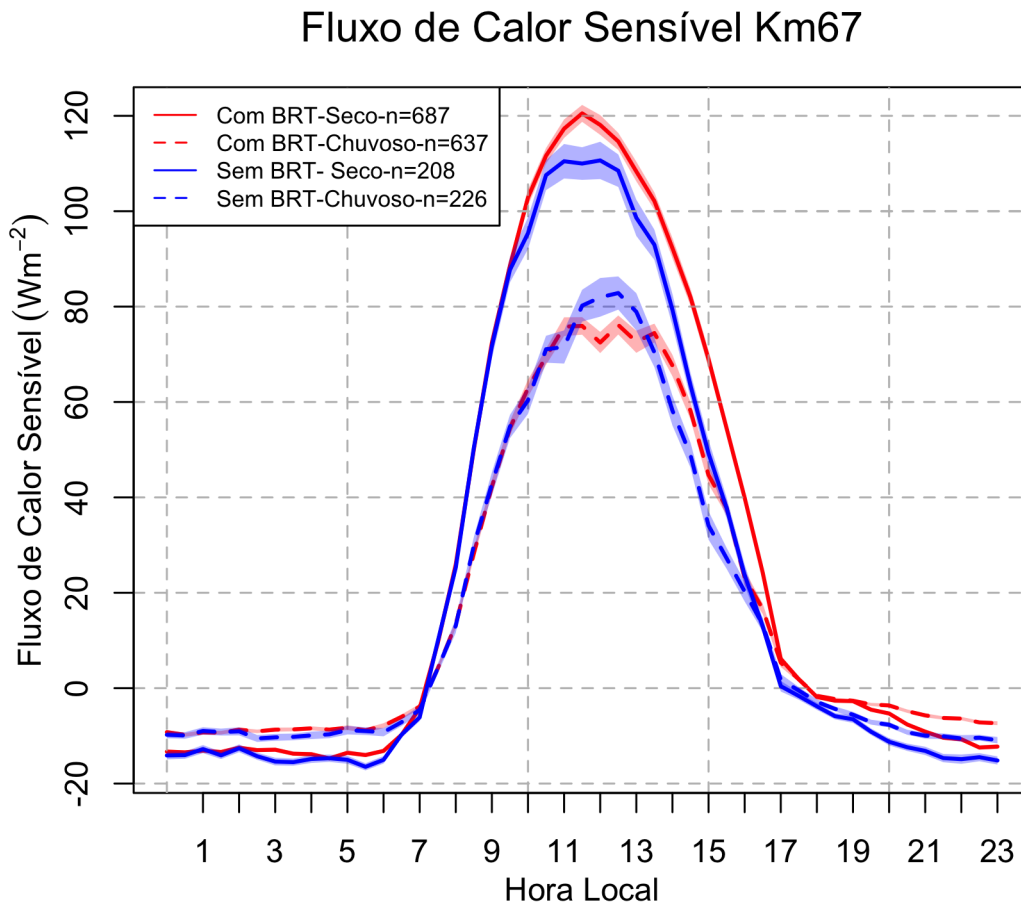


Figura 48 – Fluxo de Calor Sensível para diferentes casos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

Já no período chuvoso, existe um comportamento diferente, os dias sem BRT chegam a ter um H maior (10 W/m²) a partir das 1100LT até às 1400LT, e a partir daí acontece uma inversão, passando a ficar abaixo (16 W/m²) às 1500LT. Isso pode estar associado a menor formação de nuvens durante a primeira parte da manhã, e com ajuda dos ventos alísios empurrando para Oeste, para dias sem BRT, e o inverso ocorre para os dias em geral e com BRT.

Também foi feita uma análise entre as classes de BRT e o H (**Apêndice A8**). Para dias com BRT de Classe Fraca, no período seco, o H apresentou valores cerca de 38W/m² (às 1500LT) abaixo, comparada com os dias de outras classes de BRT. Isso leva a crer que quando ocorre BRT de Classes Médias e Fortes, estas empurram a camada de nuvens mais a Leste do local de medida, fazendo com que haja aumento da radiação (e consequentemente maior aquecimento e H), porém não tão acentuada quanto nos dias de Classe Fraca, com menor velocidade para

deslocar a camada de nuvens além do Km67, mais a Leste.

Para o Km83 (**Apêndice A9**), das 1030LT até às 1130LT há uma descontinuidade no aumento natural da linha de calor sensível, após às 1130LT há um pequeno aumento de 8W/m^2 para dias com BRT e de 16W/m^2 para dias sem BRT. Fazendo uma correlação entre a radiação incidente e fluxo H, é possível dizer que mesmo com o decréscimo repentino na radiação há continuidade do fluxo de H, porém existe um maior deslocamento para esquerda da curva de fluxo de H (considerando que há uma simetria horária), levando a crer que há um decréscimo no fluxo de H após o meio dia.

5.7.2 Fluxo de Calor Latente (LE)

Devido a disponibilidade de água e energia para evapotranspirar, o Fluxo de Calor Latente (LE) na FNT manteve-se alto durante os dois períodos, seco e chuvoso, assim como reportado por Hutyra (2007a), Hutyra et al. (2007b) e Rocha et al. (2004). Para o Km67, a partir da **Figura 49**, foi observado às 1330LT uma pequena diferença para o LE, durante período seco, de 15.9W/m^2 , e uma diferença maior durante o período chuvoso, de 42.8W/m^2 , onde o LE é superior para os dias sem BRT comparado aos dias com BRT. Para o período chuvoso, onde as diferenças são maiores, isso pode ocorrer devido a maior disponibilidade de energia (como visto no gráfico de radiação, **Figura 43**) ocorrente no horário de maior diferença. Já no período seco, onde as diferenças são menores, deve ter relação com as maiores temperaturas atingidas pela superfície nos dias com BRT, como mostrado análise de dados de satélite, no capítulo anterior.

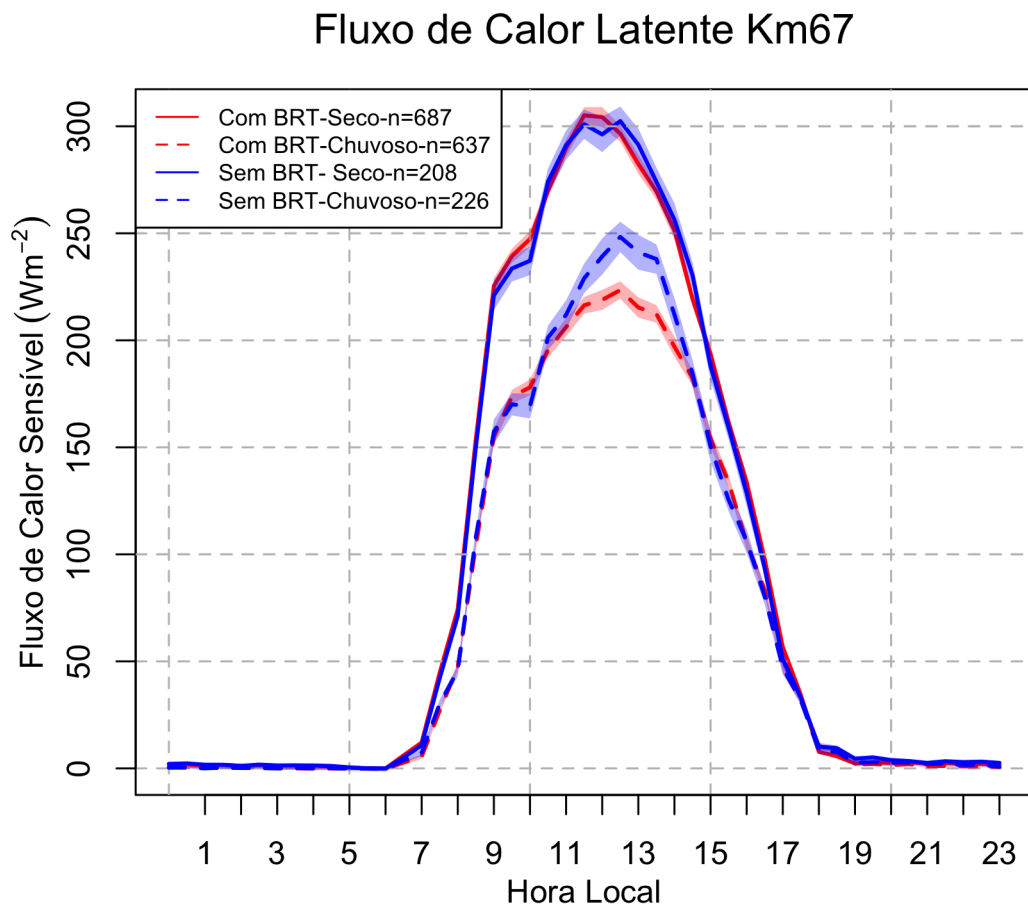


Figura 49 – Fluxo de Calor Latente para diferentes casos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

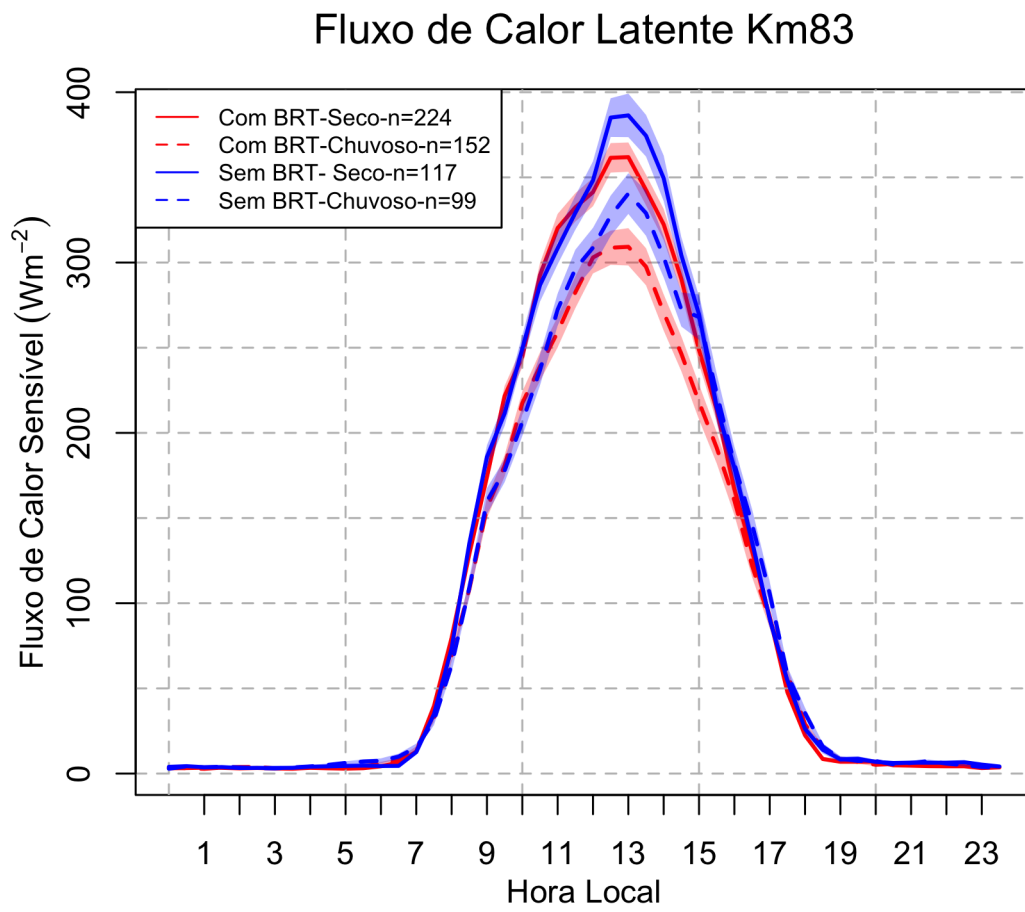


Figura 50 – Fluxo de Calor Latente para diferentes casos no Km83. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

Comparando os LE's do Km67 e do Km83, **Figuras 49 e 50**, o LE no Km67 teve máximas em torno de 50W/m^2 a mais do que foi medido no Km83, isso está de acordo com (ROCHA et al, 2004). Essa diferença pode acontecer devido à combinação de dois fatores: (i) a menor incidência de radiação sobre o Km83 após às 1300LT, o que facilita a evapotranspiração da floresta, pois a menores temperaturas facilitam a abertura dos estômatos das folhas (WU et al., 2016); (ii) a radiação recebida pela floresta durante a primeira parte dia pode ficar aprisionada pela camada de nuvens, ou seja, refletida pelas nuvens de volta para superfície, o que pode manter o nível energético alto e assim sustentar e aumentar o Fluxo de LE.

Levando em conta as Classes de BRT e o Fluxo de LE no Km67, **Figura 51**, foi possível constatar que para o período seco, os níveis de Fluxo de LE mantiveram-se altos, com menores Fluxo de LE para dias com BRT de Classe Fraca, possivelmente devido a facilitação de formação de nuvens ocorrentes para essa classe de BRT como já comentando anteriormente. Para o período chuvoso, a segunda parte do dia com BRT de Classe Fraca teve valores mais elevados comparando-se com outras classes de BRT.

Fluxo de Calor Latente Km67 - Dias com BRT - Classes

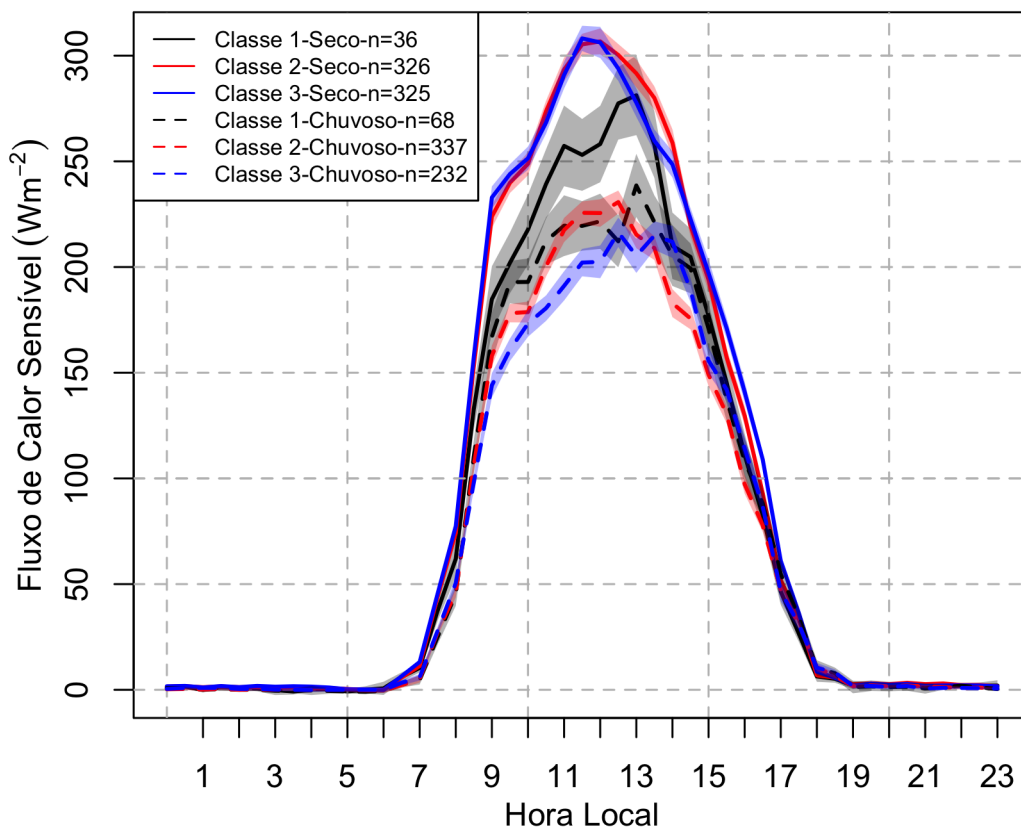


Figura 51 – Fluxo de Calor Latente para diferentes Classes e Períodos no Km67. Área sombreada é o erro padrão e n é o número de dias analisados.

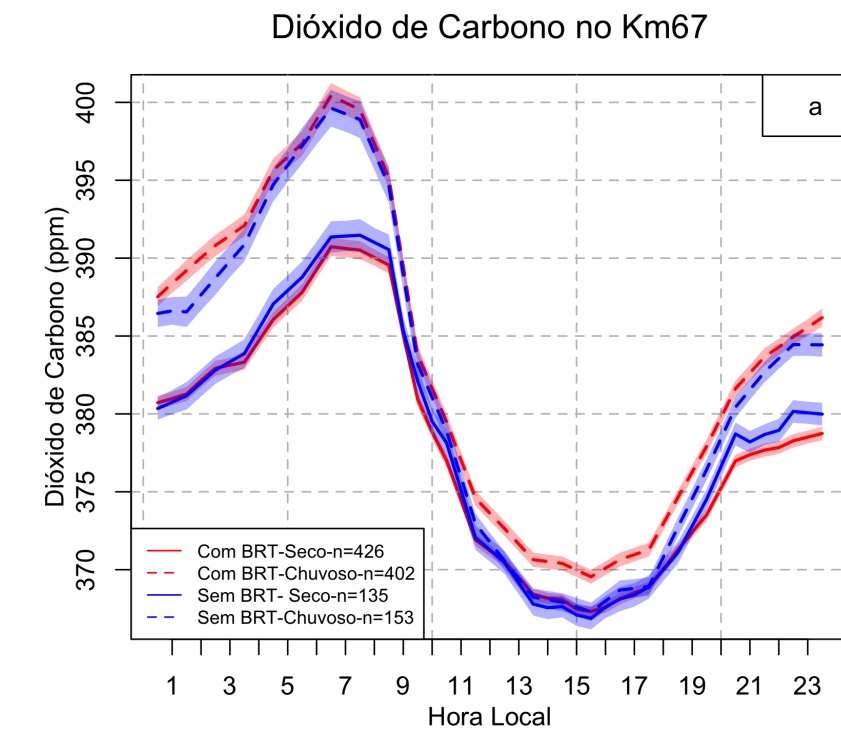
5.8 FLUXO E CONCENTRAÇÃO DE CO₂

Como o ciclo do carbono é dependente tanto de fatores abióticos como bióticos e varia tanto espacialmente quanto temporalmente, deve existir uma relação entre a mudança das características da CLA com a concentração e fluxo de dióxido de carbono. Usando uma série longa de dados, como neste trabalho, pode não se mostrar efetivamente as influências da BRT sobre o Fluxo e Concentração de Carbono. Porém, será apresentado uma visão geral, após a remoção da tendência positiva sobre a concentração ao longo dos anos analisados, e comparando dias com e sem BRT sobre o local de medida para toda série de medidas no Km67, 2002-2011.

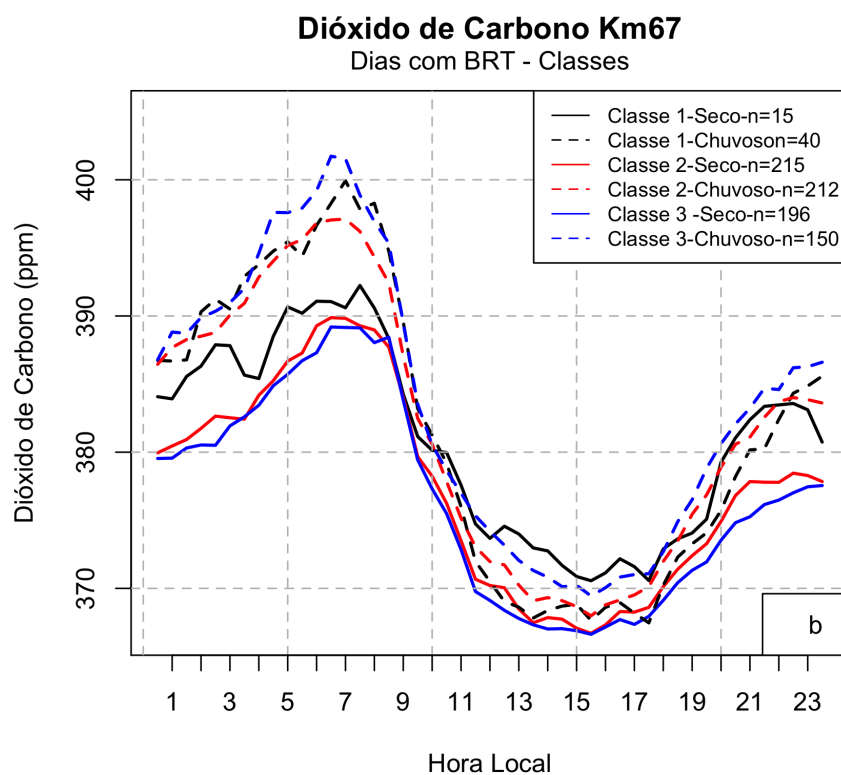
De modo geral, a **Figura 52a** apresenta a concentração para dias com e sem BRT. É possível verificar um ciclo horário, para os períodos seco e chuvoso, com aumento de CO₂ no início do dia, devido o acúmulo noturno sob o dossel da floresta, resultado da respiração do ecossistema (esse acúmulo é maior no período chuvoso para dias com BRT), e depois a diminuição gradual ao longo do dia, devido a fotossíntese, até cerca de 1530LT, onde atinge os valores mínimos, e voltando a aumentar no fim do dia. Analisando o período diurno, hora em que ocorre a BRT no Km67, entre 1200LT e 1900LT, e comparando as concentrações de CO₂ em dias com e sem BRT, para o período seco, nota-se que os dias com BRT apresentam concentrações pouco maiores que em dias sem BRT, essas diferenças iniciam-se em torno das 1300LT (0.56 ppm), e mantêm-se (variando de 0.1-0.6 ppm) até cerca de 1830LT (0.60 ppm). Para o período chuvoso, o comportamento das diferenças é o similar, porém maiores, atingindo o máximo às 1230LT de 2.65ppm.

Levando em consideração a classificação da BRT, **Figura 52b**, é possível verificar que há maior acúmulo de CO₂ para BRT de Classe Fraca, comparada com as outras duas classes de BRT, no período seco. O comportamento diferente da concentração de CO₂ para BRT de Classe Fraca (período seco) pode estar relacionado com o horário, mais tarde, de ocorrência da BRT de Classe Fraca (mostrado na **Figura 31**), que pode proporcionar a entrada de massas de ar vindas de Leste, com maiores concentrações de dióxido de carbono, de campos agrícolas ou áreas desmatadas, e facilitar o acúmulo sobre a floresta.

O resultado sobre as concentrações de dióxido de carbono, comparando dias com e sem BRT, já era imaginado visto que há uma grande extensão de Floresta ao redor da torre de medida no Km67 e que a ocorrência de BRT, com ar trazidos mais de Oeste, deveria estar misturando as camadas de ar sobre a própria floresta, que não deve mudar repentinamente a concentração. Porém, estudos mais detalhados podem indicar tanto a proporção de carbono originário da Floresta quanto de outras áreas, tanto de áreas antropizadas a Leste, quanto do rio Tapajós mais a Oeste.

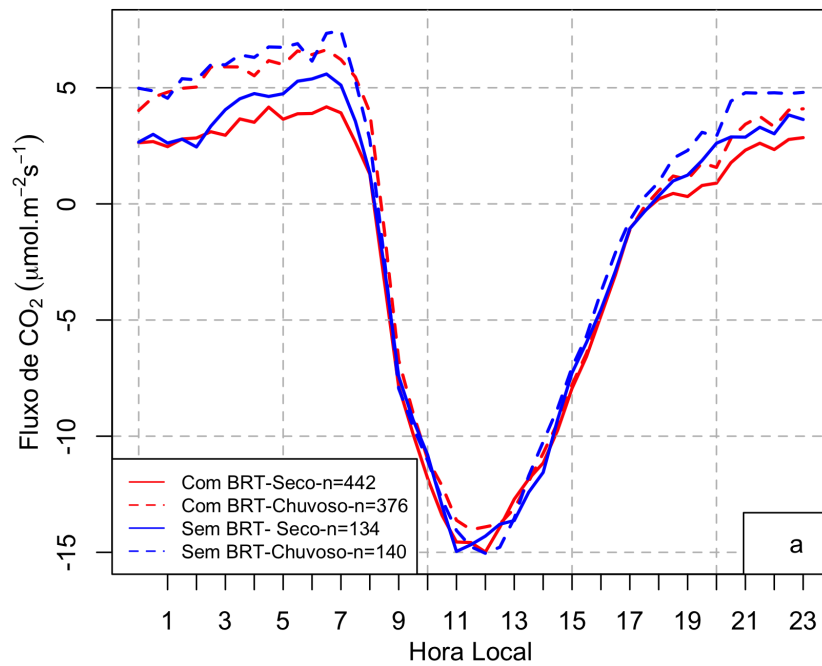


(a)

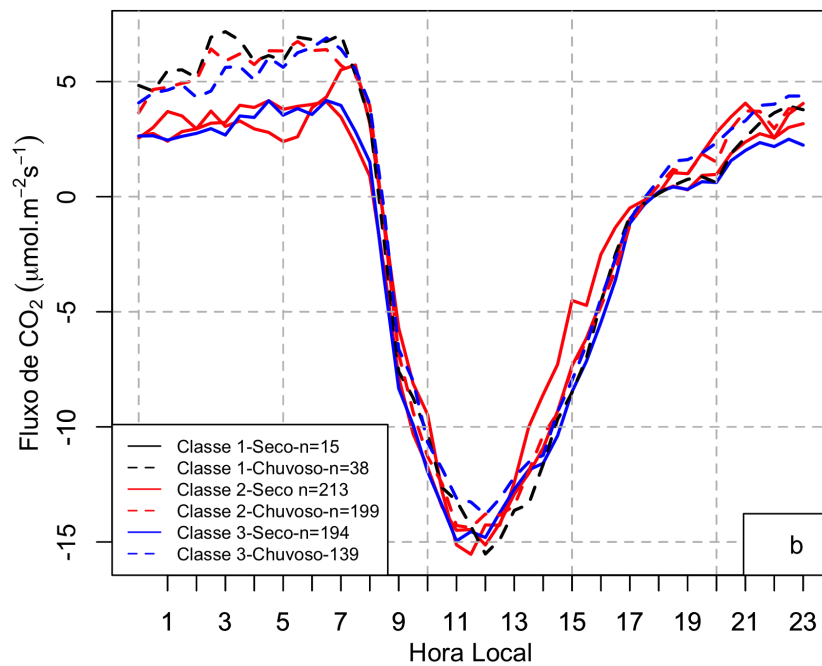


(b)

Figura 52 – Dióxido de Carbono no Km67; a. Dias com e sem BRT; b. Diferentes Classes de BRT.

Fluxo de CO₂ no Km67

(a)

Fluxo de CO₂ no Km67
Dias com BRT - Classes

(b)

Figura 53 – Fluxo de Dióxido de Carbono no Km67; a. Dias com e sem BRT; b. Diferentes classes de BRT.

Analisando os valores dos fluxos de Carbono entre os dias com e sem BRT, nas **Figura 53a**, pode-se perceber, de maneira geral, que as diferenças nos fluxos de CO₂ são muito pequenas, indicando alternância (no máximo 1.03 μ mol/m²·s às 1030LT) entre maior e menor absorção (fluxo negativo) comparando os dois casos, durante o período seco. Para o período chuvoso, existe uma diferença mais visível nos fluxos, agora com menor absorção de CO₂ pela floresta em dias com BRT, essa diferença pode chegar a cerca de 2.22 μ mol/m²·s (às 0930LT). Com isso, é possível afirmar que a BRT não influencia diretamente nos fluxos de carbono medidos na torre do Km67, pois as diferenças não são significativas.

Observando a **Figura 53b**, que contém apenas os fluxos de CO₂ para dias com BRT de acordo com as Classes de brisa, nos dias de Classe de BRT Fraca, para o período seco, e Classe de BRT Forte, para período chuvoso, visualizaram-se menor absorção de carbono durante o período diurno, o que deve estar relacionado com a menor disponibilidade de radiação (**Apêndice A10**), o que deve incluir a diminuição de radiação fotossinteticamente ativa.

Os resultados apresentados sobre o Fluxo de CO₂ são apenas indicativos que devem existir influência da BRT sobre os fluxos, porém, trabalhos mais detalhados, como por exemplo, levando em consideração o efeito da BRT sobre a turbulência, podem indicar que as influências da BRT podem ser maiores do que as mostradas nessa seção.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

De acordo com o exposto, a metodologia adotada e os dados analisados, foi possível entender e caracterizar a circulação na região do Baixo Tapajós, mais especificamente na interface Rio Tapajós e Floresta Nacional do Tapajós (FNT). O estudo mostra que a FNT se encontra em um regime climático único, e que as condições da Camada Limite Atmosférica naquele local são diretamente afetadas pela ocorrência da Brisa do Rio Tapajós (BRT).

As características únicas da FNT adicionadas à presença do rio Tapajós a Oeste faz com que as medidas meteorológicas sejam afetadas pela ocorrência de BRT. A BRT foi identificada em quase 50% dos dias analisados, a partir da análise da componente zonal do vento, para os dois pontos de medidas na FNT, Km67 e Km83. A BRT sobre a floresta, foi caracterizada como um fenômeno ocorrente próximo ao meio dia, iniciando às 1100LT no Km67 e às 1300LT no Km83, e término no fim da tarde. A predominância da BRT é no período seco, prevalecendo a BRT de Classe média (até 2m/s para u) para as estações próximo a FNT, exceto Belterra.

Os mecanismos que indicam o acontecimento da BRT, baseado nas medidas de pressão, temperatura do ar e temperatura da superfície, também foram analisados. A temperatura superficial, por meio de dados de satélite, mostrou melhor correlação do que a temperatura do ar, visto que o ponto de medidas para comparação com a FNT (Jamaraquá) era influenciado pela presença das superfícies ao redor e não apenas informações do Rio Tapajós. As diferenças de temperatura para a ocorrência da BRT, foram maiores para dias com BRT do que sem BRT, levando a crer que há um limiar de diferença de temperatura, cerca de 1°C, para que ocorra o fenômeno de brisa sobre a FNT. Também, analisando as diferenças de pressão entre o ponto próximo ao rio e sobre o continente (FNT), percebeu-se que deve haver diferenças de pressão da ordem de 0.2mb e que essa diferença perdure até após às 1200LT para que o fenômeno de brisa seja sustentado e que o vento zonal inverta por pelo menos duas horas, como caracterizado em dias com BRT.

A extensão da BRT sobre o continente é em média de 20-30Km, porém os efeitos podem ser sentidos até cerca de 50km, e a aproximadamente 900 metros de altura sobre a Floresta, dependendo do local de medida, modificando a circulação e as condições atmosféricas sobre a FNT. As observações, feitas tanto em superfície quanto em sondagens de baixa troposfera, indicam que a ocorrência de brisa facilita o acúmulo de umidade sobre a floresta (com correlação positiva sempre acima de 0.7), além do decréscimo de temperatura (de até 5°C), devido a circulação de BRT carregar a camada de ar mais úmida e fria sobre a superfície do rio Tapajós e também devido a não mistura de ar mais secos e quentes vindos de Leste (áreas antropizadas).

No que diz respeito à radiação, foi verificado que a camada de nuvens formada sobre o Km67 diminui pouco a incidência de radiação para dias com BRT, sendo mais evidente no período chuvoso. Diferentemente, mais ao Sul, no Km83, há mudanças bruscas de Radiação, em torno das 1300LT, para todo período de dados analisados. Isso leva a crer que há formação de nuvens mais densas sobre esse ponto de medida do que mais ao Norte, sobre o Km67. Essa

formação de nuvens tem ligação direta com a distribuição de chuvas sobre a FNT, que ocorrem predominantemente a tarde e a noite por influência da presença do rio Tapajós.

Os fluxos de energia, latente e sensível, não foram muito influenciados pela presença da BRT. Porém em dias com BRT o pico de calor sensível foi superior cerca de 20W/m^2 e 10W/m^2 , para período seco e chuvoso, respectivamente, isso devido o maior aquecimento ocorrente em dias com BRT. Já os fluxos de calor Latente não tiveram diferenças significativas.

Em uma análise geral sobre a concentração e fluxo de dióxido de carbono, a BRT não apresentou influências significativas sobre os valores comparados a dias sem BRT. Porém foi verificado que os dias com BRT, próximo ao meio dia, teve valores mais elevados de 1-2.6ppm a mais do que em dias sem BRT, que pode ser resultado do acúmulo de CO_2 sobre a floresta devido a inversão do vento sobre a FNT. Já para os fluxos de CO_2 , os dias com BRT apresentaram maior absorção de CO_2 que em dias sem BRT. Essas diferenças, são quase imperceptíveis no período seco (no máximo $1\mu\text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$) e mais evidentes no período chuvoso (máximo $2.2\mu\text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$) indicando existir pouca influência da BRT sobre o fluxo de CO_2 .

De acordo com o apresentado sumariamente aqui, ressalta-se a importância e o cuidado de estudos sobre a FNT, pois o fenômeno de BRT afeta de maneira significativa as condições atmosféricas neste local. Variáveis como temperatura, umidade, radiação e chuva são diretamente afetadas pela ocorrência da BRT. Os fluxos de massa e energia precisam ser estudados mais detalhadamente, visto que a BRT afeta as condições de circulação e possivelmente a turbulência e outros processos associados que não foram explorados nesse trabalho. Dessa forma, devido essas condições especiais existentes e apresentadas aqui, é muito difícil afirmar que a FNT é uma floresta representativa para todo o Leste Amazônico.

Este trabalho deve ser expandido, com a inclusão de estudo de caso, e comportamento específicos da BRT em condições especiais, como por exemplo a interação com a brisa do rio Amazonas e de vegetação, e fenômenos climáticos como ENSO, friagem, dentre outros. Porém, os resultados aqui apresentados devem colaborar com o entendimento do funcionamento da BRT e as mudanças ocorridas nas condições atmosféricas devido sua ocorrência.

Associado a esses resultados, apresentados aqui, modelos de circulação poderão responder mais detalhadamente sobre o fenômeno principalmente com a espacialização, visto que temos poucos locais de medidas na FNT e poderá responder mais precisamente sobre o alcance da BRT, célula térmica de circulação da BRT, por exemplo. Por fim, foi mostrado que o efeito da brisa do rio Tapajós é um fenômeno especial ocorrente na FNT, visto que a floresta fica condicionada às características termodinâmicas e meteorológicas únicas devido à brisa. Nesse sentido, este trabalho deve direcionar novos estudos, ressaltando a integração da BRT às inúmeras e possíveis interações deste com outros fenômenos e condições ocorrentes na região.

REFERÊNCIAS

- [1] ACEVEDO, O. C.; ; MORAES, O. L. L.; SILVA, R.; FITZJARRALD, D. R.; SAKAI, R. K.; STAEBLER, R. M.; CZIKOWSKY, M. J. Inferring nocturnal surface fluxes from vertical profiles of scalars in an Amazon pasture. **Global Change Biology**, vol. 10, 1–9, 2004.
- [2] ACEVEDO, O. C., SILVA, R.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; SAKAI, R. K.; CZIKOWSKY, M. J. , Nocturnal vertical CO₂ accumulation in two Amazonian ecosystems, **J. Geophys. Res.**, 113, 2008.
- [3] ANGELL, J. K.; PACK, D. H. A study of the sea breeze at Atlantic City, New Jersey using tetroons as Lagrangian tracers. *Mon. Weather Rev.*, 93, 475–493, 1965.
- [4] BAKER, R. D.; LYNN, B. H.; BOONE, A.; TAO, W.K.; SIMPSON, J. The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze initiated precipitation. **Journal of Hydrometeorology**, v.2, p. 193 – 211, 2001.
- [5] BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, 2003.
- [6] BETTS, A. K.; FISCH, G.; von RANDOW, C.; SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; SILVA, R.; FITZJARRALD, D. R. The Amazonian Boundary Layer and Mesoscale Circulations. **Geophysical Monograph Series**, AGU, 2009.
- [7] CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V.E. **Influência da circulação da escala sinótica na circulação da brisa marítima na costa NNE da América do Sul**. INPE, São José dos Campos (SP). 1982.
- [8] 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., 23 - 30, 2014.
- [9] D’AURIA, P. B. **Análise Das Circulações Locais na Confluência dos Rios Tapajós e Amazonas**. 2004. 104 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. 2004.
- [10] Dee, D. P.; Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M. A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A. C. M.; Van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A. J.; Haimberger, L.; Healy, S. B.; Hersbach, H.; Holm, E. V.; Isaksen, L.; Kallberg, P.; Kohler,

- M.; Matricardi, M.; McNally, A. P.; Monge-Sanz, B. M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; Rosnay, P. de; Tavolato, C.; Thepaut, J.-N. & Vitart, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553–597, 2011
- [11] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Monitoramento por Satélite. 2017. Disponível em www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevo/br/download
- [12] FIGUEIRA, A. M. S.; MILLER, S. D.; SOUSA, C. A. D. de; MENTON, M. C.; MAIA, A. R.; ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L. Effects of selective logging on tropical forest tree growth. **J. Geophys. Res.** Vol.113, 2008.
- [13] FISCH, G.; TOTA, J.; MACHADO, L. A. T.; SILVA DIAS, M. A. F.; LYRA, R. F. F. C.; NOBRE, A.; DOLMAN, A. J.; GASH, J. H. C. The Convective Boundary Layer Over Pasture and Forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, Vol. 78, p.47-59, 2004.
- [14] FITZJARRALD, D. R.; SAKAI, R. K.; MORAES, O. L.; COSME de OLIVEIRA, R.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J; BELDINI, T. Spatial and Temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajós Rivers Confluence. **Journal of Geophysical Research**, vol. 113, 2008.
- [15] FITZJARRALD, D.R., R.K. SAKAI AND O.L.L. DE MORAES. **LBA-ECO CD-03. Data set**. [http://daac.ornl.gov] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009. Disponível on-line: <http://daac.ornl.gov>
- [16] FITZJARRALD, D.R.; SAKAI, R.K. **LBA-ECO CD-03 Flux-Meteorological Data, km 77 Pasture Site, Para, Brazil: 2000-2005**. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2010. Disponível on-line: <http://daac.ornl.gov>
- [17] FUJITA, T.T.; WAKIMOTO, R. M. Effects of miso- and mesoscale obstructions on PAM winds obtained during project NIMROD. **J. App. Meteorol.**, 21, 840-858, 1982.
- [18] GANDU, A. W.; COHEN, J. C. P.; SOUZA, J. R. S. Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. **Theor. Appl. Climatol.** 78, 123–135, 2004.
- [19] GOULDEN, M. et al. Measurements of carbon storage by long term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v.2, p.169-182, 1996.
- [20] HALES, J.; PETRY, P. **Tapajós - Juruena. Freshwater Ecoregions of the World, 2013**. Disponível on-line em: www.feow.org

- [21] HARTMANN, D. L. *Global Physical Climatology*. **Academic Press**. New York, USA, 1994.
- [22] HOLTON, J. R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Fourth Edition, **Elsevier**, California, USA, 2004.
- [23] HUTYRA, L. R. **Carbon and water exchange in Amazonian rainforests**. 2007. 141 f. Tese de Doutorado. Massachusetts, Harvard University, USA, 2007a.
- [24] HUTYRA, L. R.; MUNGER, J. W.; SALESKA, S. R.; GOTTLIEB, E.; DAUBE, B. C.; DUNN, A. L.; AMARAL, D. F.; CAMARGO, P. B.; WOFSY, S. C. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.** Vol. 112, 2007b.
- [25] HUTYRA, L.; WOFSY, S.; SALESKA, S. **LBA-ECO CD-10 CO₂ and H₂O Eddy Flux Data at km 67 Tower Site, Tapajós National Forest**. Data set. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2008. Disponível on-line: <http://daac.ornl.gov>
- [26] INSTITUTO CHICO MENDES DA CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Floresta Nacional do Tapajós. 2017. Disponível em www.icmbio.gov.br/flonatapajos
- [27] KALTHOFF, N., et al., Mesoscale wind regimes in Chile at 30S. **J. Appl. Meteorol.**, 41, 953–970, 2002.
- [28] LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, T. J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. **Geomorphology**, vol. 70, 187–206, 2007.
- [29] LI, Y; MAOSHENG, Z.; SAFA, M.; QIAOZHEN, M.; EUGENIA, K.; LI, S. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. **Nature Communications** 6, 2015.
- [30] LU, L.; DENNING, A. S.; SILVA DIAS, M. A.; SILVA-DIAS, P.; LONGO, M.; FREITAS, S. R.; SAATCHI, S. Mesoscale circulations and atmospheric CO₂ variations in the Tapajós Region, Pará, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, vol. 110, 2005.
- [31] MACHADO, W. B. **Fluxo de Energia e Evapotranspiração Regional na Área De Influência Da Br-163, Leste da Amazônia**. 150 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento. Universidade Federal do Oeste do Pará, 2017.
- [32] MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; CULF, A. D. Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon basin. **J. Appl. Meteor.** 36: 1553–1566, 1997.

- [33] MARTIN, C.M., FITZJARRALD, D., GARSTANG, M., OLIVEIRA, A.P., GRECO, S. AND BROWELL, E. Structure and Growth of the Mixing Layer Over the Amazonian Rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, 93, 1361-1375, 1988.
- [34] McMILLEN, R. T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary Layer Meteorology*. Vol. 43, p. 231-245, 1988.
- [35] MILLER, S. T. K.; B. D. KEIM, R. W. TALBOT, AND H. MAO, Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts, **Rev. Geophys.**, 41(3), 2003.
- [36] MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; MENTON, M. C.; da ROCHA, H. R.; de FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. de SOUSA, C. A. D. Biometric and micrometeorological measurements of tropical Forest carbon balance. **Ecological Application**, 14(4), S114-S126, 2004.
- [37] MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; ROCHA, H. R. **LBA-ECO CD-04 Meteorological and Flux Data, km 83 Tower Site, Tapajos National Forest**. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009. Disponível on-line: <http://daac.ornl.gov>
- [38] NEUMANN, J.; MAHRER, Y., A theoretical study of the land and sea breeze circulation, **J. Atmos. Sci.**, 28, 532–542, 1971.
- [39] NEUMANN, J., On the rotation rate of the direction of sea and land breezes, **J. Atmos. Sci.**, 34, 1913–1917, 1977.
- [40] NOGUEIRA, D. S. **Aspectos observacionais e numéricos da interação floresta-atmosfera na Amazônia Oriental: fenômenos turbulentos noturnos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- [41] OLIVEIRA, A.P., SILVA DIAS, P.L. Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo. **Anais do II Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 18-22 de outubro de 1982, Pelotas RS, 129-161, 1982.
- [42] OLIVEIRA, A. P.; FITZJARRALD, D. R. The Amazon River breeze and the local boundary layer: 1. Observations. *Bound-Layer Meteor.* 63: 141–162, 1993.
- [43] PATTEY, E.; STRACHAN, I.B.; DESJARDINS, MASSHEDER, R.L.; J. Measuring night-time CO₂ flux over terrestrial ecosystems using eddy covariance and nocturnal boundary layer methods. **Agricultural and Forest Meteorology**. Vol. 113, p. 45-158, 2002.
- [44] PIELKE, R. A., **Sea breeze-induced mesoscale systems and severe weather**, **NASA Proj. Prog. Rep.**, Greenbelt, Md., 1985.
- [45] RESTREPO-COUBE, N.; DA ROCHA, H. R.; HUTYRA, L. R.; ARAUJO, A; BORMA, L.; CHRISTOFFERSEN, B.; CABRAL, O. M. R.; CAMARGO, P.; et al. What drives the

- seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, 182, 128–144, 2013.
- [46] ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia, **Ecol. Appl.** Vol. 14(4), p. S22-S32, 2004.
- [47] ROCHA, H. R.; MANZI, A. O; SHUTTLEWORTH, J. Evapotranspiration. **Geophysical Monograph Series**, AGU, 2009.
- [48] SAAD, S. I.; ROCHA, H. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; ROSOLEM, R. Can the Deforestation Breeze Change the Rainfall in Amazonia? A Case Study for the BR-163 Highway Region. **Earth Interactions**, Vol. 14, 2010.
- [49] SALESKA, S. R; MILLER, S. D.; MATROS, D. M.;GOULDEN, M. L.; WOFSY, S. C.; DA ROCHA, H. R.; DE CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B.; DE FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J. W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA H. Carbon in Amazon Forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, vol 302, 2003.
- [50] SANTOS, L. S.; MARTORANO, L. G.; GUTIERREZ, C. B. B.; PONTES, A .N.; SILVA, O. M.; GUTIERREZ, D. M. G. Aspecto Fisiológicos da Floresta Nacional do Tapajós e seu Entorno - Oeste do Pará, Brasil. **Revista ESPACIOS**, Vol. 38 (02), 2017.
- [51] SAKAI, R., D. FITZJARRALD, O. MORAES, R. STAEBLER, O. ACEVEDO, M. CZIKOWSKY, R. Da SILVA, E. BRAIT, and V. MIRANDA. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**. Vol. 10(5), p. 895-907, 2004.
- [52] SHAIR, F. H., E. J. SASAKI, D. E. CARLAN, G. R. CASS, W. R. GOODIN, J. G. EDINGER, AND G. E. SCHACHER, Transport and dispersion of airborne pollutants associated with the land breeze-sea breeze system, **Atmos. Environ.**, 16, 2043–2053,1982.
- [53] SILVA DIAS, M. A. F.; VIDALE, P. L.; BLANCO, C. M. R. Case study and numerical simulation of the summer regional Circulation in São Paulo, Brazil. **Boundary Layer Meteorology**, vol. 74-4, 371-388, 1995.
- [54] 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 modelling results. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 78(1), p. 111–121, 2004.
- [55] SILVA DIAS, M.A.; DIAS, P.L.S. ; LONGO, M.; FITZJARRALD, D.R.; DENNING, A.S. **LBA-ECO CD-01 Meteorological Data, Tapajos and Amazon Rivers, Santarem,**

- Brazil: 2001.** ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2012. Disponível on-line: <http://daac.ornl.gov>
- [56] SIMPSON, J. E. Sea Breeze and Local Winds. **Cambridge University Press**, 234 pp. 1994.
- [57] STULL, R. B. An Introduction to Boundary Layer. **Kluwer Academic Press**, Dordrecht, The Netherlands, 1988, 670p.
- [58] STULL, R. B. Meteorology for scientist and engineers. Second edition. **Kluwer Academic Press**, Dordrecht, The Netherlands, 2000, 666 pp.
- [59] TAPAJÓS, R. **Estudo Da Camada Limite Noturna Na Interface Rio-Floresta**. 2012, 60 f. Dissertação de Mestrado. UFOPA. 2012.
- [60] TAPAJÓS, R.; MACHADO, W. B.; AGUIAR, R. D.; BOTA, B.; WIEDEMANN, K.; FURTADO-NETO, A. T.; SILVA, R., FITZJARRALD, D. Brisa do Rio Tapajós e sua influência na Atmosfera. **Ciência e Natura**, vol. Especial, p.420 - 423, 2013.
- [61] TSONIS, A. A. **An Introduction to Atmospheric Thermodynamics**. Second Edition. New York, USA, 2007.
- [62] VOSS, P. B. ;HOLE, L. R.; HELBLING, E. F. ; ROBERTS, T. J. Continuous In-Situ Soundings in the Arctic Boundary Layer: A New Atmospheric Measurement Technique Using Controlled Meteorological Balloons. **J Intell Robot Syst**. 2012.
- [63] WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2. Ed. San Diego, California, USA: **Elsevier**, 2006.
- [64] WEBB, E.; PEARMAN, G. LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, p. 85-100, 1980.

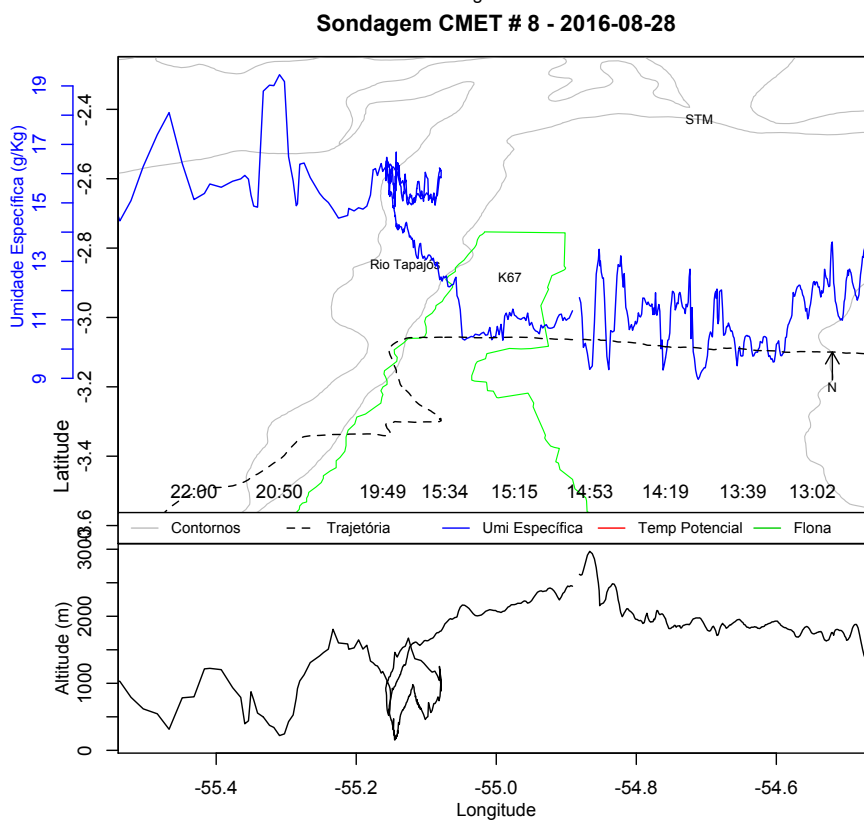
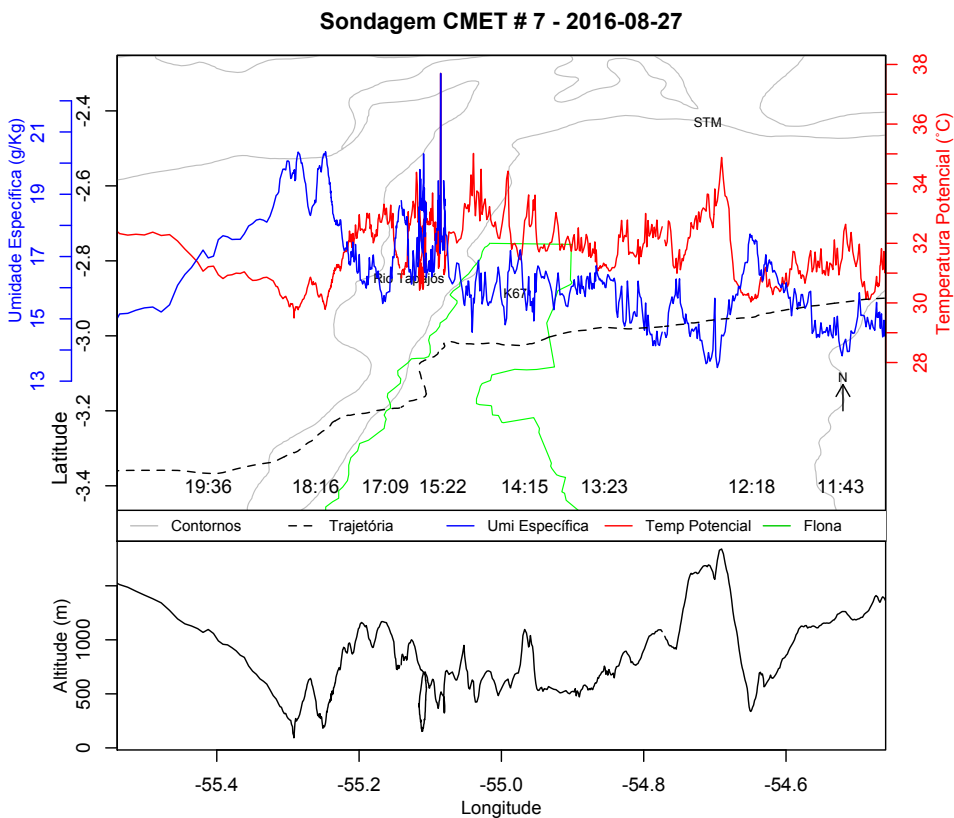
APÊNDICES

APÊNDICES

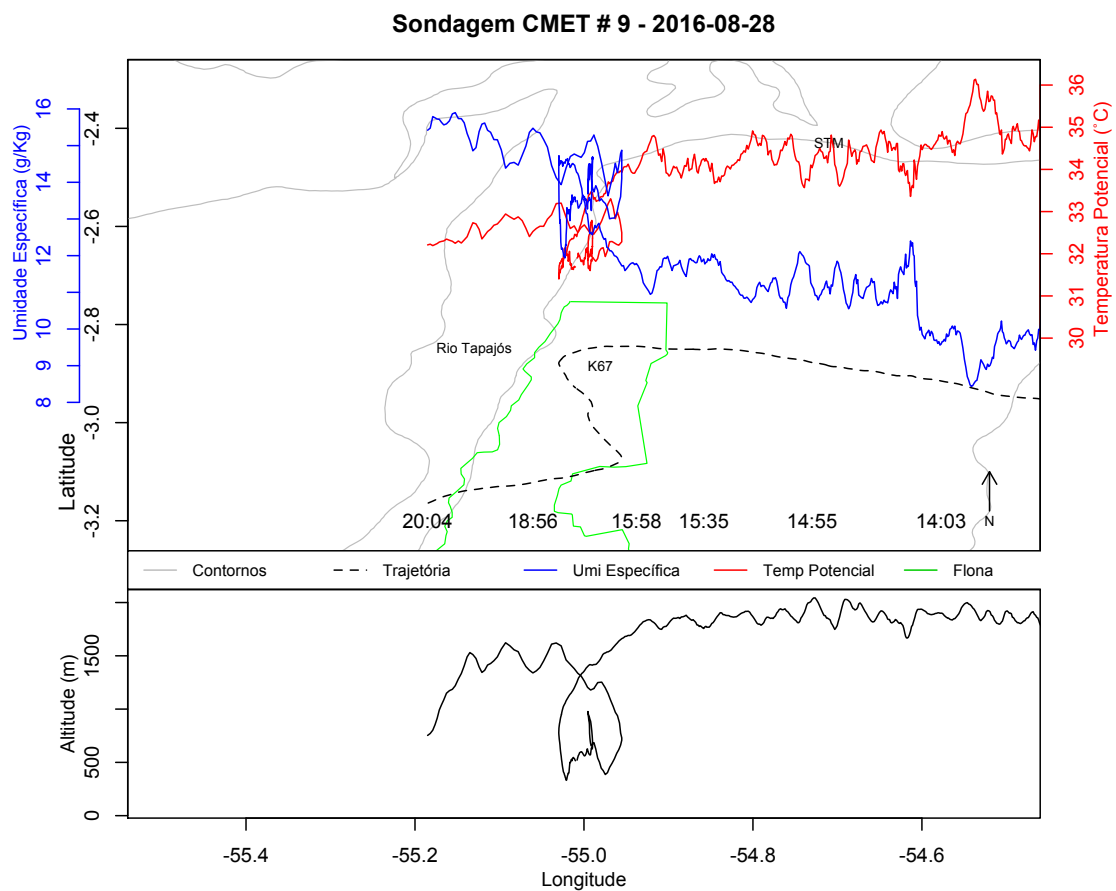
A.1 Tabela A1. Ano-Dia Juliano. Das imagens do MODIS usadas para estimar a temperatura superficial.

Ano-Dia Juliano							
2003-181	2003-193	2005-160	2005-213	2006-204	2007-205	2008-194	2009-219
2003-189	2004-204	2005-165	2005-216	2006-220	2007-214	2008-196	2009-221
2003-194	2004-208	2005-169	2005-217	2006-221	2007-215	2008-197	2009-223
2003-197	2004-209	2005-176	2005-201	2007-168	2007-216	2008-199	2009-224
2003-201	2004-210	2005-185	2005-209	2007-169	2008-178	2008-226	2009-228
2003-203	2004-211	2005-190	2006-177	2007-175	2008-180	2008-228	2010-178
2003-205	2004-213	2005-199	2006-195	2007-178	2008-181	2009-187	2010-179
2003-206	2004-215	2005-206	2006-198	2007-189	2008-183	2009-194	2010-190
						2009-214	2010-192

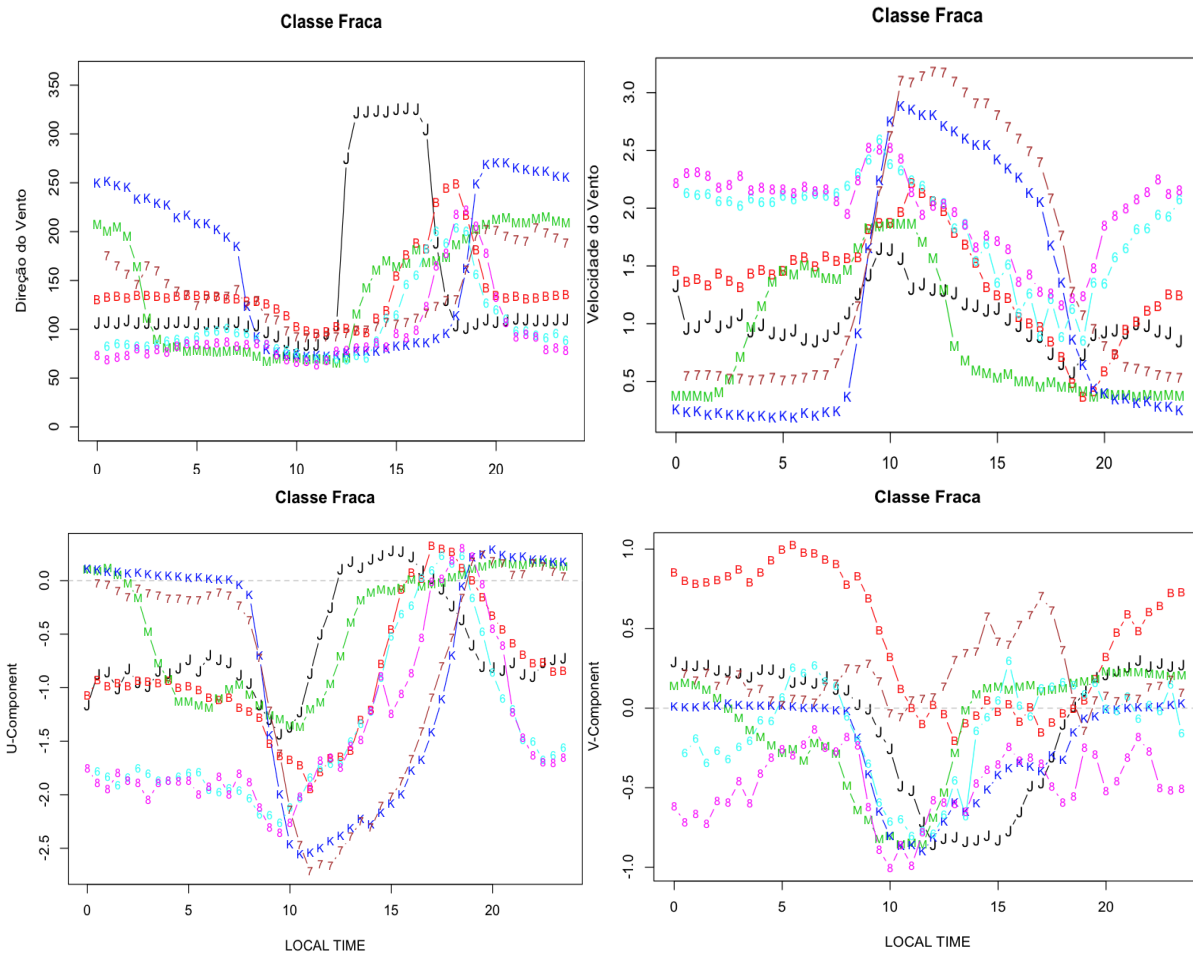
A2. Sondagens #7 e #8 - CMET-2016 com BRT.



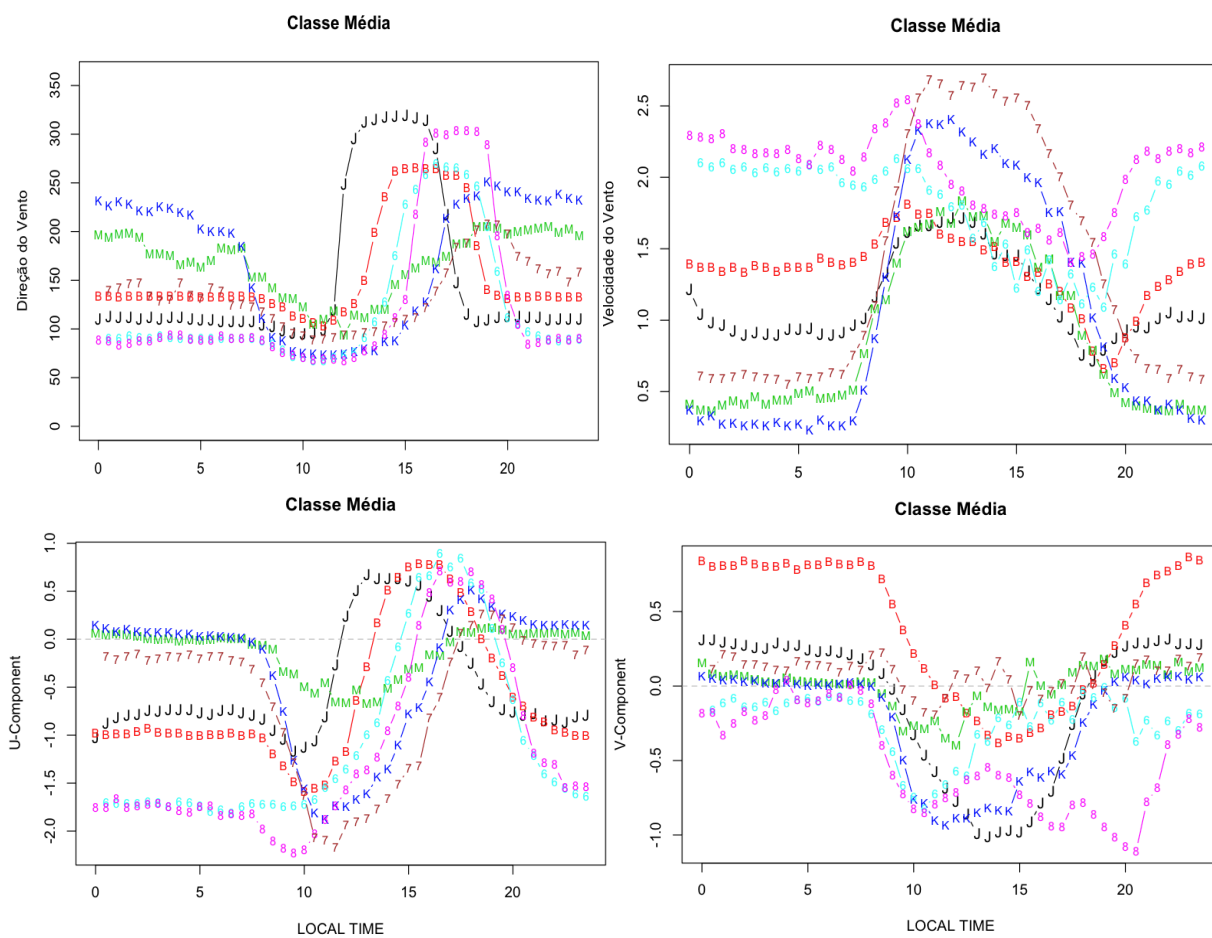
A3. Sondagens #9- CMET-2016 com BRT.



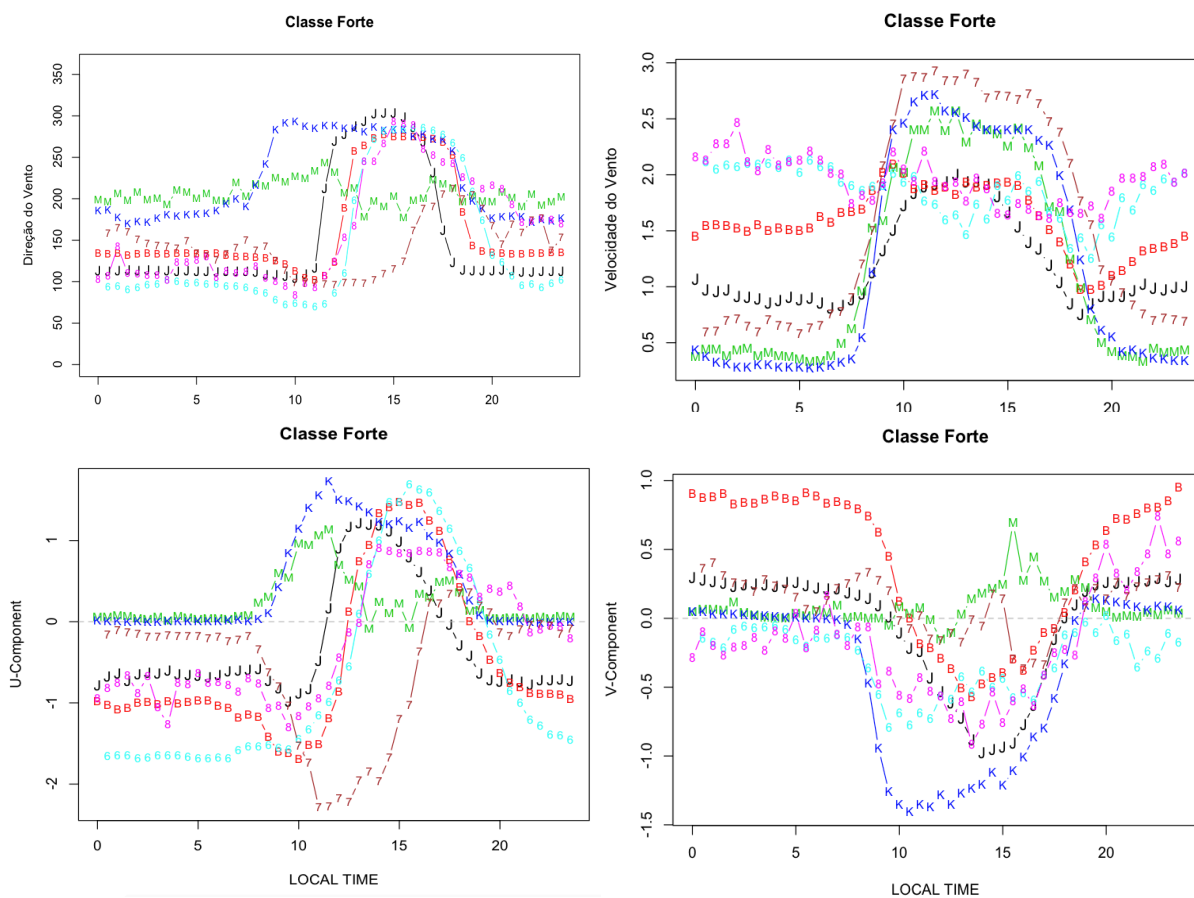
A4. Velocidade, Direção e componentes u e v para Classe Fraca de BRT



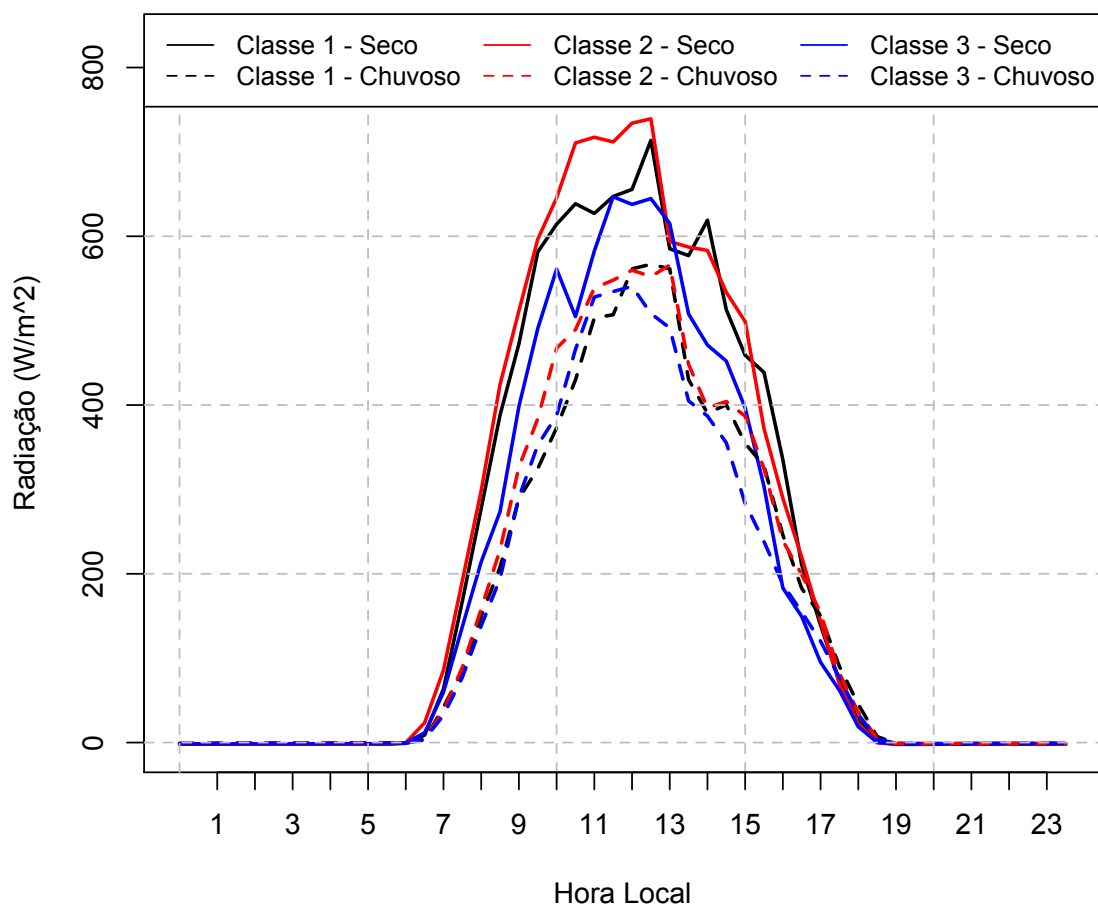
A5. Velocidade, Direção e componentes u e v para Classe Média de BRT



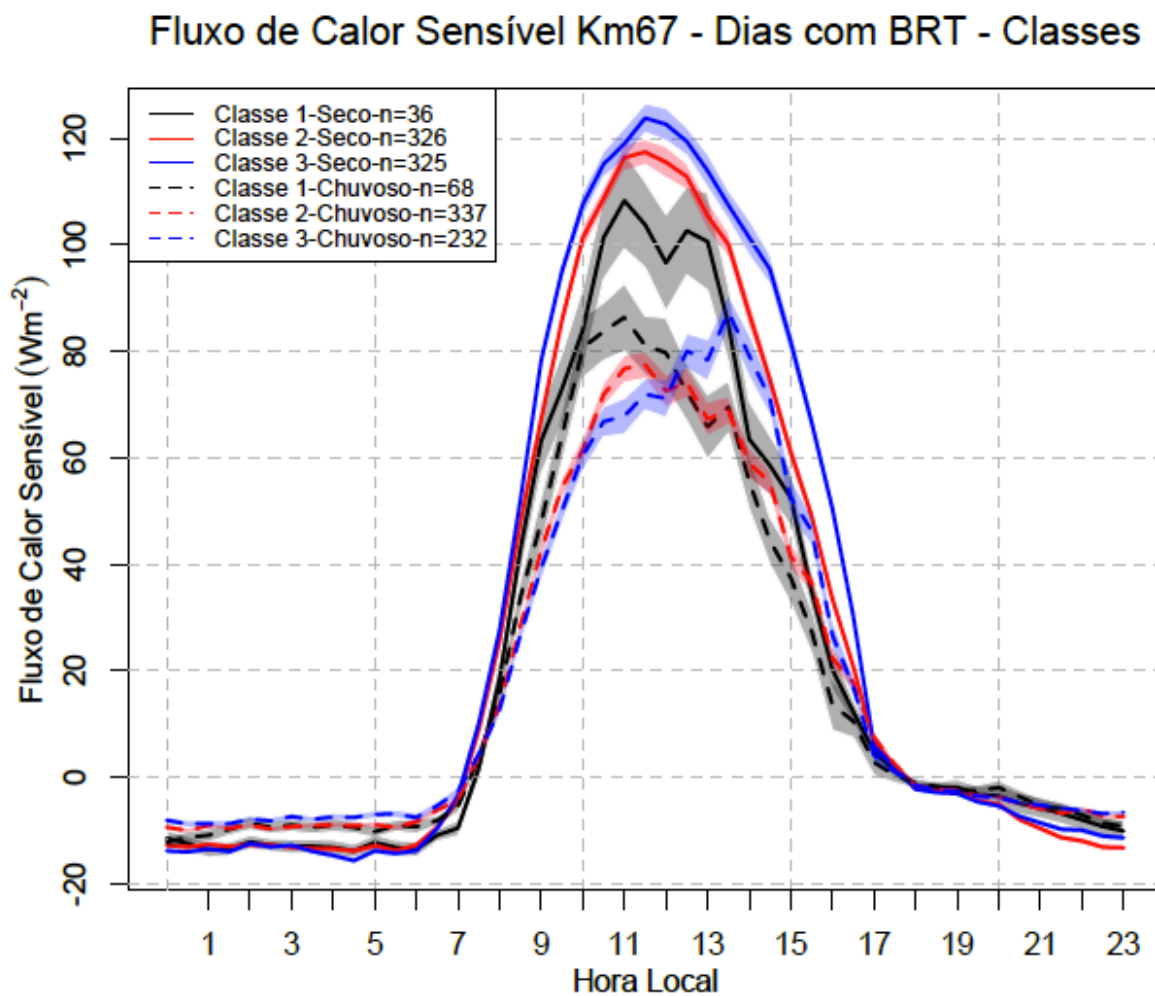
A6. Velocidade, Direção e componentes u e v para Classe Forte de BRT



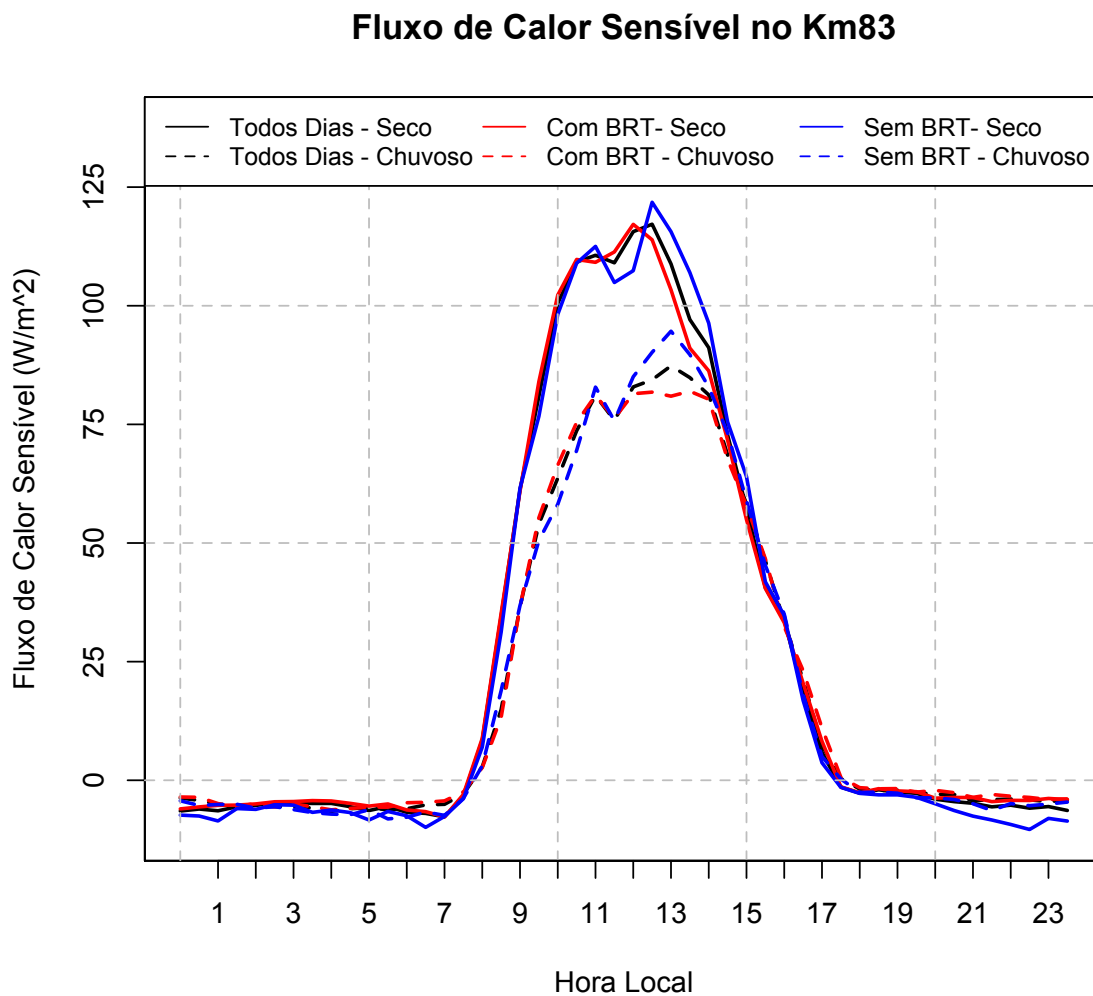
A7. Radiação de acordo com as Classes de BRT no Km83.

Radiação Km83 - Dias com BRT - Classes

A8. Fluxo de Calor sensível (H) no Km67 de acordo com classes de BRT. Número de dias são indicados (n) e o erro padrão (área hachurada).

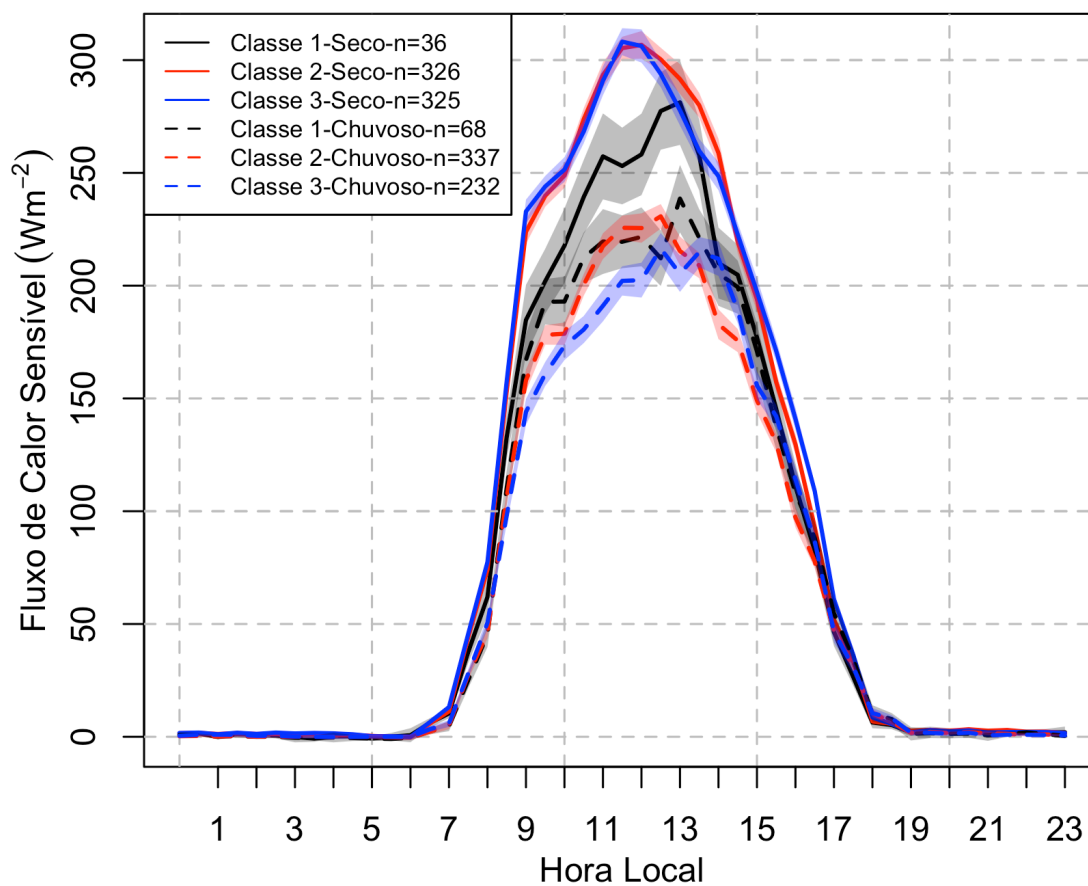


A9. Fluxo de Calor Sensível (H) no Km83



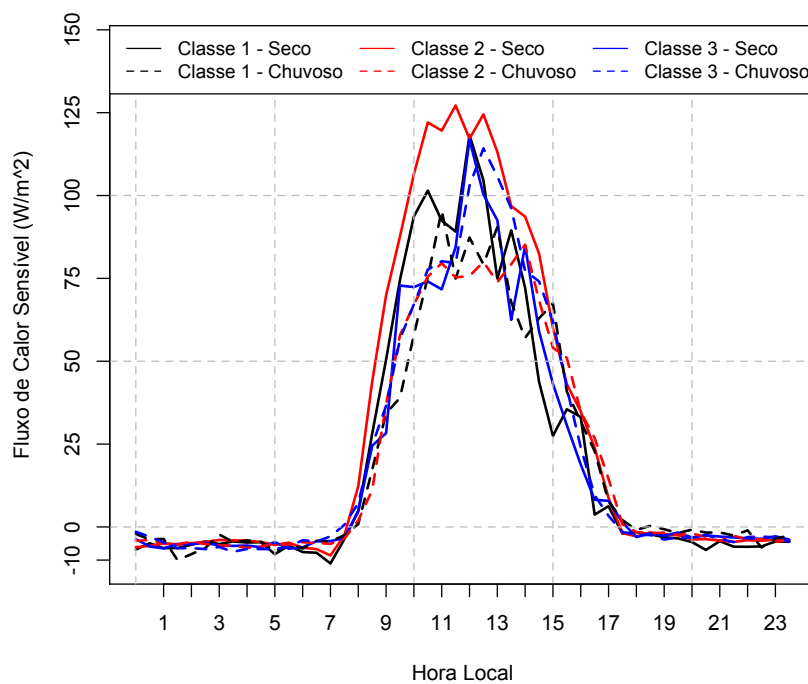
A10. Radiação para dias com BRT no Km67 em diferentes Classes. Número de dias são indicados (n) e o erro padrão (área hachurada).

Fluxo de Calor Latente Km67 - Dias com BRT - Classes



A12. Fluxo de Sensível (H) e Fluxo de Calor Latente (LE) para diferentes classes de BRT no Km83

Fluxo de Calor Sensível no Km83 - Dias com BRT - Classes



Fluxo de Calor Latente no Km83 - Dias com BRT - Classes

